



УКРАЇНА

(19) UA (11) 38540 (13) A

(51) 7 G01K13/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

(21) 2000074410

(22) 21.07.2000

(24) 15.05.2001

(33) UA

(46) 15.05.2001, Бюл. № 4, 2001 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Юрчик Геннадій Васильович, Колосніченко Марина Вікторівна, Цесельська Наталія Валентинівна

(73) Київський державний університет технологій та дизайну

(57) Термоелектричний пристрій для вимірювання температури, який містить напівпровідникову термопару з електродними діркової та електронної провідностей, послідовно з'єднані нормуючий підсилювач і аналого-цифровий перетворювач та цифровий індикатор, який **відрізняється** тим, що в нього введенні перший і другий автоматичні двохполюсні перемикачі, вхід першого перемикача з'єднаний з вільними кінцями термопари, перша пара виходів першого автоматичного двох полюс-

ного перемикача з'єднана із входом нормуючого підсилювача, мікропроцесорний контролер, вхід якого з'єднаний з цифровим входом аналого-цифрового перетворювача, цифро-аналоговий перетворювач, виконаний по типу "цифра-постійна напруга", кодовий вхід якого під'єднаний до першого виходу мікропроцесорного контролера, перетворювач постійної напруги в постійний струм, потенціальним входом підключений до виходу цифро-аналогового перетворювача, а виходом до входу другого автоматичного двохполюсного перемикача, протилежні виходи якого з'єднані між собою з другою парою виходів першого автоматичного перемикача, вхід цифрового індикатора під'єднаний до другого виходу мікропроцесорного контролера, третій, четвертий і п'ятий виходи якого під'єднані відповідно до керованих входів першого, другого автоматичних двохполюсних перемикачів і аналого-цифрового перетворювача.

Винахід відноситься до термометрії і може бути використаний для підвищення точності вимірювання температур напівпровідниковими термопарами у широкому діапазоні температур.

В останні роки для вимірювання температур широке застосування знаходять термопари, термоелектрони яких виконані з напівпровідникових термоелектричних матеріалів типу Te , $PbTe$, Bi_2Te_3 , $Si-Ge$, $GaAs$ і інші. Чутливість таких термопар в 50-100 разів вище металічних, а за своїми експлуатаційними властивостями вони придатні як для вимірювання низьких, так і високих температур. Однак вони володіють суттєво нелінійними градувальними характеристиками (ГХ), що стримує їх використання в цифрових системах контролю та регулювання.

Програмна лінеаризація ГХ, яка заснована на запису нелінійної характеристики термопари в пам'яті ЕОМ і співставленні кодів термоелектрорушійної сили (ТЕРС) термопари з кодами апроксимованої характеристики з допомогою електронних таблиць, мало ефективна із-за нестабільності ГХ напівпровідникових термопар. Тому застосовують спеціальні схеми із структурно-часовою надлишковістю, яка дозволяє стабілізувати метрологічні характеристики термопар, в тому числі напівпрові-

дникових термопар.

Відомий термоелектричний пристрій для вимірювання температури (див. В. С. Варшава, Г. М. Потапчук «Мініатюрні перетворювачі на основі ефекту Зеебека в ниткоподібних кристалах». Книга тез доповідей сьомої міжнародної НТК «Електричні методи та засоби вимірювання температури», м. Львів, 15-17 вересня 1992 р., стор. 26), який складається з чутливого елемента термопари-кристалу на основі телуру (Te) ниткоподібної форми (голки) в захисному екрані з електричними контактами, які знаходяться відповідно при опорній температурі і температурі контрольованої поверхні твердого тіла, до якого доторкається робочий кінець чутливого елемента, і цифровий вольтметр, який вимірює і показує значення термоЕРС, пропорційну вимірюваній температурі. Для даного пристрою характерна висока швидкодія та чутливість, локальність вимірювань температури поверхонь різних твердих тіл. Недоліком такого пристрою є низька точність вимірювання із-за похибок, обумовлених нелінійністю ГХ, нестабільністю коефіцієнта чутливості термопари, а також із-за похибки, яка викликається зміною температури вільних кінців термопари під дією оточуючого їх середовища.

Відомий термоелектричний пристрій для вимі-

(19) UA (11) 38540 (13) A

рювання температури за А. С. СРСР №498516 Кл. G01K 13/02, 1976 р., який складається з напівпровідникової термопар, один електрод якої виконаний з ниткоподібного монокристалу кремнію, і реєструючого приладу.

Перевагою даного пристрою є підвищена чутливість кремнієвої термопар на відміну від телуриєвої і складає 300-500 мкВ/град, що дозволяє підвищити розрізняльну здатність пристрою. Але точність вимірювання температури при цьому залишається низькою із-за невирішеної проблеми залежності результатів вимірювання від ступеня не лінійності ГХ і нестабільності чутливості термопар.

Відомий термоелектричний пристрій для вимірювання температури (див. Л. И. Анатъчук, Термoeлементы и термоeлектрические устройства. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1978 р., стор. 579), який містить напівпровідникову термопару з електродами діркової та електронної провідностей ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ або $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$) і реєструючий прилад, вхід якого з'єднаний з вільними кінцями електродів термопар. Даний пристрій володіє високою чутливістю і швидкодією. При застосуванні в цьому пристрої термоелектричної батареї напівпровідникових елементів в якості первинного перетворювача температури його чутливість може бути збільшена на порядок, але точність вимірювання контрольованої температури в широкому діапазоні температур залишається низькою із-за не лінійності ГХ та нестабільності чутливості напівпровідникової термопар.

Відомий також пристрій для вимірювання температури (див. Измерения в электронике: Справочник/ Кузнецов В. А., Долгов В. А., Коневских В. М. и др.; Под ред. В. А. Кузнецова. - М.: Энергоиздат, 1987, с. 145 - 147), який містить напівпровідникову термопару з електродами діркової та електронної провідностей, послідовно з'єднані нормуючий підсилювач і аналого-цифровий перетворювач та цифровий індикатор.

У відомому пристрої використана циліндрична напівпровідникова термопара, яка складається з діркового та електронного напівпровідникових стержнів. Один стержень виконаний із сплаву SbZn , який має високу електронну провідність та чутливість $\alpha_1 = 200\text{-}250$ мкВ/град. Другий стержень виконаний із сплаву SbCd та має діркову провідність із чутливістю $\alpha_2 = 300\text{-}400$ мкВ/град.

ТермоЕРС термопар, яка складається із електронного та діркового провідників, визначається без урахування не лінійності виразом:

$$E = (\alpha_1 + \alpha_2)(T_1 - T_2),$$

де T_1 і T_2 - температура робочого спаю та вільних кінців. Тому чутливість напівпровідникової термопар дорівнює 500-650 мкВ/град. У циліндричній термопарі одна торцева площа нагрівається від контрольованого об'єкту та являється робочим спаєм термопар; вільні кінці мають температуру оточуючого середовища.

Із-за відносно високої теплопровідності сплавів, з яких зроблені стержні - електроди термопар, важко стабілізувати температуру T_2 вільних кінців, що призводить до великих похибок вимірювання при зміні температури робочого спаю у широкому температурному діапазоні. Крім того такий

термопарі притаманні похибки від не лінійності та нестабільності її ГХ.

Задача винаходу полягає у створенні такого пристрою для вимірювання температури напівпровідниковою термопарою, в якому введення нових елементів та зв'язків дозволило б забезпечити підвищення точності вимірювання температури.

Поставлена задача вирішується тим, що в термоелектричний пристрій для вимірювання температури, який містить напівпровідникову термопару з електродами діркової та електронної провідностей, послідовно з'єднані нормуючий підсилювач і аналого-цифровий перетворювач та цифровий індикатор, згідно винаходу, в нього введені перший і другий автоматичні двохполюсні перемикачі, вхід першого перемикача з'єднаний з вільними кінцями термопар, перша пара виходів першого автоматичного двохполюсного перемикача з'єднана із входом нормуючого підсилювача, мікропроцесорний контролер, вхід якого з'єднаний з цифровим виходом аналого-цифрового перетворювача, цифро-аналоговий перетворювач, виконаний по типу «цифра - постійна напруга», кодовий вхід якого під'єднаний до першого виходу мікропроцесорного контролера, перетворювач постійної напруги в постійний струм, потенціальним виходом підключений до виходу цифро-аналогового перетворювача, а виходом до входу другого автоматичного двохполюсного перемикача, протилежні виходи якого з'єднані між собою з другою парою виходів першого автоматичного перемикача, вхід цифрового індикатора під'єднаний до другого виходу мікропроцесорного контролера, третій, четвертий і п'ятий виходи якого під'єднані відповідно до керованих входів першого, другого автоматичних двохполюсних перемикачів і аналого-цифрового перетворювача.

Введення в пристрій двох автоматичних двохполюсних перемикачів, мікропроцесорного контролера та цифро-аналогового перетворювача, які з'єднані з напівпровідниковими електродами термопар, з нормуючим підсилювачем та аналого-цифровим перетворювачем вказаним чином, дозволяє провести додаткові вимірювання термоЕРС при охолодженні і нагріві робочого спаю термопар постійним струмом, обробку результатів проміжних вимірювань в процесорі контролера за запропонованим алгоритмом, дозволяє виключити вплив непостійності коефіцієнтів Зеєбека і Пельтьє термоелектричного ланцюга на результат вимірювання температури та виключити похибки від не лінійності та нестабільності ГХ напівпровідникової термопар з електродами діркової та електронної провідностей, що дозволяє забезпечити підвищення точності вимірювання температури.

На фіг. 1 представлена функціональна схема термоелектричного пристрою для вимірювання температури. На фіг. 2, 3 - блок-схема алгоритму програмної роботи пристрою.

Пристрій містить напівпровідникову термопару з електродами діркової та електронної провідностей 1 і клемну колодку 2 з вільними кінцями термопар, перший автоматичний двохполюсний перемикач 3, нормуючий підсилювач 4, аналого-цифровий перетворювач 5, мікропроцесорний контролер 6, цифро-аналоговий перетворювач 7, перетворювач постійної напруги в постійний струм 8,

другий автоматичний двохополюсний перемикач 9 і цифровий індикатор 10.

Клеми вільних кінців напівпровідникової термопари з електродами діркової та електронної провідностей 1, розташованих на колоді 2, з'єднані з входами двохополюсного перемикача 3, одна пара виходів якого з'єднана з входами нормуючого підсилювача 4. Друга пара виходів перемикача 3 з'єднана з протилежно з'єднаними виходами двохополюсного перемикача 9.

До виходу нормуючого підсилювача 4 під'єднаний аналого-цифровий перетворювач 5, кодовий вихід якого з'єднаний з входом мікропроцесорного контролера 6. До першого виходу контролера під'єднаний кодовими входами цифро-аналоговий перетворювач 7, вихід якого через перетворювач 8 напруги в струм з'єднаний з входами автоматичного двохополюсного перемикача 9.

До третього та четвертого виходів мікропроцесорного контролера 6 під'єднані керовані входи першого та другого автоматичних двохополюсних перемикачів 3 і 9. До другого виходу мікропроцесорного контролера 6 під'єднаний цифровий індикатор 10. Управління роботою аналого-цифрового перетворювача 5 здійснюється безпосередньо від мікропроцесорного контролера 6.

Пристрій для вимірювання температури працює наступним чином.

На початку експлуатації пристрій з напівпровідниковою термопарою 1 калібрують при відомій температурі T_K , яку вибирають з умови:

$$T_K = \sqrt{T_{\max} T_{\min}} \quad (1)$$

де T_{\max} і T_{\min} максимальна і мінімальна температури діапазон вимірювання.

ТермоЕРС E_1 , яка утворюється робочим спаєм двох напівпровідникових електродів, можна представити у вигляді:

$$E_1 = \varepsilon_K T_K - \varepsilon_0 T_0, \quad (2)$$

де ε_K - коефіцієнт Зеебека робочого спаю двох напівпровідникових електродів при температурі T_K ;

ε_0 - коефіцієнт Зеебека вільних кінців термопари при температурі T_0

Так як коефіцієнт Зеебека функціонально залежить від температури, то ГХ термопари, особливо напівпровідникової, є нелінійною. Але в околиці робочої точки ГХ, яка задається температурою T_K , невеликі зміни температури $\Delta T (\Delta T \ll T_K)$ викликають пропорційні, тобто лінійні зміни термоЕРС.

Після вимірювання термоЕРС E_1 і перетворення її в цифровий код, який заноситься в пам'ять контролера 6, контакти перемикача 3 переводять з положення «а» в положення «б» і від перетворювача постійної напруги в постійний струм I_0 в направленні, при якому відбувається його відносно поступове охолодження за рахунок поглинання в робочому спаї термопари теплоти Пельтьє. Так як разом з поглинанням теплоти відбувається і виділення теплоти Джоуля, термоЕРС на вільних кінцях термопари зменшиться і буде мати значення:

$$E_2' = \varepsilon_K \left[T_K + \left(\kappa I_0^2 R_c - \Pi I_0 \right) \frac{\Delta T}{C} - \varepsilon_0 T_0 \right], \quad (3)$$

де R_c - електричний опір робочого спаю;

K - коефіцієнт, який враховує долю теплоти Джоуля, яка розсіюється в робочому спаї;

Π - коефіцієнт Пельтьє матеріалів, які утворюють робочий спай;

C - еквівалентна ємність спаю, яка визначається його масою та питомими теплоємностями матеріалів електродів;

Δt - час охолодження спаю.

Сила струму визначається з умови максимального охолодження спаю при допустимій щільності струму із співвідношення:

$$\frac{\partial E_2'}{\partial I} = 2\kappa I_0 - \Pi = 0, \quad (4)$$

Звідки оптимальний струм охолодження:

$$I_0 = \frac{\Pi}{2R_{cK}}, \quad (5)$$

Як правило $K \approx 0.5$, так як половина тепла Джоуля поступає на підвищення температури спаю, а друга половина тепла відводиться електродами к вільним кінцям та в оточуюче їх середовище. Тому можна рахувати, що:

$$I_0 = \frac{\Pi}{R_c} \quad (6)$$

Враховуючи, що коефіцієнт Пельтьє визначається значенням коефіцієнта Зеебека робочого спаю та його температурою:

$$\Pi = \varepsilon_K T_K, \quad (7)$$

термоЕРС E_2' робочого спаю представлено у вигляді:

$$E_2' = \varepsilon_K \left[T_K + \left(0,5 I_0^2 R_c - \varepsilon_K T_K I_0 \right) \frac{\Delta t}{C} - \varepsilon_0 T_0 \right], \quad (8)$$

Час охолодження ΔT вибирають меншим теплової сталої часу τ робочого спаю термопари ($\Delta T < \tau$). Тому інтенсивність адіабатичного нагрівання робочого спаю визначається еквівалентною теплоємністю C спаю і мало залежить від теплофізичних властивостей середовища, в якому знаходиться робочий спай термопари.

В момент закінчення часу охолодження робочого спаю термопари по команді мікропроцесорного контролера 6 керований перемикач 3 переводиться в початкове положення «а». Відбувається вимірювання термоЕРС E_2' і перетворення її в цифровий код, який заноситься в пам'ять мікропроцесорного контролера 6. Далі одночасно переводять автоматичні двохополюсні перемикачі 3 і 9 з положення «а» в положення «б», в результаті чого змінюється направлення протікання струму I_0 через робочий спай напівпровідникової термопари з електродами діркової та електронної провідностей 1.

Внаслідок рекурсивності ефекту Пельтьє в робочому спаї відбувається виділення теплоти і підсумовування теплоти Джоуля і Пельтьє, що веде до швидкого зростання температури спаю, а термоЕРС приймає значення

$$E_3' = \left\{ \varepsilon_K \left[T_K + \left(0,5 I_0^2 R_c + \varepsilon_K T_K I_0 \right) \frac{\Delta t}{C} \right] - \varepsilon_0 T_0 \right\}, \quad (9)$$

Час охолодження і нагрівання Δt вибирають таким, щоб температура охолодження і перегріву робочого спаю відносно T_K не перевищувала значення

$$\Delta T \leq (0,05 - 0,1) T_K,$$

Так як охолодження та нагрівання спаю здійснюються в невеликих межах (практично не більше 5-10 K), то коефіцієнт Зеебека у виразах (2), (3), (9) приймається однаковим і рівним ε_K .

Автоматичні двохполюсні перемикачі 3 і 9 переводять в положення «а», перетворюють термоЕРС E_3' в цифровий код, який заноситься в пам'ять мікропроцесорного контролера 6. Вимикають цифро-аналоговий перетворювач 7.

Таким чином, в результаті калібровки пристрою отримують цифрові коди термоЕРС термопари E_1' E_2' E_3' значення яких заносять в пам'ять мікропроцесорного контролера 6. Параметри калібровки Δt , T_K і I_0 заносять в пам'ять мікропроцесорного контролера 6 ще на початку експлуатації пристрою.

В процесі наступної експлуатації пристрою точність вимірювання температури починає знижуватися і, в основному, із-за виникаючої прогресуючої систематичної похибки первинного перетворювача - термопари внаслідок її поступового старіння. В структурі робочого спаю і електродів термопари під дією оточуючого їх середовища відбуваються незворотні фізико-хімічні зміни, що викликає відповідні зміни як термоелектричних коефіцієнтів Зеебека і Пельтьє термопари, так і дрейф її ГХ. Із-за впливу оточуючого середовища неминує змінюється і температура вільних кінців термопари T_0 , що викликає появу адитивної похибки, а зміна коефіцієнта Зеебека термопари обумовлює появу мультиплікативної похибки вимірювання температури.

Таким чином, результат вимірювання температури T_x пристроєм буде мати адитивну і мультиплікативну складові сумарної похибки, а також похибку нелінійності перетворювальної характеристики термопари.

При нелінійній характеристиці термопари складові похибки в околиці робочої точки, яка визначається температурою T_x , можна врахувати шляхом зміщення апроксимуючої дотичної (адитивна похибка) та її поворотом (мультиплікативна похибка) відносно вихідної дотичної, проведеної в точці T_x до початкової ГХ. Тому результат вимірювання контрольованої температури T_x представимо у вигляді

$$E_1'' = (\varepsilon_K + \Delta\varepsilon) T_x - \varepsilon_0 (T_0 + \Delta T) = \varepsilon_K (1 + \gamma_1) T_x - \varepsilon_0 T_0 + \delta_1, \quad (11)$$

де $\gamma = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_K}$ - відносна мультиплікативна похибка,

обумовлена зміною коефіцієнта Зеебека термопари;

$\delta_1 = \varepsilon_0 T_0$ - абсолютна адитивна похибка, обумовлена зміною температури вільних кінців термопари.

Відносна похибка γ_1 містить також складову, обумовлену залежністю коефіцієнта Зеебека від температури, тобто нелінійністю ГХ.

Цифровий код E_1'' заноситься у пам'ять мікропроцесорного контролера 6. Потім виконують додаткові вимірювання термоЕРС термопари при охолодженні і нагріві її робочого спаю постійним струмом I_0 , таким самим шляхом, як і при початковій калібровці термометра.

Змінювання температури робочого спаю та її

вимірювання здійснюється аналогічним перемиканням контактів автоматичних двохполюсних перемикачів 3 і 9.

Після охолодження робочого спаю термопари на протязі часу Δt вимірюють термоЕРС

$$E_2'' = \varepsilon_K (1 + \gamma_2) \left\{ T_x + \left[0,5 I_0^2 R_c - \varepsilon_K (1 + \gamma_2) T_x I_0 \right] \frac{\Delta t}{C} - \varepsilon_0 T_0 + \delta_2 \right\}, \quad (12)$$

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

Цифровий код E_2'' заносять у пам'ять мікропроцесорного контролера 6. Наступною операцією змінюють направлення струму I_0 через робочий спай і нагрівають його на протязі того самого часу Δt . В кінці часового інтервалу вимірюють термоЕРС

$$E_3'' = \varepsilon_K (1 + \gamma_3) \left\{ T_x + \left[0,5 I_0^2 R_c + \varepsilon_K (1 + \gamma_3) T_x I_0 \right] \frac{\Delta t}{C} - \varepsilon_0 T_0 + \delta_3 \right\}, \quad (13)$$

де γ_3 і δ_3 - значення похибок при нагріванні робочого спаю. Цифровий код E_3'' заносять у пам'ять мікропроцесорного контролера 6.

Значення вимірювальної температури γ_1 і δ_1 . Так як зміна температури робочого спаю під час пропускання через нього струму відбувається у вузькому діапазоні, то можна рахувати похибки в околиці робочої точки, однаковими:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma,$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta, \quad (14)$$

З виразів (8) і (9) визначають додаткову термоЕРС від поглинання і виділення теплоти Пельтьє в процесі калібрування термопари:

$$E_3' - E_2' = 2\varepsilon_K^2 I_0 T_K \frac{\Delta T}{C}, \quad (15)$$

Визначають додаткову термоЕРС від поглинання і виділення теплоти Пельтьє в робочому спай термопари при температурі T_x з рівнянь (12) і (13).

$$E_3'' - E_2'' = 2\varepsilon_K^2 (1 + \gamma)^2 I_0 T_x \frac{\Delta t}{C}, \quad (16)$$

Потім визначають додаткову термоЕРС від виділення теплоти Джоуля при калібруванні (2), (3) і (9) і вимірюваних при експлуатації (11), (12) і (13):

$$E_2' + E_3' - 2E_1' = \varepsilon_K I_0^2 R_c \frac{\Delta t}{C},$$

$$E_2'' + E_3'' - 2E_1'' = \varepsilon_K (1 + \gamma) I_0^2 R_c \frac{\Delta t}{C}, \quad (18)$$

Визначають відношення приростів термоЕРС (15), (16) та (17), (18);

$$\frac{E_3' - E_2'}{E_3'' - E_2''} = \frac{T_K}{T_x (1 + \gamma^2)}, \quad (19)$$

$$\frac{E_2' + E_3' - 2E_1'}{E_2'' + E_3'' - 2E_1''} = \frac{1}{1 + \gamma}, \quad (20)$$

Значення похибки з (20) підставимо у вираз (19) і отримаємо:

$$\frac{E_3' - E_2'}{E_3'' - E_2''} = \frac{(E_2' + E_3' - 2E_1')^2}{(E_2'' + E_3'' - 2E_1'')^2} \frac{T_K}{T_x}, \quad (21)$$

Вирішуючи рівняння (21) відносно вимірюваної температури T_x отримаємо

$$T_x = \frac{(E_3'' - E_2'')(E_2' + E_3' - 2E_1')^2}{(E_3' - E_2')(E_2'' + E_3'' - 2E_1'')} T_K, (22)$$

З виразу (22) випливає, що на результат вимірювання температури T_x не впливають значення коефіцієнтів Зеєбека і Пельтьє, а також адитивна 5 і мультиплікативна у складові похибки вимірювання T_x . Не впливає також ступінь нелінійності ГХ термопар, відпадає необхідність її апроксимації та запис в пам'яті ЕОМ.

Приклад

Дослідженню підлягала напівпровідникова термопара із сплавів SbZn та SbCd з чутливістю 550-650 мкВ/град. Робочий спай термопарі нагрівався у температурному діапазоні 300-750 К. Вільні кінці термопар не були термостатовані і їх температура у процесі нагріву змінювалась від 290 К

до 310 К. Попередня калібровка термопар проводилася при температурі 450 К. Струм охолодження та нагріву був вибраний порядку 0.3 А, при протіканні якого температура робочого спаю термопар знижувалася на 12-15 К. При зміні напрямку струму спостерігалось збільшення температури через робочий спай термопар на 25-30 К. Час охолодження і нагріву не перевищував 30 с.

Похибка вимірювання визначалася методом порівняння показу із зразковою термопарою платинової групи. Різниця показу при використанні результатів, отриманих тільки за допомогою ГХ напівпровідникової термопар у вказаному температурному діапазоні, досягала 10-12 К, а з обчислюванням результатів за формулою (22) не перевищувала $\pm 0,5$ К. Поріг чутливості термопар до змін температури склав не менше 0,05 К.

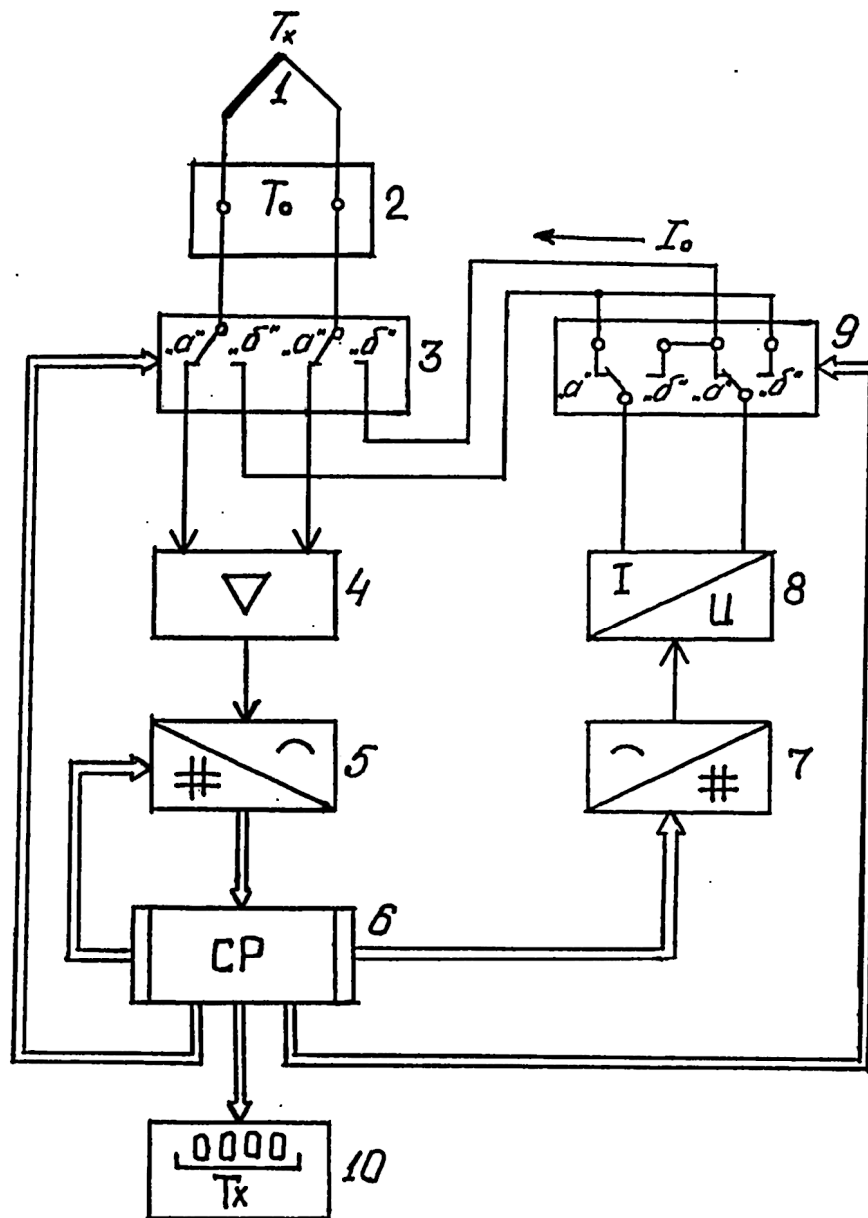
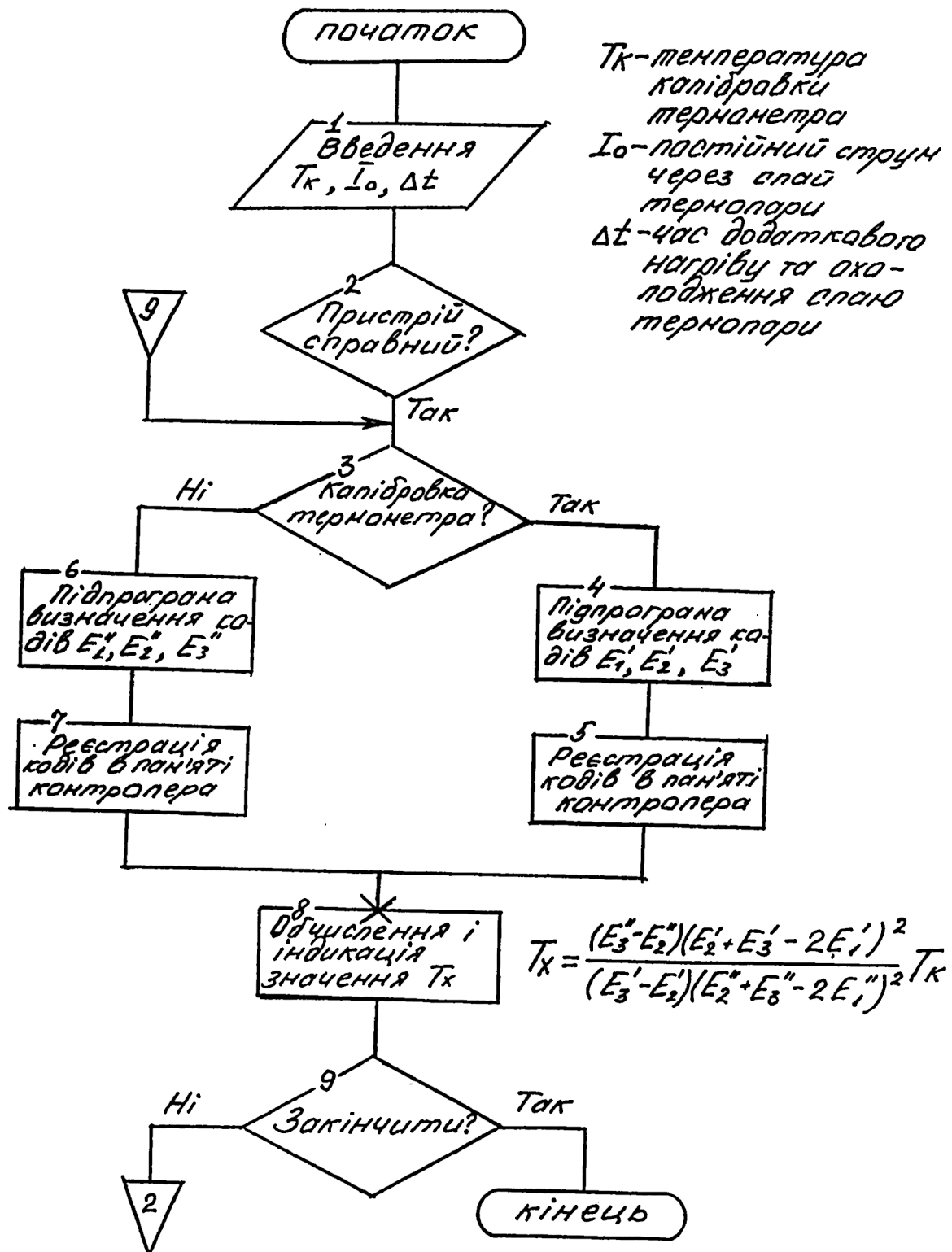
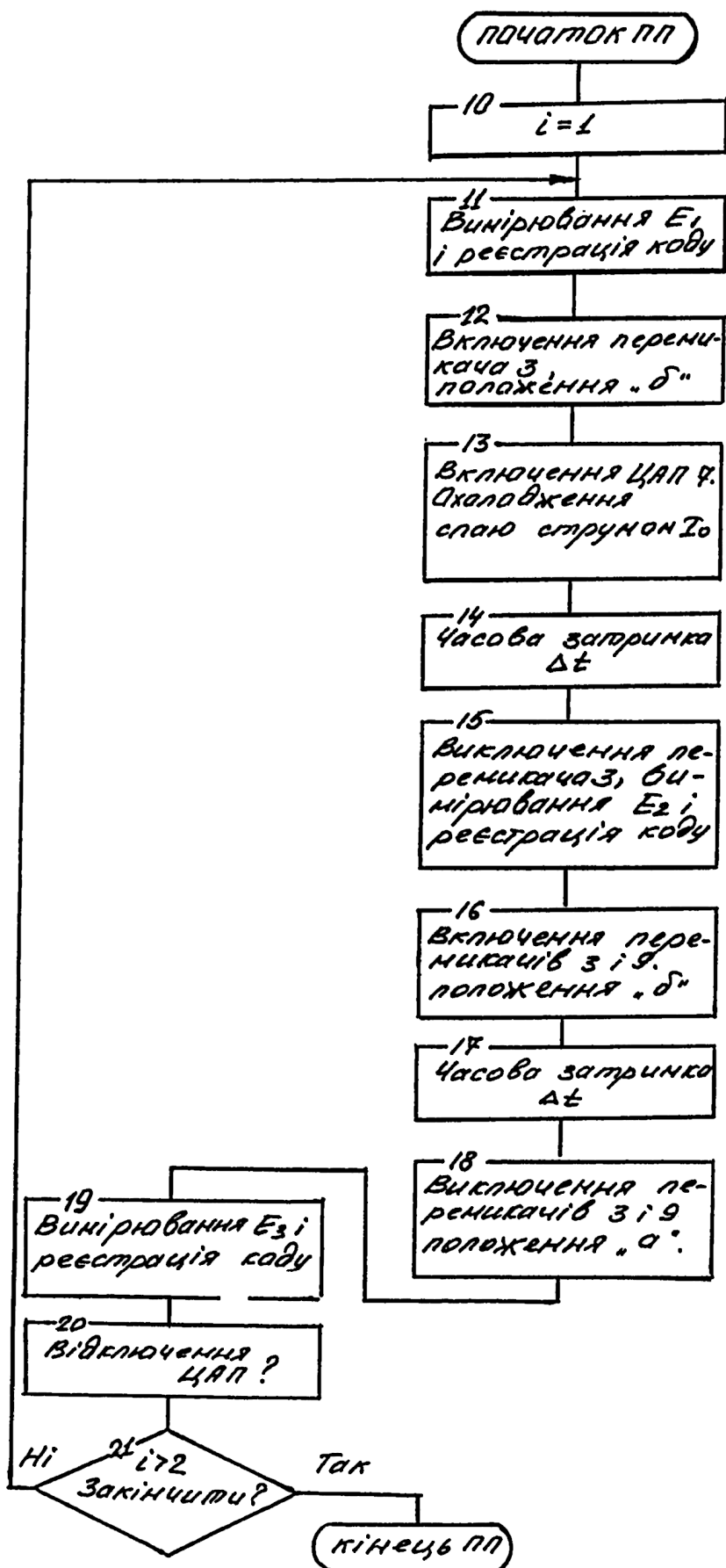


Fig. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

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
