

Гоц Н. Є.

СИСТЕМА КРИТЕРІЇВ ФОРМУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ТЕРМОМЕТРА ВИПРОМІНЕННЯ

В статті запропоновано систему критеріїв для формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінення, а саме: критерії формування сигналу окремого спектрального каналу; критерії взаємного розташування спектральних каналів; критерії вибору спектральних каналів в залежності від методу багатосмугової термометрії за випроміненням. Це дозволяє реалізувати багатосмугові методи вимірювання температури за випроміненням термометрами інфрачервоного випромінення.

Ключові слова: багатоканальний термометр випромінення, багатосмугові методи вимірювання температури за випроміненням, інфрачервоне випромінення.

1. Вступ

На сьогодні методи вимірювання температури за випроміненням (ВТВ) в залежності від кількості спектральних смуг, що використовуються для їх реалізації, можна поділити на односмугові та багато смугові [1]. Перспективним є розвиток багатосмугових методів вимірювання температури за випроміненням, оскільки їх використання направлено на зменшення методичної похибки вимірювання температури за випроміненням за рахунок використання спектральної інформації про випромінювальні властивості об'єкта [2, 3]. Для їх реалізації актуальним є розроблення багатоканальних термометрів випромінення, які мають декілька робочих спектральних каналів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Кожен з методів термометрії за випроміненням (ТВ) має відповідні обмеження по застосуванню, тому доцільний вибір методу в залежності від умов вимірювання та властивостей об'єкта [4–6]. Пропонуємо реалізувати це на основі термометра випромінення (ТМВ), який має декілька спектральних каналів або надлишкову їх кількість, що дозволяє реалізувати одночасно декілька методів ТВ. Оптимальний вибір методу ТВ та алгоритму обчислення має здійснюватися в залежності від переваг його використання в даних умовах вимірювання. Перехід на різні методи вимірюван-

ня температури за випроміненням може здійснюватися шляхом використання різних алгоритмів обчислення умовної та термодинамічної температури. Реалізувати це пропонуємо на основі багатоканального термометра випромінення, базова структурна схема якого розроблена та представлена на рис. 1.

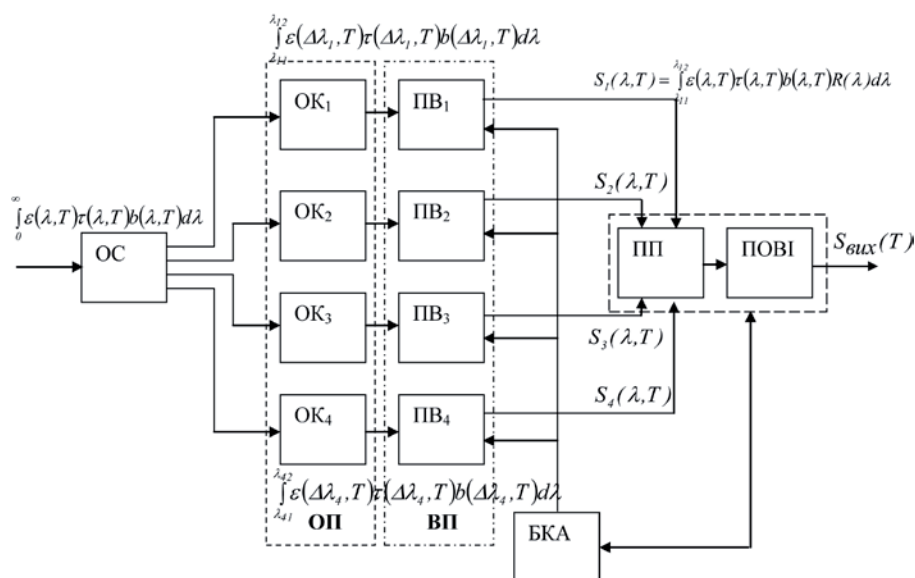


Рис. 1. Базова структурна схема багатоканального ТМВ: ОС — оптична система, ОК — оптичні канали, ОП — оптичний перетворювач, ПВ — приймач випромінення, ВП — вимірювальний перетворювач, БКА — блок керування алгоритмом, ПП — проміжний перетворювач, ПОВІ — пристрій опрацювання вимірювальної інформації

Дана структурна схема функціонує наступним чином. Інформація про значення температури досліджуваного об'єкта надходить у вигляді інтегрального потоку випромінення $\int_0^{\infty} \epsilon(\lambda, T) \tau(\lambda, T) \Phi(\lambda, T) d\lambda$ на оптичну систему термометра випромінення. На основі застосування різних видів оптичної фільтрації формуються оптич-

ні канали термометра випромінення, які пропускають потік випромінення в спектральних смугах певної ширини. Потік випромінення сприймається приймачем випромінення. Вихідний сигнал приймача випромінення надходить на проміжний перетворювач, який формує нормоване значення сигналу. При використанні декількох приймачів випромінення, блок керування алгоритмом визначає спектральні канали, які використовуються для реалізації відповідного методу термометрії випромінення та формує опрацювання нормованих вихідних сигналів приймачів випромінення за заданим алгоритмом об'єкта методу ТВ.

Для реалізації багатоканального термометра випромінення необхідно розробити вимоги до формування спектральних каналів. Спроба цього була зроблена в роботі [7, 8]. Але в роботі не висвітлені питання можливості взаємного розташування спектральних смуг та одночасної реалізації декількох методів термометрії за випроміненням.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є робочі спектральні смуги багатоканального термометра інфрачервоного випромінення.

Метою є розроблення системи критеріїв для реалізації багатосмугових методів вимірювання температури за випроміненням термометрами інфрачервоного випромінення, що дозволить зменшити методичну похибку вимірювання температури за випроміненням.

Задачі дослідження — розглянути умови формування окремих спектральних каналів в залежності від їх кількості, взаємного розташування та особливостей методу вимірювання температури за випроміненням.

4. Матеріали та методи дослідження

Методичною основою дослідження є дослідження точності вимірювання температури за випроміненням різними методами термометрії за випроміненням, проведене в [9]. За результатами дослідження встановлено наступне. Максимальна кількість спектральних каналів ТМВ не може перевищувати чотирьох, інакше значення похибок ВТВ на окремих ділянках стрімко зростають. Збільшення кількості спектральних каналів веде до зменшення методичної складової, але зростає інструментальна складова похибки ВТВ, через що необхідно створювати з низьким значенням основної похибки, до 0,3 %. Для конкретних температурних та спектральних діапазонів, умов вимірювання та властивостей об'єкта доцільно використовувати відповідні методи ТВ, що дасть змогу визначати температуру з вищою точністю. Реалізація багатосмугових методів ТВ потребує розроблення вимог для формування окремих спектральних каналів. Доцільно розробляти багатоканальні термометри випромінення, які можуть реалізувати декілька методів ТВ. ТМВ може мати надлишкову кількість спектральних каналів.

Оптимальний вибір методу ТВ та алгоритму обчислення здійснюється залежно від переваг їх використання в конкретних умовах вимірювання, а перехід на різні методи ТВ відбувається зміною алгоритму обчислення та робочих спектральних каналів. Саме це і зумовлює необхідність розроблення вимог до формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінення.

5. Результати досліджень параметрів спектральних смуг для формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінення

Концепція оптимального вибору параметрів робочих спектральних каналів ТМВ передбачає розроблення ряду критеріїв для їх формування під час реалізації різних багатосмугових методів ТВ. Як було обґрунтовано в [9], максимально можлива кількість спектральних смуг, яку доцільно застосовувати для реалізації багатосмугового методу, не повинна перевищувати чотирьох.

Але можливе застосування і надлишку спектральних смуг з оптимальним їх вибором залежно від методу, який доцільніше використовувати для конкретних умов, та випромінювальних властивостей об'єкта.

Оскільки на формування вихідного сигналу кожного спектрального каналу багатоканального термометра інфрачервоного випромінення впливають спектральна чутливість, потужність сигналу та особливості методу вимірювання температури за випроміненням, то автор статті запропонував систему критеріїв для формування спектральних каналів (рис. 2).

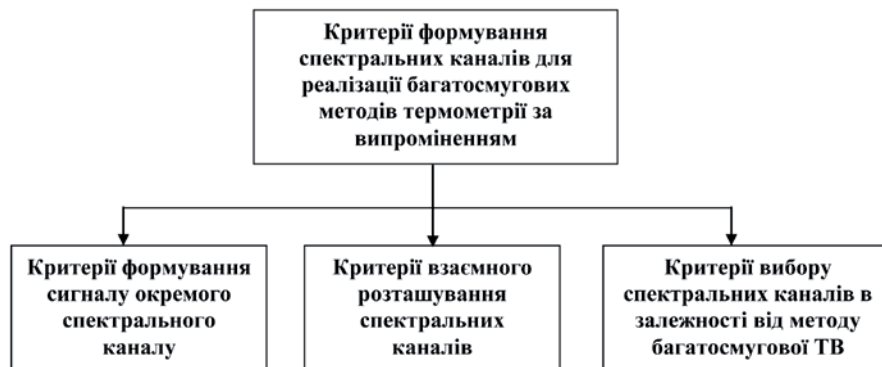


Рис. 2. Система критеріїв формування спектральних каналів для реалізації багатосмугових методів багатоканальними ТМЧВ

Розглянемо запропоновані критерії та вимоги, які повинні виконуватися для реалізації запропонованих критеріїв.

5.1. Критерії формування сигналу окремого спектрального каналу. Спектральний вимірювальний канал багатоканального ТМВ складається з ряду оптичних елементів, які формують оптичну систему каналу, та приймача випромінення. Процеси спектрального відбивання, розсіювання, пропускання оптичних елементів та поглинання випромінення від об'єкта поверхнею ПВ формують спектральну чутливість окремого спектрального каналу.

Тому функція відгуку кожного спектрального каналу багатоканального ТМВ формується на основі взаємодії спектральних характеристик оптичної системи ТМВ та ПВ, а також температурної залежності їх характеристик.

Для формування спектрального каналу ТМВ необхідне забезпечення таких критеріїв:

- максимальне виявлення корисного сигналу випромінювання від об'єкта на фоні шумів;
- максимальна потужність сигналу відповідно до спектрального та температурного діапазонів вимірювання.

Для реалізації цих критеріїв автор статті запропонував виконання наступних вимог:

1. Ширина та розташування спектрального каналу ТМВ $\Delta\lambda_i = \lambda_{2i} - \lambda_{1i}$ повинні забезпечувати сприйняття такої потужності випромінювання (за мінімального значення діапазону температури T_{\min}), щоб реалізувати задане співвідношення сигнал/шум $S_i(\lambda_{ci}, T)/S_N$ – у заданому температурному та спектральному діапазонах вимірювання.

$$\frac{S_i(\lambda_{ci}, T)}{S_N} = \frac{\int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} R(\lambda)b(\lambda, T_{\min})d\lambda}{S_N} = RS_{N\text{зад}}, \quad (1)$$

де $R(\lambda)$ – спектральна чутливість, $b(\lambda, T_{\min})$ – густина потоку випромінювання.

За температури об'єкта вище 700°C вимірювання температури за випромінюванням доцільно проводити у вузьких спектральних інтервалах завширшки $50\text{--}100\text{ нм}$ у близькій інфрачервоній області спектра у зв'язку з високою потужністю випромінювання у цій області згідно з законом Планка.

Для сприйняття необхідної потужності випромінювання за температури менше 700°C на середній та тепловій ділянках інфрачервоної області спектральна ділянка має бути розширена від 1 до кількох мкм, оскільки потужність випромінювання у цій області падає. Співвідношення сигнал/шум для одноканальних термометрів випромінювання повинно становити $3\text{...}5$ дБ, для багатоканальних ТМВ – від $5\text{...}10$ дБ та вище залежно від заданого значення похибки визначення температури за випромінюванням [10].

2. Під час формування функції відгуку у спектральному каналі повинна бути забезпечена висока контрастність корисного сигналу $\frac{S_{\max}}{S_{\min}} \rightarrow \max$ та висока гранична

крутизна $\Delta\lambda_{\text{кр}} \rightarrow \min$, де S_{\max} та S_{\min} – відповідно максимальне та мінімальне значення сигналу.

3. Забезпечення низьких втрат потужності потоку випромінювання об'єкта $\Phi_{\text{об}}(\lambda, T)$ внаслідок відбивання та розсіювання в оптичній системі ТМВ:

$$\Phi_{\max}(\lambda, T) \geq 0,8\Phi_{\text{об}}(\lambda, T), \quad (2)$$

де $\Phi_{\max}(\lambda, T)$ – максимальне значення потоку випромінювання.

5.2. Критерії взаємного розташування спектральних каналів. За одночасного сприйняття випромінювання у декількох спектральних каналах важливим критерієм є можливість розпізнавання сигналів під час вимірюванні температури T . Для реалізації цього критерію повинні виконуватися такі вимоги:

1. Для забезпечення співвідношення між сигналами окремих спектральних каналів повинно забезпечуватися

рознесення функцій відгуку вихідних сигналів $S_i(\lambda_{ci}, T)$ згідно рівняння:

$$S_1(\lambda_{c1}, T) < S_2(\lambda_{c2}, T) < S_i(\lambda_{ci}, T),$$

або

$$S_1(\lambda_{c1}, T) > S_2(\lambda_{c2}, T) > S_i(\lambda_{ci}, T). \quad (3)$$

Щоб розрізнити два сигнали в окремих спектральних каналах, їх функції відгуку $S_i(\lambda_{ci}, T)$ та $S_{i-1}(\lambda_{ci-1}, T)$ під час вимірюванні температури T повинні різнитися між собою на величину, яка у кілька разів перевищує значення сигналу шуму S_N . Зокрема пропонуємо співвідношення:

$$\Delta S_i(\lambda_{ci}, T) = S_i(\lambda_{ci}, T) - S_{i-1}(\lambda_{ci-1}, T) \geq 10 \cdot S_N. \quad (4)$$

Це дасть змогу використовувати як спектральні смуги, які лежать на деякій відстані одна від одної, так і спектральні смуги, що накладаються.

Необхідно зауважити, що домогтися ідентичності спектральних каналів важко. Рівність ширини спектральних каналів можна забезпечити шляхом застосовуючи інтерференційні фільтри. Але значення спектральної чутливості окремих каналів буде різнитися внаслідок впливу оптичної системи та змінного характеру чутливості ПВ. Забезпечити ідентичність параметрів спектральних каналів можна лише апаратними засобами за допомогою підсилення сигналів та за допомогою калібрування.

2. Спектральні смуги у близькій інфрачервоній області, де для температур вище ніж 700°C потужність випромінювання є високою, можуть бути достатньо вузькими $50 \div 100$ нм. Але у середній та тепловій областях спектра ширина смуги повинна забезпечити сприйняття ПВ достатньої потужності енергії випромінювання. Тому для цієї області ширина смуг може становити від 1 мкм до кількох мікрометрів, а окремі смуги можуть як перетинатися, так і накладатися. Тому доцільно обирати такі умови:

– $\Delta\lambda_i = \text{const}$ за умови незалежності спектральних смуг – для видимої та близької інфрачервоної області спектра;

– $\Delta\lambda_i = \text{var}$ з можливістю накладання спектральних смуг – для середньої та теплової інфрачервоної області спектра.

3. Вимога щодо нормування вихідних сигналів $S_i(T)$ спектральних каналів:

$$\begin{aligned} x &= \frac{S_1(T)}{S_1(T) + S_2(T) + S_3(T)}, \\ y &= \frac{S_2(T)}{S_1(T) + S_2(T) + S_3(T)}, \\ z &= \frac{S_3(T)}{S_1(T) + S_2(T) + S_3(T)}. \end{aligned} \quad (5)$$

5.3. Критерії вибору параметрів спектральних каналів в залежності від методу багатосмугової термометрії за випромінюванням. Вихідні сигнали приймачів випромінювання

у різних спектральних каналах термометра інфрачервоного випромінювання під час вимірювання температури T .

Критерієм вибору спектральних каналів залежно від методу ТМВ обрано мінімальну похибку вимірювання температури. Для реалізації цього критерію сформульовано такі вимоги до вихідного сигналу приймачів випромінювання багатоканального термометра інфрачервоного випромінювання:

1. Однозначність визначення температури багатоканальним методом ТВ за функцією перетворення відповідного методу. Повинен бути забезпечений монотонно зростаючий або монотонно спадаючий характер функції перетворення $f(G)$ у відповідному температурному та спектральному діапазонах вимірювання:

$$T = f(G), \text{ где } G = F[S_i^p(\lambda_{cn}, T)] \text{ при } p \in \{-1; 0; 1\}. \quad (6)$$

Для методів спектрального відношення:

$$G = \prod_{i=1}^n S_i(\lambda_{cn}, T)^p.$$

2. Динаміка зміни параметра G повинна бути достатньою для реалізації обчислень, а, значить, перевищувати допустиме значення похибки визначення температури та одиниці молодшого розряду $\chi_{доп}$ засобу вимірювання:

$$\frac{dG}{dT} \geq \chi_{доп}. \quad (7)$$

3. Оскільки температура, визначена багатоканальними методами за узагальненими формулами [9], то для зменшення значення похибки визначення температури відповідним методом, критерієм вибору значень робочих ефективних довжин хвиль спектральних каналів є мінімальне значення виразу:

$$\lim[k_i \cdot \Lambda_{ym} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(\varepsilon_i(\lambda)))] \rightarrow 0, \quad (8)$$

де k_i, b_i — коефіцієнти узагальненої формули визначення термодинамічної температури методами термометрії за випромінюванням, — еквівалентна довжина хвилі відповідного методу ТВ, $(\varepsilon_i(\lambda))$ — коефіцієнт випромінювання.

Значення виразу може прямувати до нуля у таких випадках. По-перше, за наближення ε до 1. Однак це проблематично, оскільки значення коефіцієнту випромінювання відрізняється у різних матеріалів і змінюється в широких межах не тільки з довжиною хвилі, але і з температурою. Фактично мінімізація співвідношення досягається підбором ефективних значень спектральних каналів ТМВ такими, щоб еквівалентна довжина хвилі використовуваного методу ТВ була мінімальною. Це зумовлює вимоги до взаємного розташування по спектру робочих спектральних каналів та мінімізації значення еквівалентної довжини хвилі методу ТВ $\Lambda_{ym} \rightarrow \min$. Тому важливим питанням є взаємне розташування по спектру окремих спектральних каналів. Вихідний параметр

G , який залежить від вихідних сигналів спектральних каналів ТМВ:

$$G = F(T) = f(S(\lambda_{c1}, T), S(\lambda_{c2}, T), \dots, S(\lambda_{ci}, T)). \quad (9)$$

Значення температури визначається за співвідношенням K вихідних сигналів спектральних каналів ТМВ та залежить від розташування середніх значень довжин хвиль спектральних каналів λ_{ci} та відстані між центрами $\Delta\lambda_{ci}$:

$$T = f(\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_{ci}, \Delta\lambda_{ci}, G) = f(p_i), \quad (10)$$

де $\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \dots = \Delta\lambda_i = \text{const}$; p_i — i -й параметр рівняння.

Похибка визначення температури ТМВ з кількома спектральними каналами залежить від параметрів їх взаємного розташування — середніх значень довжин хвиль спектральних каналів та відстані між їх центрами:

$$\delta T = \sum_{s=1}^n \frac{\partial T}{\partial p_i} = \frac{\partial T}{\partial \lambda_{c1}} + \frac{\partial T}{\partial \lambda_{c2}} + \dots + \frac{\partial T}{\partial \lambda_{ci}} + \frac{\partial T}{\partial \Delta\lambda}. \quad (11)$$

Умовою оптимального взаємного розташування середніх значень довжин хвиль спектральних каналів та відстані між їх центрами буде таке їх розташування, коли похибка визначення температури прямуватиме до 0, а сума часткових похідних по λ_{ci} та $\Delta\lambda$ прямуватиме до нуля:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial p_i} \rightarrow 0. \quad (12)$$

Розв'язання системи рівнянь дає змогу встановити залежність між середніми значеннями спектральних смуг та відстаней між ними. У результаті його розв'язання отримаємо співвідношення між середніми значеннями довжин хвиль спектральних каналів λ_i та відстані між їх центрами $\Delta\lambda$ — $\Delta\lambda_{cs} = f(\lambda_{ci})$.

6. Обговорення результатів оптимального формування спектральних смуг для реалізації багатосмугових методів термометром випромінювання

В результаті дослідження можна сказати, що на підставі сформульованих критеріїв створені вимоги до спектральних смуг ТМВ та визначаються оптимальні параметри спектральних каналів багатоканального ТМВ, який використовується в певному спектральному та температурному діапазоні та реалізує відповідні методи вимірювання температури за випромінюванням. Реалізація сукупності цих вимог дозволяє оптимально визначити параметри спектральних каналів багатоканального ТМВ, який функціонує в певному спектральному та температурному діапазоні та реалізує відповідні методи вимірювання температури з випромінюванням. Практична реалізація сформованих критеріїв має бути узгоджена з випромінювальними властивостями об'єкта вимірювання в процесі його апіорного дослідження.

7. Висновки

Розроблено систему критеріїв для формування спектральних каналів багатоканального термометра випромінювання в залежності від параметрів окремих спектральних каналів, їх взаємного розташування та методу багатосмугової термометрії за випромінюванням, що є основою для реалізації багатосмугових методів термометрами інфрачервоного випромінювання. На підставі сформульованих критеріїв розроблено вимоги до визначення оптимальних параметрів спектральних каналів багатоканального ТМВ, який використовується у певному спектральному та температурному діапазонах та реалізує відповідні методи вимірювання температури за випромінюванням. Отже, розроблені в роботі критерії формування спектральних каналів термометра інфрачервоного випромінювання дають змогу визначити параметри спектральних каналів для реалізації багатосмугових методів вимірювання температури в термометрах інфрачервоного випромінювання

Література

1. Снопко, В. Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности [Текст] / В. Н. Снопко. — Минск: Наука и техника, 1988. — 248 с.
2. Снопко, В. Н. Широкоспектральная оптическая пирометрия. Часть 1 [Текст] / В. Н. Снопко. — Минск, 1993. — 26 с.
3. Свет, Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Д. Я. Свет. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
4. Гоц, Н. Є. Модулювання похибок вимірювання температури за випромінюванням багатоканальними методами [Текст]: зб. наук. пр. / Н. Є. Гоц // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. — 2011. — № 710. — С. 107–112.
5. Hots, N. Analiza czynników składowych błędów pirometrii radiacyjnej [Text] / N. Hots, T. Piątkowski // Pomiar. Automatyka. Kontrola. — 2009. — № 11. — P. 874–877.
6. Coates, P. V. Multi-Wavelength Pyrometry [Text] / P. V. Coates // Metrologia. — 1981. — Vol. 17, № 3. — P. 103–109. doi:10.1088/0026-1394/17/3/006
7. Duvaut, T. Multiwavelength infrared pyrometry: optimization and computer simulations [Text] / T. Duvaut, D. Georgeault, J. L. Beaudoin // Infrared Physics & Technology. — 1995. — Vol. 36, № 7. — P. 1089–1103. doi:10.1016/1350-4495(95)00040-2
8. Fu, T. The analysis of optimization criteria for multi-band pyrometry [Text] / T. Fu, X. Cheng, X. Fan, J. Ding // Metrologia. — 2004. — Vol. 41, № 4. — P. 305–313. doi:10.1088/0026-1394/41/4/012
9. Гоц, Н. Е. Сравнительная характеристика методов пирометрии [Текст] / Н. Е. Гоц // Приборы + Автоматика. — 2007. — № 7(85). — С. 35–50.
10. Rogalski, A. Infrared detectors: an overview [Text] / A. Rogalski // Infrared Physics & Technology. — 2002. — Vol. 43, № 3–5. — P. 187–210. doi:10.1016/s1350-4495(02)00140-8

СИСТЕМА КРИТЕРИЕВ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ МНОГОКАНАЛЬНОГО ТЕРМОМЕТРА ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье предложена система критериев для формирования спектральных каналов многоканального термометра излучения, а именно: критерии формирования требований к отдельному спектральному каналу, критерии взаимного расположения спектральных каналов, критерии выбора спектральных каналов в зависимости от метода многоканальной термометрии по излучению. Это позволяет реализовать многоканальные методы измерения температуры по излучению термометрами инфракрасного излучения.

Ключевые слова: многоканальный термометр излучения, многоканальные методы измерения температуры по излучению, инфракрасное излучение.

Гоц Наталія Євгенівна, доктор технічних наук, доцент, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: natalia.gots@lp.edu.ua.

Гоц Наталия Евгениевна, доктор технических наук, доцент, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Hots Nataliya, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: natalia.gots@lp.edu.ua

УДК 658.511

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41498

Рудницький С. И.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ОБОБЩЕННОГО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЕЙ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТАМИ

В работе была разработана математическая модель контролируемого объекта процесса управления конфигурацией, которая позволяет формализовать как материальные, так и нематериальные объекты. Формализованы такие концепции как: характеристика, состояние, отношение согласованности, объект, изменение. Определен математический объект «карта согласованности объекта», который позволяет указать все характеристики, влияющие на согласованность контролируемого объекта.

Ключевые слова: конфигурация, управление конфигурацией, объект, проект, процесс, оптимизация.

1. Введение

Известно [1–6], что успешное завершение проекта невозможно без поддержки согласованности совокупнос-

ти трех взаимосвязанных объектов: проекта, продукта этого проекта и внешнего окружения. Такая потребность возникает из-за практической неизбежности изменений во внешнем и внутреннем окружении проекта