

**КИЇВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ
ВІЙСЬКОВОЇ ПІДГОТОВКИ**

**КАФЕДРА
ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
ПІДГОТОВКИ**

ПРЕДМЕТ
“ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВІЙСЬКОВИХ
ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ”

ТЕМА №11
ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

ЗАНЯТТЯ №2
ВИМІРЮВАЧІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

НАВЧАЛЬНА МЕТА:

- 1. Надати слухачам основні принципи дії перетворювачів прийомних ватметрів.**
- 2. Ознайомити студентів з структурною схемою аналогових і цифрових ватметрів малої потужності.**
- 3. Розглянути методи калібрування ватметрів малої потужності.**

ВИХОВНА МЕТА:

1. Виховувати у студентів дисциплінованість і культуру поведінки.

2. Виховувати впевненість і винахідливість при вивченні матеріалу.

3. Виховувати і розвивати творчий підхід при вивченні матеріалу на занятті і самостійній підготовці.

НАВЧАЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1. Основні принципи дії перетворювачів прийомних ватметрів.**
- 2. Структурна схема аналогових і цифрових ватметрів малої потужності.**
- 3. Методи калібрування ватметрів малої потужності.**

ПИТАННЯ 1

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИЙМАЛЬНИХ ВАТМЕТРІВ

Терморезисторні перетворювачі прохідної потужності

Болометричні ватметри прохідної потужності на основі дротових болометрів з платини або вольфраму створені як еталони, які призначені для повірки і тарування хвилевідних ватметрів середнього і великого рівня потужності.

На рис. 1 показана спрощена конструкція болометричного хвилевідного перетворювача прохідної потужності.

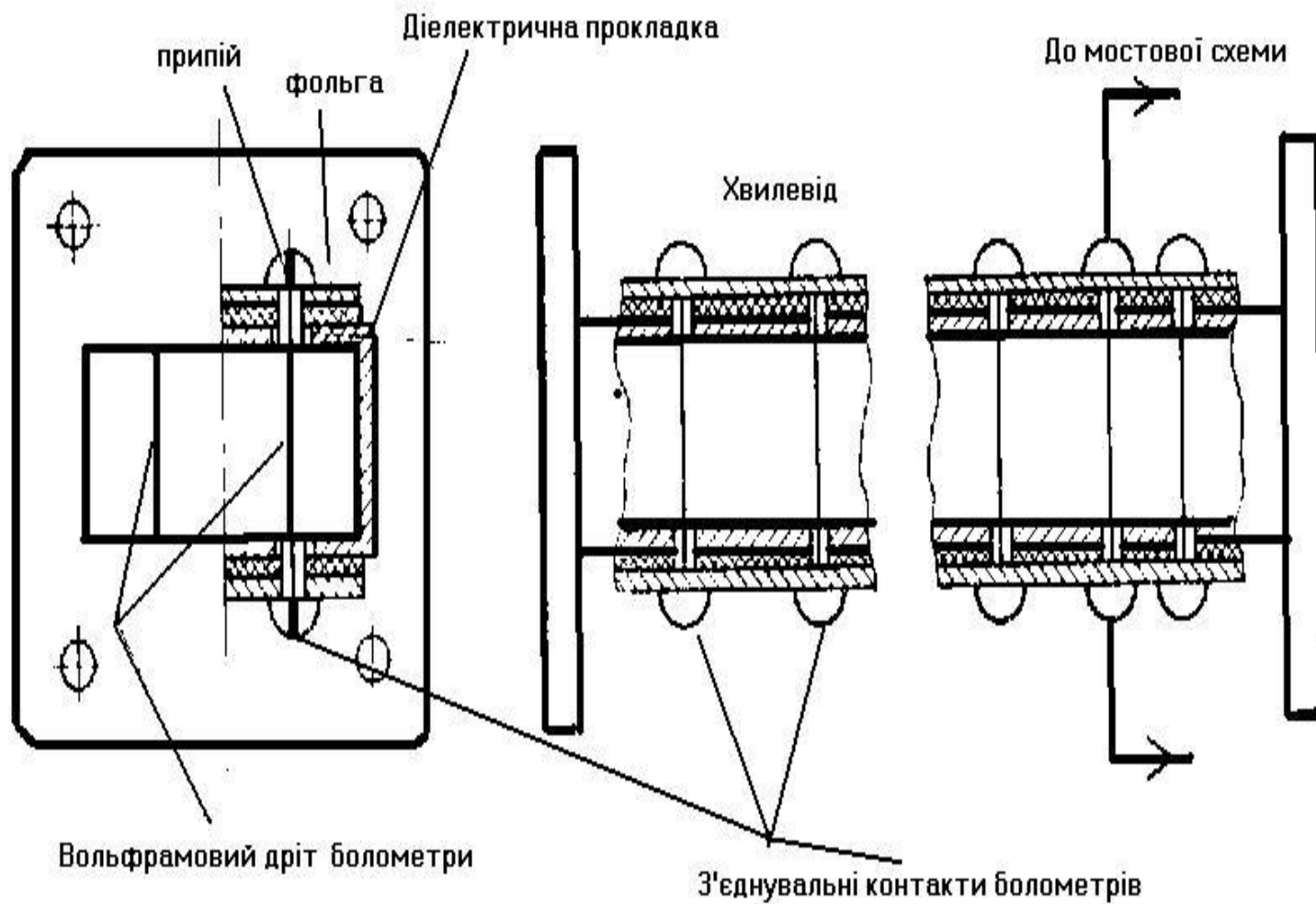


рис. 1

Для забезпечення широкосмугового узгодження застосовують багатоелементні перетворювачі.

Положення болометрів уздовж вісі хвилеводу визначає якість узгодження, а їх положення відносно вісі хвилеводу - динамічний діапазон. Чим ближче розміщені болометри до центру хвилеводу, тим вище чутливість і менше верхня межа потужності, яка вимірюється.

В схему вимірювального мосту болометри вмикаються не індивідуально, а всі разом в загальний міст. Особливістю перетворювача є можливість тарування на основі вимірювання потужності постійного струму, яка заміщує потужність НВЧ.

Якщо розміщення болометрів виконати нееквідистанційно, то можна досягти мінімуму модуля власного коефіцієнта відбиття і мінімальну залежність показів від фази коефіцієнта відбиття навантаження.

Джерелами систематичних похибок є:

1. Нерівномірний розподіл втрат із-за неоднаковості болометрів між собою і затухання коливань уздовж хвилевідного тракту.

2. Нерівномірне поглинання потужності НВЧ-болометрами із-за наявності відбитих хвиль, обумовлених неузгодженістю навантаження і взаємним впливом болометрів один на один.

3. Нееквівалентністю заміщення потужності НВЧ постійного струму, яка пов'язана з нерівномірним розподілом НВЧ струму в поперечному перетині болометрів і уздовж його довжини.

4. Відмінність повного опору болометрів від їх моделі - індуктивного стержню в хвилеводі.

Крім того, буде мати місце інструментальна похибка, яка має в своєму складі в загальному випадку як систематичну, так і випадкову похибку (похибку вимірювання потужності, яка заміщує НВЧ - потужність).

Підсумкова похибка болометричного ватметра не перевищує $\pm 1,5\%$.

Дослідження показують, що найвища точність реалізується при вимірюванні рівня потужності 0,01...100 Вт.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МЕТОД

Суть термоелектричного методу полягає в перетворенні енергії НВЧ в теплову безпосередньо на високочастотному термоперетворювачі прямого або непрямого нагрівання і вимірюванні виникаючої при цьому в результаті нагрівання термо - ЕРС, пропорційної потужності, яка розсіюється.

Таким чином, термоперетворювач при реалізації даного методу виконує одночасно дві функції - поглинаючого навантаження і диференційного термометра.

Потужність НВЧ, яка розсіюється на термоперетворювачі, можна виразити як

$$P_{\text{НВЧ}} = e_T / k_{\text{пр НВЧ}} \quad (1)$$

де e_T - термо ЕРС;

$k_{\text{пр НВЧ}}$ - коефіцієнт перетворення на НВЧ (мВ /мВт).

Термоелектричний метод застосовують для вимірювання середнього значення неперервних і імпульсно-модульованих коливань.

Так як термо - ЕРС визначається різницею температур між спаями термопар, яка при відсутності потужності НВЧ близька до нуля, вплив температури оточуючого середовища незначний. Тому вимірювальні схеми не мають у своєму складі схем температурної компенсації.

При високій чутливості термоперетворювачів термоелектричні приймальні перетворювачі можуть працювати безпосередньо з магнітноелектричними приладами.

Термоелектричний метод може бути реалізований двома шляхами: у вигляді ватметрів **поглинаючої** і **прохідної** потужності.

Ватметри поглинаючої потужності

На рис. 2, а показана конструкція коаксіального термоперетворювача поглинаючої потужності.

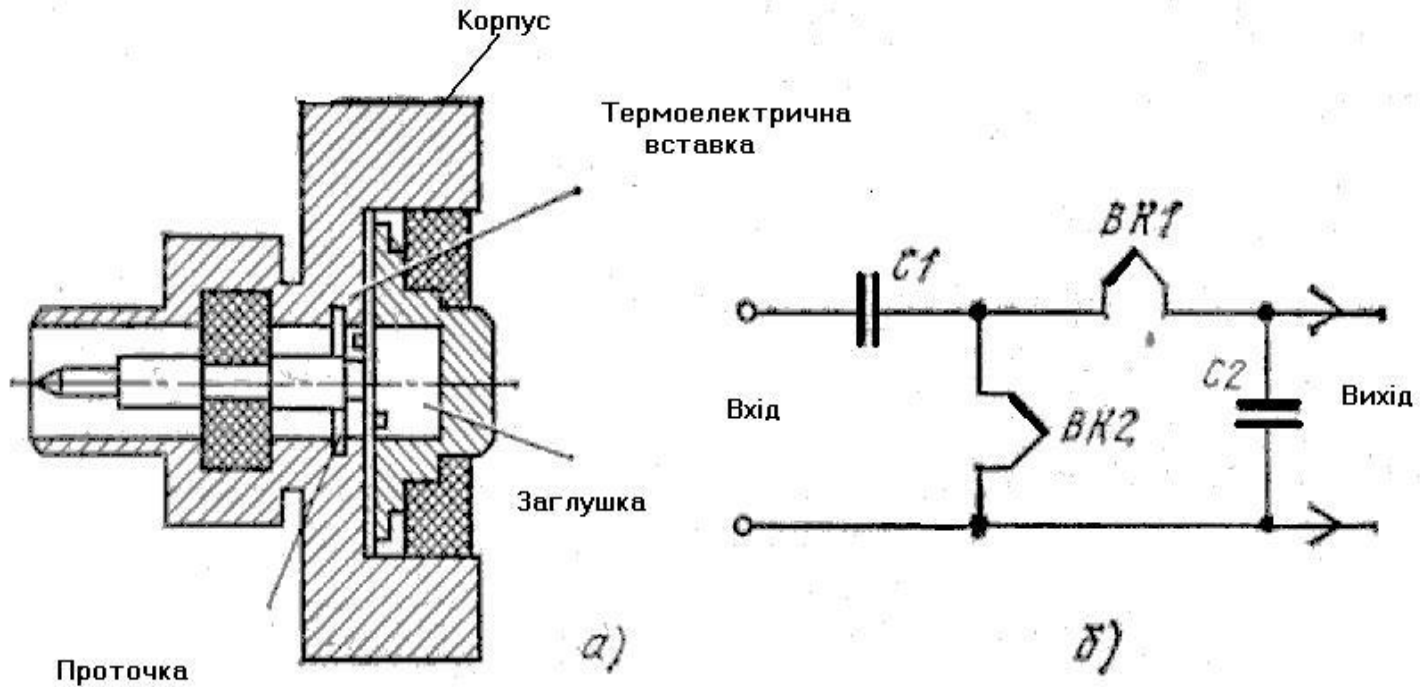


рис.2.

Блок з двох диференційних термопар виконується у вигляді термоелектричної вставки, подібної болометричній вставці.

Між електродами 1 закріплюються ниткоподібні термопари. При протіканні струму ця ділянка нагрівається і на кінцях термопари утворюється термо - ЕРС.

Для одержання лінійної температурної залежності термо - ЕРС, малого температурного коефіцієнта опору і високої чутливості застосовують термопари вісмут - сурма, копиль-сурма, хром - копиль.

По постійному струму термопари, які входять в блок з'єднуються послідовно, а по високочастотному струму - паралельно.

В якості вимірювального блоку для перетворення сигналу з виходу приймального термоперетворювача може бути застосований мікро - мілівольтметр постійного струму аналогового або цифрового типу.

Коефіцієнт ефективності k_{ϵ} перетворювачів на частотах до 4 ГГц складає 0,98...0,99 % і його приймають за одиницю.

На більш високих частотах потрібно враховувати реальне значення k_{ϵ} .

Похибка вимірювань поглинаючої НВЧ потужності при використанні термоелектричного методу має наступні складові:

1. Похибка визначення коефіцієнта перетворення на низькочастотному струмі, яка визначається похибкою вимірювальних приладів $\delta_1 = (\pm 1...2 \%)$;

2. Похибка визначення коефіцієнта ефективності k_e , яка залежить від точності використаних НВЧ-калібраторів $\delta_2 = (\pm 1,5...5 \%)$;

3. Похибка вимірювального блоку, яка визначається точністю відлікового пристрою і дрейфу показів в часі $\delta_3 = (\pm 1...2 \%)$;

4. Похибка із-за відбиттів від входу перетворювача, яка оцінюється умовами узгодження.

Підсумкова похибка знаходиться в межах $\pm (2,5...10 \%)$ без урахування похибки узгодження.

Основні позитивні якості методу:

малий час встановлення показів;

мала залежність від температури оточуючого

простору;

можливість вимірювання малих рівнів середньої потужності.

Основний недолік полягає в нестійкості до перевантажень, яка особливо проявляється при вимірюванні імпульсно-модульованих коливань.

Промисловістю випускаються термоелектричні ватметри поглинаючої потужності типу МЗ-50...МЗ-60, які перекривають діапазон частот 30...78300 МГц при рівнях потужності 10^{-5} ...1 Вт і мають основну похибку 4...6 %. Деякі типи цих ватметрів призначені для увімкнення в коаксіальний або у хвилевідній тракт.

Термоелектричні ватметри прохідної потужності.

В приймальних перетворювачах ватметрів прохідної потужності знайшли застосування термоелектричні зонди - об'ємні напівпровідникові термоелементи у вигляді стрижнів.

Термоелемент - це циліндр, одна торцева сторона якого не має ні електричного, ні теплового контакту з лінією передачі і встановлюється на одному рівні з внутрішньою поверхнею лінії, утворюючи частину хвилевідного тракту.

Другий кінець термоелемента також не має електричного контакту, але має добрий тепловий контакт з лінією передачі через діелектричну плівку.

При розповсюджені хвилі типу H_{10} температура тепловиділяючого спаю і термо - ЕРС у випадку малих втрат на тепловипромінювання пропорційні квадрату поперечної складової магнітного поля і при узгодженому навантаженні на виході - прохідній потужності.

На рис. 3 схематично показана конструкція хвилевідного термоелектричного ватметра прохідної потужності з напівпровідниковими термоелементами

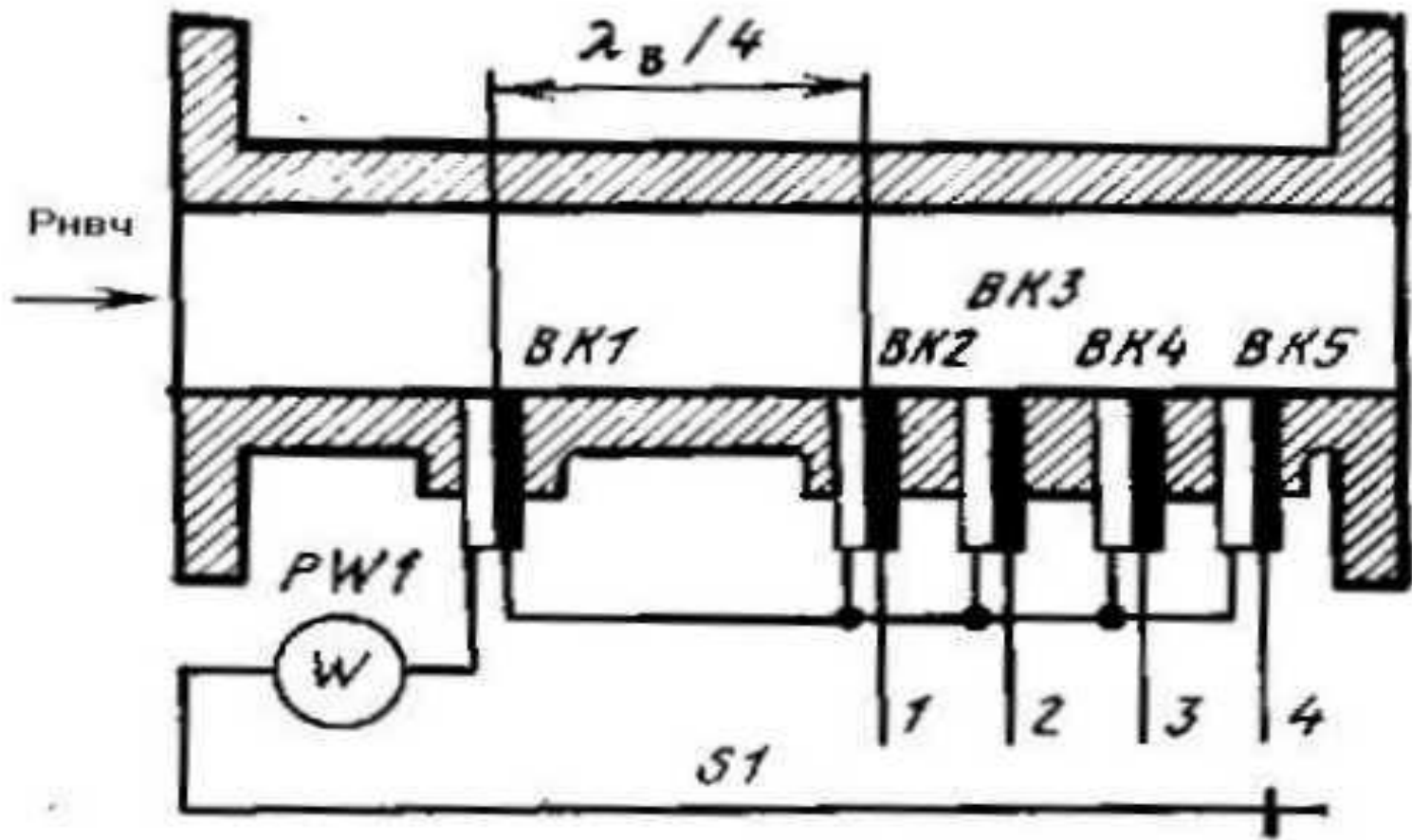


рис. 3.

Для усунення складової похибки, яка обумовлена залежністю від фази коефіцієнта відбиття, застосовують два термоелементи, які знаходяться на відстані $\lambda/4$ уздовж лінії. Термоелементи з'єднуються послідовно. За допомогою магнітоелектричного приладу вимірюється сума ЕРС двох термоелементів.

Одним з способів подальшого зменшення похибки, яка обумовлена неузгодженістю навантаження в смузі частот, є використання системи термоелементів, які утворюють решітку, нееквідистанційно розміщену уздовж лінії передачі.

Складовими похибки є :

- 1) похибка еталонного ватметра;**
- 2) похибка тарування;**
- 3) випадкова похибка стрілочного приладу;**
- 4) похибка неузгодженості навантаження.**

Ватметри подібного типу широко застосовують як вмонтовані для контролю потужності в передавальних трактах. Можна навести приклад ватметра загального користування.

Так, прилад МЗ-22 дозволяє вимірювати середню прохідну потужність 50...300 Вт в діапазоні частот 11,5...17,2 ГГц з основною похибкою $\pm 15\%$.

Пондеромоторний метод вимірювання потужності

Полягає в використанні пондеромоторної (механічної) дії електромагнітного поля на тіла, які розміщені в полі, внаслідок індукційованих в них електричних зарядів і струмів.

Загальні закономірності пондеромоторної дії електромагнітних хвиль встановлені Максвеллом.

Перші дослідження пондеромоторної дії електромагнітних хвиль на НВЧ з метою створення засобів вимірювань потужності виконав російський вчений Валітов, який показав переваги пондеромоторного методу вимірювання:

- 1) можливість самокалібрування;**
- 2) можливість вимірювання прохідної потужності;**
- 3) мала споживана потужність;**
- 4) висока точність.**

Зараз найбільшого розповсюдження одержали пондеромоторні ватметри, які використовують механічну дію електромагнітної хвилі на пробне тіло у вигляді металеві тонкої пластинки, яка розміщена в середині хвилеводу на пружній нитці. Під дією пондеромоторних сил пластинка переміщується, закручуючи нитку підвісу. Мірою потужності є кут закручування нитки (рис. 4).

Рівняння перетворення, яке використовується на практиці для калібрування таких ватметрів має вигляд

$$F_a = - P k_K \quad (2)$$

де F_a - середня за період дії НВЧ - поля сила, яка діє на рухомий елемент;

k_K - коефіцієнт електричного калібрування.

Кутове положення підвісної системи визначається за допомогою дзеркала, яке жорстко закріплене на підвісній системі, джерела світла і шкали.

При проходженні по хвилеводу електромагнітної хвилі в пластинках і на стінках хвилевідної лінії наводяться електричні заряди і струми.

Взаємодія зарядів на пластинках і хвилеводі породжує момент обертання, який переміщує підвісну систему на деякий кут α .

За допомогою вернера закручують нитку так, щоб встановити підвісну систему в попереднє положення.

Кут закручування нитки α вимірюють за шкалою вернера.

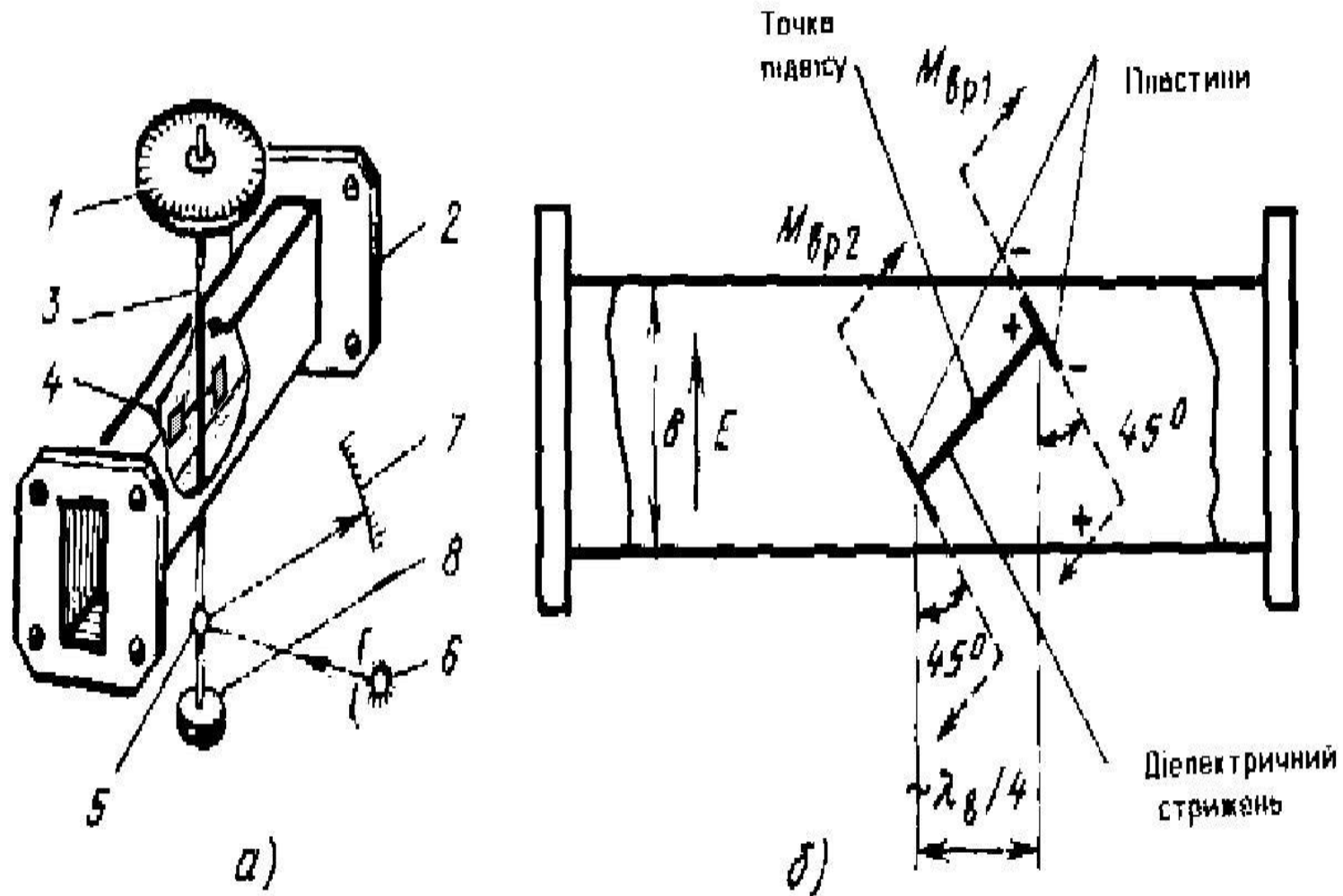


рис. 4

Основна похибка при навантаженні з $K_{ст} < 1,1$ на частоті калібрування при рівні потужності 1Вт складає 1...1,5 %.

Максимальна потужність, яка вимірюється, визначається електричною міцністю хвилевідної секції пондеромоторного ватметра і складає для хвилеводу перетином 10x23 мм приблизно 70 кВт в імпульсі.

Завдяки високій точності і можливості проведення абсолютного калібрування пондеромоторні ватметри застосовують як еталони для повірки і тарування робочих ватметрів.

Недоліком пондеромоторних ватметрів є чутливість до механічних впливів, вібрацій і необхідність горизонтування приладу при увімкненні в тракт НВЧ.

Метод, який використовує ефект холла

Ефект Холла полягає у виникненні ЕРС Холла між двома протилежними гранями зразка металу або напівпровідника у вигляді паралелепіпеда, якщо перпендикулярно одній з граней діє направлений рух носіїв заряду, а перпендикулярно іншим прикладене магнітне поле.

На рис. 5 показане розміщення зразка напівпровідника в прямокутному хвилеводі.

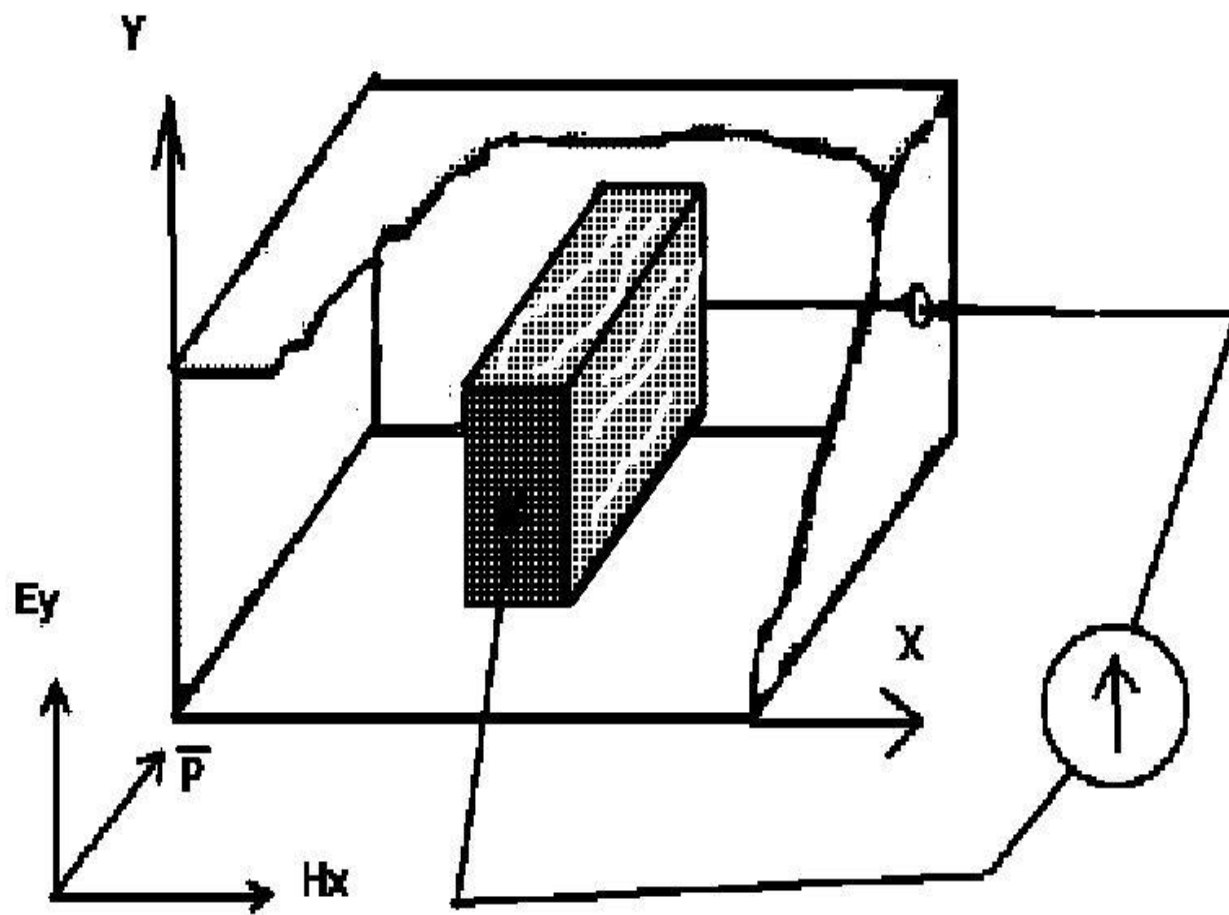


рис. 5.

Як наслідок виникає різниця потенціалів, середнє за період значення якої U_x , якщо не враховувати відбиття від зразка виражається так

$$U_x = Y \cdot k \cdot P_{пр} = R \cdot P_{п} (1 - |\Gamma_n|^2) \quad (3)$$

де Y - постійна величина, яка залежить від властивостей зразка;

k - коефіцієнт, який залежить від типу хвилі і частоти;

R - постійний коефіцієнт, який характеризує властивості зразка, тип хвилеводу і частоту;

$P_{пр}$ - прохідна потужність;

Γ_n - коефіцієнт відбиття навантаження.

З урахуванням фізичних процесів, ефект Холла дозволяє створювати вимірювачі прохідної потужності, які мають дві принципові переваги:

вимірювач може працювати при довільному навантаженні, а не тільки при узгодженому;

швидкодія вимірювача забезпечує вимірювання імпульсної потужності.

Крім цього до переваг ватметра з перетворювачем Холла можна віднести:

- мале споживання потужності;**
- порівняно широкий діапазон частот;**
- незалежність показів від форми напруги і струму;**
- мала похибка.**

Великим недоліком є різка зміна чутливості ватметра при зміні температури оточуючого середовища.

Калориметричний метод

Калориметричний метод вимірювання потужності НВЧ полягає в розсіюванні потужності на калориметричному навантаженні (робочому тілі) і вимірюванні швидкості виділення теплової енергії тим чи іншим способом.

Калориметри є ватметрами поглинаючої потужності (група МЗ), а приймальний перетворювач - калориметричне навантаження це еквівалент того реального навантаження, потужність в якому вимірюється.

При поглинанні робочим тілом енергії виділяється теплота.

За допомогою вимірювального пристрою вимірюється температура робочого тіла і визначається значення потужності.

Якщо в робочому тілі калориметра виділяється потужність P , то частина її іде на підвищення температури T тіла, а частина втрачається за рахунок теплопровідності, конвекції і тепловипромінювання.

В режимі теплового балансу

$$P = c \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{R_T} \quad (4)$$

де P - потужність, яка виділяється в робочому тілі калориметра;

θ - температура тіла;

R_T - тепловий опір між робочим тілом і оточуючим середовищем;

c - теплоємність робочого тіла.

Перша складова - це тепла потужність, яка йде на підвищення температури, друга - на втрати.

У всталеному режимі ($t \gg R c$) $\theta = P / RT$ (5)

тобто енергія, яка надходить в калориметричне тіло, повністю йде на втрати, а різниця температур прямо пропорційна розсіюваній потужності.

Якщо досягнута ідеальна теплоізоляція ($R_T \rightarrow \infty$), потужність пропорційна швидкості підвищення температури.

Найбільшого розповсюдження одержали поточні (проточні) калориметри з неперервною циркуляцією рідини - водою , яка омиває тверде робоче тіло, або кремній - органічною сумішшю, яка є об'ємним навантаженням.

На рис. 6 показана конструкція приймального перетворювача хвилевідного калориметричного ватметра.

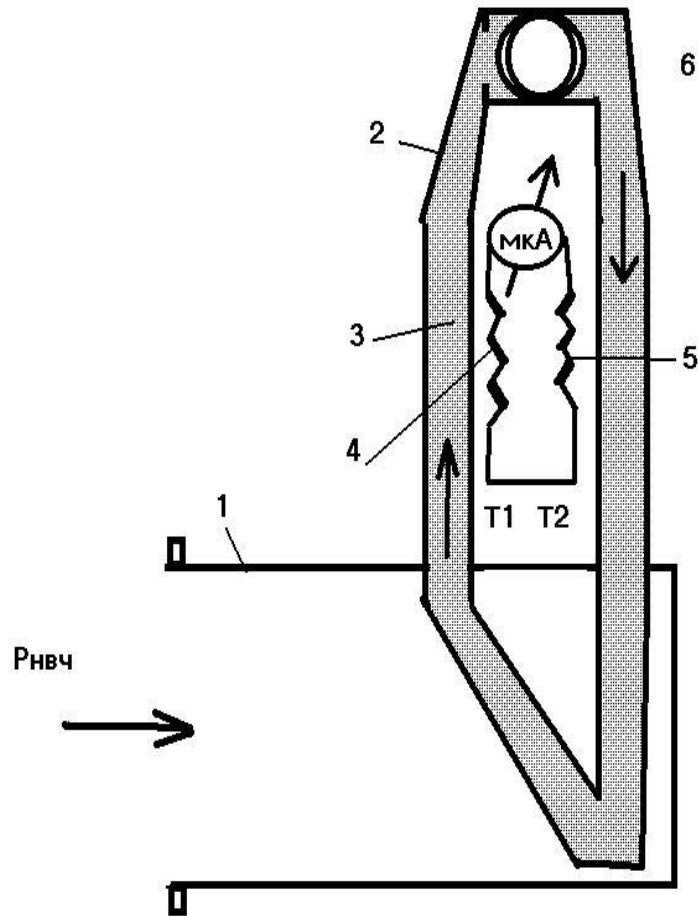


рис. 6

В короткозамкнутому відрізку хвилеводу 1 розміщена скляна трубка 2, по якій за рахунок роботи насосу 6 протікає рідина 3, яка є навантаженням. На вході і виході трубки температура рідини рівна T_1 і T_2 відповідно. Форма трубки і її довжина у хвилеводі вибирається з умови узгодження тракту, тобто мінімального коефіцієнта відбиття.

В усталеному режимі кількість теплоти Q_H , яка виділяється навантаженням R_H , дорівнює кількості теплоти Q_P , яка відводиться рідиною:

$$Q_H = 0,24 \cdot I^2 R_H t = Q_P = c \cdot V \cdot (T_1 - T_2) \quad (6)$$

Звідки

$$P = \frac{c_{\text{р}} \cdot V \cdot \Delta T}{0,24 \cdot t} \quad (7)$$

де $c_{\text{р}}$ - питома теплоємність рідини;

V - об'єм рідини, яка протікає через калориметр за час вимірювання t ;

ΔT - різниця температур рідини на вході і виході;

Якщо $c_{\text{р}}$ і швидкість протікання рідини постійні, то потужність, яка вимірюється пропорційна різниці температур ΔT .

Похибка вимірювання потужності виникає внаслідок:

**зміни питомої теплоємності рідини при її
значному нагріванні;
додаткового нагрівання рідини за рахунок її
тертя об стінки трубки;
зміни швидкості протікання рідини;
втрат теплоти на випромінювання.**

Для зменшення похибки використовують метод порівняння, при якому тепловий ефект, який породжується енергією електромагнітного поля НВЧ, порівнюють з тепловим ефектом, який виникає за рахунок енергії постійного струму або струму низької частоти.

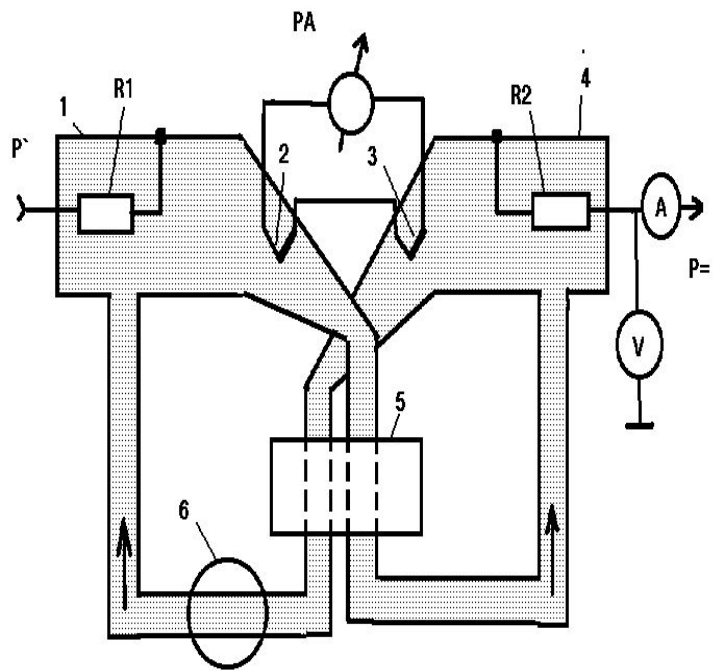


рис. 7.

На рис. 7 схематично показаний проточний калориметричний ватметр, який працює по методу заміщення. Приймальний перетворювач це - резистор навантаження $R1$, який розміщений в камері 1.

В такому калориметричному ватметрі відпадають складові похибки за рахунок непостійності питомої теплоємності, нерівномірності протікання рідини, її додаткового нагрівання за рахунок тертя.

Потужність НВЧ, яка вимірюється, визначають згідно з виразом :

$$P_{\sim} = P_{=} / K_e$$

де K_e - коефіцієнт ефективності приймального перетворювача, який враховує нееквівалентність нагрівання резисторів R_1 потужністю НВЧ і R_2 потужністю постійного струму.

Коефіцієнт ефективності залежить від частоти і приймає значення 1,0...0,7 в діапазоні частот 30 МГц...37,5 ГГц.

Проточні ватметри, як правило - це ватметри великої потужності.

В якості приклада серійного проточного ватметра можна навести МЗ-48 (водяний калориметр з коаксіальним входом забезпечує вимірювання середньої потужності 60...6000 Вт в діапазоні частот 0,001...1,6 ГГц з межею допустимої похибки 4,0...5,0 %); МЗ-11А (калориметр, в якому в якості носія тепла використовується кремній-органічна рідина, який забезпечує вимірювання потужності 0,01...10 Вт в діапазоні частот 0,001...11,5 ГГц з допустимою похибкою біля 7,0%).

Цілий ряд зразкових і робочих ватметрів (МЗ-54, МЗ-56, МЗ-62, МЗ-63) побудовані на основі СТАТИЧНИХ (сухих) калориметрів.

В них робоче калориметричне тіло, де енергія НВЧ - коливань перетворюється в теплову, нерухоме і в процесі вимірювання не змінює форми і фізичних властивостей.

Робочим тілом може бути рідина, а також тверді об'ємні або плівкові поглиначі.

ПИТАННЯ 2

СТРУКТУРНА СХЕМА АНАЛОГОВИХ І ЦИФРОВИХ ВАТМЕТРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

ПИТАННЯ 3

МЕТОДИ КАЛІБРУВАННЯ ВАТМЕТРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

1. Умови калібрування и підготовка до нього
При проведенні операцій калібрування повинні
дотримуватись наступні умови:

- температура навколишнього повітря $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$
 $(293 \pm 5\text{K})$;
- відносна вологість повітря $(65 \pm 15)\%$;
- атмосферний тиск (100 ± 4) кПа (750 ± 30) мм рт. ст.);
- напруга мережі живлення $(220 \pm 4,4)$ В; $(50 \pm 0,5)$ Гц.

Допускається проводити калібрування в реально існуючих умовах, відмінних від наведених, якщо вони не виходять за межі робочих умов експлуатації.

2.Проведення повірки ватметрів типу мЗ

1. ЗОВНІШНИЙ ОГЛЯД

Під час проведення зовнішнього огляду потрібно виконувати вказівки по операціях підготовки до проведення вимірювань згідно ТО.

2. ОПРОБУВАННЯ

Перед опробуванням ватметра на працездатність потрібно:

провести перевірку омичного опору НВ трактів ВЧ - перемикачів за допомогою універсального вольтметра В7-16А, в режимі вимірювання опору.

При цьому в положеннях ВЧ - перемикачів =1= і =0= опір повинен бути рівний нескінченності, а в положенні =100= - 75 або 50 ом в залежності від перемикача.

Увімкнути прилад в мережу і дати прогрітись під струмом

3.Визначення метрологічних характеристик

полягає у визначенні основної похибки вимірювання потужності без урахування похибки за рахунок неузгодженості його входу поелементним або комплектним методами.

Визначення основної похибки ватметра при поелементній повірці включає в себе:

визначення похибки термісторного мосту Я2М-64 на постійному струмі;

визначення значення $K_{\text{стU}}$ ВЧ - перемикачів;

визначення значення K_e і похибки визначення значення K_e (δ_{ke}) ВЧ - перемикачів;

визначення значення коефіцієнта поділу (K_d) і похибки визначення K_d ВЧ - перемикачів;

визначення похибки ΔP за рахунок впливу реактивної складової вихідного опору вимірюваного джерела потужності, який обумовлює зміну нуля ватметра.