

В.В. Самсонов , професор

О.О. Мазуренко, аспірантка

В.П. Шуліка, канд. техн. наук

Л.Й. Воробйов, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАНУ

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ «МАСІТ» ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРАЦЮЮЧОГО ГЕНЕРАТОРА

Розглянуто конструкцію, принцип дії і основні характеристики компонентів багатоканальної автоматизованої системи вимірювання температури металевих, ізоляційних деталей та охолоджуючої рідини турбогенератора. Наведено аналіз похибок вимірювання температури системою.

Ключові слова: турбогенератор, термометр опору, температура, промислова автоматика.

Одним із основних компонентів, що використовуються в процесі вироблення електричної енергії, є турбогенератор. У випадку відмови турбогенератора відбувається відключення всієї системи вироблення електроенергії, що призводить до великих економічних втрат, аварій на виробництві і навіть до людських жертв. Тому, завдання діагностування стану турбогенератора, з метою прогнозування можливої його відмови, та прийняття відповідних заходів для зменшення ваги наслідків такої відмови, є однією з першочергових.

Одним з найбільш інформативних параметрів, на яких будується система діагностики, є температурне поле працюючого генератора. Для тривалого і оперативного контролю температурного поля при роботі генератора і проведення досліджень теплових режимів розроблена програмно-апаратна багатоканальна

автоматизована система вимірювання температури «МАСІТ». Система побудована на базі уніфікованих пристроїв - промислового комп'ютера, термометрів опору, модулів аналогового вводу даних і конвертора інтерфейсів розподілених систем промислової автоматики.

Розглянемо конструкцію, принцип дії і основні технічні характеристики компонентів, на базі яких побудована система «МАСІТ».

Термометр опору. В якості перетворювачів температури в електричний сигнал застосовані термометри опору, принцип дії яких базується на залежності електричного опору металів від температури. Конструкції, основні нормовані технічні характеристики термометрів опору і методи їх випробувань вказані в стандарті [1] і довідковій літературі [2]. Для температурного діапазону -10°C до 200°C найбільш зручним типом термометра є мідний термометр опору ТСМ, так як в цьому температурному діапазоні він має лінійну залежність електричного опору R_t від температури:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t), \quad (1)$$

де R_0 – електричний опір ТСМ при 0°C ; $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$ – температурний коефіцієнт опору.

З (1) випливає формула для розрахунку температури по виміряним значенням опору:

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) = \frac{1}{\alpha} (W_t - 1)^{\circ}\text{C}, \quad (2)$$

де $W_t = \frac{R_t}{R_0}$.

У системі «МАСІТ» застосовані мідні термометри опору ТСМ виробництва АТ «Тера» (м. Чернігів) моделі 2-8а з нормованою статичною характеристикою (НСХ) 100М ($R_0 = 100$ Ом). Корпус термометра виконаний із алюмінієвого сплаву Д16, перетворювач має показник інерції 12 с і клас допуску В. Межа допустимої похибки вимірювання температури внаслідок відхилення електричного опору від НСХ для класу допуску В становить [1]:

$$\Delta t_{\text{в}} = \pm (0,25 + 0,0035|t|)^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

Область застосування даної моделі термометра опору: вимірювання температури поверхонь твердих тіл, а також, вимірювання температури в радіаторах і трубах малого діаметра. Таким чином, термометр моделі 2-8а може бути застосований для вимірювання температури як металевих та ізоляційних деталей генератора, так і охолоджуючої рідини і газу.

Модуль перетворення сигналів термометрів опору I-7015. У системі «МАСІТ» функцію перетворення значення електричного опору в цифровий код здійснюють модулі I-7015, що входять в серію I-7000 фірми ICP DAS (Тайвань). Серія I-7000 є сімейством мережевих вимірювальних і керуючих модулів, що забезпечують аналого-цифрове і цифро-аналогове перетворення, цифровий ввід / вивід, рахунок часу і подій, а також інші функції. Модулі можуть управлятися дистанційно за допомогою набору команд, який називається DCON-протоколом. Зв'язок між модулями і керуючим комп'ютером здійснюється у форматі ASCII за допомогою двонаправленого послідовного інтерфейсу RS-485.

До одного модулю I-7015 можна підключити 6 термометрів. Підключення термометрів опору можливе за 2-х або 3-х провідною схемою зі швидкістю проведення вимірювань - до 12 замірів в секунду. Електроживлення модуля здійснюється напругою постійного струму від 10 до 30 В при споживаній потужності 1,1 Вт. При використанні 100-омних мідних термометрів опору діапазон перетворюваних сигналів відповідає температурному діапазону від 0°C до 200°C , наведена відносна похибка перетворення складає $\pm 0,05\%$, дрейф зміщення нуля $0,5\text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 представлена функціональна блок-схема модуля I-7015. Для підключення кожного контрольованого термометра опору в модулі передбачена група з трьох термінальних виводів A_x , B_x і $/B_x$. Через вивід $/B_x$ контрольований термометр опору живиться вимірювальним струмом, а виводи A_x і B_x слугують для введення напруги з опору. Шість груп виводів A_0 , B_0 , $/B_0$... A_5 , B_5 , $/B_5$ послідовно комутуються аналоговим мультіплексором MUX, причому до виводів $/B_x$ підключається джерело стабілізованого вимірювального струму 200 мкА, а виводи A_x і B_x підключаються до входу аналого-цифрового перет-

ворювача ADC. Результат аналого-цифрового перетворення передається на вбудований контролер Embedded Controller, який керує всіма вузлами модуля і перетворює інформацію для передачі на інтерфейсний перетворювач RS-485 Interface. Програма роботи та, встановлені при ініціації модуля, параметри роботи зберігаються в електрично програмованому запам'ятовуючому пристрої EEPROM. Світлодіод модуля LED сигналізує про робочий стан і передачу даних. Стабілізатор напруги Power Regulator подає напругу живлення для усіх функціональних вузлів. Між інтерфейсним перетворювачем RS-485 і вбудованим контролером є оптична розв'язка Photo-Isolation, а в стабілізаторі напруги - електромагнітна гальванічна розв'язка, що забезпечує високу перешкодозахи-

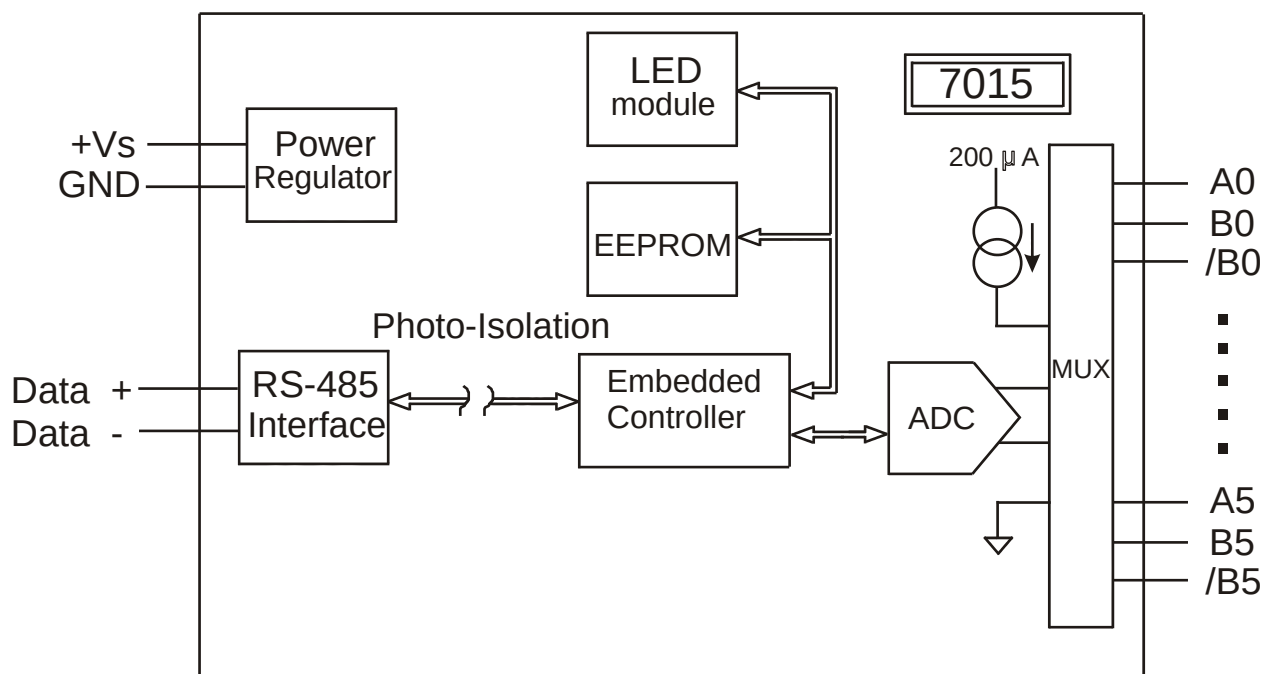


Рис. 1 - Функціональна блок-схема модуля I-7015.

щеність модуля і зниження взаємного впливу кіл живлення, кіл передачі цифрових даних і аналогових вимірювальних ланцюгів.

Модуль I-7561 - конвертор інтерфейсів RS-485/USB. Модуль I-7561 здійснює взаємне перетворення електричних сигналів комп'ютерного інтерфейсу USB і інтерфейсу передачі даних промислових систем автоматизації RS-485. Модуль I-7561 містить автоматичний перемикач напрямку передачі і може перетворювати сигнали RS-485 в сигнали USB і навпаки - USB в RS-485. Живлення модуля здійснюється від USB-порту і він не потребує інших джерел живлен-

ня, але при цьому забезпечена гальванічна розв'язка сигналів різних інтерфейсів.

RS-485 - стандарт фізичного рівня для асинхронного інтерфейсу. Регламентує електричні параметри напівдуплексної багатоточкової диференціальної лінії зв'язку типу «загальна шина». Передача даних здійснюється за допомогою диференціальних сигналів. Стандарт RS-485 обумовлює тільки електричні і тимчасові характеристики інтерфейсу.

Інтерфейс USB.

Спрощена електрична схема системи вимірювання температури «MACIT» представлена на рис. 2. Система містить 16 модулів I-7015, до кожного з яких підключені за допомогою ліній зв'язку 6 термометрів опору ТСМ, встановлених на різних вузлах, деталях і в каналах охолоджуючих середовищ генератора.

Ряд термометрів опору (наприклад, R1,0 ... R1,5) підключені за 3-х провідної схемою, інші підключені через роз'ємні з'єднання або перехідні колектора з обмеженою кількістю контактів за 2-х провідною схемою (наприклад, R16,0 ... R16,5). Виводи модулів I-7015 DATA + і DATA– об'єднані шинами інтерфейсу RS-485 і з'єднані з відповідними виводами модуля A17 конвертора інтерфейсу I-7561. Через шину інтерфейсу USB модуля A17 конвертора інтерфейсу I-7561 здійснюється зв'язок з комп'ютером ПК, що забезпечує функції керування мережею передачі даних, обробку результатів вимірювань, їх документування та передачу іншим споживачам. Кожному з модулів A1 ... A16 типу I-7015 при налаштуванні присвоюється індивідуальна адреса, що використовується при зверненні до нього і при передачі інформації від нього.

Електроживлення модулів A1... A16 перетворення сигналів термометрів опору I-7015 здійснюється за допомогою блоку живлення A18 типу DR-4524 фірми «Mean Well» (Тайвань), який перетворює мережеву напругу ~ 220 В, 50 Гц в стабілізовану напругу постійного струму 24 В, при струмі до 2 А.

Електронні модулі A1...A18 системи «MACIT» кріпляться на стандартну DIN-рейку і розміщуються в приладовій стійці.

необхідно проаналізувати похибки вимірювання температури з тим, щоб надати це врахувати при побудові моделі.

На похибку вимірювання температури системою «МАСІТ» впливає ряд факторів, причому деякі складові похибки носять адитивний, а інші – мультиплікативний характер. Тому чисельну оцінку похибки проведемо для трьох точок діапазону вимірювання: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Складова абсолютної похибки вимірювання температури внаслідок *відхилення електричного опору* від НСХ Θ_1 для термометра опору ТСМ класу допуску В відповідно до формули (3) має значення: для $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Theta_1 = \pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$; для $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Theta_1 = \pm 0,60\text{ }^{\circ}\text{C}$; для $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Theta_1 = \pm 0,95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Складова похибки вимірювання температури, викликана кінцевим *опором проводів лінії* $R_{\text{л}}$ підключення термометра опору, залежить від способу підключення. На рис.3 представлені еквівалентні схеми можливих схем підключення термометрів опору до модуля I-7015. За 2-х провідною схемою включення опір між виводами Ах і Вх складає $(R_t + 2R_{\text{л}})$. Абсолютна похибка вимірювання температури через наявність опору лінії складає $\Delta t = 2R_{\text{л}} / \alpha R_0$. Якщо лінія зв'язку виконана мідним проводом перерізом $0,12\text{ мм}^2$ і має довжину 5 метрів, то при температурі проводів $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, загальний опір лінії $2R_{\text{л}} = 1,49\text{ Ом}$, а похибка вимірювання температури становить $\Delta t = 3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Така похибка є недозволена високою і тому в системі «МАСІТ» передбачена часткова програмна компенсація цієї методичної складової похибки. При налаштуванні вимірювальної системи «МАСІТ» для кожного з вимірювальних каналів визначають опір лінії зв'язку, причому, оскільки опір лінії з мідного дроту також залежить від температури, то знаходять середнє значення опору при середній температурі проводів $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. У цьому значенні опору враховують також перехідний опір контактних елементів лінії - роз'ємів і колекторів, яке становить $0,03...0,1\text{ Ом}$. За цим

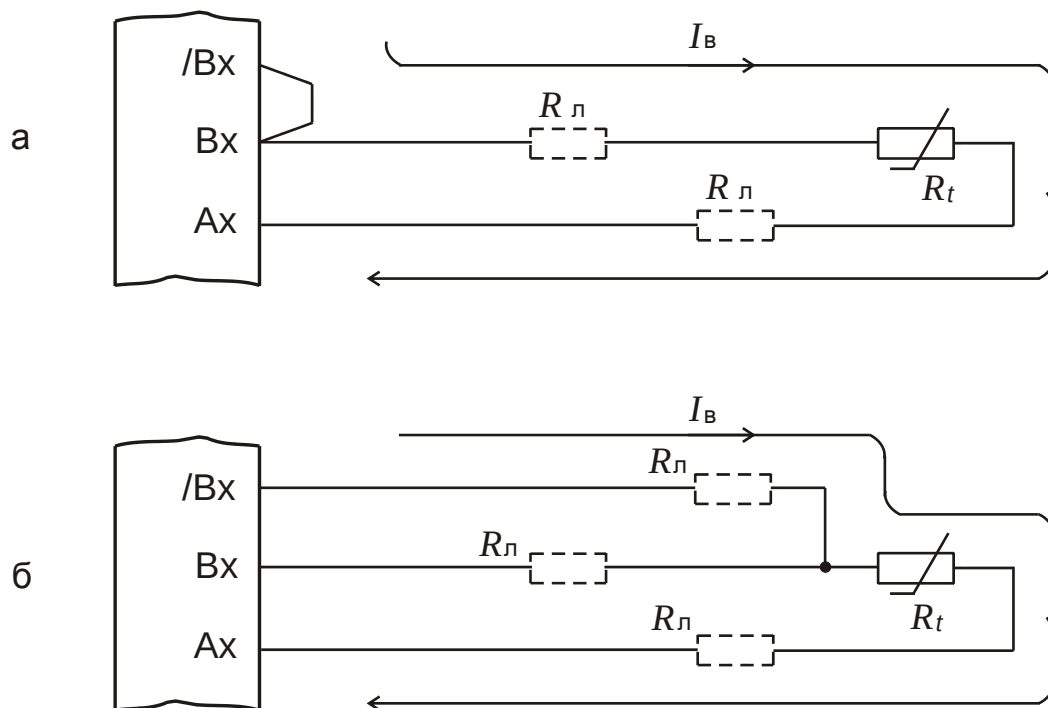


Рис. 3. Еквівалентні схеми підключення термометрів опору: а - 2-х провідна схема підключення; б - 3-х провідна схема підключення.

значенням опорів розраховують значення температурної поправки для кожного з вимірювальних каналів і формують файл поправок. Така компенсація є частковою, так як в процесі роботи генератора температура дротів ліній зв'язку може змінюватися і температура проводів може відрізнятися від прийнятого середнього значення $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температурі $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ опір 1 м мідного дроту перетином $0,12\text{ мм}^2$ складає $0,181\text{ Ом}$, а при зміні температури на $\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ змінюється на $\pm 0,032\text{ Ом}$. Для 2-х провідної лінії зв'язку довжиною 5 м зміна опору проводів складе $\pm 0,032\text{ Ом}$, а відповідна некомпенсована складова по-хибки вимірювання температури $\Theta_2 = \pm 0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При 3-х провідній лінії зв'язку, вимірювальний струм I_e протікає від виводу $/B_x$ до виводу A_x модуля I-7015 через термометр опору R_t та два дроти лінії зв'язку, кожен з яких має опір R_L . Оскільки вивід B_x модуля має високий вхідний опір, струм через цей вивід мізерно малий і ним можна знехтувати, відповідно можна знехтувати спадом напруги на проводі, що йде від виводу B_x до термометра опору. Тоді спад напруги між виводами $/B_x$ і B_x є спадом напруги на одному проводі лінії зв'язку, він вимірюється модулем I-7015 і враховується

його внутрішньою програмою обробки даних з урахуванням припущення, що опір лінії зв'язку від виводів A_x і B_x рівні між собою. У цьому ідеалізованому випадку модуль I-7015 повністю компенсує складову похибки, викликану опором лінії зв'язку. В реальності, опір проводів лінії зв'язку можуть незначно відрізнятися від розрахункового опору в зв'язку з розкидом технологічних параметрів (наприклад, перетину проводів, неоднаковими перехідними опорами контактних пристроїв і т. п.). Ці відмінності можна оцінити приблизно як $\pm 3\%$ від опору лінії. При опорі одного проводу лінії довжиною 5 м, рівному 0,905 Ом, відмінності в опорах можуть скласти 0,0272 Ом, що відповідає некомпенсованій складовій похибки вимірювання температури $\Theta_2 = \pm 0,063^\circ\text{C}$, тобто на порядок менше, ніж при 2-х провідній схемі навіть з програмною частковою компенсацією складової похибки.

Модуль I-7015 має власні похибки вимірювання і перетворення. При діапазоні вимірювання температури до 200°C , і наведеної відносної похибки перетворення $\pm 0,05\%$, абсолютна похибка вимірювання температури становить $\Theta_3 = \pm 0,1^\circ\text{C}$.

Температура електронного блоку системи «МАСІТ» в процесі експлуатації може знаходитися в діапазоні від 15°C до 35°C , тобто відхилення температури від середнього значення 25°C може скласти до $\pm 10^\circ\text{C}$. Крім того, можливий додатковий розігрів модулів електронного блоку на 5°C за рахунок потужності системи електроживлення самого блоку. Таким чином відхилення температури модуля від нормальної може скласти 15°C . При вимірювальному струмі $I_b = 200\text{ мкА}$, складова похибки вимірювання температури, викликана зміщенням нуля складає

$$\Theta_4 = \frac{\Delta U_0}{I_g \cdot \alpha \cdot R_0} = 0,088^\circ\text{C}.$$

Внаслідок протікання вимірювального струму відбувається додатковий *саморозігрів* термометра опору щодо середовища, в якому він знаходиться. Складова похибки, що виникає внаслідок саморозігріву термометра:

$$\Theta_5 = I_{\text{в}}^2 R_t (\mathfrak{R}_{\text{т}} + \mathfrak{R}_{\text{ср}}),$$

де $\mathfrak{R}_{\text{т}}$ – тепловий опір між чутливим елементом і поверхнею корпусу термометра; $\mathfrak{R}_{\text{ср}}$ – опір теплообміну поверхні з навколишнім середовищем.

Результати розрахунку заносимо в таблицю.

Межі невиключення систематичної похибки вимірювання температури системою «МАСІТ» можна визначити відповідно до рекомендації ГОСТ 8.207-76 [3] за формулою:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

де Θ_i – межа i -го невиключення систематичної похибки; k – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою ймовірністю. Коефіцієнт приймають рівним $k = 1,1$ при довірчій ймовірності $P = 0,95$.

У таблиці наведені отримані вище значення меж невиключення систематичних похибок, а в останньому стовпці – межі невиключення систематичної похибки вимірювання температури системою «МАСІТ».

Для 3-х провідної схеми вмикання термометрів опору найбільша абсолютна похибка спостерігається при вимірюванні найбільшої температури $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, межа невиключення систематичної похибки становить $\pm 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для 2-х провідної схеми вмикання термометрів опору при частковій програмній компенсації найбільша абсолютна похибка також спостерігається при вимірюванні температури $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ і межа невиключення систематичної похибки становить $\pm 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відзначимо, що в разі відсутності часткової програмної компенсації впливу опору проводів лінії зв'язку, межа невиключення систематичної похибки становить $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця

Похибки вимірювання температури системою «МАСІТ».

Схема включення термометра	Температура, °C	Похибка внаслідок відхилення електричного опору від НСХ Θ_1 , °C	Похибка внаслідок відхилення електричного опору від НСХ... Θ_2 , °C	похибка перетворення Θ_3 , °C	Похибка, викликана дрей- фом зсуву нуля, Θ_4 , °C	Похибка, викликана само- розігрівом термометра Θ_5 , °C	Межі невиключення систематичної похибки Θ , °C
2-х провідна при частко- вій програм- ній компен- сації	0	0,25	0,74	0,1	0,088	0,001	0,87
	100	0,60	0,74	0,1	0,088	0,0014	1,06
	200	0,95	0,74	0,1	0,088	0,0018	1,33
	0	0,25	0,063	0,1	0,088	0,001	0,32
3-х провідна	100	0,60	0,063	0,1	0,088	0,0014	0,68
	200	0,95	0,063	0,1	0,088	0,0018	1,06

Висновки. Результати розрахунку похибок вимірювання температурного поля дозволяють побудувати адекватну математичну модель прогнозу стану турбогенератора.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2858-94 (ГОСТ 6651-94) Термоперетворювачі опору. Загальні технічні умови і методи випробувань. – Держстандарт України, 1995.-53 с.
2. Температурные измерения. Справочник /Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др./ Под ред. Геращенко О.А. –К.: Наук. думка, 1989.-704 с.
3. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. –М.: Издательство стандартов, 1986.