

УДК 551.501.822

П.І. Ванкевич

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РУХОМИХ КОНТАКТНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З МАГНІТНИМИ ТЕРМОЧУТЛИВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

*Розроблено модель процесу вимірювання температури об'єктів, що здійснюють обертальний рух. На основі проведених досліджень встановлені закономірності зв'язку температури ділянок контакту термоперетворювачів (ТП) і поверхонь дослідних об'єктів з температурою внутрішніх точок ТП. Отримано співвідношення, які пов'язують швидкість руху ТП і момент досягнення максимуму температури у його внутрішніх точках, що дозволяє збільшити порогову чутливість ТП та його точність. На основі цих же співвідношень для кожного конкретного прикладу може бути отримане значення кута відставання зняття показів з контактного кільця в залежності від швидкості обертання. Вимірювання у цей момент температура термочутливих елементів (ТЧЕ) може бути перерахована до температури поверхні рухомого дослідного об'єкта.*

**Ключові слова:** оптимізація, рухомі контактні засоби вимірювання температури, магнітні термочутливі елементи, контрольно-вимірювальні системи, військово-технічні комплекси.

### Вступ

Сучасні засоби діагностування з рухомими контактними ТП, що в процесі вимірювань здійснюють обертальний рух або відтворюють траєкторії руху дослідних об'єктів ґрунтуються на забезпеченні безпосереднього контакту між термоперетворювачем та рухомою дослідною поверхнею на протязі обмеженого проміжку часу. За цей час термоперетворювач повинен набути температури, рівної температурі дослідної поверхні, перетворити її в інформативний, корисний сигнал і передати до вимірювальної апаратури. Для забезпечення безпосереднього контакту термоперетворювача з рухомою дослідною поверхнею використовуються конструктивно складні електромеханічні системи спряження, які негативно впливають на надійність діагностичних пристроїв і надійність вимірювань в цілому. Сьогодні у зв'язку із зростанням складності, функціонування в складних експлуатаційних умовах, і відповідальності технічних систем і технологій, які використовуються у військово-технічних комплексах, до засобів вимірювань висуваються достатньо жорсткі вимоги, які насамперед, потребують суттєвого підвищення точності, зменшення енергоємності і надійності в роботі [1, 13, 16, 19].

**Огляд сучасних засобів рухомих контактних засобів термометрії об'єктів технічних систем та аналіз досліджень і публікацій з проблем теплової діагностики військово-технічних комплексів.** Існує велика група рухомих інженерних конструкцій теплове діагностування яких не може бути здійснено засобами температурних вимірювань із

контактними термоперетворювачами (ТП), стаціонарно розташованими зовні рухомого дослідного об'єкта, або засобами ТП яких нерухомо закріплені на їх поверхні чи вмонтовані в товщі об'єму [2-7]. До таких об'єктів відносяться рухомі ланки технічних систем, що не мають фіксованої траєкторії руху, знаходяться під впливом випадкових вібраційних, ударних і деформуючих навантажень, поверхні яких мають нерівності у вигляді вм'ятин, зварних швів, та дефекти у вигляді тріщин, корозійних каверн, та зазнають впливу зовнішнього агресивного середовища [1, 20]. Вимірювання температури таких рухомих об'єктів не може бути здійснене відомими традиційними методами, а при допомозі технічних пристроїв із вмонтованими ТП, які на протязі певного проміжку часу частково чи повністю відтворюють траєкторію руху поверхні дослідних об'єктів або здійснюють обертальний рух [10, 11].

**Метою статті** визначимо моделювання процесів теплообміну в засобах діагностування з рухомими контактними ТП, що здійснюють обертальний рух. Ці пристрої перебувають у постійному контакті з поверхнею дослідного об'єкта, однак площадка їх контакту  $[-a; a]$  є рухомою. Розрахунок теплових процесів у такій системі пов'язаний з адекватним формулюванням контактних умов та розмірів площадки контакту, що обумовлено деформуванням твердотілого проміжного агента під дією прикладеного механічного навантаження. Слід зауважити, що ТЧЕ можуть бути розміщені як всередині, так і на поверхні циліндричного тіла і ця особливість є основою для поділу рухомих ТП на

дві групи – ТП з внутрішніми ТЧЕ та ТП з зовнішніми ТЧЕ. Зареєстроване значення температури ТП з внутрішнім розміщенням ТЧЕ так чи інакше відрізняється від реального, ця різниця залежить як від конструкції ТП, так і від матеріалу і швидкості переміщення дослідної поверхні [8, 9].

### Виклад основного матеріалу

Вважаємо швидкість обертання достатньо високою, щоб момент контакту точки ТП з дослідною поверхнею прийняти миттєвим.

Нехай температура в середині валика ТП внаслідок тривалого обертання стабілізувалась і рівна  $T_0$ . Досліджується порогова чутливість ТП шляхом локальної зміни температури у точці досліджуваної поверхні.

Нехай  $x = R\omega t$  – лінійна відстань від середини площадки контакту вздовж ободу валика;

$R$  – радіус валика;

$\omega$  – кутова швидкість обертання ТП.

Не порушуючи загальності для уяочення інтерпретації результатів вважаємо, що ТП залишається нерухомим, а джерело нагріву потужності  $H$  рухається навколо нього з постійною швидкістю. Тоді у точці на глибині  $z$  від зовнішньої поверхні валика температура визначається співвідношенням [14, 17, 18]:

$$T(R\omega t, z) = T_0 + \frac{1}{2\pi\lambda} \int_{-a}^a H(s) ds \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(x-s-R\omega t)^2 + z^2}{4\kappa t}} dt. \quad (1)$$

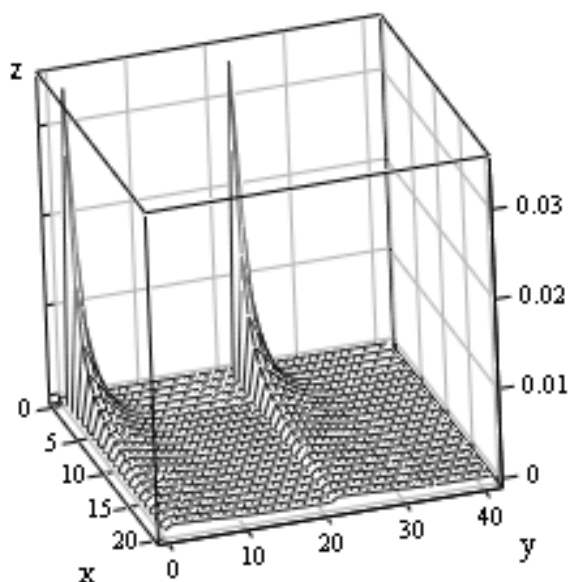
З використанням залежності (1), в якій  $\lambda$ ,  $\kappa$  – відповідно коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності, проведено числовий розрахунок теплового стану в модельованій технічній системі. Два цикли обертання ТП зображені на графіку, зображеному на рис. 1.

Для якісного аналізу по осі  $x$  відкладено відстань  $R$  від точки контакту вглиб валика, по осі  $y$  – час, по осі  $z$  – температура у відносних одиницях.

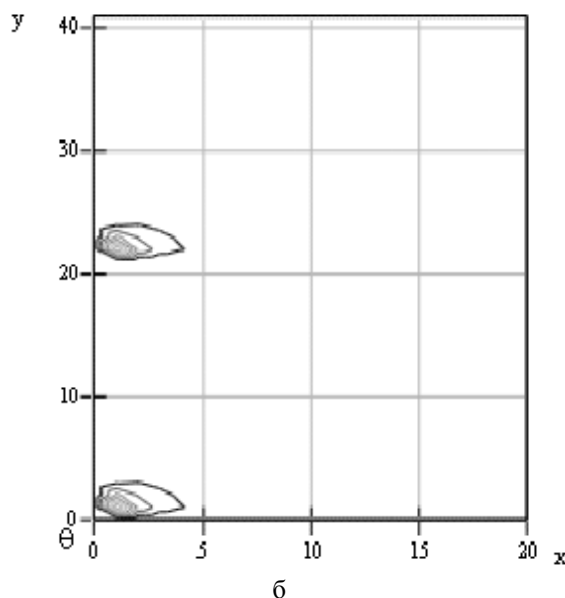
Числовий аналіз показує, що оптимальною точкою щодо розміщення ТЧЕ є поверхня валика, де температура досягає максимального значення, але з метою протидії зношуванню ТЧЕ цю поверхню не використовують.

Можна помітити, що характер проникнення температури вглиб тіла є більш плавним, ніж вздовж циліндричної поверхні валика.

Температура зростає від  $T_0$  до максимального значення за умови досягнення часу значення, яке характеризується співвідношенням  $t = R^2 / 6\kappa$ , і повільно спадає знову до  $T_0$ .



а



б

Рис. 1. Графік зміни температури (2 періоди): а – при прикладанні миттєвого джерела тепла в момент проходження через точку контакту ТЧЕ-валик у безрозмірних координатах; б – карта ізотерм

Для досягнення високої чутливості ТП потрібна перш за все висока роздільна здатність обмеження у часі, оскільки процес швидко згасає. Необхідно, щоб ТП розрізняв покази двох інтервалів тривалістю принаймні на порядок менші за  $t$

$$\Delta t = \frac{1}{10} \cdot \frac{\delta^2}{6\kappa}. \quad (2)$$

де  $\delta$  – товщина ободу валика чи відстань від поверхні валика до ТЧЕ

Зчитування показів ТП необхідно проводити із запізненням в часі згідно із співвідношенням (2) після проходження зони ТЧЕ з валиком контакту на кут, який описується наступною залежністю:

$\alpha = \omega \delta^2 / (6\kappa)$ , де  $\alpha$  рад) – кут «затримки» ТП, що характеризує кут між точкою контакту ТП з рухомих тілом та точкою на ТП, де відбувається вимірювання та зчитування показів;  $v$  (м/с) – лінійна швидкість руху тіла відносно обертового ТП.

Отже, кут «затримки» моменту вимірювання температури прямо пропорційно залежить від швидкості руху тіла та квадрату відстані від поверхні до ТП та обернено пропорційний коефіцієнту температуропровідності. Формула для визначення параметра  $\Delta t$  справедлива для великих швидкостей обертання і малого радіусу ТП, коли контакт можна вважати точковим і миттєвим [15].

В результаті виконаних досліджень запропоновано низку пристроїв, які дозволяють реєструвати температуру валика в точці його контакту з контрольованою поверхнею [12].

На рис. 2 представлена схема пристрою для вимірювання температури рухомих поверхонь з магнітним ТЧЕ.

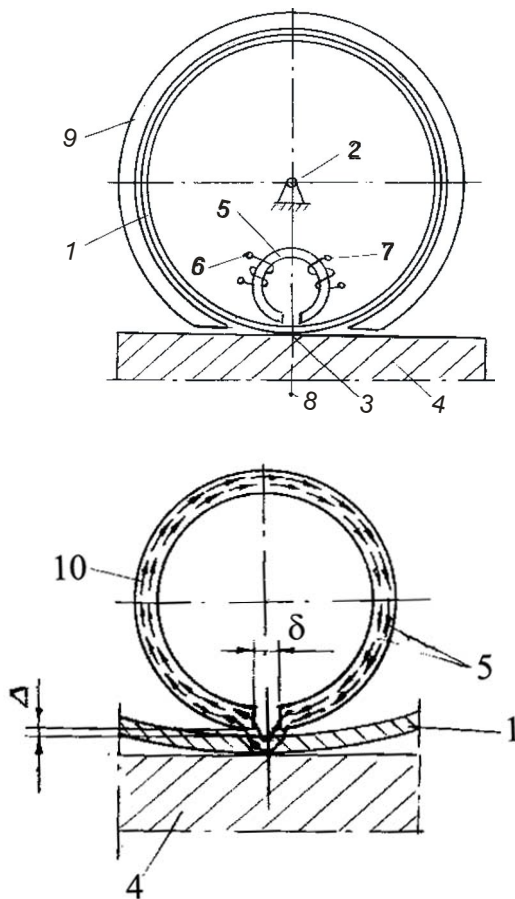


Рис. 2. Пристрій для вимірювання температури рухомої поверхні з магнітними ТЧЕ:  
1 – ТЧЕ; 2 – центр; 3 – точка контакту;  
4 – досліджувана поверхня; 5 – магнітопровід;  
6, 7 – обмотки; 8 – вісь симетрії магнітопроводу;  
9 – тепловий екран;  $\Delta$  – зазор між магнітопроводом і кільцевим ТЧЕ;  
 $\delta$  – величина розрізу магнітопроводу

Постійний контакт валика з контрольованою поверхнею приводять до наведення в ньому температури, близької до температури поверхні і лише в точці контакту температура круглого валика та поверхні однакова. Запропоноване виконання ТП у вигляді валика усуває можливість наведення по товщині його стінки температурного градієнта, тобто температура його зовнішньої та внутрішньої циліндричних поверхонь, що знаходяться на одному радіусі, однакова. При русі поверхні 4 контактуючий з нею циліндричний ТЧЕ 1 виконаний із термомагнітного матеріалу розігривається. Його температура відрізняється від температури рухомої поверхні і рівна температурі повітря, що знаходиться під теплоізоляційним екраном 9. І лише в зоні контакту, тобто в точці 3 та неподалік неї, внаслідок підвищеної теплопровідності термомагнітного матеріалу (коефіцієнт теплопровідності  $\lambda=58$  Вт/м град.), температура циліндра 1 стає рівною температурі поверхні 4. Таким чином, ТЧЕ, закріплені на внутрішній поверхні валика, по чергово проходячи через окіл точки контакту з контрольованою поверхнею, будуть фіксувати її температуру. Внутрішнє розміщення ТЧЕ запобігає їх механічному зношуванню. В деяких випадках вдається внести поправку в результати вимірювання, з тим щоб перерахувати виміряне значення температури до реального, зниження інерційності ТП шляхом вибору конструктивного рішення та регулювання або уніфікації поправок до результатів вимірювання шляхом керування параметрами моделі ТП. Магнітні силові лінії 10, які наводяться в магнітопроводі 5 давача, являються замкнутими, причому замикання в місці вирізу циліндричного магнітопроводу 5 здійсниться через ділянку термомагнітного циліндра 1, котра контактує з дослідною поверхнею 4. Таким чином, давач фіксує температуру циліндра 1 в зоні в якій вона рівна температурі поверхні 4.

Для практичної реалізації описаного явища необхідно, щоб співвідношення між вирізом  $\delta$  та зазором  $\delta_1$  описувалось нерівністю  $\delta > \delta_1$ , тільки в цьому випадку магнітні силові лінії будуть замикаються, проходячи ТЧЕ.

З іншого боку, замикання силових ліній повинно здійснюватись в місці контакту термочутливого елемента з дослідною поверхнею. Але, оскільки контакт здійснюється по безмежно малій площадці (в точці 3), то величина зазору  $\delta$  – повинна мати мінімально можливе значення. Враховуючи вище викладене для термочутливого елемента з внутрішнім діаметром 30-60 мм, значення вирізу  $\delta$  та зазору  $\delta_1$  повинні знаходитись в таких границях:

$$\delta = 1..1,5; \quad \delta_1 = 0,01..0,1.$$

При збільшенні вирізу  $\delta$  знижується точність пристрою, оскільки в цьому випадку збільшується довжина ділянки термочутливого елемента, через який замикаються магнітні силові лінії і він стає більшим площиною контакту.

Недотримання залежності  $\delta > \delta_1$  приводить до того, що магнітні силові лінії не проходять через термочутливий елемент, а замикаються через виріз  $\delta$ .

Пристрій дозволяє реєструвати магнітну проникливість термочутливого елемента в точці контакту його з контрольованою поверхнею або з деяким запізненням, якщо це необхідно для встановлення кута «затримки» моменту вимірювання температури. Таке встановлення забезпечується конструктивним виконанням та розміщенням магнітопроводу.

Магнітні силові лінії, що наводяться в магнітопроводі давача, являються замкнутими. Їх замикання в місці вирізу кільцевого магнітопроводу здійснюється через ділянку циліндричного термочутливого елемента, оскільки величина зазору, з яким встановлено магнітопровід по відношенню до циліндричного термочутливого елемента, менша від розміру вирізу виконаного в кільці магнітопроводу.

Крім цього, магнітопровід встановлено так, що точка контакту циліндричного термочутливого елемента з дослідною поверхнею знаходиться в зоні, через яку замикаються його магнітні силові лінії, таким чином, пристрій фіксує температуру термочутливого елемента в зоні, в якій вона рівна температурі піддослідної поверхні.

Отже, пристрій дозволяє реєструвати температуру валика в точці його контакту з контрольованою поверхнею або з певним запізненням. Постійний контакт валика з контрольованою поверхнею приводять до наведення в ньому температури, близької до температури поверхні і лише в точці контакту температура круглого валика та поверхні однакова.

Запропоноване виконання валика усуває можливість наведення по товщині його стійки температурного градієнта, тобто температура його зовнішньої та внутрішньої циліндричних поверхонь, що знаходяться на одному радіусі, однакова.

Таким чином, термочутливі елементи, закріплені на внутрішній поверхні валика, по чергово проходячи через окіл точки контакту з контрольованою поверхнею, будуть фіксувати її температуру. Внутрішнє розміщення ТЧЕ запобігає їх механічному зношуванню

## Висновки

При вимірюванні температури об'єктів, що здійснюють обертальний рух можуть бути викори-

стані ТП з внутрішніми або зовнішніми термочутливими елементами.

На основі проведених досліджень встановлені закономірності зв'язку температури ділянок контакту ТП і поверхонь дослідних об'єктів з температурою внутрішніх точок ТП.

Отримано співвідношення, які пов'язують швидкість руху термочутливого елемента і момент досягнення максимуму температури у його внутрішніх точках, що дозволяє збільшити порогову чутливість ТП та його точність.

На основі цих же співвідношень для кожного конкретного прикладу може бути отримане значення кута відставання зняття показів з контактної кільця в залежності від швидкості обертання. Виміряна у цей момент температура термочутливого елемента може бути перерахована до температури поверхні рухомого дослідного об'єкта.

## Список літератури

1. Ванкевич П.І. Основи розрахунку та побудови засобів контактної термометрії для теплової діагностики рухомих об'єктів технічних систем [Текст] / П.І. Ванкевич // Транспортна академія України: 20 років (1992 – 2012). – К. : НТУ, 2012. – С. 141-156.
2. Ванкевич П.І. Дослідження особливостей розповсюдження тепла в рухомому матеріальному середовищі [Текст] // П.І. Ванкевич, І.О. Ніщенко, І.П. Курітнік // Вісн. Львів. держ. аграр. ун-ту : Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2007. – № 8. – С. 69-75.
3. Ванкевич П.І. Дослідження процесів теплообміну при контактному вимірюванні температури рухомої поверхні [Текст] / П.І. Ванкевич // Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia nr 2. Seria : TRANSPORT, RZESOW. – 2011. – P. 113-120. – іноземне періодичне видання.
4. Ванкевич П.І. Математичний опис процедури вимірювання температури рухомих об'єктів [Текст] / П.І. Ванкевич, В.І. Асташкін, С.Г. Іванік // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького. – 2009. – Т. 11. – № 2(41), частина 5. – С. 15-19.
5. Ванкевич П.І. Моделювання та розрахунок термометричних систем на основі рівнянь математичної фізики [Текст] / П.І. Ванкевич // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. – 2012. – Вип. 20. – С. 37-45.
6. Ванкевич П.І. Моделювання умов теплообміну між контактними термоперетворювачами та дослідними поверхнями [Текст] / П.І. Ванкевич // Вісн. Львів. держ. аграр. ун-ту : Агроінженерні дослідження. – 2006. – № 10. – С. 369-373.
7. Ванкевич П.І. Розрахунок температурних полів в рухомих складниках вимірювальних термометричних систем [Текст] / П.І. Ванкевич // Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia nr 3. Seria : TRANSPORT, RZESOW. – 2012. – P. 301-310. – іноземне періодичне видання.
8. Ванкевич П.І. Розрахунок коефіцієнтів впливу на похибку мінливих значень вхідних параметрів обертових контактних термоперетворювачів [Текст] / П.І. Ванкевич // Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia nr 4. Seria : TRANSPORT,

RZESOW. – 2013. – P.413-420. – Іноземне періодичне видання.

9. Ванкевич П.І. Розрахунок методичної похибки обертюваних контактних термоперетворювачів (ТП) при вимірюванні температури рухомих об'єктів [Текст] / П.І. Ванкевич // Вісник Академії сухопутних військ. Військово-технічний збірник. – 2012. – Вип. 1(6). – С. 15-18.

10. Ванкевич П.І. Аналіз методів контактної термометрії рухомих об'єктів [Текст] / П.І. Ванкевич // ЦНДІ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗСУ. Тези доповідей на 2-й науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України», Київ 13-22 грудня 2011 р. – С. 92-93

11. Ванкевич П.І. Фізичні основи приладів контролю температурних параметрів [Текст] / П.І. Ванкевич // ЦНДІ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗСУ. Тези доповідей на 3-й науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України», Київ 13-22 грудня 2012 р. – С. 93-94

12. Деклараційний пат. на винахід № 31523 А Україна, МПК G01K13/04, G01K13/08. Пристрій для вимірювання температури рухомої поверхні [Текст] / П.І. Ванкевич, І. П. Курітнік; заявник та власник пат. Ужгородський державний університет, Державний університет «Львівська політехніка» – № 98094545; заявл. 22.09.1998; опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7. – 3 с.

13. Ванкевич П.І. Підбір оптимальних трибологічних характеристик матеріалів у приладах контролю температури рухомих об'єктів [Текст] / П.І. Ванкевич // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 3. – С. 114-117.

14. Ванкевич П.І. Оптимізація параметрів рухомих контактних термоелектричних перетворювачів [Текст] / П.І. Ванкевич, О.М. Бурнаєв // Вісн. Львів. держ. аграр. ун-ту: Агроінженерні дослідження. – 2005. – № 9. – С. 377-385.

15. Ванкевич П.І. Шляхи підвищення точності рухомих контактних термоперетворювачів [Текст] / П.І. Ванкевич, О.М. Бурнаєв // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2001. – Вип. 58. – С. 83-90.

16. Інженерія агропромислового виробництва у вимірах бережливості: Колективна монографія [Текст] / За ред. О.Д. Семковича та ін. – Львів: Львів. держ. аграр. університет, 2006. – 318 с.

17. Карслоу Г. Теплопроводность твёрдых тел [Текст] / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

18. Хантер Н. Контактная задача качения жесткого цилиндра по вязко-упругому полупространству [Текст] / Н. Хантер // Прикладная механика. – М.: Мир, 1961. – Т. 28, № 4. – С. 146-153.

19. Яковлев М.Ю. Теоретические аспекты вопроса об установлении межповерочных интервалов средств измерительной техники / М.Ю. Яковлев // Зб. наук. пр. НТУ «ХПИ». – 2005. – Вип. 24. – С. 257-261.

20. Vankevych P.I. Selection of optimal tribological characteristics of materials in devices for checking temperature of moving objects / P.I. Vankevych // Materials Science. – November 2013. – Vol. 49, Is. 3. – P. 408-412.

Надійшла до редколегії 4.03.2016

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. І.М. Болеста, Львівський національний університет ім. І. Франка, Львів.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ КОНТАКТНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ С МАГНИТНЫМИ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

П.И. Ванкевич

Разработана модель процесса измерений температуры объектов, осуществляющих вращательное движение. На основе выполненных исследований установлены закономерности взаимосвязи температуры участков контакта ТП и поверхностей исследуемых объектов с температурой внутренних точек ТП. Получены соотношения, связывающие скорость движения ТП и момент достижения максимума температуры в его внутренних точках, что позволяет увеличить пороговую чувствительность ТП и его точность. На основе этих соотношений для каждого конкретного рабочего режима можно получать значение угла отставания снятия показаний с контактного кольца в зависимости от скорости вращения. Измеренная в этот момент температура ТЧЭ может быть пересчитана к температуре поверхности движущегося исследуемого объекта.

**Ключевые слова:** оптимизация, движущиеся контактные средства измерения температуры, магнитные термочувствительные элементы, контрольно-измерительные системы, военно-технические комплексы.

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF MOVING CONTACT DEVICE MEASURING TEMPERATURE WITH MAGNETIC THERMOSENSITIVE ELEMENTS FOR MODERNIZATION OF CONTROL-MEASURING SYSTEMS OF MILITARY-TECHNICAL COMPLEX

P.I. Vankevych

Model is designed process temperature measurement objects, which realize rotating movement. On the basis of acting research be formed conformity with temperature plots of thermotransformation (TT) and contact surfaces of objects with temperature of internal point of TT. Is made the correlations which connect velocity movement TT and achievements point maximum temperature in the inner points, something zoom allows rapid sensory TT and his accuracy. Based on this dependence for any specific mode can be value of angle late taking from contact ring in dependence from velocity rotation. Taking in this time temperature of thermosensitive elements can be recalculation to a temperature surface moving investigated object.

**Keywords:** optimization, moving contact devices of temperature measuring, magnetic thermosensitive elements, control-measuring systems, military technical complex.