

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИЛАДУ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

Галицький В. А.

1. Вступ

Значні результати в області максимально оптимального компонування елементів на стадії проектування, методологічних дослідженнях та різних розрахунково-експериментальних підходів для побудування моделі внесли вчені робіт [1, 2]. Кожна проектна модель теплового стану приладу має свої особливості та потребує в подальшому заходів щодо її вдосконалення. В праці [3] запропоновано різноманітні проектні моделі, які дозволяли визначити тепловий стан окремих елементів. Розрахунки нагріву основних елементів статора і ротора проводилися в різних режимах навантаження машини. Також було розглянуто особливості застосування розмірного аналізу для розрахунку допусків, з урахуванням експлуатаційної похибки [4, 5], що відобразило важливість використання розмірного аналізу для заданої точності та забезпечення необхідної працездатності. Незважаючи на те, що за останнє десятиліття виконано багато досліджень [6–8], залишаються питання щодо вдосконалення та аналізування процесів теплообміну приладів дистанційного вимірювання механічних величин. А також неодноразово розглянуті задачі отримання достовірних даних при проектуванні приладу [9, 10] та дослідження температурних режимів в різних умовах використання [11], що підтверджує актуальність цього напрямку. Отже, *об'єктом дослідження* є модель теплового стану приладу дистанційного вимірювання, що визначається умовами експлуатації і викликана необхідністю підтвердити функціонування приладу в навколишніх умовах згідно вимогам технічного завдання (ТЗ). Метою роботи є визначення як локальних значень температур, так і осереднених значень температури по окремим елементам конструкції. Це дозволяє оптимально компонувати елементи конструкції на етапі проектування.

2. Методика проведення досліджень

Конструкція приладу дистанційного вимірювання (ПДВ) містить наступні основні елементи: корпус приладу, три акселерометри, два гіродатчики, зовнішні кожухи, електронні пристрої під нижнім кожухом.

В моделі враховані геометричні параметри основних елементів конструкції приладу. З ціллю оптимізації розрахункової сітки при її створенні, а також зменшенні кількості контрольних об'ємів теплової моделі, були прийняті наступні допущення при моделюванні елементів приладу:

- а) в корпусі приладу відсутні отвори;
- б) в тепловій моделі приладу не враховується геометрія проводів, кріплення, плат. В той же час для дотримання теплового балансу й адекватності моделі до основних елементів приладу в математичній моделі введені додаткові

характеристики (потужність розсіювання, щільність і середня теплоємність) цих компонентів – провідів, кріплення, плат.

В математичній моделі прийняті наступні допущення:

1. Тепловиділення в акселерометрах і гіродатчиках задається рівномірно по всьому об'єму.

2. Радіаційним і конвективним теплообміном під верхньою і нижньою кришками приладу на даному етапі знехтуємо. Основним видом теплообміну всередині приладу є кондуктивний теплообмін.

3. Радіаційна температура оточуючих ПДВ конструкцій і температура навколишнього середовища завдається як функція часу.

4. Виділення теплоти в платах імітується тепловиділенням в корпусі приладу.

5. Теплообміном за рахунок теплопровідності по амортизаторам знехтуємо.

Для обліку основних особливостей теплообміну в умовах експлуатації приладу введені наступні вимоги до математичної і комп'ютерної моделі:

1. Розглядається нестационарне тривимірне температурне поле ПДВ при вільно-конвективному теплообміну зі зовнішніх поверхонь приладу.

2. Враховується радіаційний теплообмін між зовнішніми поверхнями приладу і оточуючими його конструкціями координато-вимірювальної машини.

3. Враховується закономірність зміни температури навколишнього середовища в залежності від режиму експлуатації координато-вимірювальної машини (КВМ).

Отже, розглядається нестационарний тепловий стан приладу ПДВ з урахуванням радіаційно-конвективного теплообміну зовнішніх поверхонь приладу з навколишнім середовищем, температура якої змінюється згідно задалегідь заданому закону:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v, \\ 0 < x < x_{\max}; \quad 0 < y < y_{\max}; \quad 0 < z < z_{\max}; \\ 0 < \tau < \tau_{\max}; \\ c &= c(x, y, z); \quad p = p(x, y, z); \quad \lambda = \lambda(x, y, z), \end{aligned} \tag{1}$$

де c – теплоємність;

ρ – щільність;

T – температура;

τ – час;

q_v – об'ємне тепловиділення;

λ – теплопровідність матеріалу ($\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – теплопровідність по відповідній координаті простору);

x, y, z – просторові координати ($x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$ – їх максимальне значення рівне максимальним габаритам приладу ПДВ).

Початкова умова:

$$T(x, y, z, 0) = t_0,$$

де t_0 – початкова температура.

Гранична умова на зовнішній поверхні приладу:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = a(T_f - T) + \varepsilon \sigma [T_f^4 - T^4], \quad (2)$$

$$T_f = f(\tau), \quad (3)$$

де a – коефіцієнт конвективного теплообміну; T_f – температура навколишнього середовища (повітря); ε – ступінь чорноти; σ – константа Стефана-Больцмана.

Рівняння (1) описує температурний режим елементів ПДВ, фізичні властивості яких враховуються коефіцієнтами c, p, λ . Рівняння (3) – зміни температури навколишнього середовища (газу) згідно графіку, наведеному на рис. 1.

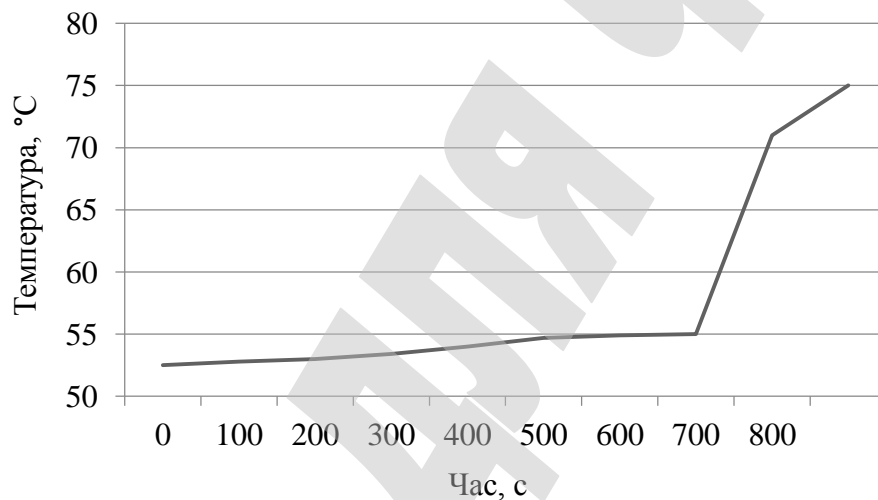


Рис. 1. Зміна температури навколишнього газу при підготовці приладу дистанційного вимірювання в координатно-вимірювальній машині

В табл. 1 представлені теплофізичні характеристики та вихідні дані по тепловиділенню в основних елементах приладу.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів, які використовуються в моделі приладу дистанційного вимірювання

Найменування компонента	Матеріал	Теплофізичні характеристики		
		λ , Вт/м·К	c , Дж/(кг·К)	ε
Корпус	Алюмінієвий сплав Д16	120	890	0,84
Акселерометр	Нержавіюча сталь	16	560	–
Гіродатчик	Нержавіюча сталь	16	560	–
Верхній кожух	Алюмінієвий сплав АМц	150	896	0,84
Нижній кожух	Алюмінієвий сплав АМц	150	896	0,84

Розглядається два варіанти температурних умов експлуатації приладу ПДВ:

Варіант 1. Початкова температура $t_{ноч} = -40$ °С; температура навколишнього середовища $t_{нав.сер.} = -40$ °С; сумарна кількість підведеного тепла $Q_{\Sigma} = 20$ Вт; час режиму підготовки ПДВ $\tau = 500$ с.

Варіант 2. Початкова температура $t_{ноч} = 50$ °С; температура навколишнього середовища $t_{нав.сер.} = f(\tau)$ °С; сумарна кількість підведеного тепла $Q_{\Sigma} = 60$ Вт в режимі роботи; час режиму підготовки й основної роботи $\tau = 800$ с.

Варіант 2. Початкова температура $t_{ноч} = 50$ °С; температура навколишнього середовища $t_{нав.сер.} = f(\tau)$ °С; сумарна кількість підведеного тепла $Q_{\Sigma} = 60$ Вт в режимі роботи; час режиму підготовки й основної роботи $\tau = 800$ с.

Фізична постановка задачі, яка описує внутрішні джерела тепла і граничні вимоги теплообміну на зовнішніх поверхнях приладу в КВМ.

Модель реалізована в програмному коді STAR-CCM на основі методу контрольних об'ємів. Метод контрольного об'єму для виведення звичайно-різницевих рівнянь аналогічний інтегральному методу, але більш фізичний по суті. Програмний код STAR-CCM відноситься до сімейства програм, які реалізують CFD (Computational Fluid Dynamic) підхід. CFD заснований на сучасних комп'ютерних технологіях, новітніх математичних моделях процесів переносу, а також ефективних і високоточних чисельних алгоритмах. CFD-моделі дозволяють прогнозувати поля температур, тиску і швидкостей газів в кожній точці простору й часу, а також поля температур влюбій точці твердих тіл, які аналізуються.

Для комп'ютерного аналізу приладу ПДВ була розроблена чисельна тривимірна модель з контрольних об'ємів. Побудована сітка враховувала особливості геометрії приладу. Крок по часу при вирішенні нестационарних задач вибирався в діапазоні 0,5–10 с, число ітерацій на кожному кроці склало 4–7.

3. Результати дослідження та обговорення

Як обумовлювалося раніше, розглядалися два варіанти температурних умов експлуатації приладу.

Варіант 1 – режим підготовки ПДВ ($\tau = 500$ с), рис. 2, 3.

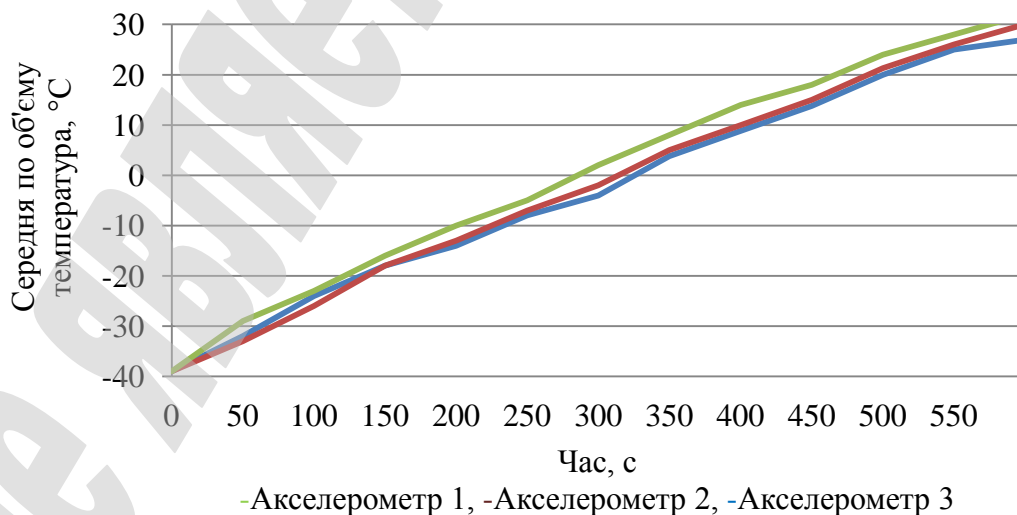


Рис. 2. Зміни середньої температури по об'єму акселерометра в часі (варіант 1)

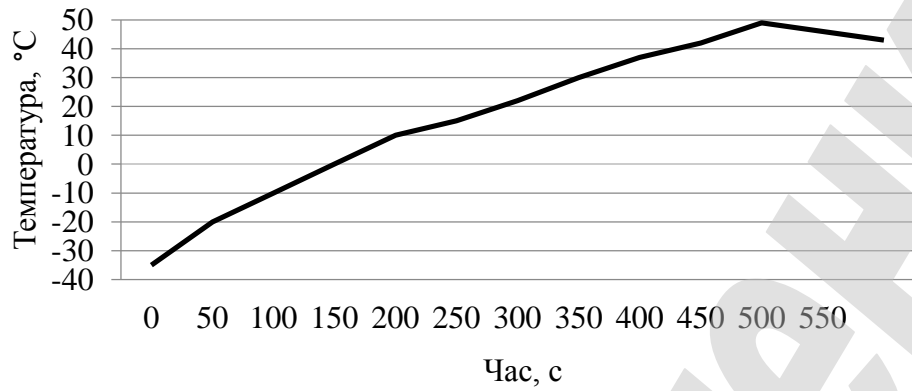


Рис. 3. Зміни середньої температури по об'єму гіродатчика в часі (варіант 1)

Варіант 2 – режим підготовки і режим основної роботи ($\tau=800$ с), рис. 4, 5.

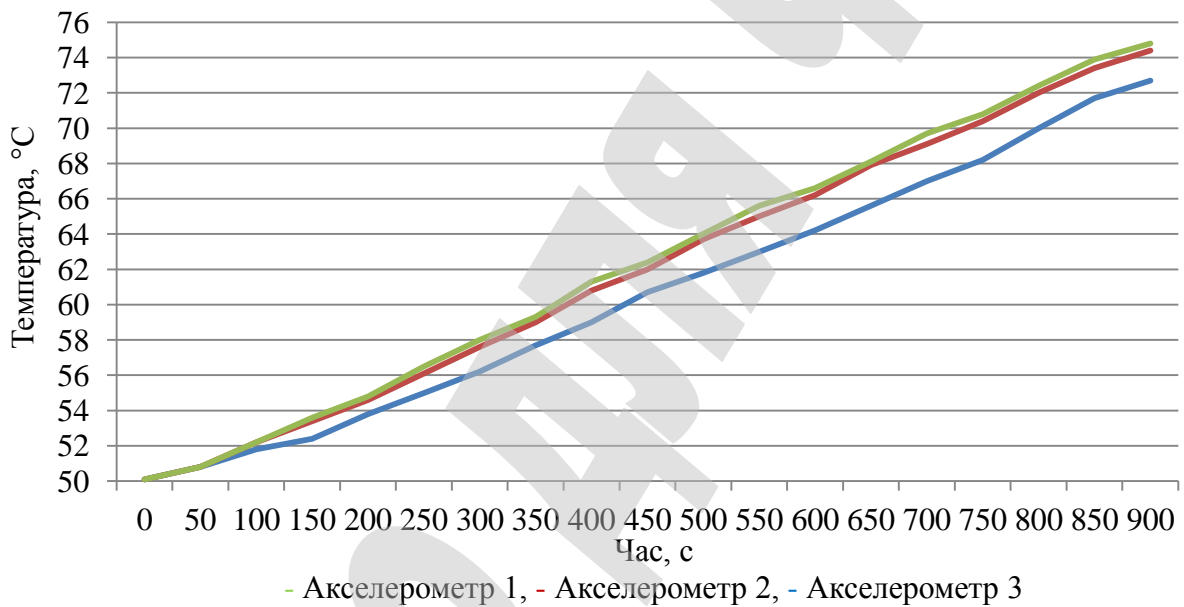


Рис. 4. Зміни середньої температури по об'єму акселерометра в часі (варіант 2)

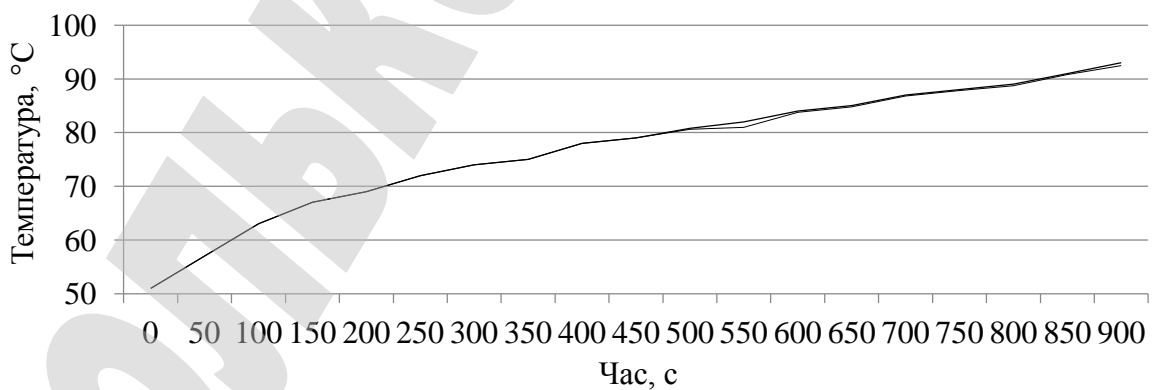


Рис. 5. Зміни середньої температури по об'єму гіродатчика в часі (варіант 2)

Наведені на рис. 1–5 температурні графіки зміни температури в часі елементів приладу ПДВ для прийнятих характерних режимів роботи дозволяють зробити наступні висновки:

1. При підготовці з навколишньою температурою газу $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура приладів гіродатчиків виходить на рівень $50\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ приблизно через 8 хв.

2. В режимі основної роботи температура приладу і елементів конструкції збільшується на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кришки кожуха), а гіродатчика на $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносно їх температури в кінці підготовки.

3. В режимі підготовки й основної роботи при температурі оточуючого газу згідно рис. 1 температура на несучих конструкціях блока електроніки не перевищує $70\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. В режимі підготовки й основної роботи максимально виділяюча потужність ПДВ у КВМ не перевищує $12\pm 2\text{ Вт}$.

4. Висновки

В ході дослідження отримана модель теплового стану, що визначається умовами експлуатації і викликана необхідністю підтвердити функціонування приладу в навколишніх умовах, та яка може бути використана для оптимальної комбінації елементів конструкції приладу дистанційного вимірювання. До складу конструкції ПДВ входили наступні елементи: корпус приладу, три акселерометри, два гіродатчики, зовнішні кожухи, електронні пристрої під нижнім кожухом. При моделюванні враховувалися геометричні параметри основних елементів конструкції приладу, що оптимізувало розрахункову сітку при її створенні, а також зменшення кількості контрольних об'ємів теплової моделі. Розроблена тепла і математична модель теплового режиму ПДВ дозволяє проводити розрахунки багатомірних полів температур елементів приладу для різних умов його експлуатації. Отримані у роботі результати дозволяють оптимально скомплектувати прилад та дослідити температурні режими в різних умовах використання.

Література

1. Бекинчис З. Н., Каспарайтис А. Ю., Куметайтис Ю. П. Новые автоматизированные координатные измерительные машины // Станки и инструмент. 1981. № 4. С. 12–15.

2. Болотов М. А., Лёзин И. А. Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно измерительных машинах // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. 2011. № 2 (26). С. 28.

3. Грубой О. П., Шофул А. К., Ключников О. О., Федоренко Г. М., Кенсичкий О. Г. Моделювання нагріву елементів статора й ротора гідрогенератора-двигуна Дністровської ГАЕС // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2012. Вип. 18. С. 77–87.

4. Прецизионные измерения в машиностроении / Брянкин С. Ю. и др. // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 5 (111). С. 48.

5. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы

роботов. М.: Наука, 1985. 343 с.

6. Coordinate measuring machine // Advanced Mathematical Tools in Metrology II. 1995. Vol. 27, Issue 45. P. 45.

7. Measuring system automatically recognizes geometric features // Modern machine shop. 1996. Vol. 69, Issue 3. P. 484.

8. Ernst M. 3D-Koordinaten – Messtechnik der Zukunft // Maschinbau. 1994. Vol. 23, Issue 12. P. 21.

9. Модестов М. Б. Исследование точности модульных головок для координатно-измерительных машин с ЧПУ // Моделирование задач машиностроения на ЭВМ. М.: Наука, 1976. С. 17–20.

10. Серков Н. А. Измерение пространственно-сложных поверхностей на координатных измерительных машинах // Станки и инструмент. 1982. № 11. С. 27–35.

11. CMM for precise operation // American machine. 1995. Vol. 139, Issue 3. P. 73.