



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 55528

(13) C2

(51) 7 G01R21/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ НАДВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

1

2

(21) 2000105928

(22) 20 10 2000

(24) 15 04 2003

(46) 15 04 2003, Бюл. № 4, 2003 р

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Юрчик Генадій
Васильович, Іващенко Володимир Олексійович(73) КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ, ТОВАРИСТВО З ОБ-
МЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ВІКТОРІЯ"(56) "Измерения в электронике" Справочник
В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, М. Энергоатомиздат,
1987, с. 142-146

(57) 1 Термоелектричний спосіб вимірювання надвисокочастотної потужності (НВЧ), який полягає в розміщенні робочих кінців напівпровідникового термоелемента з електронною і дірковою провідностями у хвилеводі, вимірюванні напруги на вільних кінцях термоелемента, пропусканні постійного струму через термоелемент, додаткових вимірюваннях напруги при охолоджених та перегрітих робочих кінцях термоелемента і визначенні вимірюваної потужності по формулі, який відрізняється тим, що після вимірювання напруги U_1 на вільних кінцях термоелемента, нагрітого коливаннями НВЧ, пропускають через термоелемент постійний струм, охолоджують термоелемент струмом, силу якого встановлюють оптимальною по фіксації мінімального значення напруги U_1 , вимикають струм і вимірюють напругу U_2 охолодженого термоелемента, змінюють напрям протікання струму через термоелемент на протилежний, нагрівають термоелемент струмом, вимикають струм і вимірюють напругу U_3 перегрітого термоелемента,

при цьому час охолодження та нагрівання обирають в 3-4 разів більше теплової сталої термоелемента, а результат вимірювання НВЧ потужності визначають по формулі

$$P_x = \frac{(U_3 - U_2)(U_2 + U_3 - 2U_1)^2}{(U_3 - U_2)(U_2 + U_3 - 2U)^2} P_0,$$

де U_1, U_2, U_3 - напруги на вільних кінцях термоелемента при його калібруванні відомою потужністю P_0 , охолодженні і нагріванні робочих кінців термоелемента тим же оптимальним постійним струмом

2 Термоелектричний пристрій для вимірювання надвисокочастотної потужності, який містить напівпровідниковий термоелемент, робочі кінці електродів якого з'єднані металічним містком з поглинаючим шаром, який розташований на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилеводу, подовжуючі дроти, нормуючий підсилювач і мілівольтметр, під'єднано до виходу нормуючого підсилювача, який відрізняється тим, що в нього введено джерело постійної напруги, змінний резистор, міліамперметр та два двополюсні перемикачі, входи першого перемикача через подовжуючі дроти з'єднано з вільними кінцями електродів термоелемента, одна пара виходів його з'єднана з входами нормуючого підсилювача, друга пара виходів з'єднана з входами другого двополюсного перемикача, пари яких ввімкнені між собою зустрічно, а входи другого перемикача під'єднано до виходів джерела постійної напруги через змінний резистор і міліамперметр

Винахід відноситься до техніки радіовимірювань і може бути використаний для вимірювання надвисокочастотної (НВЧ) потужності, яка перетворюється в електричну напругу термоелектричними перетворювачами, переважно напівпровідниковими термоелементами електронної та діркової провідностей

Термоелектричний метод вимірювання НВЧ

потужності засновано на перетворенні електромагнітної енергії в теплову. Мірою НВЧ потужності є термоелектрорушійна сила (ТЕРС), яка виникає в результаті нагрівання одного з кінців термопари або термоелемента НВЧ коливаннями

Відомі два різновиди термоелектричного способу термопарний з прямим підгрівом, в якому НВЧ струм безпосередньо проходить через робо-

(13) C2

(11) 55528

(19) UA

чий спай термопари і його підігриває, та термоелементний, в якому НВЧ коливання нагрівають резистивний елемент, контактуючий з робочими кінцями термоелемента

Прямий підігрів забезпечує вимірювання НВЧ потужності в діапазоні частот до 10 ГГц, в той час як термоелементи з непрямим підігрівом застосовуються на частотах до декількох десятків ГГц

До сих пір відомі способи вимірювання на основі металічних термоелектричних перетворювачів мають низьку точність і чутливість, оскільки утворена на виході ТЕРС складає доли мікровольт (на рівні випромінювання потужності менше 10 мВт), вимірювання яких пов'язано з великими похибками

Відомий термоелектричний спосіб вимірювання НВЧ потужності по А С СССР №291157, кл G01R21/04, 1973, засновано на вимірюванні температури поглинаючого елемента термоелектричним перетворювачем. Але непостійність чутливості, поступовий дрейф статичної (градуювальної) характеристики термоелектричного перетворювача в умовах інтенсивного опромінювання, а також невідворотні теплові втрати викликають великі похибки вимірювань

Відомий також термоелектричний спосіб вимірювання НВЧ потужності по А С СССР №718795, кл G01R21/02, 1980) який полягає в розміщенні робочих кінців напівпровідникового термоелемента з електронною та дірковою провідностями у хвилеводі, вимірюванні напруг на вільних кінцях термоелемента, пропусканні постійного струму через термоелемент, додаткових вимірюваннях напруги при охолодженнях та перегрівих робочих кінців термоелемента і визначенні вимірюваної потужності по формулі

Крім того, по відомому способу поглинаючий елемент додатково нагрівають відомою потужністю P_0 низької частоти, а потім примусово охолоджують та вимірюють вихідний сигнал термоелектричного перетворювача, після чого вимірювану НВЧ потужність визначають по формулі

$$P_{\text{свч}} = \frac{(U_1 - U_2)}{(U_3 - U_1) - (U_4 - U_2)} P_0,$$

де U_1, U_2, U_3, U_4 - ТЕРС при нагріванні робочих кінців термоелектричного перетворювача НВЧ потужністю, примусовому охолодженні, додатковому нагріванні поглинаючого елемента і подальшому його охолодженні

Як видно з розрахункової формули, параметри термоелектричного перетворювача в неї не входять, отже їх нестабільність не впливає на результати вимірювання. Однак відомий спосіб має недоліки, які викликають великі методичні похибки

Так, в процесі примусового охолодження поглинаючого тіла потоком холодної рідини або повітря його температура у встановленому режимі прямує до температури самого потоку. При термоелектричному охолодженні тіла його температура встановлюється на рівні заданим струмом, який впливає через робочий спай термоелектричного перетворювача. В результаті цього порушується пропорційна залежність між потужністю поглинаючих НВЧ коливань та встановленим вихідним сигналом термоелектричного перетворювача при

примусовому охолодженні поглинаючого тіла. Тому коефіцієнт q в формулах (2), (3), (6) і т.д. прототипу не можна вважати величиною постійною, і результат обчислень залежить від змінюваності цього коефіцієнта, тобто коефіцієнта Пельтьє робочого спаю термоелемента

При додатковому нагріві поглинаючого елемента відповідною потужністю P_0 низької частоти його температура визначається не тільки значенням цієї потужності, але й умовами теплообміну з оточуючим середовищем, температура якого також не є постійною. Тому вихідні сигнали термоелектричного перетворювача U_1, U_2, U_3, U_4 визначаються не тільки значеннями відповідних потужностей, а й умовами вимірювань, які не залишаються постійними із-за нестабільності процесів охолодження-нагрівання і змінюваності параметрів оточуючого середовища, впливаючих на теплові втрати

Відомий термоелектричний пристрій для вимірювання НВЧ потужностей (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 електроди у вигляді стержнів, розділених ізоляційною прокладкою, мідні продовжувачі і виводи. При цьому робочий спай (місце з'єднання електродів) являє собою площину, яка знаходиться на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилевода. Напівпровідникові електроди виконані відповідно з сплавів Te-Bi-Se і Te-Bi-Sb , чутливість термоперетворювача $160 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$

Із-за нестабільності чутливості напівпровідникового термоперетворювача, коефіцієнт перетворення НВЧ потужності в постійну напругу поступово змінюється, що викликає великі прогресуючі похибки вимірювання НВЧ потужності. Ці похибки в процесі експлуатації термоперетворювача важко врахувати або скомпенсувати

Відомий також термоелектричний пристрій для вимірювання НВЧ 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 металічним містком з поглинаючим шаром, розташованим на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилевода, продовжувальні дроти, нормуючий підсилювач і мілівольтметр, під'єднаний до виходу нормуючого підсилювача

Крім того, відомий пристрій містить блок компенсації зміни температури вільних кінців термоелемента, який увімкнено між виходом термоелемента і мілівольтметром

Нелінійність статичної характеристики напівпровідникового термоелемента із-за залежності коефіцієнта Зеебека від температури, нестабільність чутливості в часі та складність стабілізації температури вільних кінців із-за відносно високої теплопровідності напівпровідникових електродів не дають можливості забезпечити високу точність вимірювання НВЧ потужності

Завданням винаходу являється створення таких способу та пристрою для вимірювання НВЧ потужності, у яких введення нових операцій, еле-

ментів та зв'язків дозволили б виключити вплив зміни коефіцієнтів Зеебека та Пельтьє на термоелектричне перетворення НВЧ потужності, що забезпечить підвищення точності вимірювання та розширення динамічного діапазону вимірювання НВЧ потужності

Поставлене завдання досягається тим, що в термоелектричний спосіб вимірювання НВЧ потужності, який полягає в розміщенні робочих кінців напівпровідникового термоелемента з електронною та дірковою провідностями у хвилеводі, вимірюванні напруги на вільних кінцях термоелемента, пропусканні постійного струму через термоелемент, додаткових вимірюваннях напруги при охолоджених та перегрітих робочих кінцях термоелемента і визначенні вимірюваної потужності по формулі, згідно винаходу, після вимірювання напруги U_1 на вільних кінцях термоелемента, нагрітого коливанням НВЧ, пропускають через термоелемент постійний струм, охолоджують термоелемент струмом, силу якого встановлюють оптимальною по фіксації мінімального значення напруги U_1 , вимикають струм і вимірюють напругу U_2 охолодженого термоелемента, змінюють напрям протікання струму через термоелемент на протилежний, нагрівають термоелемент струмом, вимикають струм і вимірюють напругу U_3 перегрітого термоелемента, при цьому під час охолодження і нагрівання обирають в 3 - 4 разів більше теплової сталої термоелемента, а результат вимірювання НВЧ потужності визначають по формулі

$$P_x = \frac{(U_3 - U_2)(U_2 + U_3 - 2U_1)^2}{(U_3 - U_2)(U_2 + U_3 - 2U_1)^2} P_0$$

де U_1 , U_2 , U_3 - напруги на вільних кінцях термоелемента при його калібруванні відомою потужністю P_0 , охолодженні і нагріванні робочого спаю термоелемента тим же оптимальним постійним струмом

Поставлене завдання вирішується також тим, що в електричний пристрій для вимірювання НВЧ потужності, який містить напівпровідниковий термоелемент, робочі кінці електродів якого з'єднані металічним містком з поглинаючим шаром, розташованим на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилеводу, продовжуючи дроти, нормуючий підсилювач і мілівольтметр, під'єднаний до виходу нормуючого підсилювача, згідно винаходу введено джерело постійної напруги, змінний резистор, міліамперметр та два двокопюсних перемикачі, входи першого перемикача через продовжуючи дроти з'єднані з вільними кінцями електродів термоелемента, одна пара виходів його з'єднана з виходами нормуючого підсилювача, друга пара виходів з'єднана з виходами другого двокопюсного перемикача, пари яких увімкнено між собою назустріч, а входи перемикача під'єднані до виходів джерела постійної напруги через змінний резистор і міліамперметр

Власне введення у відомий спосіб та пристрій для вимірювання надвисокочастотної потужності операцій по охолодженню робочих кінців напівпровідникового елемента струмом від джерела постійної напруги через змінний резистор і міліамперметр, за допомогою яких встановлюють та фіксують оптимальну силу струму по мінімальному

показу мілівольтметра, увімкненого на виході підсилювача напруги, операцій по перегріву робочих кінців термоелемента оптимальним струмом, який через термоелемент протікає в протилежному напрямку, додаткові вимірювання напруг на виході охолодженого та перегрітого термоелемента за час у 3 - 4 рази більший від його теплової сталої часу, порівняння напруг, отриманих при нагріванні термоелемента вимірюваною НВЧ потужністю і відомою НВЧ потужністю при калібруванні, введення двокопюсних перемикачів, увімкнених вказаним чином, які виключають вплив струму охолодження та нагрівання на значення вимірюваної напруги, обробка результатів основного і додаткових вимірювань по запропонованій формулі забезпечують виключення впливу залежності коефіцієнтів Зеебека та Пельтьє термоелемента від температури, їх зміни в часі і нестабільності температури його вільних кінців на результат вимірювання НВЧ потужності, що забезпечує підвищення точності та розширення динамічного діапазону вимірювання НВЧ потужності

На кресленні (Фіг.) запропонована схема термоелектричного пристрою для вимірювання НВЧ потужності

Пристрій містить напівпровідниковий термоелемент 1, який включає металічний місток 2 з нанесеним на нього поглинаючим шаром, електроди 3 і 4 з електронною та дірковою провідностями, продовжуючи дроти 5 і 6, двокопюсні перемикачі 7 і 8, підсилювач постійної напруги 9, мілівольтметр 10, джерело постійної напруги 11, змінний резистор 12 та міліамперметр 13. Позицією 14 позначено відрізок хвилеводу, у стінці якого розташований місток напівпровідникового термоелемента 1, а позицією 15 теплоізоляційна пласина із слюди

Металічний місток 2 термоелемента 1 розташований на одному рівні з внутрішньою поверхнею хвилеводу 14. Напівпровідникові електроди 3 і 4 розташовані поза хвилеводом і контактують з містком 2, створюючи робочий спай термоелемента. Вільні кінці термоелемента через продовжуючи дроти 5 і 6 з'єднані з входами двокопюсного перемикача 7, одна пара виходів якого з'єднана через підсилювач 9 з мілівольтметром 10. Друга пара виходів перемикача 7 з'єднана з виходами двокопюсного перемикача 8, пари яких увімкнено між собою зустрічне. До входів перемикача 8 під'єднані виходи джерела 11 постійної напруги через змінний резистор 12 і міліамперметр 13.

Спосіб здійснюється наступним чином. Напівпровідниковий термоелемент 1 увімкнено у хвилеводну лінію передачі між джерелом НВЧ енергії і навантаженням. Поглинаючий шар містка 2 споживає малу долю НВЧ потужності, яка розповсюджується вздовж лінії передачі. Завдяки слабкому електромагнітному зв'язку поглинаючого елемента з полем НВЧ перехідна потужність не спотворюється і практично в цілому споживається навантаженням. Поглинаючий шар являє собою ділянку лінії передачі, на якій розсіюється частина прохідної НВЧ потужності

$$P_1 = K_1 P_x \quad (1)$$

де K_1 - коефіцієнт зв'язку, P_x - прохідна НВЧ потужність. Активний опір поглинаючого шару міс-

тка 2 вибирають значно меншим активної складової опору НВЧ навантаження. При поглинанні НВЧ потужності рі місток 2 нагрівається до температури $T_1 = K_1 K_2 P_X$ (2)

де K_2 - коефіцієнт, пропорційний термічному опору містка 2 відносно хвилеводу 14

При великій теплопровідності металу можна рахувати, що робочі (гарячі) кінці електродів 3 і 4 термоелемента мають також температуру T_1 . Вільні (холодні) кінці електродів 3 і 4 знаходяться при температурі T_2 , дещо більший за температуру оточуючого середовища T_0

Утворювані термоелектрорушійні сили (ТЕРС) в обох напівпровідникових електродах направлені від робочого (гарячого) кінця до вільного (холодного). Оскільки термоелектричне коло складається із електронного та діркового провідників, то їх ТЕРС сумуються

$$E = (\alpha'_1 + \alpha_1) T_1 - (\alpha'_2 + \alpha_2) T_2 \quad (3)$$

де α'_1 і α_1 - коефіцієнти Зеебека робочих кінців електродів,

α'_2 і α_2 - коефіцієнти Зеебека вільних кінців електродів

Чутливість напівпровідникового термоелемента визначається результуючими коефіцієнтами

$$\alpha_1 = \alpha'_1 + \alpha_1, \alpha_2 = \alpha'_2 + \alpha_2 \quad (4)$$

З врахуванням (4) ТЕРС E_1 на вільних кінцях термоелемента при нагріванні робочих кінців до температури T_1 можна представити у вигляді

$$E_1 = \alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2 \quad (5)$$

ТЕРС вільних кінців e_1 за допомогою продовжуваних дрітків 5 і 6 поступає на перемикач 7, який встановлюють в ліве положення згідно креслення. Підсилена підсилювачем 9 постійна напруга

$$U = K_3 (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2), \quad (6)$$

де K_3 - коефіцієнт підсилення підсилювача 7, вимірюється мілівольтметром 10

Оскільки коефіцієнт Зеебека функціонально залежить від температури, то номінальна статична характеристика термоелемента має нелінійний характер. Але в околі робочої точки характеристики $(T_1 \pm \Delta T)$ невеликі зміни температури ($\Delta T \ll T_1$) викликають пропорційні, тобто лінійні зміни ТЕРС. Тоді з врахуванням нестабільності коефіцієнта Зеебека в часі і змінності температури вільних кінців T_2 вимірюване значення напруги можна представити у вигляді

$$E = (K_3 + \Delta K_3) [(\alpha_1 + \Delta \alpha_1) T_1 - \alpha_2 (T_2 - \Delta T_2)] + \Delta U \quad (7)$$

Де ΔK_3 - нестабільність коефіцієнта підсилення підсилювача постійної напруги 9,

$\Delta \alpha_1$ - зміна коефіцієнта Зеебека робочих кінців термоелемента в часі та від температури,

ΔT_2 - зміна температури T_2 вільних кінців термоелемента в процесі його експлуатації,

ΔU - дрейф нуля підсилювача постійної напруги

Якщо лінійну ділянку характеристики термоелемента апроксимувати дотичною, то вплив вказаних нелінійностей можна звести до паралельного зміщення дотичної, що викликає адитивну похибку вимірювання та деякому повороту дотичної, яка викликає мультиплікативну похибку вимірювання. З врахуванням мультиплікативної похибки (похибки чутливості) і адитивної похибки

(похибки нуля) рівняння (7) зводимо до вигляду $U_1 = K_3 (1 + \gamma) [\alpha_1 (1 + \gamma_1) T_1 - \alpha_2 T_2] + \delta_1$ (8)

де $\gamma = \Delta K_3 / K_3$ - відносна мультиплікативна похибка від нестабільності підсилення ТЕРС,

$\gamma_1 = T_1 \alpha_1' / \alpha_1$ - відносна мультиплікативна похибка від нестабільності чутливості і нелінійності статичної характеристики,

$\delta_1 = K \alpha_2 \Delta T_2 + \Delta U$ - сумарна абсолютна адитивна похибка від нестабільності температури вільних кінців термоелемента та дрейфу нуля підсилювача

Після вимірювання напруги U_1 перемикач 7 переводять в праве положення і через електроди 3 і 4 термоелемента 1 пропускають постійний струм від джерела 11 (перемикач 8 в лівому положенні згідно креслення). Напрямок струму вибирають таким, щоб за рахунок ефекту Пельтьє викликати охолодження робочих кінців термоелемента. Одночасно з поглинанням теплоти Пельтьє в робочих кінцях термоелемента відбувається і виділення теплоти Джоуля по довжині електродів. Якщо час протікання струму t вибирають значно більшим теплової сталої термоелемента ($\Delta t = 3 - 4\tau$), то процес охолодження робочих кінців має усталений характер, а його інтенсивність буде визначатися теплопровідністю електродів термоелемента

Після охолодження робочих кінців на протязі часу Δt , перемикач 7 переводять знову в ліве положення і вимірюють напругу охолодженого термоелемента

$$U_2 = K_3 (1 + \gamma') \{ [\alpha_1 (1 + \gamma_1')] [T_1 + (K_4 I^2 R - \Pi)] / \lambda \} - \alpha_2 T_2 \} + \delta_1' \quad (9)$$

де I - сила постійного струму,

R - внутрішній опір термоелемента,

Π - коефіцієнт Пельтьє матеріалів електродів, які створюють робочий спай,

K_4 - коефіцієнт, який враховує долю теплоти Джоуля, що розсіюється на робочому кінці термоелемента,

λ - еквівалентна теплопровідність робочих кінців термоелемента з врахуванням питомої теплопровідності електродів та термічного опору містка,

γ_1' , γ_1' , δ_1' - похибки результату вимірювання напруги U_2

Силу струму I вибирають з умови максимального охолодження робочих кінців. Оскільки при цьому зменшення ТЕРС на вільних кінцях термоелемента буде найбільшим, то оптимальний струм визначають з рівняння

$$dU_2 / dI = 2K_4 I_0 R - \Pi = 0 \quad (10)$$

звідки

$$I_0 = \Pi / 2K_4 R \quad (11)$$

При симетричній конструкції термоелемента половина теплоти Джоуля поступає до робочих кінців, а половина - до вільних кінців. Тому $K_4 = 0,5$ і оптимальний струм

$$I_0 = \Pi / R \quad (12)$$

Враховуючи, що коефіцієнт Пельтьє робочих кінців пов'язаний з коефіцієнтом Зеебека а через температуру T_1 , маємо

$$\Pi = \alpha_1 T_1 \quad (13)$$

Тоді напругу U_2 при оптимальному струмі I_0 і з врахуванням виразу (9) представимо у вигляді

$$U_2 = K_3 (1 + \gamma') \{ \alpha_1 (1 + \gamma_1') T_1 + [0,5 I_0^2 R - \Pi] \} - \alpha_2 T_2 \quad (14)$$

$$- \alpha_1(1 + \gamma_1)T_1I_0 / \lambda - \alpha_2T_2\} + \delta_1'$$

Еквівалентну теплопровідність λ , робочих кінців вибирають такою, щоб температура охолодження робочого спаю при оптимальному струмі I_0 знаходилася в межах лінійної ділянки статичної характеристики термоелемента, тобто необхідно виконання умови

$$- \Delta T = (0,5I_0^2R - \alpha_1T_1I_0) / \lambda \leq (0,05 + 0,1) T_1 \quad (15)$$

Після вимірювання напруги U_2 перемикачі 7 і 8 переводять в праве положення. При цьому змінюється напрям протікання струму I_0 через робочі кінці термоелемента. Внаслідок реверсивності ефекту Пельтьє здійснюється сумування теплоти Джоуля та Пельтьє, тому швидко зростає температура робочих кінців. Після часової витримки t перемикач 7 знову переводять в ліве положення і вимірюється напруга

$$U_3 = K(1 + \gamma'')\{\alpha_1(1 + \gamma_1'')T_1 + [0,5I_0^2R + \alpha_1(1 + \gamma_1'')T_1I_0] / \lambda\} - \alpha_2T_2\} + \delta_1'' \quad (16)$$

де γ'' , γ_1'' , δ_1'' - похибки результату вимірювання напруги U_3

Оскільки примусове охолодження та нагрівання робочих кінців термоелемента здійснюють в невеликих межах і на протязі досить малого часу t , то похибки трьох вимірювань можна рахувати однаковими

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma' = \gamma'', \\ \gamma_1 &= \gamma_1' = \gamma_1'', \\ \delta_1 &= \delta_1' = \delta_1'' \end{aligned}$$

(17)

Далі визначають величину зміни напруги на виході термоелемента в результаті виконання операцій охолодження та нагрівання його робочих кінців за рахунок ефекту Пельтьє за час t з врахуванням виразів (14) і (16),

$$U_3 - U_2 = 2\alpha_1^2(1 + \gamma_1)^2T_1I_0 / \lambda \quad (18)$$

Потім визначають величину зміни напруги на виході термоелемента від виділення теплоти Джоуля за той же проміжок часу Δt з врахуванням виразів (8), (14) та (16)

$$U_2 + U_3 - 2U_1 = \alpha_1(1 + \gamma_1)I_0^2R / \lambda \quad (19)$$

Якщо тепер поділити вираз (18) на квадрат виразу (19), то отримаємо відношення

$$\frac{U_3 - U_2}{(U_2 + U_3 - 2U_1)^2} = \frac{2T_1\lambda}{I_0^2R^2} \quad (20)$$

Звідки температура робочих кінців термоелемента

$$T_1 = \frac{(U_3 - U_2)I_0^2R^2}{2(U_2 + U_3 - 2U_1)^2\lambda} \quad (21)$$

Підставляючи у вираз (21) значення температури T_1 з (2), отримаємо значення вимірюваної НВЧ потужності

$$P_x = \frac{(U_3 - U_2)I_0^2R^2}{2(U_2 + U_3 - 2U_1)^22K_1K_2\lambda} \quad (22)$$

З виразу (22) випливає, що виміряна НВЧ потужність P_x не залежить від коефіцієнта Зеебека, який визначає чутливість термоелемента, коефіцієнта Пельтьє Π , який визначає інтенсивність додаткового охолодження та нагрівання робочих кінців, від адитивної і мультиплікативної похибок, які відображують зміну параметрів термоелемента в процесі його тривалої експлуатації при певних рів-

нях вимірюваної потужності (температури), тобто ступеня нелінійності статичної характеристики. Тому, якщо виміряти іншу відому НВЧ потужність P_0 при додатковому охолодженні та нагріванні робочих кінців таким же струмом I_0 за час t , то результат вимірювання також не буде залежати від похибок другого термоелектричного перетворення

$$P_0 = \frac{(U_3' - U_2')I_0^2R^2}{(U_2' + U_3' - 2U_1')^22K_1K_2\lambda} \quad (23)$$

де U_1' , U_2' та U_3' - значення напруг на виході термоелемента, які отримані в процесі калібрування термоелемента відомою НВЧ потужністю P_0 безпосередньо на місці установки на початку його тривалої експлуатації

Якщо взяти відношення лівої та правої частин рівнянь (22) і (23), то отримаємо

$$\frac{P_x}{P_0} = \frac{(U_3 - U_2)(U_2' + U_3' - 2U_1')^2}{(U_3' - U_2')(U_2 + U_3 - 2U_1)^2} \quad (24)$$

Звідки вимірювана НВЧ потужність

$$P_x = \frac{(U_3 - U_2)(U_2' + U_3' - 2U_1')^2}{(U_3' - U_2')(U_2 + U_3 - 2U_1)^2} P_0 \quad (25)$$

Таким чином, результат вимірювання НВЧ потужності визначається тільки вимірюванням значень напруг на виході термоелемента і не залежить від змін параметрів та похибок термоелектричного елемента з нелінійною статичною характеристикою при нестабільності температури T_2 вільних кінців із-за відносно високої теплопровідності електродів

Термоелектричний пристрій працює наступним чином

Перемикачі 7 і 8 встановлюють в ліве положення і мілівольтметром 10 вимірюють підсилену напругу U_1 на виході термоелемента 1. Потім перемикач 7 переводять в праве положення і пропускають через термоелектроди 3 і 4 постійний струм від джерела 11 на протязі часу $\Delta t > 3\tau$. Силу струму отримують і регулюють змінним резистором 12, а відлік значень струму роблять за допомогою міліамперметра 13. При струмі близькому до оптимального I_0 по закінченні часу Δt перемикач 7 переводять в ліве положення і вимірюють вихідну напругу U_2 термоелемента 1 мілівольтметром 10. Значення оптимального струму I_0 встановлюють змінним резистором 12 по мінімальному показу мілівольтметра 10 ($U_2 < U_1$). Для цього виконують декілька переключень перемикачем 7 при регулюванні резистора 12. Значення оптимального струму I_0 фіксують міліамперметром 13.

Далі перемикачі 7 і 8 переводять в праве положення і змінюють таким чином напрям протікання струму через робочі кінці термоелемента 1. Після нагрівання робочих кінців термоелемента 1 також на протязі часу Δt перемикач 7 переводять в ліве положення і вимірюють вихідну напругу U_3 мілівольтметром 10.

Калібровку пристрою проводять перед початком експлуатації для конкретного типу напівпровідникового термоелемента 1 безпосередньо на місці його установки в хвилеводі НВЧ тракту при відомому значенні НВЧ потужності P_0 і при встановленому значенні оптимального струму I_0 . При

цьому на точність вимірювання НВЧ потужності не впливає похибка визначення оптимального струму I_0 . Важливо лише те, щоб значення струму I_0 було однаковим як при калібруванні, так і при вимірюваннях, що контролюються міліамперметром 13.

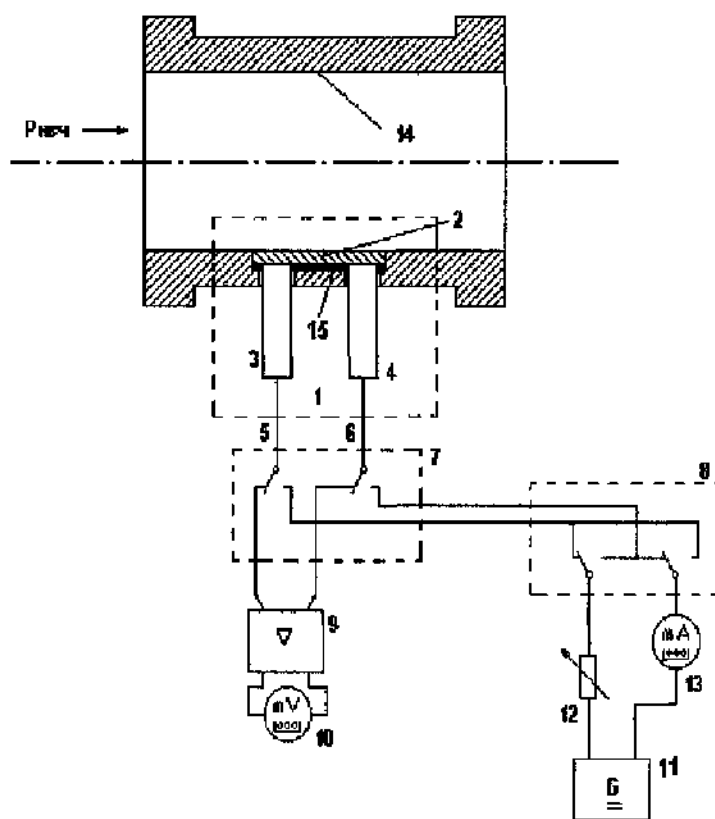
З врахуванням потужності калібровки P_0 результат вимірювання невідомої потужності P_x визначають по формулі (25)

Таким чином, термоелектричний пристрій з допоміжним охолодженням і нагрівом забезпечує реалізацію запропонованого способу вимірювання НВЧ потужності і виключає похибки від нелінійності та нестабільності характеристик термоелектричного перетворювача і електронного підсилювача.

Приклад. Дослідження показали, що використання напівпровідникового термоелемента стержневого типу, в якому використані електроди із

сплавів $SbZn$ та $SbCd$, забезпечують чутливість 500 - 600 мкВ/град, дають можливість вимірювати перехідну НВЧ потужність починаючи з 100 - 200 мВт. Оптимальний струм для цього типу термоелемента знаходиться в межах 100 - 200 мА, а стала часу не перевищує 3 - 5 с. При калібруванні пристрою НВЧ потужністю 10 Вт динамічний діапазон вимірювання прохідної потужності складає від 0,5 до 300 Вт.

Використання цифрового міліамперметра типу Щ301 і мілівольтметра типу В2-36 забезпечують похибку вимірювання прохідної НВЧ потужності не більше 0,5% на частоті 10 ГГц. При роботі в діапазоні частот 3 - 12 ГГц похибки зростають за рахунок залежності коефіцієнта зв'язку K_1 від частоти до значення 1,5 - 2%.



Фіг.