

Определение аппроксимирующих функций сопротивления воздуха движению снаряда, нелинейных относительно оцениваемых параметров

С.В. Бондаренко, Ю.Н. Косовцов, В.И. Грабчак

В статье рассмотрен подход определения аппроксимирующих функций сопротивления снаряда, нелинейных относительно оцениваемых параметров, построенный на точных (прямых) методах решения системы линейных уравнений, что позволяет использовать метод наименьших квадратов для определения параметров аппроксимирующей функции.

Ключевые слова: аппроксимация, функция сопротивления снаряда, метод наименьших квадратов, функция Гаусса, полином второго порядка, система алгебраических уравнений.

Definition of approximating functions of air resistance to the projectile movement, non-linear relatively to evaluated parameters

S. Bondarenko, Y. Kosovtsov, V. Hrabchak

The article considers the approach to definition of approximating functions of air resistance to the projectile movement, non-linear relatively to evaluated parameters, built on accurate (straight) methods of linear equations solution, which allows to use the method of the smallest squares to define the parameters of approximating function.

Key words: approximating function, projectile resistance function, method of the smallest squares, Gauss function, second order polynomial, algebraic equation system.

УДК 551.501.822

П.І. Ванкевич, Є.Г. Іваник

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ КОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Запропоновано методику розрахунку теплових параметрів засобів контактної термометрії, які відтворюють траєкторії руху досліджуваних об'єктів складних технічних систем озброєння різноманітного призначення. Отримано аналітичні залежності, що характеризують особливості процесів теплоперенесення, з допомогою яких виконано кількісну оцінку параметрів термоперетворювачів. Розроблена методика дозволяє мінімізувати тривалість перехідного режиму процесу теплопровідності в засобах контактної термометрії, що безпосередньо має вплив на похибку показів датчиків температури.

Ключові слова: вимірювання температури, тепловий потік, теплообмін, розподіл температури, теплопровідність, термоперетворювачі, траєкторія руху досліджуваних об'єктів.

Вступ

Першочергове завдання підтримання в належному стані Збройних Сил полягає в їх оснащенні військовою технікою різноманітного призначення, процес експлуатації якої передбачає неухильне підтримання встановленого рівня готовності і надійності. Ускладнення конструкцій обумовлює збільшення різноманітності складових (вузлів, блоків) згідно з особливостями фізико-хімічних процесів, характеру і рівня зовнішніх впливів та їх перебіг в реальних умовах експлуатації. Цілком достовірним джерелом

інформації про тепловий стан теплонапружених об'єктів складних технічних систем є прямі чи побічні вимірювання параметрів, які визначають протікання теплових процесів. Методи вимірювань відрізняються великою різноманітністю, залежать від постановки задачі, габаритних розмірів моделі або натурального відтворення, доступності зон вимірювань, способів теплоперенесення тощо.

Сучасні складні системи машинобудування за своїм конструктивним виготовленням передбачають наявність рухомих інженерних складових, теплове діагностування яких не може здійснюватись відомими засобами

температурних вимірювань із контактними термоперетворювачами (ТП), стаціонарно розташованими зовні рухомого дослідного об'єкта, або засобами ТП, які нерухомо закріплено на їх поверхні чи вмонтовано в товщі об'єму. До таких інженерних конструкцій відносяться рухомі ланки цілого ряду технічних систем, які мають назву обертових теплових агрегатів. Вони 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, й зазнають впливу зовнішнього агресивного середовища [1–4]. Вимірювання температури таких рухомих об'єктів не може бути здійснене відомими традиційними методами, а лише за допомогою діагностичних пристроїв із рухомими контактними ТП. Ці пристрої мають складну конструкцію, яка забезпечує безпосередній контакт та рух ТП з рухомими поверхнями дослідних об'єктів. Конструктивно вмонтовані в діагностичні засоби ТП, протягом певного проміжку часу контактуючи з поверхнями дослідних об'єктів, частково чи повністю відслідковують їх траєкторію руху або здійснюють обертальний рух навколо власної осі симетрії [5].

Огляд сучасних систем теплової діагностики технічних систем та аналіз досліджень і публікацій. Детальний аналіз питань, пов'язаних з вимірюванням температури, теплових потоків та інших параметрів, які визначають основні фактори теплофізичного експерименту, відображено в праці [6]. Методи діагностичних вимірювань ґрунтуються на забезпеченні безпосереднього контакту між ТП та рухомою дослідною поверхнею протягом обмеженого проміжку часу [7–9]. За цей час ТП повинен набути температури, рівної температурі дослідної поверхні, перетворити її в інформативний, корисний сигнал і передати до вимірювальної апаратури [10]. В зв'язку з цим дослідження мають бути спрямовані на розробку напрямів інтенсифікації процесу розігріву ТП з метою розширення функціональних можливостей та конструктивного вдосконалення засобів діагностування [9, 10]. Відомі результати досліджень, відображені в низці праць [6–10], показали, що для забезпечення безпосереднього контакту ТП з рухомою дослідною поверхнею використовуються конструктивно складні електромеханічні системи спряження, які негативно впливають на надійність діагностичних пристроїв і надійність вимірювань в цілому [8, 9]. Система вимірювань температури з використанням ТП, що відтворюють траєкторії руху дослідних об'єктів, є частковим випадком загальної системи контактної термометрії рухомих об'єктів. В даному конкретному випадку ми маємо систему з твердотільним проміжним агентом, вибір якого диктується тим, що необхідно забезпечити надійний короткочасний тепловий контакт між термочутливим елементом (ТЧЕ) і поверхнею

дослідного об'єкта, а також володіти мінімальною тепловою інерційністю та здатністю захисту ТЧЕ від хімічного впливу і абразивного зношування [9].

Метою статті визначимо узагальнення наявного теоретико-експериментального матеріалу з вирішення задач, пов'язаних з дослідженням теплових процесів, що мають місце при контактному вимірюванні температури рухомих твердотільних об'єктів, та розробку віртуальної моделі ТП для короткотермінових контактних замірів температури.

Виклад основного матеріалу

У досліджуваному випадку процеси контролю температури здійснюються періодично впродовж заданих проміжків часу. ТП розміщені з певним кроком на нескінченному пружному елементі, почергово входять в контакт з досліджуваним об'єктом і рухаються в кінематичній системі як єдине ціле. Протягом часу між двома послідовними циклами вимірювання ТП відривається від дослідної поверхні і займає положення для наступного вимірювання. Математичне дослідження такої схеми пов'язане з труднощами знаходження контактних умов між досліджуваним об'єктом та ТП.

Розглянемо теплові впливи, які мають місце і визначають умови теплообміну і покази ТП, являючись вхідним параметром. Основними тепловими впливами при короткотерміновому контакті ТП з дослідною поверхнею є наступні:

- тепловий потік від дослідної поверхні;
- теплообмін між ТП і дослідною поверхнею;
- тепловий потік через термоперетворювач;
- теплообмін між ТП і зовнішнім середовищем.

Тепловий потік від дослідної поверхні є корисним, інформативним параметром вхідного сигналу, всі інші теплові впливи приводять до виникнення неінформативного параметра вхідного сигналу і до відхилення показників ТП від температури дослідної поверхні, становлячи тим самим джерело виникнення похибки.

Узагальнюючи шкідливі теплові впливи, зведемо їх до двох основних причин, які негативно впливають на точність вимірювання температури поверхневими контактними ТП.

Перша причина полягає в спотворенні ТП теплового потоку, що передається від дослідної поверхні в зовнішнє середовище. Це може викликати як перегрів зони контакту при обладнанні ТП теплоізоляційними властивостями, так і охолодження, якщо до вимірюваної поверхні підводиться недостатня кількість енергії, це може бути справедливо лише для неметалевих поверхонь [10]. Друга причина полягає в складності забезпечення надійного контакту між поверхнею і ТП. Навіть зовсім незначні повітряні зазори між, на перший погляд, гладкими поверхнями ТП і об'єкта матимуть в зв'язку з низькою теплопровідністю повітря, негативні впливи на температуру.

Перша причина практично не впливає на точність вимірювань, якщо об'єктом вимірювань є металева поверхня, до якої підводиться достатня кількість енергії, тому контакт з нею незначною за розмірами ТП не приводить до спотворення теплового потоку.

При вимірюванні температури негладких металевих поверхонь, тобто поверхонь з нерівностями, виступами, вм'ятинами, друга причина має ще більшу актуальність, оскільки крім зниження точності через тепловий опір між ТП і поверхнею зростає час прогріву ТП, точніше, зростає його показник теплової інерції.

Зниження інерційності і підвищення точності можна досягти за рахунок певного конструктивного виконання ТП [8–10]. Так, значного підвищення точності можна досягти, якщо ТЧЕ контактує з дослідною поверхнею за допомогою металевої пластини, наявність якої обумовлено наступними аргументами:

- маючи більшу площу, пластина відбирає більше теплоти від дослідної поверхні, тобто дозволяє інтенсифікувати процес теплообміну між ТП і дослідною поверхнею;
- при виконанні пластини із матеріалів з підвищеним значенням коефіцієнта теплопровідності, а також з відповідними пружно-деформівними характеристиками, вона займає конфігурацію дослідної поверхні, зменшуючи прогарки середовища, що також інтенсифікує процес прогрівання ТП;
- захищає ТЧЕ від механічного зношення, а також абразивного і хімічного впливу гріючого середовища, таким чином, пластина є обов'язковою і невід'ємною складовою ТП.

Враховуючи вищевикладене, пропонується віртуальна модель ТП для короткотермінових контактних замірів температури. Геометрична частина віртуальної моделі має вигляд системи, яка складається із пластини 1 і ТЧЕ 2, розміщеного на пластині 1, яка з одного боку контактує з гріючим середовищем, тобто з дослідною поверхнею 3, а з іншого – із проміжним середовищем

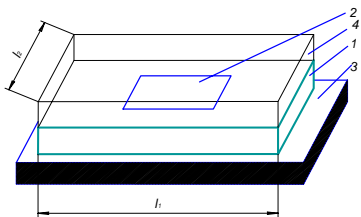


Рис. 1. Геометрична модель ТП

Пластина 2 має наступні параметри: товщину δ_1 , довжину l_1 та ширину l_2 , причому параметр δ_1 незначний в порівнянні з параметром l_1 та l_2 . Геометричні параметри ТЧЕ 2 порівняно з параметрами пластини 1 на порядок менші. В якості ТЧЕ може бути використано будь-який первинний термоелектричний чи перетворювач опору у вигляді пластини, спіралі чи іншої конфігурації.

При розробці математичної частини моделі прийняті наступні припущення: через ТП проходить рівномірний тепловий потік, який викликає однорідне температурне поле вздовж осей OX і OZ та неоднорідне температурне поле вздовж осі OY ; між ТЧЕ і пластиною має місце ідеальний тепловий контакт, тобто температура ТЧЕ рівна температурі поверхні пластини, яка примикає до проміжного середовища 4; теплообмін між пластиною 1 та дослідною поверхнею 3, а також між пластиною 2 і проміжним середовищем 4 відбувається відповідно із законом Фур'є.

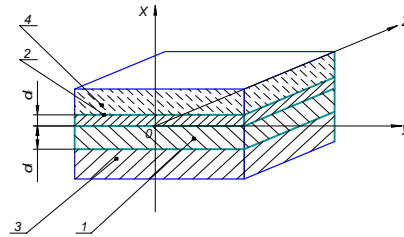


Рис. 2. Елемент ТП

Аналізуючи геометричну частину моделі і беручи до уваги прийняті припущення, диференціальне рівняння теплопровідності для кожної із складових ТП набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} &= c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t}, \quad -\delta_1 \leq x \leq 0, \\ \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} &= c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq \delta_2; \end{aligned} \quad (1)$$

граничні і початкові умови:

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \alpha_1 (T_1 - T_{1c}) = 0, & x = -\delta_1, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_2 (T_2 - T_{2c}) = 0, & x = \delta_2, \\ T_1 = T_2, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, & x = 0, \\ T_1 = T_2, & t = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності; c_1, c_2 – об'ємні теплоємності матеріалів пластин; α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі; $T_{1c} = \text{const}$, $T_{2c} = \text{const}$ – температури омиваючих поверхонь; t – час.

Розв'язок крайової задачі (1), (2) будується з використанням інтегрального перетворення Лапласа по часу t ; при переході від зображень до оригіналів використовувалась теорема розкладу [11].

Отже, розподіл температури в пластинах у будь-який момент часу можна подати як суму стаціонарної та нестаціонарної частин

$T_1(\eta, \tau) = T_{1s}(\eta) + T_{1t}(\eta, \tau)$, $T_2(\eta, \tau) = T_{2s}(\eta) + T_{2t}(\eta, \tau)$, які описуються відповідно співвідношеннями:

стаціонарна частина розв'язку

$$\begin{cases} T_{1s}(\eta) = \frac{H_1 T_{1c}(1+H_2) + \beta H_2 T_{2c}(1-H_1 b)}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)} + \\ + \frac{\beta H_1 H_2 (T_{2c} - T_{1c}) \eta}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)}; \\ T_{2s}(\eta) = \frac{H_1 T_{1c}(1+H_2) + \beta H_2 T_{2c}(1-H_1 b)}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)} + \\ + \frac{H_1 H_2 (T_{2c} - T_{1c}) \eta}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)}; \end{cases} \quad (3)$$

нестационарна частина розв'язку

$$\begin{aligned} T_{1r}(\eta, \tau) &= H_1(T_{1c} - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha \mu_n \cos(\alpha \mu_n) + H_2 \sin(\alpha \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta_3(\mu_n)} \cos(\mu_n \eta) + \right. \\ &+ \left. \frac{\alpha \mu_n \sin(\alpha \mu_n) - H_2 \cos(\alpha \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta_3(\mu_n)} \alpha \beta \sin(\mu_n \eta) \right) e^{-\mu_n^2 \tau} + \\ &+ H_2(T_{2c} - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\mu_n \cos(b \mu_n) + H_1 \sin(b \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta(\mu_n)} \alpha \beta \cos(\mu_n \eta) + \right. \\ &+ \left. \frac{\mu_n \sin(b \mu_n) + H_1 \cos(b \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta(\mu_n)} \alpha \beta \sin(\mu_n \eta) \right) e^{-\mu_n^2 \tau}; \quad (4) \\ T_{2r}(\eta, \tau) &= H_1(T_{1c} - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha \mu_n \cos(\alpha \mu_n) + H_1 \sin(\alpha \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta(\mu_n)} \cos(\mu_n \eta) + \right. \\ &+ \left. \frac{\alpha \mu_n \sin(\alpha \mu_n) - H_2 \cos(\alpha \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta(\mu_n)} \sin(\mu_n \eta) \right) e^{-\mu_n^2 \tau} + \\ &+ H_2(T_{2c} - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\mu_n \cos(b \mu_n) + H_1 \sin(b \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta(\mu_n)} \alpha \beta \cos(\mu_n \eta) + \right. \\ &+ \left. \frac{\alpha \mu_n \sin(b \mu_n) + H_1 \cos(b \mu_n)}{\mu_n^3 \Delta(\mu_n)} \sin(\mu_n \eta) \right) e^{-\mu_n^2 \tau}. \end{aligned}$$

У залежностях (3), (4) позначено:

$$\begin{aligned} x &= \delta_2 \eta \quad (b \leq \eta \leq 1); \quad b = -\frac{\delta_1}{\delta_2}; \quad t = \frac{c_1 \delta_2^2}{\lambda_1} \tau \\ (0 \leq \tau < \infty); \quad \alpha^2 &= \frac{c_2 \lambda_1}{c_1 \lambda_2}; \quad H_1 = \frac{\alpha_1 \delta_2}{\lambda_1}; \quad H_2 = \frac{\alpha_2 \delta_2}{\lambda_2}; \\ \beta &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad \Delta_3(\mu) = \\ &= \frac{\cos(b\mu) \cos(\alpha\mu)}{2} \left(\left((1-bH_1) \frac{\operatorname{tg}(b\mu)}{\mu} + b \right) (\alpha\mu + H_2 \operatorname{tg}(\alpha\mu)) - \right. \\ &- (H_1 + \mu \operatorname{tg}(b\mu)) \left(\alpha^2 \operatorname{tg}(\alpha\mu) - \frac{\alpha + \alpha H_1}{\mu} \right) - \\ &- \alpha \beta \left(b \operatorname{tg}(b\mu) - \frac{1-bH_1}{\mu} \right) (H_2 - \alpha \mu \operatorname{tg}(\alpha\mu)) - \\ &- \left. \left. \alpha \beta (\mu - H_1 \operatorname{tg}(b\mu)) \left((\alpha + \alpha H_2) \frac{\operatorname{tg}(\alpha\mu)}{\mu} + \alpha^2 \right) \right) \right); \end{aligned}$$

μ_n – корені трансцендентного рівняння

$$(H_1 + \mu \operatorname{tg}(b\mu)) (\alpha\mu + H_2 \operatorname{tg}(\alpha\mu)) +$$

$$+ \alpha \beta (\mu - H_1 \operatorname{tg}(b\mu)) (H_2 - \alpha \mu \operatorname{tg}(\alpha\mu)) = 0.$$

Отримана система залежностей (3), (4) дозволяє визначати розподіл температури в елементах ТП в довільний момент часу та моделювати процес вимірювання температури контактними перетворювачами, відображаючи суть явищ, що протікають при короткочасному контактному вимірюванні, і за допомогою певного алгоритму прогнозувати поведінку ТП при зміні тих чи інших параметрів. Іншими словами, маючи характеристики дослідної поверхні (швидкість, наявність нерівностей, виступів, вм'ятин, охолоджувальних чи змашувальних агентів), а також характеристик оточуючого середовища (температура, коефіцієнти теплообміну), розроблена модель дозволяє визначати основні геометричні і механічні характеристики ТП.

Для дослідження впливу різноманітних факторів на стаціонарну частину температурного розподілу в елементах ТП залежності (3) представлено в наступному вигляді:

$$T_{1s} = C_{11} T_{1c} + C_{12} T_{2c}, \quad T_{2s} = C_{21} T_{1c} + C_{22} T_{2c}, \quad (5)$$

$$\text{де } C_{11} = \frac{H_1(1+H_2) - \beta H_1 H_2 \eta}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)},$$

$$C_{12} = \frac{H_1(1-H_1 b) \beta + \beta H_1 H_2 \eta}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)},$$

$$C_{21} = \frac{H_1(1+H_2) - H_1 H_2 \eta}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)},$$

$$C_{22} = \frac{H_1(1-H_1 b) \beta + H_1 H_2 \eta}{H_1(1+H_2) + \beta H_2(1-H_1 b)}.$$

Результати числових розрахунків залежності параметрів $C_{ij} = f(H_1, H_2)$ в співвідношеннях (5), обраховані для фіксованих значень H_1 , проведені за допомогою обчислювального пакету MathCAD [12], наведено у вигляді графіків на рис. 3 та рис. 4. Для даного виду ТП, пластина 1, виконана з пружинної сталі товщиною 0,001 м, пластина 2 має вигляд мідного первинного перетворювача опору, товщиною 0,0005 м.

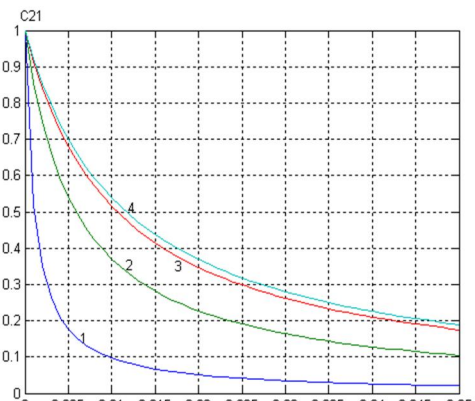


Рис. 3. Графічна залежність $C_{21}=f(H_2)$: 1 – $H_1=0,01$; 2 – $H_1=0,1$; 3 – $H_1=1$; 4 – $H_1=100$

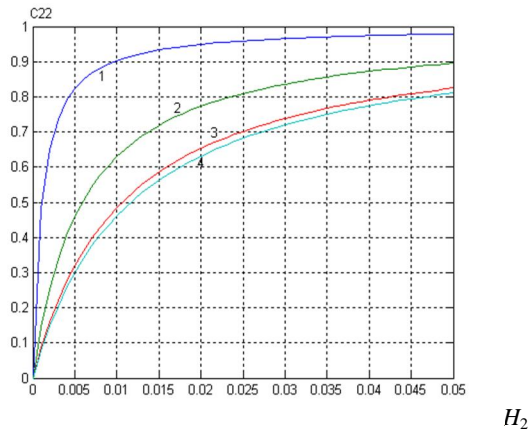


Рис. 4. Графічна залежність $C_{22}=f(H_2)$: 1 – $H_1=0,01$; 2 – $H_1=0,1$; 3 – $H_1=1$; 4 – $H_1=100$

Аналіз наведених графіків дозволяє зробити висновок, що вирішальний вплив на прогрів пластини 1 ТП мають значення критеріїв H_1 та H_2 , які характеризують теплообмін відповідно між ТП та ґрунчим середовищем, а також між ТП та зовнішнім середовищем. Ідеальним варіантом прогріву пластини 1 мав би бути випадок, за якого реалізуються умови $C_{11} \rightarrow 1$, $C_{12} \rightarrow 0$, що можна досягти в умовах теплових режимів, для яких $H_1 > 5$, $H_2 < 0,1$.

Що стосується ТЧЕ, тобто пластини 2, то для інтенсифікації її прогріву мають реалізуватись умови, за яких коефіцієнти C_{21} , C_{22} прямують до значень $C_{21} \rightarrow 1$, $C_{22} \rightarrow 0$. Із графіків видно, що ці умови реалізуються, коли $H_2 \rightarrow 0$, тобто коли зовнішня поверхня пластини 2 ТП теплоізолювана. Величина H_1 має суттєвий вплив на стаціонарний розподіл температури в ТЧЕ в діапазоні $0 < H_1 < 1$. Наступне зростання цього параметра до величини, рівній 100 (крива 4), майже не відрізняється від кривої 3, для якої $H_1 = 1$.

Для вимірювального пристрою, ТП якого лише короткочасно контактує з дослідною поверхнею, найважливішою характеристикою ТП є показник теплової інерції. Цей параметр також вдається прогнозувати з використанням залежностей (4) та коригуванням підбору відповідних матеріалів і зміни умов теплообміну між елементами ТП і дослідною поверхнею шляхом завдання відповідних критеріїв H_1 та H_2 . Для дослідження впливів різноманітних фізико-механічних і теплових параметрів на інерційність ТП представимо нестационарну частину розподілу температури у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} T_{1r}(\eta, \tau) &= (T_{1c} - T_0)B_{11} + (T_{1c} - T_0)B_{12}, \\ T_{2r}(\eta, \tau) &= (T_{1c} - T_0)B_{21} + (T_{2c} - T_0)B_{22}, \end{aligned} \right\} (6)$$

де коефіцієнти B_{ij} ($i, j = 1, 2$) представлено відповідними безмежними тригонометричними

рядями у співвідношеннях (4) по коренях наведеного трансцендентного рівняння.

Аналіз числових розрахунків за формулами (6) вказує на те, що час прогрівання ТП до виходу на стаціонарний режим не перевищуватиме сотих долей секунди.

Найоптимальніший за швидкістю процес прогріву ТП забруднених поверхонь з великою кількістю нерівностей, вм'ятин матиме місце за умови, коли значення критеріїв H_1 та H_2 прямуватимуть до наступних значень: $H_1 \rightarrow \infty$; $H_2 \rightarrow 0$, тобто між термоперетворювачем і дослідною поверхнею матиме місце ідеальний тепловий контакт, а між ТЧЕ і проміжним середовищем – теплова ізоляція.

З використанням описаної моделі проведені дослідження і на їх основі розроблені конструкції ТП для короткочасних контактних замірів температури поверхонь корпусів різноманітних обертових теплових агрегатів [13, 14], які конструктивно виконано у вигляді котлів і мають велику кількість нерівностей, вм'ятин, зварних швів тощо.

Висновки

Класифіковано теплові впливи на покази рухомих контактних ТП, з'ясовано причини їх виникнення. Пропонується модель для кількісного розрахунку температури рухомих об'єктів для випадків, коли засоби вимірювання, контактуючи з дослідними об'єктами протягом обмеженого проміжку часу, здійснюють переміщення по траєкторіях, що конгруентні траєкторіям руху об'єктів. В рамках розробленої моделі проаналізовано процеси і явища, що відбуваються при короткочасних вимірюваннях температури з урахуванням впливу на них параметрів дослідної поверхні та отримано взаємозв'язану систему рівнянь для опису процесу поширення тепла в елементах ТП. Розвинута модель дозволяє визначати основні параметри елементів ТП – геометричні і механічні характеристики пластини та проміжного середовища.

З використанням запропонованої моделі надалі можна проводити подальші дослідження, на основі яких розробляти конструкції ТП для короткочасних контактних замірів температури поверхонь корпусів різноманітних обертових теплових агрегатів, які є котловими виробами і мають велику кількість нерівностей, вм'ятин, зварних швів тощо.

Список літератури

1. Анатычук Л.Н. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.Н. Анатычук. – К.: Наук. думка, 1979. – 256 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

4. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н.А. Ярышев. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

5. Ванкевич П.І. Дослідження особливостей розповсюдження тепла в рухомому матеріальному середовищі // П.І. Ванкевич, І.О. Ніценко, І.П. Курітнік // Вісн. Львів. держ. аграр. ун-ту: Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2007. – № 8. – С. 69-75.

6. Ванкевич П.І. Дослідження процесів теплообміну при контактному вимірюванні температури рухомої поверхні / П.І. Ванкевич // Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia nr 2. Seria : TRANSPORT, RZESOW. – 2011. – P. 113-120.

7. Ванкевич П.І. Математичний опис процедури вимірювання температури рухомих об'єктів / П.І. Ванкевич, В.І. Асташкін, Є.Г. Іваник // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького. – 2009. – Т. 11. – № 2(41), частина 5. – С. 15-19.

8. Ванкевич П.І. Моделювання умов теплообміну між контактними термоперетворювачами та дослідними поверхнями / П.І. Ванкевич // Вісн. Львів. держ. аграр. ун-ту: Агроінженерні дослідження. – 2006. – № 10. – с. 369-373.

9. Ванкевич П.І. Моделювання і розрахунок процесів теплообміну в термоперетворювачах (ТП) з плинним проміжним середовищем / П.І. Ванкевич, В.І. Асташкін, Є.Г. Іваник // Проектування, виробництво та експлуатація

автотранспортних засобів та поїздів. – 2009. – № 18. – С. 43-48.

10. Ванкевич П.І. Напрями розвитку контактної термометрії рухомих об'єктів / П.І. Ванкевич // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2000. – Вип. 57. – с. 67-69.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.

12. Дьяконов В. MathCAD 2000: учебный курс / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2000. – 592 с.

13. Деклараційний пат. на винахід № 37808 А Україна, МПК G01K13/04, G01K 13/08. Пристрій для вимірювання температури рухомої поверхні / П.І. Ванкевич; заявник та власник пат. Львівський державний аграрний університет – № 2000042210; заявл. 18.04.2000; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4. – 2 с.

14. Патент на корисну модель № 24976 U Україна, МПК G01K13/00. Пристрій для вимірювання температури рухомої поверхні [Текст] / П.І. Ванкевич, І.М. Ніценко, Є.Г. Іваник; заявник та власник пат. Львівський державний аграрний університет – № u200701504; заявл. 12.02.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11. – 2 с.

Рецензент: д.т.н., доц. В.О. Фединець, Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

Моделирование тепловых процессов в системах контактного измерения температуры движущихся объектов военной техники

П.И. Ванкевич, Е.Г. Иваник

Предложена методика расчета тепловых параметров в средствах контактной термометрии, воспроизводящих траектории движения исследуемых объектов сложных технических систем вооружения различного назначения. Получены аналитические зависимости, характеризующие особенности протекания процессов теплопроводности, с помощью которых производится количественная оценка параметров термопреобразователей. Предложенная методика позволяет минимизировать продолжительность переходного режима процесса развития температурного поля в средствах контактной термометрии, что непосредственно определяет влияние на погрешность показаний датчиков температуры.

Ключевые слова: измерение температуры, тепловой поток, теплообмен, распределение температуры, теплопроводность.

Heat exchange processes modeling in systems of contacting measuring temperature of the moving objects of military technic

P. Vankevych, E. Ivanyk

The method of calculation of the thermal parameters in the media contact thermometry reproducing the path of movement of the objects of complex technical weapons systems for various purposes. Analytical dependences characterizing features of the processes of heat conduction in which is made Quantify thermocouples. The proposed method allows to minimize the duration of the transient process of the development of the temperature field in the media contact thermometry, which directly determines the effect on the error of indication of temperature sensors.

Key words: measurement of temperature, heat flow, heat transfer, temperature distribution, thermal conductivity.