

О.К. КУЧЕРЕНКО, А.Е. ТОМАШЕВСЬКА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАСТОСУВАННЯ ПІРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗНОСУ КОНТАКТНОГО ДРОТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МЕРЕЖІ

*Мета статті – обґрунтування переваг застосування пірометра спектрального співвідношення для контролю зносу контактної дроти залізничної мережі. Основні переваги запропонованого методу полягають в тому, що результати моніторингу не залежать від таких характеристик об'єкта вимірювання, як випромінююча здатність дроту, відстань до нього та стан атмосфери. Наведено результати розрахунку вихідного сигналу пірометра для типових параметрів дроту, оптичної системи пірометра та інших факторів, що мають місце при вимірюваннях.*

*Ключові слова: контактний дріт залізничного транспорту, пірометр спектрального співвідношення.*

O. KUCHERENKO, A. TOMASHEVSKA

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

### APPLICATION OF A PYROMETER SPECTRAL RELATIONSHIP TO CONTROL THE WEAR OF A CONTACT WIRE OF RAILWAY NETWORK

*The safety of the operation of rail transport is connected with the necessity of control over the deterioration of the wires of the contact networks with the friction of the current collector. The purpose of this article is to justify the benefits of using a spectral pyrometer to control the wear of a contact wire of a railway network. The main advantages of the proposed method are the fact that monitoring results do not depend on such measurement characteristics as radiance, distance from the object to the instrument and the state of the atmosphere. The article presents the results of calculating the output signal of the pyrometer for typical output parameters when monitoring the condition of the contact wire. Also, the graph of the dependence of the coefficient of the spectral correlation on the temperature of the contact wire is given. We introduce the concept of the coefficient of the spectral correlation of the CSC. CSC during monitoring of the condition of the contact wire of the railway transport depends on the temperature of the overheating of the wire due to the wear of the cross-section. After analysing the theoretical correlations for the value of the coefficient of the spectral ratio, we can conclude that the value of CSC does not depend on such factors as the distance between the wire and the pyrometer, the coefficient of the radiating ability of the contact wire, the transmission coefficient of the optical system of the pyrometer and the atmosphere. The analysis of these calculations proved the advantages of this method.*

*Keywords: contact wire of railway transport, pyrometer of spectral ratio, CSC.*

### 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 перетину. Моніторинг повинен проводитися безконтактним методом, так як провід знаходиться під високою напругою (близько 30 кВ.) Для вирішення цієї задачі застосовується ряд методів. Так в роботах [1–3] розглядається можливість застосування тінювих методів, основний недолік яких полягає в необхідності розташування джерела освітлення та фотоприймача по різних сторонах об'єкта вимірювання. В роботах [4–7] пропонується використовувати метод структурного освітлення та лазерної проекційної системи для автоматичного дистанційного контролю геометрії та дефектів контактних проводів. При зазначених авторами можливостях цього методу, реалізація його пов'язана з застосуванням складної оптико-механічної частини пристрою, що впливає на точність вимірювання та надійність експлуатації в реальних умовах.

Очевидним є той факт, що при зносі контактної дроти зменшується площа його поперечного перетину, а це у свою чергу викликає перегрівання дротів у місцях зносу [8]. У більшості європейських країн для перегріву зношених частин дроту прийняті наступні норми:

- 1-а категорія (перегрів менше 50°C) – дріт слід тримати під контролем та піддавати технічному обслуговуванню при наступній перевірці;
- 2-а категорія (перегрів 50°÷300°C) – ремонт дроту в найближчий час з урахуванням навантаження;
- 3-а категорія (перегрів більше 300°C) – потрібен невідкладний ремонт з урахуванням навантаження.

**Ціллю роботи** є задача визначення вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення при контролі місць перегріву дротів контактних мереж залізниць. При цьому необхідно враховувати ряд основних факторів:

- коефіцієнт теплового випромінювання (КТВ) дроту контактної мережі, значення якого залежать від багатьох факторів;
- середню температуру проводу контактної мережі, обумовлену зоною кліматичного поясу;
- допустиму величину перегріву ділянок дроту контактної мережі;
- відстань між дротом контактної мережі та пірометром з урахуванням можливості закріплення пірометра на планці, пов'язаній зі струмоприймачем;
- температурну чутливість пірометра;
- характеристики оптичної системи пірометра та параметри теплового приймача.

**Метод розрахунку вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення**

Для визначення вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення при контролі місць перегріву контактної дроти треба скористатися законами теплового випромінювання. Густина теплового випромінювання об'єкта дослідження в заданому спектральному діапазоні визначається законом Планка. Він є основним і найбільш загальним законом в теорії теплового випромінювання. Закон Планка характеризує розподіл по спектру енергії випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) і, якщо за змінний параметр прийнята довжина хвилі, закон Планка записують в наступному вигляді [9]:

$$r = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}, \tag{1}$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – перша та друга константи в формулі Планка, пов'язані зі швидкістю світла в вакуумі  $c_0$ , сталою Больцмана  $k$  і сталою Планка  $h$ .

Ці константи дорівнюють:

$$c_1 = 2\pi c_0^2 h,$$

$$c_2 = \frac{c_0 h}{k}.$$

Інтегруючи (1) в межах від  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ , отримуємо значення щільності випромінювання АЧТ у всьому спектральному діапазоні:

$$R_{0-\infty} = \int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda. \tag{2}$$

Виходячи з (2) отримаємо значення щільності випромінювання АЧТ в певних спектральних діапазонах:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r d\lambda = \int_0^{\lambda_2} r d\lambda - \int_0^{\lambda_1} r d\lambda,$$

$$R_{0-\lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} r d\lambda = \int_0^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda,$$

$$R_{0-\lambda_1} = \int_0^{\lambda_1} r d\lambda = \int_0^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda,$$

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda.$$

Для сірого тіла маємо:

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

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

де  $\varepsilon_T$  – коефіцієнт теплового випромінювання сірого тіла.

Їх співвідношення матиме вигляд:

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

Тобто можна зробити висновок, що на співвідношення щільностей випромінювання параметр  $\varepsilon_T$  не впливає, а впливають тільки значення температури розігрітого контактного дроту  $T$  та спектральні діапазони  $\lambda_1 \div \lambda_2$  і  $\lambda_3 \div \lambda_4$ , у яких відбувається вимірювання. Причому у випадку, коли вимірювання відбуватимуться при різних температурах нагріву контактного дроту, значення співвідношення (3) також будуть відрізнятися.

Щільність випромінювання  $R_{\lambda_1-\lambda_2}$  пов'язана з енергетичною яскравістю  $L_{\lambda_1-\lambda_2}$  співвідношенням:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = \pi \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}. \quad (4)$$

З урахуванням (4) енергетична яскравість контактного дроту в спектральних діапазонах  $\lambda_1 \div \lambda_2$  і  $\lambda_3 \div \lambda_4$  дорівнює:

$$L_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{R_{\lambda_1-\lambda_2}}{\pi},$$

$$L_{\lambda_3-\lambda_4} = \frac{R_{\lambda_3-\lambda_4}}{\pi}.$$

Енергетична опроміненість теплового приймача залежить від енергетичної яскравості контактного дроту, кутової апертури об'єктива пірметра в площині зображення  $\tan \omega'$ , площі контактного дроту, що потрапляє в межі поля зору оптичної системи пірметра  $S_{ef}$  та коефіцієнта пропускання оптичної системи пірметра та атмосфери. Величина  $S_{ef}$  визначається відстанню від контактного дроту до вхідної зіниці об'єктива пірметра, яка може змінюватись і кута поля зору  $\Omega$  оптичної системи. В свою чергу  $\Omega$  визначається розміром приймача випромінювання. Якщо вважати, що зображення ділянки контактного дроту будується поблизу фокальної площини об'єктива величина  $\tan \omega' \approx \sin \omega'$  і дорівнює:

$$\sin \omega' = \frac{D}{2 \cdot f'},$$

де  $D$  і  $f'$  діаметр вхідної зіниці і фокусна відстань об'єктива пірметра відповідно.

Спектральне пропускання системи визначається співвідношенням:

$$\tau_{\lambda_1-\lambda_2} = \tau_{o \lambda_1-\lambda_2} \cdot \tau_{a \lambda_1-\lambda_2},$$

де  $\tau_{o \lambda_1-\lambda_2}$  – коефіцієнт пропускання об'єктива пірметра;  $\tau_{a \lambda_1-\lambda_2}$  – коефіцієнт пропускання випромінювання атмосферою. Прийmemo:  $\tau_{\lambda_1-\lambda_2} = \tau_{\lambda_3-\lambda_4}$ . Тоді інтегральний потік випромінювання для двох спектральних діапазонів знаходиться за формулами:

$$\Phi_{\lambda_1-\lambda_2} = R_{\lambda_1-\lambda_2} \cdot S_{ef} \cdot \tau_{\lambda_1-\lambda_2} \cdot (\sin \omega')^2, \quad (5)$$

$$\Phi_{\lambda_3-\lambda_4} = R_{\lambda_3-\lambda_4} \cdot S_{ef} \cdot \tau_{\lambda_3-\lambda_4} \cdot (\sin \omega')^2. \quad (6)$$

Напряга на виході приймачів випромінювання пов'язана з інтегральним потоком і чутливістю теплових приймачів  $S_U$  співвідношеннями:

$$U_{\lambda_1-\lambda_2} = S_U \cdot \Phi_{\lambda_1-\lambda_2}, \quad (7)$$

$$U_{\lambda_3-\lambda_4} = S_U \cdot \Phi_{\lambda_3-\lambda_4}. \quad (8)$$

Треба зазначити, що чутливість термопарного приймача  $S_U$  залежить лише від теплової потужності і не залежить від спектрального діапазону.

Співвідношення напруги сигналів на виході термопарного приймача для спектральних діапазонів  $\lambda_1 \div \lambda_2$  і  $\lambda_3 \div \lambda_4$  з урахуванням (3÷8) має наступне значення:

$$\frac{U_{\lambda_3-\lambda_4}}{U_{\lambda_1-\lambda_2}} = \frac{S_U \cdot \Phi_{\lambda_3-\lambda_4}}{S_U \cdot \Phi_{\lambda_1-\lambda_2}} = \frac{S_U \cdot R_{\lambda_3-\lambda_4} \cdot S_{ef} \cdot \tau_{\lambda_3-\lambda_4} \cdot (\sin \omega')^2}{S_U \cdot R_{\lambda_1-\lambda_2} \cdot S_{ef} \cdot \tau_{\lambda_1-\lambda_2} \cdot (\sin \omega')^2} = \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda} \quad (9)$$

Проаналізувавши співвідношення (9), приходимо до висновку, що співвідношення напруги сигналів на виході термопарного приймача для спектральних діапазонів  $\lambda_1 \div \lambda_2$  і  $\lambda_3 \div \lambda_4$  не залежить від більшості параметрів, які мали б впливати на результат вимірювання, а визначається лише відношенням щільностей випромінювання в визначених спектральних діапазонах. Для цього відношення доцільно ввести поняття коефіцієнта спектрального співвідношення (КСС).

**Проведені розрахунки і їх аналіз**

КСС при моніторингу стану контактного дроту залізничного транспорту залежить від температури перегріву дроту внаслідок зносу поперечного перетину. Пірометр кріпиться на рамі, пов'язаній зі струмоприймачем, тому відстань від пірометра до дроту, з урахуванням незначних пересувань, відома заздалегідь. Користуючись попередніми співвідношеннями, проведемо аналіз КСС, отриманого пірометром спектрального співвідношення для розігрітого контактного дроту, який є сірим тілом з коефіцієнтом теплового випромінювання (КТВ)  $\varepsilon = 0.7$ , для температур перегріву  $T_1 = 50^\circ + 273 = 323 \text{ K}$ ,  $T_2 = 100^\circ + 273 = 373 \text{ K}$ ,  $T_3 = 140^\circ + 273 = 413 \text{ K}$ , в спектральних діапазонах  $\lambda_1 \div \lambda_2 = 3 \div 5 \text{ мкм}$  і  $\lambda_3 \div \lambda_4 = 8 \div 13 \text{ мкм}$ . Відстань від досліджуваного дроту до вхідної зони об'єктива пірометра складає  $700 \pm 100 \text{ мм}$ . У якості приймача випромінювання використовуємо інтегральний термопарний датчик PerkinElmer TPS334|10 з площею чутливого елемента  $0.7 \times 0.7 \text{ мм}^2$ , розміром вікна датчика  $5.5 \text{ мм}^2$ , чутливістю  $75 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$  [10]. Кут поля зору оптичної системи пірометра складає  $2\Omega = 5^\circ$ .

Результат обчислень КСС для двох спектральних діапазонів при температурах  $T = 323\text{K} \div 413\text{K}$  показаний на рис. 1:

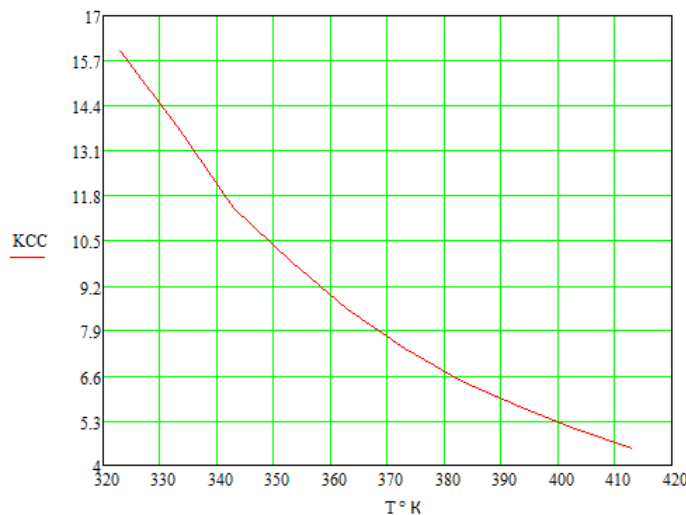


Рис. 1. Графік залежності коефіцієнта спектрального співвідношення від температури контактної дроту

**Висновки**

Провівши аналіз теоретичних співвідношень для значення коефіцієнта спектрального співвідношення, можна зробити висновок, що значення КСС не залежить від таких чинників, як відстань між дротом і пірометром, коефіцієнта випромінюючої здатності контактної дроту, коефіцієнта пропускання оптичної системи пірометра і атмосфери.

Приведений графік дає можливість при визначеному значенні КСС знайти температуру перегріву контактної дроту залізничного транспорту і прийняти рішення щодо відповідних регламентних робіт. Як видно на графіку з рис. 1 значення КСС знижується зі збільшенням температури перегріву контактної дроту. Наприклад, якщо КСС=13, то необхідний ремонт дроту в найближчий час з урахуванням

навантаження.

## Література

1. Методы и средства контроля в кабельной промышленности : [методические указания к выполнению лабораторных работ для магистрантов, обучающихся по магистерской программе «Приборы и методы контроля качества и диагностики» направления 200100 «Приборостроение»] / сост. В. В. Редько, Е. М. Федоров. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 16 с.
2. Запускалов В. Г. Мобильный комплекс для управления динамическими параметрами троллейбусов электрифицированных железных дорог / В. Г. Запускалов, А. И. Маслов, Е. В. Арбузов, Е. О. Петренко, А. С. Мушкаров // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 7. – С. 16–18.
3. Пат. на корисну модель № 129646 України. МПК (2018.01) G01B 11/00; G01B 11/16. Пристрій для контролю зносу контактної дроти залізничного транспорту / О.К. Кучеренко, Д. О. Вишневецький. – Бюл. №21 від 12.11.2018.
4. Воронин А. В. Система диагностики контактного провода «Износ» / А. В. Воронин, В. И. Сиротинин, С. М. Шевяков, Ю. И. Федоров // Локомотив. – М. : Российские железные дороги. – 2013. – № 2(674). – С. 39–40.
5. Горшков Д. П. Современные методы определения износа контактной проволоки / Д. П. Горшков, В. М. Ступицкий // Иркутский железнодорожный транспортный университет. – 2017. – № 5. – С. 85–89.
6. Федоров Е. М. Измерение диаметра и эксцентриситета электрического кабеля на основе индуктивного оптического метода / Е. М. Федоров, А. Е. Гольдштейн, А. Р. Свендровский, В. В. Редько // Известия Томского политехнического университета. Технические науки. – 2005. – № 2. – С. 129–133.
7. Skibicki J. The new version of contact-less method for localization of catenary contact wire-theoretical assumption / J. Skibicki, M. Bartłomiejczyk // Przegląd elektroniczny. – 2013. – №7. – P. 100–104. – DOI: <http://www.pe.org.pl/articles/2013/7/23.pdf>
8. Сборник правил и инструкций по эксплуатации электрифицированных железных дорог. Правила построения и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог ЦЕ-197 [Электронный ресурс]. – Москва : ЗАО «ЭНЕРГОСПЕЦСЕРВИС», 2001. – Доп. 3. – Режим доступа : <http://www.gosthelp.ru/text/CE197Pravilaustrojstvaite.html>
9. Криксунов Л. Инфракрасные системы обнаружение, пеленгации и автоматического слежения за подвижными мишенями / Л. Криксунов, И. Усольцев. – 1-е изд. – Вашингтон : Совместная исследовательская служба публикаций, 1978. – 50 с.
10. Рынок микроэлектроники. PerkinElmer [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03\\_02/stat\\_18.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_02/stat_18.htm)

## References

1. Metody i sredstva kontrolja v kabel'noj promyshlennosti : [metodicheskie ukazaniya k vypolneniju laboratornyh rabot dlja magistrantov, obuchajushihhsja po magisterskoj programme «Pribory i metody kontrolja kachestva i diagnostiki» napravlenija 200100 «Priborostroenie»] / sost. V. V. Red'ko, E. M. Fedorov. – Tomsk : Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2008. – 16 s.
2. Zapuskalov V. G. Mobil'nyj kompleks dlja upravlenija dinamiceskimi parametrami trollejbusov jelektrificirovannyh zheleznyh dorog / V. G. Zapuskalov, A. I. Maslov, E. V. Arbuзов, E. O. Petrenko, A. S. Mushkarov // Kontrol'. Diagnostika. – 2002. – № 7. – S. 16–18.
3. Pat. na korysnu model № 129646 Ukrainy. MPK (2018.01) G01B 11/00; G01B 11/16. Prystrii dlja kontroliu znosu kontaktnoho drotu zaliznychnoho transportu / O.K. Kucherenko, D. O. Vyshnevskiy. – Biul. №21 vid 12.11.2018.
4. Voronin A. V. Sistema diagnostiki kontaktnogo provoda «Iznos» / A. V. Voronin, V. I. Sirotinin, S. M. Shevjakov, Ju. I. Fedorov // Lokomotiv. – M. : Rossijskie zheleznye dorogi. – 2013. – № 2(674). – S. 39–40.
5. Gorshkov D. P. Sovremennye metody opredelenija iznosa kontaktnoj provoloki / D. P. Gorshkov, V. M. Stupickij // Irkutskij zheleznodorozhnyj transportnyj universitet. – 2017. – № 5. – S. 85–89.
6. Fedorov E. M. Izmerenie diametra i jekscentrisiteta jelektricheskogo kabelja na osnove induktivnogo opticheskogo metoda / E. M. Fedorov, A. E. Gol'dshstejn, A. R. Svendrovskij, V. V. Red'ko // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2005. – № 2. – S. 129–133.
7. Skibicki J. The new version of contact-less method for localization of catenary contact wire-theoretical assumption / J. Skibicki, M. Bartłomiejczyk // Przegląd elektroniczny. – 2013. – №7. – P. 100–104. – DOI: <http://www.pe.org.pl/articles/2013/7/23.pdf>
8. Sbornik pravil i instrukcij po jekspluatácii jelektrificirovannyh zheleznyh dorog. Pravila postroenija i tehnichekoj jekspluatácii kontaktnoj seti jelektrificirovannyh zheleznyh dorog CE-197 [Elektronnij resurs]. – Moskva : ЗАО «JeNERGOSPECSERVIS», 2001. – Dop. 3. – Rezhim dostupu : <http://www.gosthelp.ru/text/CE197Pravilaustrojstvaite.html>
9. Kriksunov L. Infrakrasnye sistemy obnaruzhenie, pelengacii i avtomaticheskogo slezhenija za podvizhnymi mishenjami / L. Kriksunov, I. Usol'cev. – 1-e izd. – Vashington : Sovmestnaja issledovatel'skaja sluzhba publikacij, 1978. – 50 s.
10. Ryнок mikrojelektroniki. PerkinElmer [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03\\_02/stat\\_18.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_02/stat_18.htm)

Рецензія/Peer review : 20.1.2019 р.

Надрукована/Printed : 16.2.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Боровицький В.М.