

Винахід відноситься до техніки радіовимірювань і може бути використаний для вимірювання надвисокочастотної (НВЧ) потужності, яка поглинається навантаженням і перетворюється в тепло, що генерує електричну напругу напівпровідниковою термобатареєю.

В останні роки як первинні перетворювачі надвисокочастотної потужності все ширшого застосування набувають термоелементи або термобатареї, термоелектроди яких виконані з таких термоелектричних напівпровідникових матеріалів, як  $\text{Te}$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Si-Ge}$ ,  $\text{GaAs}$  та інші. Чутливість таких термоелементів у 50-100 разів вище металевих, а за своїми експлуатаційними властивостями вони придатні для роботи у широкому діапазоні температур. Однак вони суттєво відрізняються нелінійною градувальною характеристикою (ГХ), що стримує їх використання у цифрових системах контролю та регулювання НВЧ-потужності.

Програмна лінеаризація ГХ, заснована на записі нелінійної характеристики термоелемента у пам'яті електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) і зіставленні кодів термоелектрорушійної сили (ТЕРС) термоелемента з кодами апроксимованої характеристики за допомогою електронних таблиць, малоефективна через часову нестабільність ГХ напівпровідникових термоелементів. Тому застосовують спеціальні схеми із структурно-часовою надлишковістю вимірювань, які дозволяють стабілізувати метрологічні характеристики, у тому числі термоелементів з напівпровідниковими електродами.

Відомий калориметричний вимірювач надвисокочастотної потужності (див. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1986, С. 105-106), який містить напівпровідникові термоелектроди у вигляді стержнів, розділених ізоляційною прокладкою, мідні продовжувачі і виводи. Робочі кінці (місце з'єднання електродів) вимірювача розташовані на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилеводу. Напівпровідникові термоелектроди виконані із сплавів  $\text{Te-Bi-Se}$  і  $\text{Te-Bi-Sb}$ , що забезпечує чутливість термоперетворювача на рівні 160-180 мкВ/К.

Через нестабільність чутливості напівпровідникового термоелемента коефіцієнт перетворення НВЧ-потужності у постійну напругу поступово змінюється, що спричиняє значні прогресуючі похибки вимірювання НВЧ-потужності. Ці похибки у процесі експлуатації термоелемента важко врахувати або компенсувати.

Відомий калориметричний вимірювач надвисокочастотної потужності (див. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова. - М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 142-146), який містить напівпровідниковий термоелемент, робочі кінці електродів якого з'єднані металевим містком з поглинаючим шаром, розташованим на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилеводу, продовжувальні дроти, нормуючий підсилювач та мілівольтметр, під'єднаний до виходу нормуючого підсилювача.

Нелінійність статичної характеристики ГХ напівпровідникового термоелемента через залежність коефіцієнта Зеебека його робочих кінців від температури, нестабільність чутливості за часом та у зв'язку зі складністю стабілізації температури вільних кінців внаслідок відносно високої теплопровідності напівпровідникових електродів не дають можливості забезпечити високу точність вимірювання НВЧ-потужності.

Відомий також калориметричний вимірювач надвисокочастотної потужності (див. А.С. 714299 (СССР). Сверхвысокочастотный калориметр. / Водотовка В.И., Скрипник Ю.А. МПК G01R21/02 // БИ 1980, №8), що містить відрізок хвилеводу, у якому розміщене сухе навантаження, і калориметричну насадку.

Крім того, відомий вимірювач оснащений охолоджуючим термоелементом, включеним до ланцюга підсилювання зворотного зв'язку, що охоплює індикаторну термобатарею, а також нагрівач і другий охолоджуючий термоелемент, що розташовані на калориметричній насадці.

Перевагою цього пристрою є те, що він реалізує алгоритм вимірювання з автоматичною корекцією похибок первинного термоелектричного перетворення теплової енергії контрольованої НВЧ-потужності. Цей алгоритм передбачає отримання додаткових результатів спостережень при мультиплікативному та адитивному теплових каліброваних впливах на калориметричну насадку з сухим навантаженням і визначення значення НВЧ-потужності за формулою.

Недоліком цього вимірювача є низька чутливість первинного перетворювача (термобатареї, виконаної з металевих термопар) до малих значень контрольованої НВЧ-потужності, оскільки утворювана на виході термобатареї ТЕРС становить лише одиниці мікр вольт, вимірювання яких пов'язане з великими похибками. Недоліком пристрою є також дуже низька швидкодія, обумовлена тим, що здійснення теплових впливів на калориметричну насадку з метою збільшення або зменшення її температури потребує багато часу. Час встановлення термодинамічного балансу у калориметричній насадці з сухим навантаженням залежить від її відносно великої теплової інерційності. При цьому значення струмів, що входять до складу алгоритмічної формули можуть не відповідати ustalеним станам термодинамічної рівноваги калориметричної насадки, в результаті чого алгоритм визначення контрольованої потужності буде порушений, а похибка визначення кінцевого результату матиме непередбачене значення. Цей недолік підсилюється тим, що всі вимірювальні операції та реєстрація додаткових результатів спостережень виконується вручну, що викликає появу суб'єктивної похибки - неоднозначності відліку спостережень.

Завданням винаходу є створення такого калориметричного вимірювача надвисокочастотної потужності, у якому введення нових елементів та зв'язків забезпечило б не тільки усунення впливу на результат вимірювання вагомих похибок, обумовлених нелінійністю ГХ, нестабільністю чутливості, зміною температури вільних кінців термобатареї, й підвищення чутливості вимірювача, розширення діапазону вимірювання за рахунок перетворення малої НВЧ-потужності в електричний сигнал, збільшення швидкодії вимірювача та усунення суб'єктивних похибок неоднозначності відліку додаткових спостережень.

Поставлене, завдання вирішується завдяки тому, що у калориметричний вимірювач надвисокочастотної потужності, до складу якого входить відрізок хвилеводу, у якому розміщено сухе навантаження і калориметрична насадка, на якій розташована індикаторна термобатарея, нормуючий підсилювач постійної напруги та індикатор, (відповідно винаходу введено два автоматичних двополюсних перемикачі, вхід першого з яких з'єднаний з вільними кінцями термобатареї, а перший його вихід - з входом нормуючого підсилювача постійної напруги, аналого-цифровий перетворювач, що входом з'єднаний з виходом нормуючого підсилювача постійної напруги, мікропроцесорний контролер входом з'єднаний з виходом аналого-цифрового перетворювача, цифро-аналоговий перетворювач входом з'єднаний з першим

виходом мікропроцесорного контролера, перетворювач постійної напруги у постійний струм входом з'єднаний з виходом цифро-аналогового перетворювача; входи другого автоматичного двополюсного перемикача під'єднані до виходу перетворювача постійної напруги у постійний струм, виходи його зустрічно сполучені між собою і з'єднані з другим виходом першого автоматичного перемикача, цифровий індикатор входом з'єднаний з другим виходом мікропроцесорного контролера, третій, четвертий і п'ятий виходи якого під'єднані відповідно до керуючих входів першого і другого автоматичних двополюсних перемикачів та аналого-цифрового перетворювача, а як термобатарею використано багатоелементний термоперетворювач з напівпровідниковими електродами електронної та діркової провідностей.

На фіг.1 представлена функціональна схема калориметричного вимірювача НВЧ-потужності; на фіг.2, 3 - блок-схема алгоритму програмної роботи вимірювача.

Вимірювач НВЧ-потужності містить відрізок хвилеводу 1, сухе навантаження 2, металеву калориметричну насадку 3, на поверхні якої встановлена індикаторна термобатарея 4, утворена кількома напівпровідниковими елементами електронної та діркової провідностей, радіатор 5, двополюсні перемикачі 6 і 7 (мультиплексори), нормуючий підсилювач постійної напруги 8, аналого-цифровий перетворювач 9, мікропроцесорний контролер 10, цифро-аналоговий перетворювач 11, перетворювач постійної напруги у постійний струм 12, цифровий індикатор 13.

Вільні кінці термобатареї 4 підключені до входу двополюсного перемикача 6, одна пара виходів якого з'єднана з входом нормуючого підсилювача 8, а друга - з виходами другого перемикача 7, з'єднаних між собою вставкою. Вихід нормуючого підсилювача 8 з'єднаний з входом аналого-цифрового перетворювача 9, кодовий вихід якого з'єднаний з входом мікропроцесорного контролера 10. Перший вхід контролера 10 з'єднаний з входом цифро-аналогового перетворювача 11, вихід якого сполучений з потенціальним входом перетворювача 12. Вихід перетворювача 12 з'єднаний з входом двополюсного перемикача 7. Управління роботою перемикачів 6 і 7, а також аналого-цифровим перетворювачем 9 здійснюється мікропроцесорним контролером 10 згідно з програмою (фіг.2, 3).

Калориметричний вимірювач НВЧ-потужності працює таким чином.

Електромагнітне випромінювання НВЧ-сигналу потужністю  $P_X$  надходить на хвилевід 1 з сухим навантаженням 2, що спричиняє повний нагрів останнього за рахунок діелектричних втрат до температури  $T_X$ . Зв'язок температури з середньою потужністю НВЧ-сигналу можна записати у вигляді:

$$P_X = \frac{C \Delta T}{t} = \frac{C(T_X - T_0)}{t} \quad (1)$$

де  $T_0$  - температура навколишнього середовища;

$C$  - теплоємність робочого тіла;

$\Delta T$  - зміна температури сухого навантаження;

$t$  - час, за який досягається температура  $T_X$ .

В результаті перетворень (1), оскільки  $T_0/C = \text{const}$ , можна записати:

$$T_X = \frac{P_X t}{C} + \frac{T_0}{C} = k_1 k_2 P_X \quad (2)$$

де  $k_1, k_2$  - коефіцієнти, що характеризують ступінь зв'язку та передачі теплоти від сухого навантаження до калориметричної насадки та відповідно до термобатареї.

Таким чином, НВЧ-потужність спричиняє нагрів термобатареї і, як наслідок, виділення термоелектрорушійної сили (ТЕРС), що утворюється на виході термобатареї 4, пропорційної температурі робочих кінців його електродів. Для забезпечення надійної теплопередачі без втрат, робочі кінці термобатареї мають тепловий контакт з поверхнею калориметричної насадки 3. Вільні кінці термоелемента, закріплені на радіаторі, перебувають при температурі  $T_2$ , яка дещо вища за температуру навколишнього середовища  $T_0$  за рахунок теплопровідності стержнів.

На початку експлуатації вимірювача його калібрують відомою НВЧ-потужністю  $P_0$ , яку вибирають згідно з умовою

$$P_0 = \sqrt{P_{\max} P_{\min}} \quad (3)$$

де  $P_{\max}$  і  $P_{\min}$  - максимальна і мінімальна НВЧ-потужності діапазону вимірювання.

Термо-ЕРС  $E_1'$ , що утворюється на вільних кінцях термобатареї при нагріванні робочих кінців до температури  $T_1$ , яка відповідає НВЧ-потужності  $P_0$ , можна представити у вигляді.

$$E_1' = \alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2 \quad (4)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  - коефіцієнти Зеебека відповідно робочих та вільних кінців термобатареї.

Вихідний сигнал термобатареї  $E_1'$  надходить через контакти перемикача 6, розташовані, як показано на фіг.1 у лівому положенні, на вхід нормуючого підсилювача 8, після чого перетворюються аналого-цифровим перетворювачем 9 на цифровий код:

$$N_1 = k_3 S (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2) \quad (5)$$

де  $k_3$  - коефіцієнт підсилення підсилювача 8;

$S$  - крутизна перетворення цифрового перетворювача 9.

Код  $N_1$  реєструється у пам'яті контролера 10. Після цього за командою контролера 10 контакти перемикача 6 переводять у праве положення і одночасно за допомогою цифро-аналогового перетворювача 11 і перетворювача постійної напруги у постійний струм 12 формується постійний струм заданого значення  $I_0$ . Струм пропускають протягом визначеного часу  $\Delta t_1$  через робочі кінці термобатареї у напрямку, що забезпечує їх охолодження за рахунок поглинання теплоти Пельтьє.

$$Q_P = \Pi I_0 \quad (6)$$

де  $Q_P$  - кількість теплоти, поглинутої у місці контакту робочих кінців;

$\Pi$  - коефіцієнт Пельтьє робочих кінців термобатареї.

В результаті температура робочих кінців термобатареї зміниться на величину  $\Delta T \ll T_1$ . Невеликі зміни температури робочого кінця при нелінійній характеристиці термобатареї в околиці робочої точки, яка задається температурою  $T_1$ , викликають пропорційні, тобто лінійні, зміни ТЕРС.

Одночасно з поглинанням теплоти відбувається також і виділення теплоти Джоуля вздовж термоелектродів. Якщо час протікання струму  $\Delta t_1$  вибирають значно тривалішим, ніж теплова стала  $\tau$  термобатареї ( $\Delta t_1 = 4 \div 5 \tau$ ), то процес охолодження робочих кінців має усталений характер, а його інтенсивність визначатиметься в основному теплопровідністю електродів термоелемента.

На момент закінчення часу  $\Delta t_1$  за командою мікропроцесорного контролера 10 контакти керованого перемикача 6 переводять у початкове ліве положення і цифровий код  $N'_1$  напруги охолодженої термобатареї реєструється у пам'яті мікропроцесорного контролера 10:

$$N'_2 = k_3 S \left\{ \alpha_1 \left[ T_1 + l \frac{k_4 I_0^2 R - \Pi I_0}{\lambda F} \right] - \alpha_2 T_2 \right\} \quad (7)$$

де  $I_0$  - оптимальний струм, що проходить через термобатарею 4;

$R$  - внутрішній опір термобатареї;

$k_4$  - коефіцієнт врахування питомої теплоти Джоуля, що розсіюється на робочих кінцях термобатареї;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності електродів термобатареї;

$l$  - довжина термоелектродів;

$F$  - площа поперечного перетину термоелектродів.

Силу оптимального струму  $I_0$  вибирають виходячи з умови максимального охолодження робочих кінців термобатареї. Оскільки при цьому зменшення ТЕРС на вільних кінцях термобатареї буде найбільшим, то оптимальний струм  $I_0$  визначають з рівняння

$$\frac{du_2}{dl} = 2k_4 I_0 R - \Pi = 0 \quad (8)$$

звідки значення оптимального струму

$$I_0 = \frac{\Pi}{2k_4 R} \quad (9)$$

При симетричній конструкції термобатареї половина теплоти Джоуля надходить до робочих кінців електродів, а половина - до вільних кінців. Тому при  $k_4 = 0,5$  оптимальний струм становитиме:

$$I_0 = \frac{\Pi}{R} \quad (10)$$

Враховуючи, що коефіцієнт Пельтьє робочих кінців пов'язаний з коефіцієнтом Зеєбека  $\alpha$  через температуру  $T_1$  маємо

$$\Pi = \alpha_1 T_1 \quad (11)$$

Тоді код напруги охолодженої термобатареї при оптимальному струмі  $I_0$  з урахуванням виразу (7) можна представити у вигляді

$$N'_2 = k_3 S \left[ \alpha_1 \left( T_1 + l \frac{0,5 I_0^2 R - \alpha_1 T_1 I_0}{\lambda F} \right) - \alpha_2 T_2 \right] \quad (12)$$

Довжину термоелектродів та їх площу вибирають такими, щоб температура охолодження робочих кінців  $\Delta T_1$  при оптимальному струмі  $I_0$  перебувала у межах лінійної ділянки статичної характеристики термобатареї, тобто необхідне виконання такої умови:

$$-\Delta T = \alpha_1 l \frac{0,5 I_0^2 R - \alpha_1 T_1 I_0}{\lambda F} \leq (0,05 \div 0,1) T_1 \quad (13)$$

Після реєстрації цифрового коду  $N'_1$  виконується коротка часова затримка  $\Delta t_2$ , в результаті якої температура робочих кінців охолодженої термобатареї починає за відсутності струму  $I_0$  підвищуватися і наближається до початкової  $T_1$  за рахунок в основному природного кондуктивного та конвекційного теплообміну робочого кінця з елементами конструкції калориметричної насадки та навколишнім середовищем. У момент, коли мікропроцесорний контролер 10 зафіксує значення вихідної напруги термобатареї, яка дорівнює  $E'_1$ , тобто код  $N'_1$  (момент, коли температура робочого кінця термобатареї дорівнюватиме  $T_1$ ), за командою контролера 10 встановлюють контакти перемикачів 6 і 7 відповідно у праве і нижнє положення згідно з фіг.1, в результаті чого змінюється напрямок протікання струму  $I_0$  через робочі кінці термобатареї 3.

Внаслідок реверсивності ефекта Пельтьє у робочих кінцях термобатареї відбувається виділення теплоти Пельтьє і Джоуля, які підсумовуються. Таким чином температура робочого кінця термобатареї швидко зростає. У момент закінчення часової витримки  $\Delta t_3 = \Delta t_1$  за командою контролера 10 контакти перемикачів встановлюють у початкове положення. Фіксується цифровий код ТЕРС термобатареї, який відповідає перегріванню робочого кінця термобатареї струмом  $I_0$  протягом  $\Delta t_1$ ,

$$N'_3 = k_3 S \left[ \alpha_1 \left( T_1 + l \frac{0,5 I_0^2 R - \alpha_1 T_1 I_0}{\lambda F} \right) - \alpha_2 T_2 \right] \quad (14)$$

Далі вимикають цифро-аналоговий перетворювач 11, і термобатарея охолоджується до початкової температури. На цьому калібрування вимірювача НВЧ-потужності закінчується, в результаті якого

отримують цифрові коди  $N'_1$ ,  $N'_2$ ,  $N'_3$ , а також фіксують у пам'яті контролера 10 параметри калібрування –  $P_0$ ,  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  та  $I_0$ .

У процесі довготривалої експлуатації вимірювача точність прямого вимірювання потужності поступово починає знижуватися в основному через прогресування систематичної похибки термобатареї, зумовлене поступовим старінням її електродів, зміни їх складу під дією дестабілізуючих факторів навколишнього середовища. При цьому змінюються термоелектричні коефіцієнти Зеебека і Пельтьє термобатареї, а також помітно дрейфує її ГХ. Через вплив навколишнього середовища неминує змінюється і температура на вільних кінцях термобатареї  $T_2$ , що спричиняє появу адитивної похибки, а зміна коефіцієнта Зеебека обумовлює виникнення мультиплікативної похибки вимірювання потужності.

При нелінійній характеристиці термобатареї складові похибки у межах робочої точки, що визначається температурою  $T_X$ , яка відповідає виміряній потужності  $P_X$ , можна врахувати зміщенням апроксимуючої дотичної (адитивна похибка) та її поворотом (мультиплікативна похибка) відносно початкової дотичної, проведеної до точки з температурою  $T_X$  номінальної ГХ термобатареї. Тому цифровий код напруги термоелемента з урахуванням похибок вимірювання, які існують на конкретний момент часу, можна представити у вигляді

$$N_1 = k_3 S [\alpha_1 (1 + \gamma_1) T_X - \alpha_2 T_2 + \delta_1] \quad (15)$$

де  $\gamma = \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha}$  - відносна мультиплікативна похибка від нестабільності чутливості і нелінійності ГХ термобатареї;

$\delta_1 = \alpha_2 \Delta T_2$  - абсолютна адитивна похибка від нестабільності температури вільних кінців термобатареї;

$\Delta T_2$  - відхилення температури вільних кінців термобатареї від температури калібровки  $T_2$ .

Цифровий код  $N_1$  реєструють у пам'яті контролера 10. Потім виконують додаткові вимірювання ТЕРС термобатареї при охолодженні і нагріванні її робочого кінця постійним струмом  $I_0$  так само, як і при калібровці вимірювача потужності на початку його експлуатації. Операції зміни абсолютної температури робочого спаю та вимірювання ТЕРС термобатареї здійснюються аналогічним перемиканням контактів двополюсних перемикачів 6 і 7.

Після охолодження робочого кінця термобатареї струмом  $I_0$  протягом визначеного часу  $\Delta t_1$  цифровий код ТЕРС термобатареї визначатиметься за формулою

$$N_2 = k_3 S \left[ \alpha_1 (1 + \gamma_1') \left( T_X + I_0 \frac{0,5 l_0^2 R - \alpha_1 (1 + \gamma_1') T_X l_0}{\lambda F} \right) - \alpha_2 T_2 + \delta_1' \right] \quad (16)$$

де  $\gamma_1'$ ,  $\delta_1'$  - значення мультиплікативної та адитивної похибок термобатареї у точці  $(T_X - \Delta T_1)$ .

Цифровий код  $N_2$  реєструють у пам'яті контролера 10.

Після витримки часу  $\Delta t_2$ , в результаті чого температура робочого кінця набуває початкового значення  $T_X$ , яке фіксує контролер коду  $N_1$ , нагрівають робочий кінець термобатареї струмом  $I_0$  протягом визначеного часу  $\Delta t_3 = \Delta t_1$ . Вимірюють ТЕРС на виході термобатареї, цифровий код якої матиме значення:

$$N_3 = k_3 S \left[ \alpha_1 (1 + \gamma_1'') \left( T_X + I_0 \frac{0,5 l_0^2 R + \alpha_1 (1 + \gamma_1'') T_X l_0}{\lambda F} \right) - \alpha_2 T_2 + \delta_1'' \right] \quad (17)$$

де  $\gamma_1''$ ,  $\delta_1''$  - значення мультиплікативної та адитивної похибок термобатареї у точці  $(T_X + \Delta T_2)$ .

Оскільки примусове охолодження і нагрівання робочого кінця термобатареї здійснюють у невеликих межах протягом досить нетривалого часу  $\Delta t$ , то похибки трьох вимірювань можна вважати однаковими:

$$\gamma_1 = \gamma_1' = \gamma_1''; \delta_1 = \delta_1' = \delta_1'' \quad (18)$$

Виходячи з рівнянь (15) і (16) обчислюють різницю кодів

$$N_3 - N_2 = \frac{2 k_3 S \alpha_1^2 (1 + \gamma_1)^2 T_X l_0}{\lambda F} \quad (19)$$

яка пропорційна теплоті Пельтьє.

Використовуючи рівняння (15), (16) і (17), обчислюють значення цифрового коду, який відповідає величині зміни ТЕРС термобатареї від виділення в ньому теплоти Джоуля:

$$N_2 + N_3 - 2N_1 = \frac{k_3 S \alpha_1 (1 + \gamma_1)^2 R}{\lambda F} \quad (20)$$

Якщо поділити вираз (19) на квадрат виразу (20), то отримаємо відношення

$$\frac{N_3 - N_2}{(N_2 + N_3 - 2N_1)^2} = \frac{2 T_X \lambda F}{l_0^3 R^2 k_3 S I} \quad (21)$$

звідки температура робочого кінця термоелемента становитиме:

$$T_X = \frac{(N_3 - N_2) l_0^3 R^2 k_3 S I}{2 (N_2 + N_3 - 2N_1)^2 \lambda F} \quad (22)$$

Підставляючи у вираз (22) значення температури  $T_X$  з (2) при  $T_1 = T_X$ , отримаємо вираз для вимірюваної НВЧ-потужності

$$P_X = \frac{(N_3 - N_2) l_0^3 R^2 k_3 S I}{2 (N_2 + N_3 - 2N_1)^2 \lambda F k_1 k_2} \quad (23)$$

З виразу (23) випливає, що отримане значення НВЧ-потужності не залежить від коефіцієнта Зеебека,

який визначає чутливість термобатареї, від коефіцієнта Пельтьє, який визначає інтенсивність додаткового охолодження та нагрівання робочих кінців термобатареї, від адитивної і мультиплікативної похибок, які відображають зміну параметрів термобатареї у процесі її тривалої експлуатації за умов дестабілізуючих факторів і їх залежність від рівнів вимірюваної потужності (температури), а також від ступеня нелінійності ГХ термобатареї.

На залишкову похибку вимірюваного перетворення, як видно з формули (23), може впливати лише нестабільність коефіцієнта підсилення  $K_3$  підсилювача 8 та чутливості  $S$  аналого-цифрового перетворювача 9. Але виконання цих електронних ланок вимірювального тракту на сучасній елементній базі дозволяє схематично стабілізувати ці коефіцієнти і вважати їх постійними величинами.

Тепер, якщо скористатися результатами калібрування вимірювача НВЧ-потужності на початку його експлуатації, які були занесені у пам'ять контролера 10, то вираз для відомої НВЧ-потужності  $P_0$  калібрування мати аналогічний вигляд:

$$P_0 = \frac{(N'_3 - N'_2)^3 R^2 k_3 S I}{2(N'_2 + N'_3 - 2N'_1)^2 \lambda F k_1 k_2} \quad (24)$$

З відношення лівих та правої частин рівнянь (23) і (24), матимемо:

$$\frac{P_X}{P_0} = \frac{(N_3 - N_2)(N'_2 + N'_3 - 2N'_1)^2}{(N'_3 - N'_2)(N_2 + N_3 - 2N_1)^2} \quad (25)$$

звідки вимірювана потужність дорівнюватиме

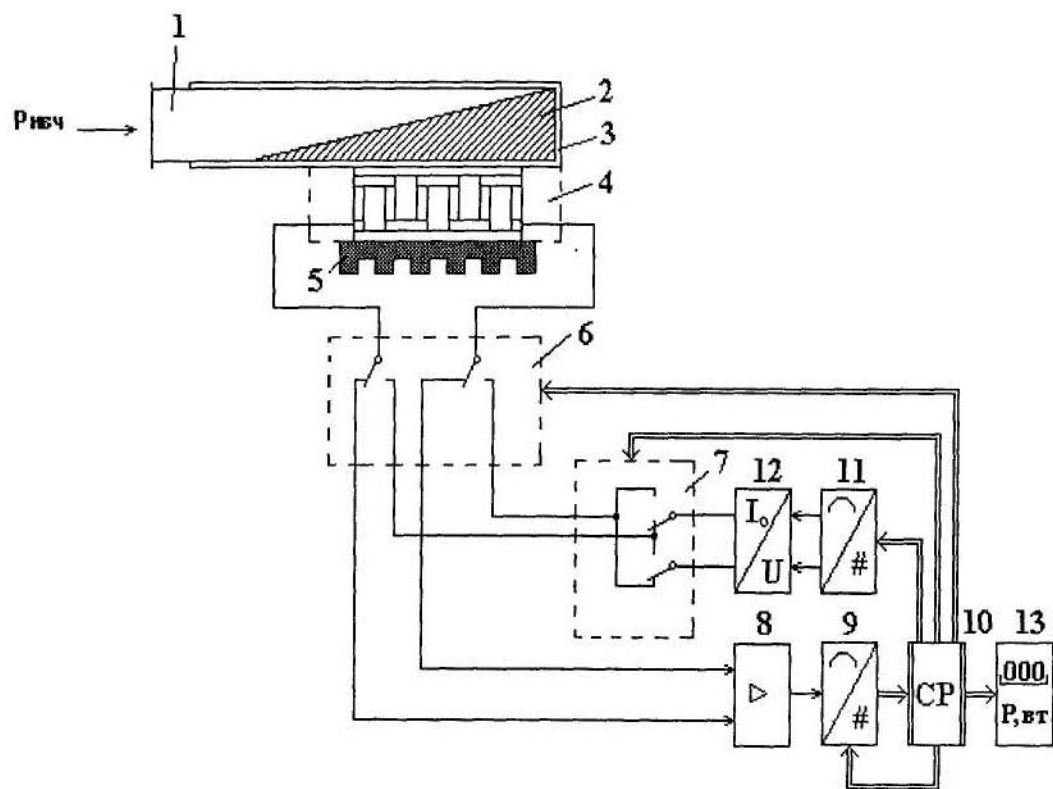
$$P_X = \left[ \frac{(N_3 - N_2)(N'_2 + N'_3 - 2N'_1)^2}{(N'_3 - N'_2)(N_2 + N_3 - 2N_1)^2} \right] P_0 \quad (26)$$

Значення контрольованої НВЧ-потужності обчислюється за допомогою мікропроцесорного контролера 10 за формулою (26) і подається у цифровій формі на табло індикатора 13.

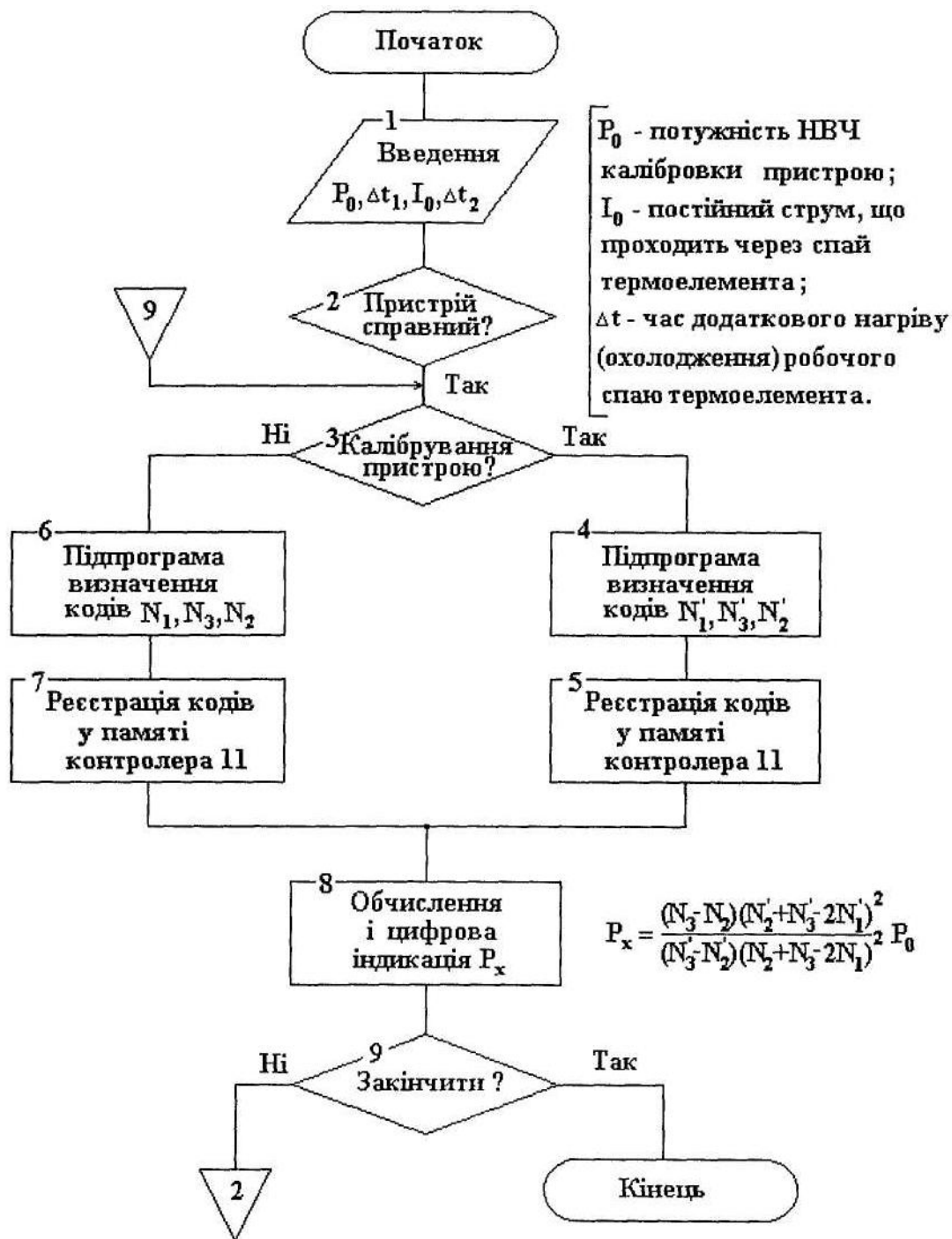
Як видно з формули (26), значення вимірюваної НВЧ-потужності визначається тільки значеннями цифрових кодів ТЕРС термоелемента і не залежить від змін параметрів та похибок термоелемента з нелінійною характеристикою при нестабільній температурі  $T_2$  його вільних кінців.

На відміну від серійних, розроблених вимірювач має також високу чутливість до малих значень НВЧ-потужності завдяки використанню в ньому як первинного перетворювача малоінерційної напівпровідникової термобатареї. Це дає можливість розширити діапазон вимірювання у бік малих значень НВЧ-потужності. Вимірювач відрізняється також високою швидкістю як за рахунок повної автоматизації операцій вимірювання за допомогою мікропроцесорного контролера, так і за рахунок того, що калібровані теплові впливи спрямовуються не на інерційну калориметричну насадку з сухим навантаженням, а безпосередньо на первинний термоелектричний перетворювач. Адекватні зміни сигналу останнього під дією теплових впливів можна зареєструвати значно скоріше.

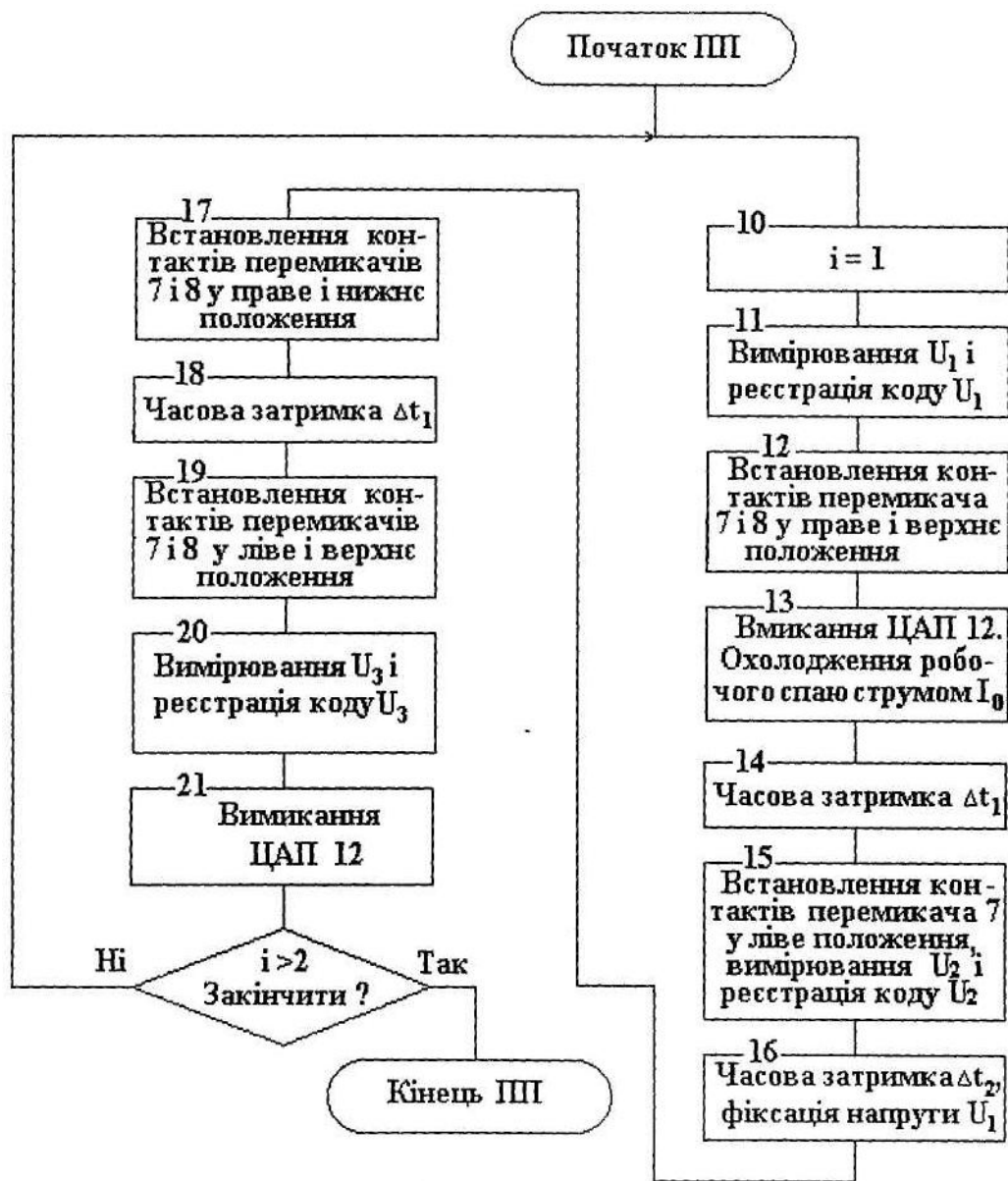
Приклад. Дослідження показали, що використання напівпровідникової термобатареї стержневого типу, у якій використані електроди із сплавів  $SbZn$  та  $SbCd$ , забезпечує чутливість 500-600 мкВ/К, а це дає можливість вимірювати НВЧ-потужність починаючи з  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$  Вт. Оптимальний струм для цього типу термоелемента має межі 1-1,5А, а стала часу не перевищує 5-10с. При калібруванні пристрою НВЧ-потужністю в 1мкВт динамічний діапазон вимірювання НВЧ-потужності становить від  $10^{-9}$  Вт до  $10^{-3}$  Вт. Похибка вимірювання не перевищує  $\pm 2,5\%$  на частоті 10ГГц. При роботі у діапазоні частот 3-12ГГц похибки зростають за рахунок частотної залежності коефіцієнта зв'язку  $K_1$ ,  $K_2$  до значення  $>2,5\%$ . Для зниження частотної похибки доцільно калібрувати вимірювач потужності на кількох частотах робочого діапазону та використовувати коригуючі коди.



Фиг. 1



Фіз. 2



$\Phi 2.3$