



УКРАЇНА

(19) UA (11) 38066 (13) A

(51) 7 G01K15/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ БЕЗДЕМОНТАЖНОЇ ПОВІРКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

(21) 2000052973

(22) 24.05.2000

(24) 15.05.2001

(33) UA

(46) 15.05.2001, Бюл. № 4, 2001 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Дубровний Ана-
толій Вікторович, Ляховецький Олександр Воль-
фович(73) Київський державний університет технологій
та дизайну

(57) 1. Спосіб бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів, який складається з реєстрації значень термоЕРС, що відповідають різниці температур робочого спаю і вільних кінців термоелектричного перетворювача, який повіряється, зміни температури робочого спаю, реєстрації значень термоЕРС після зміни температури робочого спаю і визначення похибки термоелектричного перетворювача за формулою, який **відрізняється** тим, що після реєстрації значення термоЕРС E_1 термоелектричного перетворювача температури об'єкта, який повіряється, робочий спай примусово охолоджують пропусканням постійного струму через електроди і робочий спай термоелектричного перетворювача протягом часу, більшого за потроєне значення теплової сталої термоелектричного перетворювача, реєструють усталене значення термоЕРС E_2 , змінюють напрям пропускання постійного струму на протилежний і примусово нагрівають робочий спай відносно температури об'єкта протягом часу, більшого за потроєне значення теплової сталої термоелектричного перетворювача, реєструють усталене значення термоЕРС E'' , вимикають постійний струм, а значення похибки ΔT визначають за формулою

$$\Delta T = T_x - \frac{(E_3'' - E_2'')(E_2' + E_3' - 2E_1')^2}{(E_3' - E_2')(E_2' + E_3' - 2E_1')^2} \cdot T_H$$

де T_x - температура об'єкта в процесі повірки, одержана за градувальною характеристикою термоелектричного перетворювача, що повіряється або за вторинним приладом;

T_H - початкова температура об'єкта при виконанні пусконаладжувальних робіт на об'єкті;

E_1 , E_2 і E_3 - термоЕРС, зареєстровані в процесі пусконаладжувальних робіт при початковій температурі об'єкта T_H .

2. Пристрій для бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів, що складається з двополюсного перемикача, нормуючого підсилювача, з'єднаного входами з одною парою виходів двополюсного перемикача, і аналого-цифрового перетворювача, приєднаного входом до виходу нормуючого підсилювача, який **відрізняється** тим, що у нього введені штепсель втичного роз'єму, приєднаний до входу двополюсного перемикача, мікропроцесорний контролер, цифро-аналоговий перетворювач, цифровий індикатор і другий двополюсний перемикач, входи якого з'єднані з другою парою виходів першого двополюсного перемикача, перетворювач напруги в струм, виходи якого приєднані до протилежних виходів другого двополюсного перемикача, а вхід з'єднаний з виходом цифро-аналогового перетворювача, кодові входи якого під'єднані до першого виходу мікропроцесорного контролера, другий вихід якого з'єднаний із входом цифрового індикатора, третій і четвертий виходи його з'єднані з керуючими входами двополюсних перемикачів, вхід мікропроцесорного контролера під'єднаний до кодових виходів аналого-цифрового перетворювача.

Винахід відноситься до області температурних вимірювань і може бути застосований для контролю метрологічних характеристик термоелектричних, перетворювачів термометрів безпосередньо в умовах їх експлуатації без демонтажу з об'єкта, на якому вони встановлені.

В процесі експлуатації термоелектричного перетворювача на об'єкті в його робочому спай відбуваються безповоротні фізико-хімічні зміни, які

деформують початкову градувальну характеристику. Ці зміни можна звести до паралельного зміщення характеристики в околицях робочої точки і до змін кута її нахилу. Паралельне зміщення викликає появу адитивної складової похибки ("похибки нуля"), а зміна кута нахилу обумовлює появу мультиплікативної складової похибки ("похибки чутливості"). Звичайно ці похибки виявляють після проведення повторних градувань, які проводять

(19) UA (11) 38066 (13) A

після демонтажу термоелектричних перетворювачів з об'єкту в лабораторних умовах. Якщо такий демонтаж неможливий або недоцільний, похибки термоелектричних перетворювачів оцінюють з допомогою спеціальних методів і повірочних схем.

Відомий спосіб бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. СРСР № 1173206, кл. G01 K 15/00, 1985, який складається з порівняння показів однотипних термоелектричних перетворювачів, один з яких повіряють і він знаходиться на об'єкті, а інший контрольний - у термостаті, вирівнюванні температур їх робочих спаїв змінами температури термостата, пропусканні імпульсу струму через послідовно-зустрічно з'єднані електроди термоелектричних перетворювачів, що створюють диференціальну термопару, і вимірюванні приростів термоелектрорушійної сили (термоЕРС). Похибку ЛТ термоелектричного перетворювача, який повіряють, визначають за формулою

$$\Delta T = T_K \left(\frac{\Delta E_K}{\Delta E_K - \Delta E} - 1 \right)$$

де T_K - значення температури контрольного термоелектричного перетворювача;

ΔE_K і ΔE - значення приростів термоЕРС контрольного термоелектричного перетворювача і диференціальної термопари відповідно.

Через неминуче технологічне розкидання характеристик навіть однотипних термоелектричних перетворювачів важко забезпечити дійсну рівність температур їх робочих спаїв за нульового значення термоЕРС диференціальної термопари, яка створена термоелектричними перетворювачами, що порівнюються. При додатковому нагріванні робочих спаїв короточасним імпульсом струму виникає невеликий приріст термоЕРС кожної термопари, а їх різниця пропорційна похибці термоелектричного перетворювача, що повіряється, складає дуже малу величину другого порядку малості, яку важко достовірно виділити на фоні завад і шумів.

Тривалість імпульсу струму не можна збільшити через неадекватність умов теплообміну робочих спаїв термоелектричних перетворювачів, що порівнюються, адже вони знаходяться в термостаті і на об'єкті у різних теплофізичних умовах.

Відомий спосіб бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. № 1471089, кл. G01 K 15/00, 1989, що складається з послідовно-зустрічного з'єднання термоелектричного перетворювача, що повіряється, і зразкового термоелектричного перетворювача, вирівнюванні їх температур додатковим нагріванням або охолодженням зразкового термоелектричного перетворювача, змін температури робочих спаїв обох термоелектричних перетворювачів шляхом одночасного пропускання через них імпульсів струму заданої тривалості і амплітуди, реєстрації різницевої термоЕРС у момент часу зразу ж після закінчення додаткового нагрівання.

При короточасному нагріванні і охолодженні робочих спаїв термоелектричних перетворювачів залежно від напрямку струму, коли умови наближені до адіабатичних, нагрівання термоелектродів практично відсутнє. Тому виявити адитивну складову похибки, що викликається термоелектричною

неоднорідністю термоелектродів і градієнтом температур, практично неможливо. Через різницю в умовах теплообміну зразкового термоелектричного перетворювача і того, що повіряється, достовірність повірки підвищується при зменшенні тривалості струмових імпульсів, але це призводить до зниження чутливості, тобто, і до збільшення визначення похибок термоелектричного перетворювача, що повіряється.

Загальним недоліком розглянутих способів є низька точність визначення похибок термоелектричних перетворювачів через необхідність вимірювання лінійно наростаючої термоЕРС робочих спаїв у момент закінчення імпульсу струму. Немінуча затримка у ввімкненні вимірювача термоЕРС викликає появу великих методичних похибок.

Відомий спосіб без демонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. СРСР № 1362964, кл. G01 K 15/00, 1987, суть якого в тому, що покази термоелектричного термометра на відмітці шкали, що повіряється, порівнюють з дійсним значенням температури, яку задають, пропускаючи електричний струм через додатковий нагрівач, розміщений в зоні робочого спаю термоелектричного перетворювача. Після встановлення показу, що відповідає заданій температурі T_1 об'єкта за вторинним приладом термометра, виконують охолодження робочого спаю, пропускаючи через нього постійний струм, при цьому значення струму охолодження вибирають пропорційним струму нагрівача, реєструють усталений показ T_2 термометра, потім збільшують струм нагрівача і відповідно струм охолодження робочого спаю, реєструють усталений показ T_3 термометра, перестають пропускати постійний струм через робочий спай і реєструють усталений показ T_4 термометра, а шукану похибку ΔT визначають за формулою

$$\Delta T = T_1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_3) - (T_1 - T_2)} \cdot \frac{\rho l_1}{2\lambda}$$

де I_1 - струм нагрівача, що створює задану температуру T_1 ;

ρ - коефіцієнт Пельтьє для матеріалів, що створюють робочий спай;

ρ - коефіцієнт пропорційності між струмом нагрівача і постійним струмом охолодження робочого спаю;

λ - еквівалентна теплопровідність робочого спаю.

Оскільки вимірювання проводять в усталених режимах, проявляються обидві складові похибок термоелектричного перетворювача, а прирости термоЕРС збільшуються в 3-5 разів за таких же значень струму через спай. Проте, оскільки потрібний додатковий нагрівач у зоні робочого спаю, цей спосіб важко реалізувати в умовах застосування стандартних термоелектричних перетворювачів, якими обладнані більшість промислових об'єктів. Крім того, коефіцієнт Пельтьє, що входить у розрахункову формулу, непостійний, тому що він функціонально залежить від температури робочого спаю і може піддаватися фізико-хімічним змінам.

Відомий також спосіб без демонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. СРСР № 1397752, кл. G01 K 15/00, 1988, який складається з реєстрації значень термоЕРС, які відповідають різниці температур робочого спаю і вільних

кінців термоелектричного перетворювача, що повіряється, наступній зміні температури робочого спаю, реєстрації значень термоЕРС після зміні температури робочого спаю і визначення похибки термоелектричного перетворювача за формулою. Крім того, у відомому способі вимірювану термоЕРС змінюють на задане значення перемиканням вільних кінців термоелектричного перетворювача з одного термостата в інший, температуру робочого спаю змінюють на задане значення, пропускаючи під захисним кожухом термоелектричного перетворювача повітряного потоку від окремого компресора, а значення похибки АТ визначають за формулою

$$\Delta T = T_1 - \frac{(T_1 - T_3)\Delta T_0}{(T_2 - T_1)\varepsilon}$$

де T_1 - T_3 - покази термометра;

ΔT_0 - зміна температури вільних кінців термоелектричного перетворювача;

ε - задана відносна зміна температури робочого спаю термоелектричного перетворювача при повітряному охолодженні.

Зміни показів термометра на задане значення температури $\Delta T_0 = \text{const}$ перемиканням вільних кінців термоелектричного перетворювача з одного термостата у інший, які мають постійну різницю температур ΔT_0 , справедливо тільки при лінійній характеристиці термоелектричного перетворювача. Для його реальної нелінійної характеристики такі зміни будуть різними залежно від температури робочого спаю, що викличе велику методичну похибку. Крім того, при повірці важко забезпечити задану відносну зміну температури ε робочого спаю термоелектричного перетворювача з допомогою стандартного компресора і задавача витрат повітря. Таким чином, і цей спосіб не забезпечить високої точності повірки термоелектричних перетворювачів безпосередньо на об'єкті.

Відомий пристрій для бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. СРСР № 717564, кл. G01 K 15/00, 1980, що складається з комутатора, аналого-цифрового перетворювача, блока пам'яті, блока керування, який з'єднаний з індикатором, аналого-цифровим перетворювачем і комутатором. У цьому пристрої термоелектричний перетворювач має вбудований калібратор у вигляді зразкової речовини з відомою температурою плавлення, як правило, у ролі зразкової речовини застосовують чисті метали.

Для використання калібатора необхідно температуру об'єкта, на якому встановлено термоелектричний перетворювач, довести до температури плавлення зразкової речовини. Проте на діючому об'єкті з заданим температурним режимом виконати це інколи складно.

Відомий пристрій для бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. СРСР № 881982, кл. G01 K 15/00, 1981, що включає комутатор, аналого-цифровий перетворювач, блок обчислення, блоки пам'яті і керування, а також блок формування дозованих імпульсів і блок вторинних перетворювачів, включених між комутатором і аналого-цифровим перетворювачем, вхід якого з'єднаний з першим входом блока обчислення, а виходи з'єднані з індикатором і блоком фор-

мування дозованих імпульсів, що з'єднаний з комутатором.

Нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача, що повіряється, дозованими імпульсами струму дозволяє проводити повірку термоелектричного перетворювача тільки на "холодному", тобто непрацюючому об'єкті. Якщо робочий спай термоелектричного перетворювача нагрітий від об'єкта, то на тепловий потік, що йде від об'єкта, накладається Джоулеве тепло від імпульсу струму. Це не дозволяє безпосередньо порівнювати результати досліджень, що одержані на працюючому термоелектричному перетворювачі, з результатами, які раніше були зафіксовані при пусконаладжувальних випробовуваннях нового термоелектричного перетворювача на холодному об'єкті.

Відомий пристрій для без демонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за а. с. СРСР № 1583761, кл. G01 K 15/00, 1988, що включає джерело струму, перемикач, який під'єднаний до джерела струму, зразковий термоелектричний перетворювач, розміщений у регульованому задавачі температури, блок логічної обробки і ланцюг з двох послідовно з'єднаних резисторів, середня точка яких під'єднана до першого входу блока логічної обробки, до другого і третього входу якого під'єднана середня точка послідовно з'єднаних термоелектричних перетворювачів: зразкового і того, що повіряється, а його четвертий вхід з'єднаний з вільними кінцями порівнюваних термоелектричних перетворювачів. Наявність зразкового термоелектричного перетворювача, який розміщений в регульованому задавачі температури, не дозволяє вимірювати прирости термоЕРС термоелектричного перетворювача, що повіряється, в ustalеному режимі через різні умови теплообміну робочих спайів порівнюваних термоелектричних перетворювачів.

Відомий також пристрій для бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів за патентом України № 12916, кл. G01 K 15/00, 1997, що складається з двополюсного перемикача, нормуючого підсилювача, з'єднаного входами з одною парою виходів двополюсного перемикача, і аналого-цифрового перетворювача, під'єднаного входом до виходу нормуючого підсилювача. Крім того, відомий пристрій має секундомір, компресор, задавач витрат повітря, що під'єднаний з'єднувальними трубками до каналів фарфорової втулки термоелектричного перетворювача, а також цифровий міліамперметр і вольтметр, включені на виходах двополюсного перемикача.

Короткочасне нагрівання і охолодження робочого кінця термоелектричного перетворювача у адіабатичному режимі не дозволяє виявити складову похибки від термоелектричної неоднорідності електродів і градієнта температур, що має місце. Крім того, потреба у компресорі і задавачі витрат повітря робить повірочний пристрій громіздким і обмежує можливості повірки будь-яких стандартних термоелектричних перетворювачів незалежно від їх конструкції. Тому точність бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів відомими пристроями остається низькою.

В основу винаходу покладена задача створення таких способу і пристрою для бездемонтажної

повірки термоелектричних перетворювачів, в яких введення нових операцій в спосіб і елементів і зв'язків у пристрої дозволяють визначити температуру об'єкта і шляхом порівняння з результатом вимірювання цієї температури за термоЕРС термоелектричного перетворювача визначити значення похибки, завдяки чому підвищується точність без демонтажної повірки термоелектричних перетворювачів.

Поставлена задача вирішується тим, що у спосіб бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів, який складається з реєстрації значень термоЕРС, що відповідають різниці температур робочого спаю і вільних кінців термоелектричного перетворювача, який повіряється, наступній зміні температури робочого спаю, реєстрації значень термоЕРС після зміни температури робочого спаю і визначення похибки термоелектричного перетворювача за формулою, згідно з винаходом, після реєстрації значення термоЕРС E''_1 термоелектричного перетворювача температури об'єкта, який повіряється, робочий спай примусово охолоджують пропусканням постійного струму через електроди і робочий спай термоелектричного перетворювача на протязі часу, більшого за потроєне значення теплової сталої термоелектричного перетворювача, реєструють усталене значення термоЕРС E''_2 змінюють напрям пропускання постійного струму на протилежне і примусово нагрівають робочий спай відносно температури об'єкта на протязі часу, більшого за потроєне значення теплової сталої термоелектричного перетворювача, реєструють усталене значення термоЕРС E''_3 , вимикають постійний струм, а значення похибки ΔT визначають за формулою

$$\Delta T = T'_x - \frac{(E''_3 - E''_2)(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2}{(E'_3 - E'_2)(E''_2 + E''_3 - 2E''_1)^2} \cdot T_H$$

де T'_x - температура об'єкта в процесі повірки, одержана за градуальною характеристикою термоелектричного перетворювача, що повіряється, або по вторинному приладу;

T_H - початкова температура об'єкту при виконанні пусконаладжувальних робіт на об'єкті;

E'_1 , E'_2 і E'_3 - термоЕРС, зареєстровані в процесі пусконаладжувальних робіт при початковій температурі об'єкта T_H .

Поставлена задача вирішується також тим, що у пристрої для без демонтажної повірки термоелектричних перетворювачів, що складається з двополюсного перемикача, нормуючого підсилювача, з'єднаного входами з одною парою виходів двополюсного перемикача, і аналого-цифрового перетворювача, приєднаного входом до виходу нормуючого підсилювача, згідно з винаходом, у нього введені штепсель втичного роз'єму, приєднаний до входу двополюсного перемикача, мікропроцесорний контролер, цифро-аналоговий перетворювач, цифровий індикатор і другий двополюсний перемикач, входи якого з'єднані з другою парою виходів першого двополюсного перемикача, перетворювач напруги в струм, виходи якого приєднані до протилежних виходів другого двополюсного перемикача, а вхід з'єднаний з виходом цифро-аналогового перетворювача, кодові входи якого під'єднані до першого виходу мікропроцесорного контролера, другий вихід якого з'єднаний із входом

цифрового індикатора, третій і четвертий виходи його з'єднані з керуючими входами двополюсних перемикачів, вхід мікропроцесорного контролера під'єднаний до кодових виходів аналого-цифрового перетворювача.

Саме примусове охолодження постійним струмом робочого спаю термоелектричного перетворювача, що знаходиться на об'єкті, після вимірювання термоЕРС під впливом поточної температури об'єкта, реєстрація усталеного зменшеного значення термоЕРС, наступний перегрів робочого спаю тим же струмом, який пропускають у протилежному напрямі, реєстрація збільшеного значення термоЕРС, обробка результатів проміжних значень термоЕРС у мікропроцесорі контролера програмне керування двополюсними перемикачами, які забезпечують почергове охолодження і нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача і вимірюваний усталених значень термоЕРС при перериванні постійного струму, дозволяють визначити температуру об'єкта і шляхом порівняння з результатом вимірювання цієї температури за термоЕРС термоелектричного перетворювача визначити значення похибки, завдяки чому підвищується точність бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів.

На фіг. 1 представлена функціональна схема пристрою для бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів, на фіг. 2 - залежність температури робочого спаю від часу пропускання через нього постійного струму у різних напрямках; на фіг. 3 - залежність усталеної температури робочого спаю термоелектричного перетворювача від значення струму, що протікає по ньому в результаті поглинання теплоти Пельтьє і виділення теплоти Джоуля; на фіг. 4 - структурна схема алгоритму роботи програмного пристрою.

Пристрій складається і штепселя 1 втичного роз'єму, двополюсних перемикачів 2 і 3, нормуючого підсилювача 4, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 5, мікропроцесорного контролера 6, цифрового індикатора 7, цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) 8 і перетворювача 9 напруги в струм.

Позицією 10 позначений термоелектричний перетворювач, що повіряється, який розміщений на об'єкті 11, позиції: 12 - гніздо і 13 - штепсель втичного роз'єму; 14 - колодка стабілізації або компенсації впливу змін температури вільних кінців термоелектричного перетворювача, що повіряється, і 15 - вторинний прилад. Ці елементи в склад пристрою для бездемонтажної повірки термоелектричних перетворювачів не входять.

Позиціями 1к-16к на фіг. 4 позначені кроки програми мікропроцесорного контролера, який керує роботою пристрою.

В режимі повірки втичні контакти штепсельного роз'єму 1 з'єднують через гніздо 12 з термоелектричним перетворювачем 10, який повіряється, при цьому штепсель 13 і з'єднані з ним колодка 14 вільних кінців термоелектричного перетворювача і комплектний вторинний прилад 15 відключаються.

Контакти штепсельного роз'єму 1 з'єднані із входом двополюсного перемикача 2, перша пара виходів цього перемикача з'єднана із входом нормуючого підсилювача 4, а друга пара - із входом двополюсного перемикача 3. Вихід нормуючого

підсилювача 4 з'єднаний із входом АЦП 5, кодовий вихід якого з'єднаний із входом мікропроцесорного контролера 6. Перший вихід контролера 6 з'єднаний з кодовим входом ЦАП 8, другий - з кодовим входом цифрового індикатора 7, третій і четвертий виходи - з керуючими входами перемикачів 2 і 3. Виходи перемикача 3 з'єднані так, що при його роботі струм від перетворювача 9 подається на затискачі "б" перемикача 2 і на термоелектричний перетворювач 10, що повіряється, у протилежних напрямках.

В режимі нормальної роботи термоелектричний перетворювач 10, робочий спай якого розміщений на об'єкті 11, через гніздо 12 і штепсель 13 втичного роз'єму з'єднаний з колодкою 14 стабілізації або компенсації впливу змін температури вільних кінців термоелектричного перетворювача, до виходу якого під'єднаний вторинний вимірювальний прилад 15, шкала якого градуйована в значеннях температури.

Спосіб здійснюється так.

ТермоЕРС термоелектричного перетворювача 10 залежно від різниці температур його робочого і вільних кінців можна записати

$$E = \varepsilon T_P - \varepsilon_0 T_0 \quad (1)$$

де ε - коефіцієнт Зеебека робочого спаю термоелектричного перетворювача;

ε_0 - коефіцієнт Зеебека вільних кінців термоелектричного перетворювача;

T_P и T_0 - температури робочого спаю і вільних кінців термоелектричного перетворювача 10 відповідно.

Оскільки коефіцієнт Зеебека функціонально залежить від температури, то градувальна характеристика термоелектричного перетворювача в загальному випадку є нелінійною. В процесі експлуатації відбуваються фізико-хімічні зміни в робочому спаї термоелектричного перетворювача і в його термоелектродах, особливо на тих ділянках, які прилягають до робочого спаю, останнє призводить до додаткових змін значень коефіцієнта Зеебека і появи неоднорідностей в термоелектродах.

При пусконаладжувальних роботах на об'єкті 11 на початку експлуатації термоелектричного перетворювача вимірюють термоЕРС при початковій робочій температурі T_H об'єкта, яка відповідає його технологічному регламенту і вимірюється вторинним приладом 15. Відповідно до початкової градувальної характеристики нового термоелектричного перетворювача, його термоЕРС буде

$$E'_1 = \varepsilon_H T_H - \varepsilon_0 T_0 \quad (2)$$

Після вимірювання і фіксації значення E'_1 по електродах термоелектричного перетворювача пропускають струм I_0 у напрямі, що відповідно до закону Пельтьє викликає охолодження робочого спаю термоелектричного перетворювача (крива в проміжку часу Δt_1 на фіг. 2). Значення струму 1 вибирають мінімальним, але таким, щоб одержати $-\Delta T_{охл} = (5-7)K$ відносно початкової температури T_H об'єкта. Процес охолодження ведуть до появи стабільного значення температури і термоЕРС E'_2 , яку відповідно до законів Пельтьє і Джоуля можна записати у вигляді

$$E'_2 = \varepsilon_H [T_H + (kl_0^2 R_C - \Pi \cdot I_0) / \lambda] - \varepsilon_0 T_0 \quad (3)$$

де R_C - електричний опір робочого спаю і термоелектродів, що прилягають до нього;

k - коефіцієнт, що враховує долю теплоти Джоуля, що поступає в робочий спай;

Π - коефіцієнт Пельтьє для матеріалів, що створюють робочий спай

λ - еквівалентна теплопровідність робочого спаю з урахуванням теплофізичних властивостей об'єкта, на якому змонтовано термоелектричний перетворювач.

Струм I_0 , який є оптимальним за розміром, вибирають з умов максимального охолодження робочого спаю термоелектричного перетворювача при одночасному протилежному впливі теплоти Пельтьє і Джоуля. Це буде мати місце, якщо додержати умови (фіг. 3)

$$\frac{dE}{dI} = \frac{d}{dI} (k \cdot I_0^2 R_C - \Pi I_0) / \lambda = 0 \quad (4)$$

звідкіля

$$2kl_0 R - \Pi = 0 \quad (5)$$

Розв'язавши це рівняння відносно I_0 , одержимо значення оптимального струму

$$I_0 = \frac{\Pi}{2 \cdot k \cdot R_C} \quad (6)$$

Звичайно $k=0,5$, тому що приблизно половина теплоти Джоуля поступає до робочого спаю, а половина відводиться до вільних кінців. Тому можна вважати, що $I_0 = \Pi / R_C$.

У першому наближенні можна прийняти, що процеси охолодження і нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача відбуваються за експоненціальним законом. Щоб одержати досить пологі значення експоненти, треба затратити час не менше 3-4 значень її сталих часу. Враховуючи інерційність стандартних термоелектричних перетворювачів і умов їх установки на реальному об'єкті, цей час буде в межах від 1 до 10 хвилин.

Підставляючи в (3) відому залежність коефіцієнта Пельтьє від температури і коефіцієнта Зеебека

$$\Pi = \varepsilon_H T_H \quad (7)$$

одержимо

$$E'_2 = \varepsilon_H [T_H + (kl_0^2 R_C - \varepsilon_H T_H I_0) / \lambda - \varepsilon_0 T_0] \quad (8)$$

Після вимірювання і фіксації значення E'_2 по електродах термоелектричного перетворювача, пропускають струм I_0 в протилежному напрямі, який викликає нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача. У цьому випадку теплова енергія, яка виділяється відповідно до законів Пельтьє і Джоуля, додається (крива у проміжку часу Δt_2 на фіг. 2). Процес нагрівання ведуть до одержання усталеного значення термоЕРС

$$E'_3 = \varepsilon_H [T_H + (kl_0^2 R_C + \varepsilon_H T_H I_0) / \lambda - \varepsilon_0 T_0] \quad (9)$$

Оскільки охолодження і нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача відбувається у невеликому температурному діапазоні (до 10 K), то можна вважати значення коефіцієнта Зеебека ε_H незмінним.

Після вимірювання і фіксації значення E'_3 , струм I_0 вимикають і через деякий час температура робочого спаю термоелектричного перетворювача стає рівною T_H (крива у проміжку часу Δt_3 на фіг. 2). На цьому процес налагодження нового термоелектричного перетворювача на об'єкті за-

кінчується, а значення: E'_1 , E'_2 , E'_3 і T_H заносяться в пам'ять мікропроцесорного контролера 6.

В процесі експлуатації термоелектричного перетворювача, змінюється його градувальна характеристика. Крім того, можливі зміни температури його вільних кінців. Тому значення термоЕРС при повірці на об'єкті з новою невідомою температурою $T_X \neq T_H$ можна записати так

$$E'_1 = (\varepsilon_H + \Delta\varepsilon)T_K - \varepsilon_0(T_0 + \Delta T) = \varepsilon_H(1 + \gamma_1)T_K - \varepsilon_0T_0 + \delta_1 \quad (10)$$

де $\gamma_1 = \Delta\varepsilon/\varepsilon_H$ - відносна мультиплікативна похибка, обумовлена змінами коефіцієнта Зеебека;

$\delta_1 = \varepsilon_0\Delta T$ - абсолютна адитивна похибка, викликана змінами температури T_0 вільних кінців термоелектричного перетворювача, а також термоелектричною неоднорідністю його термоелектродів.

Похибки γ_1 і δ_1 враховують також зміни коефіцієнта Зеебека внаслідок нелінійності характеристики термоелектричного перетворювача і нерівності температур $T_X \neq T_H$ - фактичної і тієї, при якій проводили налагоджувальні дослідження термоелектричного перетворювача. В процесі повірки після вимірювання і фіксації значення E'_1 по електродах термоелектричного перетворювача пропускають таке ж значення струму I_0 , як і при налагоджуванні у напрямі, який відповідно до закону Пельтьє викликає охолодження робочого спаю термоелектричного перетворювача (крива у проміжку часу Δt_1 на фіг. 2). Зменшене значення термоЕРС буде

$$E'_2 = \varepsilon_H(1 + \gamma_2)T_X + [Kl_0^2 R_C - \varepsilon_H(1 + \gamma_2)T_X I_0] / \lambda - \varepsilon_0T_0 + \delta_2 \quad (11)$$

де γ_2 і δ_2 - значення похибок при охолодженні робочого спаю.

Після вимірювання і фіксації значення E'_2 по електродах термоелектричного перетворювача пропускають струм I_0 в протилежному напрямі, який викликає нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача відносно невідомої температури T_X . ТермоЕРС термоелектричного перетворювача виростає до значення

$$E'_3 = \varepsilon_H(1 + \gamma_3)T_X + [Kl_0^2 R_C - \varepsilon_H(1 + \gamma_3)T_X I_0] / \lambda - \varepsilon_0T_0 + \delta_3 \quad (12)$$

де γ_3 і δ_3 - значення похибок при додатковому нагріванні.

Після вимірювання і фіксації значення E'_3 струм I_0 вимикають. На цьому процес повірки термоелектричного перетворювача на діючому об'єкті закінчується.

Похибки термоелектричного перетворювача оцінюють як різницю між температурою T_X , яку визначають за градувальною характеристикою термоелектричного перетворювача або за показами вторинного приладу 15 і дійсною температурою об'єкта T_X

$$\Delta T = T'_X - T_X \quad (13)$$

Якщо температуру T'_X визначають за градувальною характеристикою відповідно до вимірюваного значення E'_1 , то

$$T'_X = F^{-1}(E'_1) \quad (14)$$

де F^{-1} - зворотна функція від градувальної характеристики.

Дійсне значення температури T_X об'єкта визначають шляхом виключення складових похибок вимірювання γ_1 і δ_1 .

Як було вказано вище, примусові зміни температури робочого спаю термоелектричного перетворювача виконують у невеликих межах (до 10 K). Це дозволяє вважати, що похибки перетворення в околицях робочої точки однакові: $\gamma_1 \cong \gamma_2 \cong \gamma_3 \cong \gamma$ і $\delta_1 \cong \delta_2 \cong \delta_3 \cong \delta$. З виразів (2), (8) і (9) визначають додаткову термоЕРС від виділення теплоти Джоуля, яка мала місце в процесі пусконаладжувальних робіт

$$E'_2 + E'_3 - 2E'_1 = \varepsilon_H I_0^2 R_C / \lambda \quad (15)$$

Із виразів (8) і (9) визначають зміни термоЕРС, що пов'язані з теплою Пельтьє

$$E'_3 - E'_2 = 2\varepsilon_H I_0 T_H / \lambda \quad (16)$$

Ті ж самі величини визначають з виразів (10), (11) і (12), які одержані в процесі без демонтажної повірки:

$$E'_2 + E'_3 - 2E'_1 = \varepsilon_H(1 + \gamma) I_0^2 R_C / \lambda \quad (17)$$

$$E'_3 - E'_2 = 2[\varepsilon_H^2(1 + \gamma) I_0 T_X / \lambda] \quad (18)$$

Якщо розділити значення термоЕРС з (15) на значення з (17), то одержимо

$$\frac{E'_2 + E'_3 - 2E'_1}{E'_2 + E'_3 - 2E'_1} = \frac{1}{1 + \gamma} \quad (19)$$

звідкіля похибка

$$\gamma = \frac{E'_2 + E'_3 - 2E'_1}{E'_2 + E'_3 - 2E'_1} - 1 \quad (20)$$

Далі визначають відношення приростів термоЕРС з (16) і (18)

$$\frac{E'_3 - E'_2}{E'_3 - E'_2} = \frac{T_H}{T_X(1 + \gamma)^2} \quad (21)$$

Підставляючи у праву частину рівності (21) значення похибки γ з (20), одержимо

$$\frac{E'_3 - E'_2}{E'_3 - E'_2} = \frac{(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2 T_H}{(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2 T_X} \quad (22)$$

Розв'язавши рівняння (22) відносно T_X , одержимо

$$T_X = \frac{(E'_3 - E'_2)(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2}{(E'_3 - E'_2)(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2} T_H \quad (23)$$

Похибка термоелектричного перетворювача, що пов'язана, оцінюють з виразу (13), враховуючи (23)

$$\Delta T = T'_X - T_X = \frac{(E'_3 - E'_2)(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2}{(E'_3 - E'_2)(E'_2 + E'_3 - 2E'_1)^2} T_H \quad (24)$$

де T_X - температура об'єкта при пусконаладжувальних роботах.

З одержаного виразу (24) видно, що на результат повірки не впливають мультиплікативна і адитивна складові, похибки γ і δ термоелектричного перетворювача, які виникли в процесі експлуатації, непотрібний зразковий термоелектричний перетворювач для порівняння термоЕРС або зразковий вимірювач температури, установлений на об'єкті в околицях робочого спаю. Порівняно з відомим способом-прототипом непотрібне конвективне охолодження робочого спаю повітряним потоком із стабілізацією його параметрів. Електричне охолодження робочого спаю не потребує додаткових змін в конструкції термоелектричного перетво-

рювача і стабілізації кількості теплоти Пельт'є, яка виділяється у спай. Вимірювання термоЕРО в усталеному режимі знижує вимоги до швидкодії вимірювача термоЕРС і не потребує точного часу вимикання струму через спай для забезпечення його адіабатичного нагрівання.

Пристрій для без демонтажної повірки термоелектричних перетворювачів працює за програмою відповідно до фіг. 4 так.

В процесі пусконаладжувальних робіт в пам'ять мікропроцесорного контролера 6 (фіг. 1) вводять коди оптимального струму I_0 і часів пропускання його через робочий спай Δt_1 і Δt_2 , необхідних для одержання усталених значень термоЕРС при охолодженні і нагріванні робочих спайів (фіг. 2), а також градувальні характеристики монтованих термоелектричних перетворювачів (крок 1к програми).

При пусконаладжувальних роботах, коли новий змонтований на об'єкті термоелектричний перетворювач 10 (фіг. 1) має початкову температуру T_H об'єкта 11, проводять його налагодження. Ця температура вимірюється комплектом вторинним приладом 15 або її код, одержаний з допомогою електронної таблиці за кодом термоЕРС E_1 , вводиться в постійну пам'ять контролера 6 (крок 2к програми).

На початку налагодження термоелектричного перетворювача 10 контактами штепселя 1 втичного роз'єму виконують під'єднаний переносного повірочного пристрою замість комплектного вторинного приладу 15 до термоелектричного перетворювача 10, що повіряється. Запускають програму повірки з кроку 3к (фіг. 4).

На кроці 4к програми двополюсний перемикач 2 за командою мікропроцесорного контролера 6 переводиться у верхнє положення "а" (фіг. 1). На кроці програми 5к виконується одержання і фіксація термоЕРС E_1 термоелектричного перетворювача, яка підсилюється підсилювачем 4 і перетворюється у цифровий код з допомогою АЦП 5. Код термоЕРС E_1 поступає в оперативну пам'ять контролера 6.

На кроці програми 6к за командою контролера 6 перемикач 2 переводиться в положення "б", а перемикач 3 установлюється в положення "а". В регістрі ЦАП 8 заноситься код струму I_0 , який починає протікати через термоелектроди і робочий спай термоелектричного перетворювача 10. При цьому починається охолодження робочого спаю до усталеної температури $T_H - \Delta T_{опт}$ (фіг. 2), що триває протягом часу Δt_1 , який задається таймером контролера.

На кроці програми 7к за командою контролера 6 перемикач 2 встановлюється в положення "а", струм через робочий спай переривається, а вихід термоперетворювача 10 під'єднується до нормуючого підсилювача 4.

На кроці програми 8к термоЕРС E_2 термоелектричного перетворювача 11 підсилюється підсилювачем 4 і перетворюється у цифровий код у АЦП 5. Код термоЕРС E_2 поступає в оперативну пам'ять контролера 6.

На кроці програми 9к перемикачі 2 і 3 встановлюються в положення "б", і через термоелектроди і робочий спай термоелектричного перетворювача 10 проходить струм I_0 протилежної полярності.

При цьому починається нагрівання робочого спаю до усталеної температури $T_H + \Delta T_{наг}$ (фіг. 2), що триває протягом часу Δt_2 , який задається таймером контролера.

На кроці програми 10к перемикач 2 встановлюється в положення "а", струм через робочий спай термоелектричного перетворювача 10 вимикається.

На кроці програми 11к термоЕРС термоелектричного перетворювача 10 підсилюється підсилювачем 4 і перетворюється в цифровий код у АЦП 5. Код термоЕРС E_3 поступає в оперативну пам'ять контролера 6. ЦДП 8 обнуляється, струм I_0 вимикається, коди E_1 , E_2 і E_3 з оперативної пам'яті контролера переносяться в постійну пам'ять (крок 3к програми), де зберігаються і використовуються при повірці. На цьому процес налагодження цифрового повірочного пристрою закінчується.

Якщо на кроці 12к програма переведена в режим повірки, то пристрій працює за командами 3к-11к, при цьому в оперативну пам'ять мікропроцесорного контролера заносяться коди термоЕРС E_1 , E_2 і E_3 .

За командою 13к програми за формулами (23) і (24) проводяться обчислення дійсного значення температури T_x і похибки ΔT термоелектричного перетворювача, що повіряється, з урахуванням його попередніх, даних: T_H , E_1 , E_2 і E_3 , які були одержані при налагодженні нового термоелектричного перетворювача.

За командою 14к ці дані висвітлюються на цифровому відліковому пристрої 7 (фіг. 1). Якщо необхідно, можна процес повірки повторити багаторазово (команда 15к програми) і в результаті одержати середньозважені значення T_x і ΔT , що підвищить точність повірки. Налаштування можна проводити і на експлуатованих раніше термоелектричних перетворювачах, якщо змінюються термоелектричні умови їх експлуатації, але при цьому температуру T_H треба визначати з високою точністю, наприклад, за зразковим термометром, що вимірює температуру в зоні робочого спаю термоелектричного перетворювача, який буде потім повірятися.

Якщо контроль термоелектричного перетворювача, що повіряється, продовжується, наприклад, при температурі T_x , яка трохи змінюється в околицях робочої точки, при інших температурах цього ж термоелектричного перетворювача або інших термоелектричних перетворювачів, то в першому випадку знову виконують три такти програми (кроки 3к-12к) при таких же значеннях вихідних даних (E_1 , E_2 , E_3 , I_0 , Δt_1 , Δt_2), у другому і третьому випадках в пам'ять контролера вводять нові значення цих даних, одержані в результаті налагодження цих термоелектричних перетворювачів в процесі роботи об'єкта.

Дані для всієї номенклатури термоелектричних перетворювачів, які застосовуються на підприємстві, або для різних робочих точок одного термоелектричного перетворювача можуть зберігатися на окремих дискетах або у постійній пам'яті контролера при досить великому її об'ємі.

Як приклад запропонованого способу, була визначена похибка термоелектричного перетворювача на основі хромель-копелевої термопари типу ТХК-0179. Теплова стала часу термопари

дорівнює $\tau \approx 90$ с, оптимальне значення постійного струму $I_0 = 0,6$ А, що призводило до охолодження робочого спаю на 4 К і нагрівання на 9 К за $\Delta t_1 = 6$ хв і $\Delta t_2 = 4$ хв відповідно.

ТермоЕРС термоелектричного перетворювача, робочий спай якого розміщували в розтопленому свинці у фазі переходу його від рідинної фази до твердої, відповідала температурі $331,46^\circ\text{C}$ за його градієнтною характеристикою. Дійсна температура, обчислена за формулами (23) і (24), з врахуванням вимірянних значень: E_1 , E_2 , E_3 і $T_H = 300^\circ\text{C}$ дорівнює $327,62^\circ\text{C}$, тобто похибка термоелектричного перетворювача $\Delta T_1 = 331,46 - 327,62 = 3,84$ К.

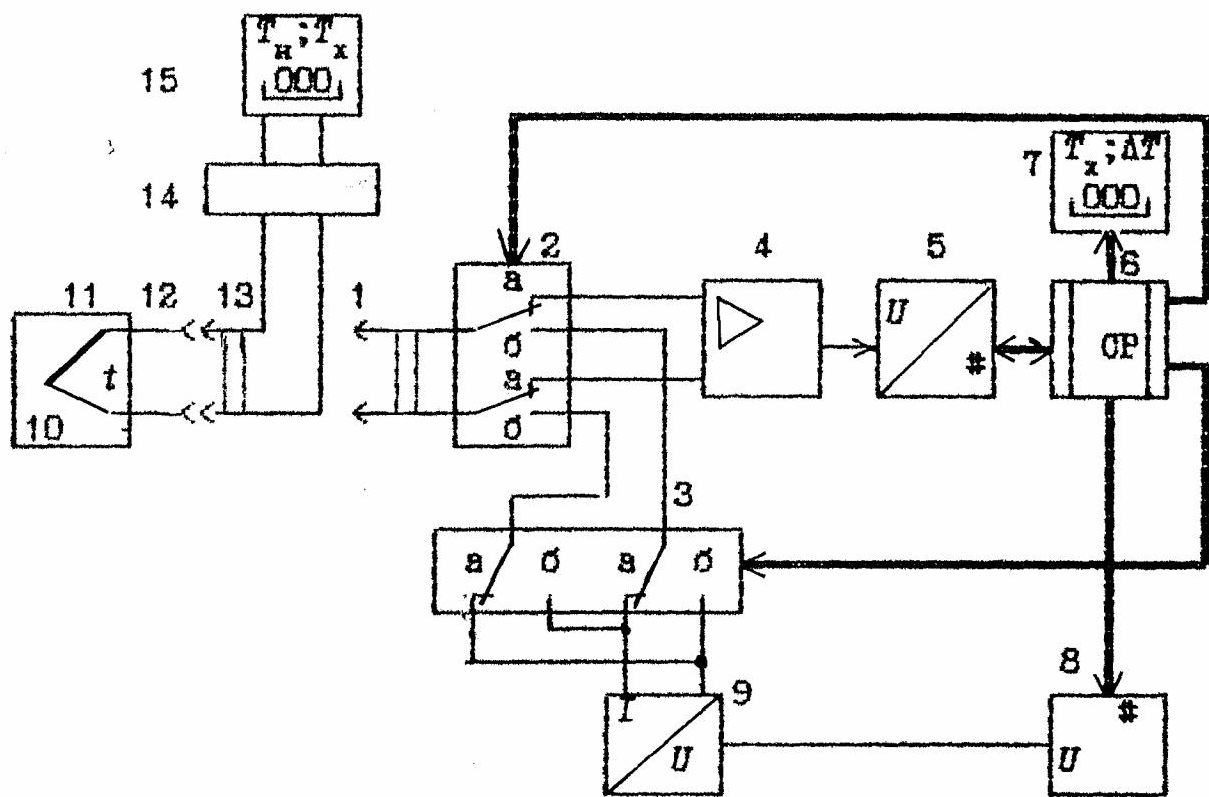
Температура затвердіння свинцю, як фізична константа, дорівнює $327,56^\circ\text{C}$. Тому дійсна похибка термоелектричного перетворювача дорівнює $\Delta T_2 = 331,46 - 327,56 = 3,9$ К. Таким чином, запропо-

нований спосіб дозволяє визначити абсолютну похибку термоелектричного перетворювача з відносною похибкою вимірювання

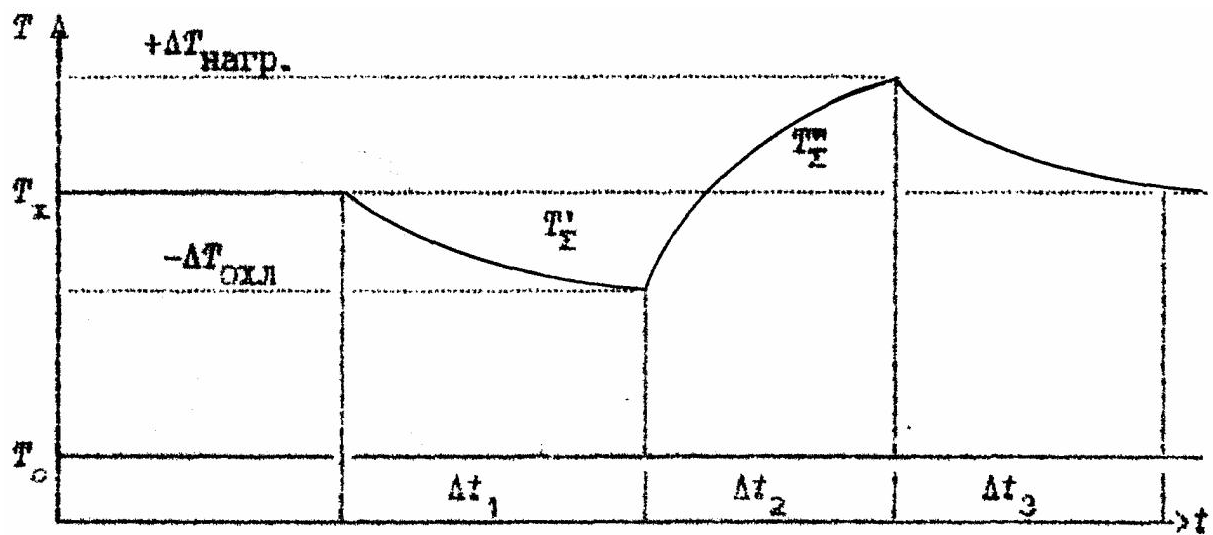
$$\gamma = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta T_2} \cdot 100 = \frac{3,84 - 3,9}{3,9} \cdot 100 \approx -1,5\%$$

Похибка вимірювання значення похибки термоелектричного перетворювача є величиною другого порядку малості. Тому її значення в межах до 5-10% цілком допустиме.

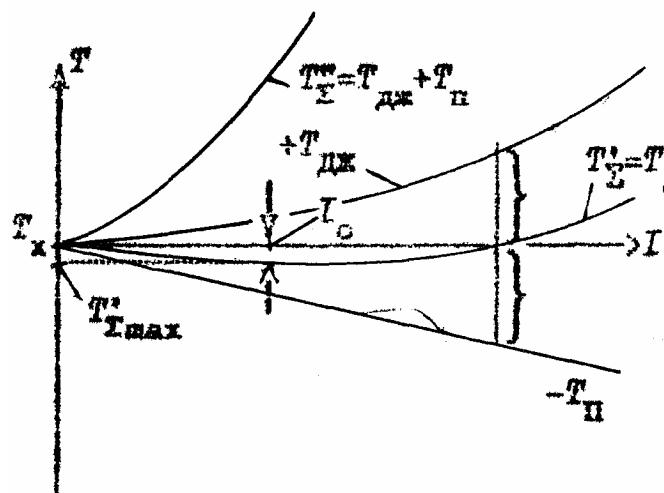
Вимірювання усталених значень термоЕРС, як указано вище, не потребує швидкодіючих АЦП і ЦАП, а також високоточних таймерів, що задають витримки часу на охолодження і нагрівання робочого спаю термоелектричного перетворювача. Повірка здійснюється за програмою і не потребує затрат ручної праці.



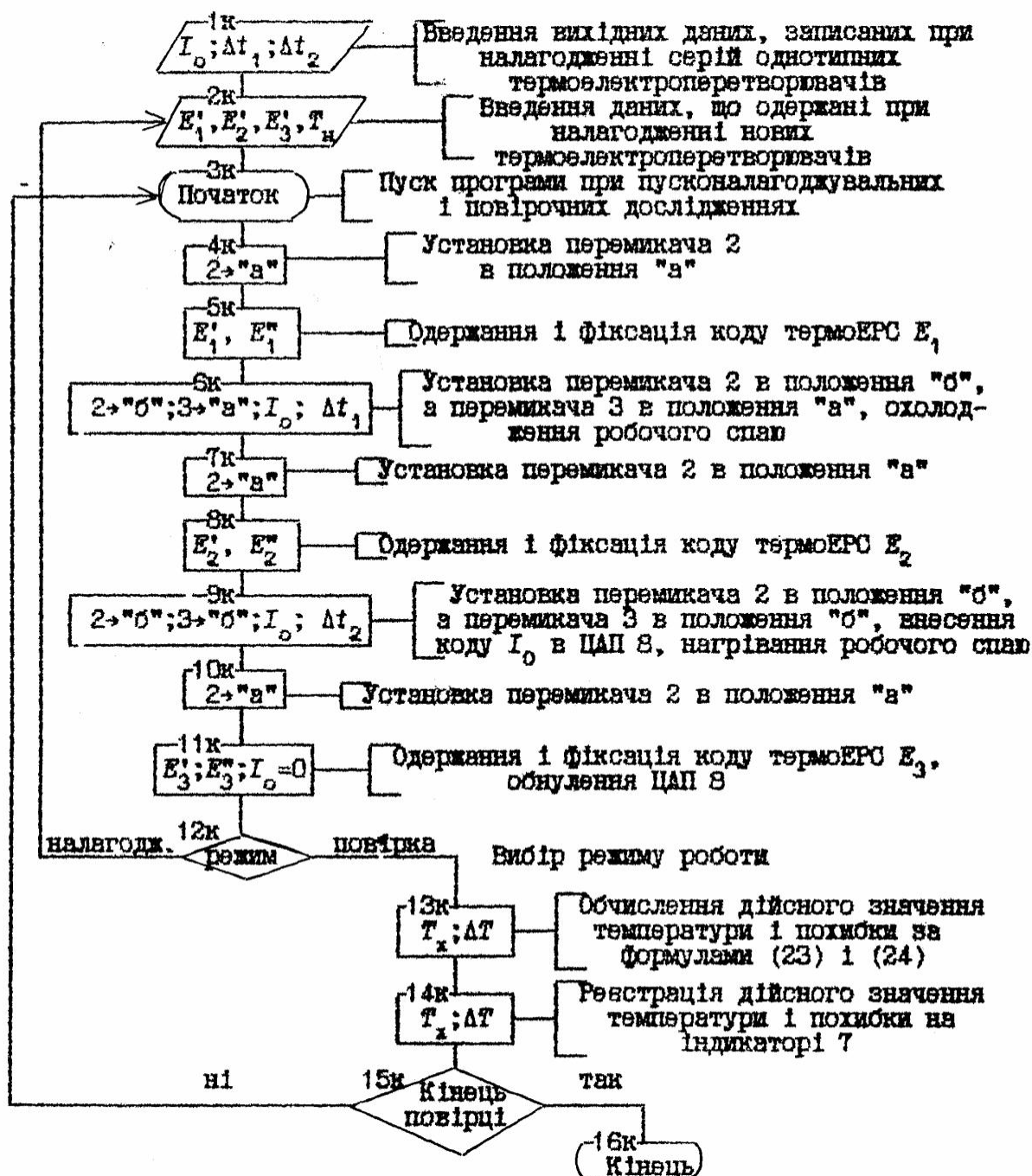
Фіг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фіг. 4

ДП "Український інститут промислової власності" (Укрпатент)
Україна, 01133, Київ-133, бульв. Лесі Українки, 26
(044) 295-81-42, 295-61-97

Підписано до друку _____ 2001 р. Формат 60х84 1/8.
Обсяг _____ обл.-вид. арк. Тираж 50 прим. Зам. _____

УкрІНТЕІ, 03680, Київ-39 МСП, вул. Горького, 180.
(044) 268-25-22