

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ  
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 621.384.3

**КОРЕКЦІЯ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ПІРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО  
СПІВВІДНОШЕННЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ СТАНУ КОНТАКТНОГО ДРОТУ**

Кучеренко О. К., Томашевська А. Е.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [oleg.kucherenko@gmail.com](mailto:oleg.kucherenko@gmail.com), [devineska96@gmail.com](mailto:devineska96@gmail.com)

**Вступ.** У статті розглянуто один з методів визначення стадії зносу контактного дроту залізничного транспорту, побудований на використанні пірометра спектрального співвідношення. На практиці дослідження повинні проводитися безконтактним методом, оскільки дріт знаходиться під високою напругою, і це є небезпечним для операторів, які беруть участь в дослідженні.

**Матеріали дослідження.** Можливість використання пірометра обумовлена тим, що в місцях зносу зменшується поперечний переріз дроту, і він перегрівається, тим самим виходячи з ладу. Знаючи допустимі температури перегріву, можна прийняти рішення про необхідність заміни зношеної ділянки для попередження аварійної ситуації. Результати вимірювання пірометром не залежать від відстані до об'єкта, на якій проводиться дослідження, його форми, стану атмосфери. Це важливі фактори, оскільки під час вимірювання вони можуть змінюватися. Однак дослідження показали, що результати вимірювання потребують корекції вихідного сигналу внаслідок залежності випромінюючої здатності матеріалу дроту від його температури і спектрального діапазону, в якому проводяться вимірювання. Значення коефіцієнта теплового випромінювання для матеріалу, з якого виготовляють контактний дріт, зменшується при збільшенні довжини хвилі випромінювання і збільшується при підвищенні температури об'єкта.

**Результати.** Проведені дослідження дозволили отримати аналітичні моделі визначення коефіцієнту спектрального співвідношення при визначенні температури перегріву контактного дроту залізничного транспорту. Важливим фактором для обчислення цього коефіцієнта є залежність випромінюючої здатності матеріалу контактного дроту від температури і спектрального діапазону. Математичне моделювання надало можливість визначити значення коригувального коефіцієнта для визначення дійсної температури контактного дроту пірометром спектрального співвідношення залежно від матеріалу і спектральних діапазонів вимірювання.

**Ключові слова:** знос контактного дроту залізничного транспорту; пірометр спектрального співвідношення; випромінююча здатність матеріалів.

**Вступ**

Безпека експлуатації залізничного транспорту пов'язана з необхідністю контролю за зносом проводів контактних мереж при терті об струмоприймач. Внаслідок неперервного тертя дріт піддається зносу, змінюється профіль його поперечного перерізу. Це може призвести до аварійного стану.

Моніторинг повинен проводитися безконтактним методом, оскільки дріт знаходиться під високою напругою (близько 30 кВ.) Для вирішення цієї задачі застосовується низка методів [1-5].

Очевидним є той факт, що при зносі контактного дроту зменшується площа його поперечного перерізу, а це, у свою чергу, призводить до перегрівання дроту у місцях зносу.

Знаючи допустимі температури перегріву, можна прийняти рішення про необхідність своєчасної заміни зношених ділянок. Визначення температури контактного дроту може проводитися радіаційним пірометром або пірометром спектрального співвідношення, що встановлюється на кронштейні струмоприймача вагона-лабораторії.

Радіаційні пірометри простіші у виконанні, ніж пірометри спектрального співвідношення, однак результат вимірювання ними залежить від відстані до об'єкта, його форми і стану атмосфери [6]. Це є важливі фактори, оскільки під час вимірювання вони можуть змінюватися. Пірометри спектрального співвідношення засновані на залежності від температури тіла відношення спектральних енергетичних

яскравостей на двох діапазонах спектру з певними значеннями ефективних довжин хвиль.

Водночас, вказані шкідливі фактори однаково впливають на обидва канали і при визначенні співвідношення спектральних енергетичних яскравостей скорочуються [7]. Але на результат вимірювання тим чи іншим пірометром впливає також значення випромінюючої здатності матеріалу контактного дроту.

Для отримання дійсного значення температури дроту потрібно враховувати зміни випромінюючої здатності матеріалу дроту залежно від температури і спектрального діапазону.

#### Постановка задачі

Основною перевагою використання пірометрів спектрального співвідношення є те, що такі пірометри нечутливі до стану атмосфери, форми вимірюваного об'єкту чи відстані, на якій проводиться вимірювання. Таким чином, можна стверджувати, що ця особливість, порівняно з радіаційними пірометрами, зменшує відхилення вимірюваної температури від її реального значення [8].

Особливістю пірометрів спектрального співвідношення є те, що результати вимірювання таким пірометром пов'язані з функціональною залежністю випромінювальної здатності  $\varepsilon$  від довжини хвилі  $\lambda$ , оскільки зі зростанням довжини хвилі спектральна випромінювальна здатність деяких матеріалів знижується. Крім того, випромінювальна здатність залежить від вимірюваної температури. Ці фактори вносять похибку у результати вимірювання.

В роботі поставлені наступні задачі:

- визначити аналітичне значення коефіцієнта спектрального співвідношення (КСС);
- проаналізувати залежність випромінюючої здатності матеріалу контактної дроту від температури і довжини хвилі;
- за допомогою комп'ютерного моделювання знайти значення коригувального коефіцієнта при визначенні температури контактної дроту з урахуванням визначених залежностей;
- порівняти зміну значень КСС від температури з урахуванням залежності  $\varepsilon = f(\lambda, T)$  і без неї.

#### Основні теоретичні співвідношення

Аналітично можна розглянути проблему впливу значення випромінюючої здатності об'єктів на результат вимірювання температури пірометром спектрального співвідношення, використовуючи закон Планка. Цей закон характеризує розподіл за спектром енергії випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) і, якщо за змінний параметр прийнята довжина хвилі, його записують в наступному вигляді [9]:

$$r = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}, \quad (1)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – перша та друга константи в формулі Планка, які пов'язані з швидкістю світла у вакуумі  $c_0$ , сталою Больцмана  $k$  і сталою Планка  $h$ ;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $T$  – абсолютна температура.

Інтегруючи (1) в спектральних діапазонах вирази  $\lambda_1 - \lambda_2$  і  $\lambda_3 - \lambda_4$ , визначимо щільність випромінювання для сірого тіла за формулами

$$R_{\lambda_1 - \lambda_2} = \varepsilon_T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda,$$

$$R_{\lambda_3 - \lambda_4} = \varepsilon_T \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda,$$

де  $\varepsilon_T$  – коефіцієнт теплового випромінювання, що характеризує випромінюючу здатність сірого тіла,  $\lambda$  – змінна довжина хвилі у заданому спектральному діапазоні.

У такому разі значення КСС дорівнює [7]:

$$\frac{R_{\lambda_3 - \lambda_4}}{R_{\lambda_1 - \lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}$  і  $\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}$  – середні значення коефіцієнтів теплового випромінювання в певних спектральних діапазонах.

Якщо значення  $\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}$  і  $\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}$  залежать від довжини хвилі і температури, то це необхідно враховувати при визначенні КСС.

Експериментальне визначення залежності  $\varepsilon = f(\lambda, T)$  для різних матеріалів є складною науково-технічною проблемою, тому в більшості випадків при розрахунках вона не враховується що, як наслідок, спричиняє появу систематичної похибки вимірювання температури пірометром.

У роботі [10] проведені ґрунтовні дослідження залежності  $\varepsilon = f(\lambda, T)$  для різних матеріалів, що надало можливість врахувати

значення співвідношенням  $\frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}$  в формулі (2).

Залежність  $\varepsilon = f(\lambda, T)$  для матеріалу, з якого виготовляється контактний дріт залізничного транспорту, зазвичай міді, що усереднена для декількох циклів вимірювання, приведена на графіках (рис. 1) [10].

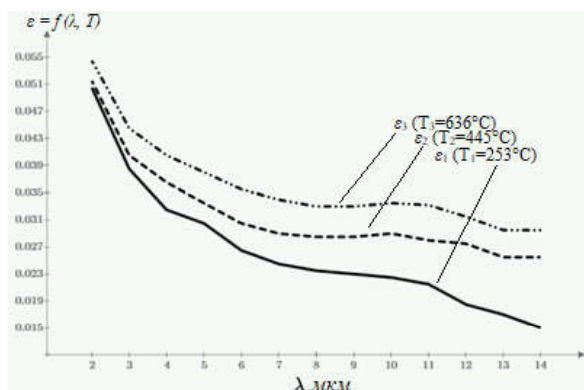


Рис. 1. Залежність коефіцієнту теплового випромінювання  $\varepsilon = f(\lambda, T)$  для міді

#### Проведені розрахунки та їх аналіз

Як видно з графіків (рис. 1), значення коефіцієнта теплового випромінювання  $\varepsilon$  для міді зменшується при збільшенні довжини хвилі випромінювання і збільшується при підвищенні температури об'єкта.

Для визначення КСС в пірометрі вимірювання температури контактного дроту доцільно скористатися двома спектральними діапазонами:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 3 \div 5 \text{ мкм};$$

Таблиця 1. Значення співвідношення  $\frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}$  залежно від температури зразка і спектрального діапазону.

Температура	Середні значення коефіцієнта теплового випромінювання		Співвідношення $\frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}$
	Спектральний діапазон $\lambda_1 - \lambda_2 = 3 \div 5 \text{ мкм}$	Спектральний діапазон $\lambda_3 - \lambda_4 = 8 \div 13 \text{ мкм}$	
$T_1 = 253^\circ\text{C}$	0,033	0,021	0,615
$T_2 = 445^\circ\text{C}$	0,036	0,027	0,752
$T_3 = 636^\circ\text{C}$	0,041	0,032	0,785

У залізничній галузі така невідповідність призводить до припинення використання придатних до роботи контактних дротів і до додаткових витрат на ремонтні роботи.

Оскільки температура перегріву контактного дроту менша за  $253^\circ\text{C}$ , можна зробити висновок, що для даного використання справжнє значення КСС становить лише 61,5% від того, яке розраховане без врахування залежності  $\varepsilon = f(\lambda, T)$ . Тому формулу (2) необхідно уточнити з використанням коригувального коефіцієнта і записати у такому вигляді:

$$R_{\lambda_3 - \lambda_4} = 0,615 \cdot \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda}. \quad (3)$$

$$\lambda_3 - \lambda_4 = 8 \div 13 \text{ мкм},$$

тому саме ці спектральні діапазони були використані для проведення математичного моделювання.

Середні значення випромінюючої здатності  $\varepsilon$  у вказаних спектральних діапазонах при температурах об'єкта  $T_1 = 253^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 445^\circ\text{C}$  і  $T_3 = 636^\circ\text{C}$  приведені в табл. 1. Там же надані результати обчислення співвідношення  $\frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}$ .

Як показали результати математичного моделювання, співвідношення  $\frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}$  збільшується зі збільшенням температури, що знайшло відображення в табл. 1. Вочевидь,  $\frac{\varepsilon_{\lambda_3 - \lambda_4}}{\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}$  суттєво відрізняється від одиниці, щоб нехтувати цим параметром при визначенні КСС.

Як наслідок, значення температури контактного дроту виміряне пірометром спектрального співвідношення буде завищеним.

Користуючись співвідношенням (3), внаслідок математичного моделювання обчислимо значення КСС, отриманого пірометром спектрального співвідношення для контактного дроту в діапазоні температур  $T = 323\text{K} \div 413\text{K}$  і вказаних спектральних діапазонах.

На графіках (рис. 2.) представлені дві залежності КСС від температури:  $\text{КСС}_1$  – без врахування коригувального коефіцієнта;  $\text{КСС}_2$  – з врахуванням коригувального коефіцієнта.

Як видно на рис. 2, графік залежності коефіцієнту спектрального співвідношення, побудований з урахуванням поправочного коефіцієнту, має дещо інше положення у площині графіків відносно графіка, побудованого без урахування цього коефіцієнту.

На рис. 2 можна спостерігати, що значення  $\text{КСС}_1$  без урахування поправочного коефіцієнту

більш різко зменшуються при збільшенні температури.

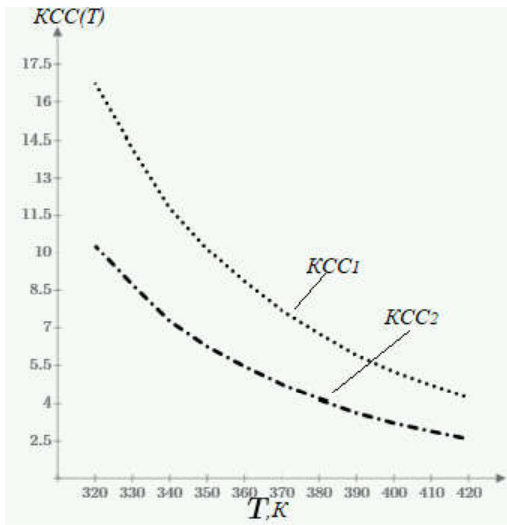


Рис. 2. Графіки коефіцієнтів спектрального співвідношення

При цьому графік  $KCC_2$  ілюструє більш плавне зменшення значень  $KCC$  при збільшенні температури. Максимальне значення  $KCC$  зменшилось приблизно на 6 одиниць, а мінімальне – всього на 1,5 одиниці, однак відсоткове співвідношення між цими значеннями залишається сталим і дорівнює 61,5 %.

#### Висновки

Проведені дослідження дозволили отримати аналітичне співвідношення для визначення  $KCC$  при визначенні температури перегріву контактного дроту залізничного транспорту.

Важливим фактором для обчислення цього коефіцієнта є залежність випромінюючої здатності матеріалу контактного дроту від температури і спектрального діапазону. Значення коефіцієнта теплового випромінювання  $\epsilon$  для міді зменшується при збільшенні довжини хвилі випромінювання і збільшується при підвищенні температури об'єкта. Тому в формулу для обчислення  $KCC$  потрібно вводити відповідний коригувальний коефіцієнт, який дорівнює 0,615. В такому випадку значення поправочного коефіцієнту можна ввести і на кінцевому етапі – помноживши аналітично визначену температуру на 0,615, в результаті отримати реальну температуру об'єкту. Зміна положення графіка  $KCC$  з урахуванням поправочного коефіцієнту відносно графіка  $KCC$  без його урахування показана на рис. 2.

УДК 621.384.3

**О. К. Кучеренко, А. Э. Томашевская**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина

Подальші дослідження будуть направлені на використання отриманих результатів математичного моделювання роботи пірометра спектрального співвідношення при інших застосуваннях цього приладу.

#### Література

1. В. А. Пилипович, А. К. Есман, В. К. Кулешов, "Устройство измерения диаметра движущихся объектов", *Приборы и системы управления*, № 3. 1990.
2. А. Р. Свендровский, "Расчет диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях" у *Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: сборник трудов конференции*, 2005, с. 31.
3. Е. М. Фёдоров, А. Е. Гольдштейн, А. Р. Свендровский, В. В. Редько, "Измеритель диаметра и эксцентricности электрического кабеля на основе индуктивнооптического метода", *Известия Томского политехнического университета*, Т. 316, № 2, 2010.
4. А. В. Воронин, В. И. Сиротинин, С. М. Шевяков, Ю. И. Федоров, "Лазерная быстродействующая система диагностики контактного провода «Износ»", *Наука и транспорт*, № 3, 2012.
5. Пат. на корисну модель № 129646 України. МПК (2018.01) G01B 11/00; G01B 11/16. Пристрій для контролю зносу контактної дроту залізничного транспорту / О.К. Кучеренко, Д. О. Вишневецький. Бюл. №21 від 12.11.2018.
6. А. Фрунзе, "Влияние методических погрешностей пирометров на выбор прибора", *Фотоника*, №3, с. 46-51, 2012.
7. О. К. Кучеренко, А. Е. Томашевська, "Застосування пірометра спектрального співвідношення для контролю зносу контактної дроту залізничної мережі", *Вісник ХНУ*, №1, с. 244, 2019.
8. А. Фрунзе, "Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения", *Фотоника*, № 4, 2009.
9. Л. З. Криксунов, *Справочник по основам инфракрасной техники*. Москва, СССР: Сов. Радио, 1978.
10. Telmo Echániz Ariceta, *Infrared spectral emissivity studies on metals and materials for solar thermal applications*. University of the Basque Country, 2016.

**КОРРЕКЦІЯ ВИХОДНОГО СИГНАЛА ПИРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО СООТНОШЕННЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА**

В статье рассмотрен один из методов определения стадии износа контактного провода железнодорожного транспорта, построенный на использовании пирометра спектрального соотношения. Возможность использования пирометра обусловлена тем, что в местах износа уменьшается поперечное сечение проволоки, и он перегревается. Зная допустимые температуры перегрева, можно принять решение о необходимости замены изношенного участка. Результаты измерения пирометром, не зависящие от изменения расстояния до объекта, его формы, состояния атмосферы, но, как показали проведенные авторами исследования, требующие коррекции выходного сигнала вследствие зависимости излучающей способности материала проволоки от его температуры и спектрального диапазона, в котором проводятся измерения. Математическое моделирование позволило определить значение корректирующего коэффициента для определения действительной температуры контактного провода пирометром спектрального соотношения в зависимости от материала и спектральных диапазонов измерения.

**Ключевые слова:** износ контактного провода железнодорожного транспорта; пирометр спектрального соотношения; излучающая способность материалов.

**О. К. Kucherenko, А. Е. Tomashevskа**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

**A CORRECTION OF INITIAL SIGNAL OF PYROMETER OF SPECTRAL CORRELATION IS AT DETERMINATION OF THE STATE OF PIN WIRE**

The article deals with one of the methods of determining the stage of wear of a contact wire of a railway transport, built on the use of a spectrometer. In practice, the research should be carried out by a non-contact method, since the wire is under high voltage, which is dangerous for the operators involved in the study. The possibility of using a pyrometer is due to the fact that the cross-section of the wire is reduced in places of wear and it overheats, thereby failing. Knowing the permissible overheating temperatures, it is possible to decide on the need to replace the worn area to prevent an emergency. The results of the pyrometer measurement are independent of the distance to the object being studied, its shape, and the state of the atmosphere. These are important factors as they may change during measurement. However, studies have shown that the measurement results require the correction of the output signal due to the dependence of the radiative capacity of the wire material on its temperature and the spectral range in which the measurements are made. The value of the thermal radiation coefficient for the material from which the contact wire is made decreases as the radiation wavelength increases and increases as the temperature of the object increases. The conducted studies have allowed to obtain an analytical ratio to determine the coefficient of spectral ratio in determining the overheating temperature of the contact wire of railway transport. An important factor in calculating this coefficient is the dependence of the radiating power of the contact wire material on temperature and spectral range. Mathematical modeling made it possible to determine the value of the correction factor to determine the actual temperature of the contact wire by a spectrometer-ratio pyrometer depending on the material and spectral ranges of measurement.

**Keywords:** contact wire wear of railway transport; spectral ratio pyrometer; radiant capacity of materials.

*Надійшла до редакції  
12 листопада 2019 року*

*Рецензовано  
22 листопада 2019 року*

УДК 621.384.3

**ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ НА БЕЗПІЛОТНИКАХ**

<sup>1)</sup>Колобродов В. Г., <sup>1)</sup>Кузнецов М. С., <sup>1)</sup>Налбандова В. П., <sup>1)</sup>Сокол Б. В., <sup>1,2)</sup> Імієв А. Д.

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>Server Tibbi Cihazlar San. Tic. Ltd. Şti., Istanbul, Turkey

E-mail: [sokolbohdan@ukr.net](mailto:sokolbohdan@ukr.net)

**Вступ.** У даній статті розглянуто найпоширеніші сфери застосування тепловізорів, що розміщені на безпілотних літальних апаратах. Авторами розглянуто відмінності у конструкціях крил та спричинені цим переваги і недоліки безпілотних літальних апаратів. **Мета.** Як головну мету роботи автори визначають