

**КИЇВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ
ВІЙСЬКОВОЇ ПІДГОТОВКИ**

**КАФЕДРА
ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
ПІДГОТОВКИ**

ПРЕДМЕТ
“ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВІЙСЬКОВИХ
ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ”

ТЕМА №11
ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

ЗАНЯТТЯ №1
ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

НАВЧАЛЬНА МЕТА:

- 1. Надати слухачам класифікацію засобів вимірювання потужності.**
- 2. Ознайомити студентів з методами вимірювання потужності.**
- 3. Розглянути метрологічні характеристики вимірювачів 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. Класифікація засобів вимірювання потужності.**
- 2. Методи вимірювання потужності.**
- 3. Метрологічні характеристики вимірювачів потужності.**

ПИТАННЯ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

Потужність - фізична величина, яка визначається роботою, виконаною за одиницю часу. Одиниця потужності ват (Вт) відповідає роботі в один джоуль (Дж), яка виконується за одну секунду.

Засоби вимірювань, які призначені для вимірювання потужності, називаються ватметрами. Ватметри входять в число основних приладів, які застосовуються на всіх етапах розробки, серійного виготовлення і експлуатації радіоелектронної техніки.

В колах постійного струму потужність P , яка споживається навантаженням R , дорівнює добутку струму I і напруги U :

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2 / R \quad (1)$$

В колах змінного струму розрізняють миттєву $p(t)$ і середню (активну) P потужності.

Миттєва потужність визначається
виразом $p(t) = u(t) \cdot i(t)$, (2)
де $u(t)$, $i(t)$ - миттєві значення напруги і струму.

Активна (середня за період) потужність визначається виразом.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3)$$

В техніці зв'язку і радіолокації широко застосовують сигнали імпульсної форми: радіо і відеоімпульси.

В цих випадках потрібно визначати не тільки середню, але і імпульсну потужність.

Якщо обвідна радіоімпульсу прямокутної форми, то імпульсна P_i і середня P потужності пов'язані наступним чином:

$$P_i = T \cdot P / \tau , \quad (4)$$

де τ - тривалість радіоімпульсу;

T - період надходження імпульсів.

Практично майже завжди вимірюють середню потужність P_i за формулою (4) обчислюють імпульсну P_i .

Якщо форма імпульсу відрізняється від прямокутної, то імпульсну потужність визначають по еквівалентному прямокутному імпульсу тієї ж площі з тривалістю, яка дорівнює інтервалу часу на рівні половини його амплітуди.

У цьому випадку застосовується поняття пікової потужності $P_{\text{пik}}$

$$P_{\text{пik}} = P_i \cdot k_{\text{фi}}, \quad (5)$$

де $k_{\phi i}$ - коефіцієнт форми імпульсу, рівний відношенню максимального рівня імпульсної потужності дійсного імпульсу 1 до рівня потужності еквівалентного прямокутного імпульсу 2 (рис.1).

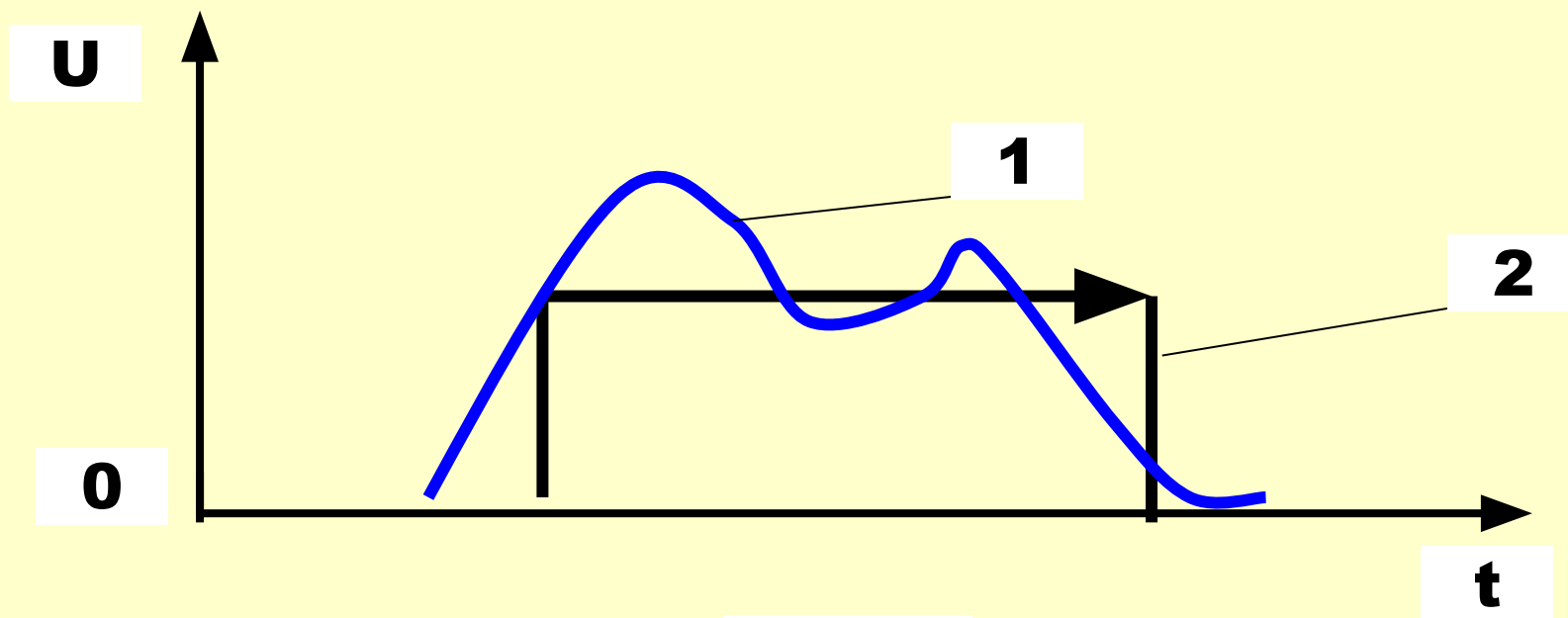


Рис. 1.

Тракти, по яким передаються сигнали імпульсної форми, розраховуються на пікову потужність.

Вимірювання потужності широко використовується у всьому діапазоні частот, а на НВЧ є єдиним способом визначення режимів пристроїв і кіл. Значення потужності, яка вимірюється, знаходяться в межах від 10^{-15} до 10^7 Вт.

Такі великі межі значень і широкий діапазон частот, а також різні вимоги до похибок вимірювання потужності привели до розробки багатьох методів і виготовлення великої кількості вимірювачів, робота яких базується на різних фізичних принципах.

Але не дивлячись на різноманітність методів вимірювання потужності, всі вони приводять до перетворення енергії електромагнітних коливань в інший вид енергії, більш зручний для вимірювання: теплову, механічну і т.п. з наступним вторинним перетворенням в електричний сигнал.

По характеру величини потужності, яка вимірюється, розрізняють методи вимірювання середнього значення потужності неперервних або імпульсно-модульованих сигналів і імпульсної потужності.

По рівню вимірюваної потужності розрізняють методи вимірювання малої (до 10 мВт), середньої (понад 10 мВт), великої потужності (понад 10 Вт).

У відповідності з ГОСТ 13605-75 визначений наступний ряд значень класів точності: 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 15,0; 25,0 , який допускає також можливість відносити широкодіапазонні і багатомежні ватметри до різних класів точності на різних ділянках діапазону частот і при різних межах вимірювання.

По типу ліній передачі енергії, в яких вимірюється потужність, приймальні перетворювачі ватметрів розділяють на коаксіальні і хвилевідні.

На низьких частотах вимірюється потужність незалежно від коефіцієнта навантаження, і в ланцюгах вимірювання поглинається дуже мала потужність.

Для ВЧ і НВЧ діапазонів картина дещо інша. На НВЧ методи, які базуються на вимірюванні струму і напруги менш зручні або взагалі неможливі із-за великих частотних похибок. Це обумовлено співвимірюваністю розмірів вхідних ланцюгів вимірювальних пристроїв з довжиною хвилі, яка є однією із причин неоднозначності вимірювання напруги і струму.

Тому на частотах понад десятків мегагерц одержали розповсюдження методи, які базуються на перетворенні енергії електромагнітного поля в інші види енергії, частіше всього в теплову.

По характеру перетворення електромагнітної енергії ватметри НВЧ розділяють на наступні типи:

теплові

калориметричні

болометричні

термоелектричні

термісторні

пондеромоторні (механічні)

електронні

діодні

на ефекті Холла

і інш.

По способу увімкнення вимірювального перетворювача в передавальний тракт розрізняють дві групи ватметрів НВЧ:

ватметри поглинаючої потужності

ватметри прохідної потужності.

Принципова відміна цих груп ватметрів полягає в тому, що вимірювальні перетворювачі першої групи є навантаженням для джерела електромагнітних коливань і розсіюють усю підведену до нього потужність, а вимірювальні перетворювачі другої групи споживають незначну частину потужності, яка проходить в навантаження, і майже не завдає ніякого впливу на умови розповсюдження електромагнітних хвиль в передавальному тракті.

При вимірюванні потужності поряд з абсолютними одиницями широко застосовуються відносні (логарифмічні) одиниці, як правило децибели (дБ):

$$\alpha = 10 \lg (P_x / P_o) \quad (6)$$

де P_x - вимірювана потужність,

P_o - вихідний рівень потужності.

P_0 вибирають рівним 1мВт або 1 Вт, і в цих випадках одиниця позначається дБ/мВт або дБ/Вт. Якщо значення α додатне, то вимірювана потужність більша вихідного рівня, якщо від'ємне - менша.

Кожний з основних методів вимірювання потужності: тепловий, механічний і електронний - мають особливості, переваги і недоліки, а також визначені області найбільш ефективного застосування на практиці.

Найбільш широко застосовуються і краще вивчені теплові методи.

Механічний (пондеромоторний) метод має дві основні переваги:

1) на його основі може бути створений прилад, який в ідеальному випадку не поглинає потужності;

2) прилад може бути тарований в одиницях потужності.

Метод, який базується на застосуванні ефекту Холла, має одну важливу перевагу в тому, що вимірюється істинний потік потужності незалежно від умов узгодження в вимірювальній лінії (КСХУ). Другою, поки що потенціальною перевагою цього методу є відсутність суттєвої часової затримки між моментом поданням потужності і появою ЕРС Холла.

Результати порівняння методів вимірювання потужності наведені в табл. 1.

Табл.1

Метод	Рівень потужності	Похибка, %	Постійна часу, с
Тепловий:			
Статичний калориметр			
основний	100 мкВт-10 Вт	0,5 - 5	До 104
з заміщенням	100 мкВт-1 кВт	0,5 - 3	До 102
диференційний	100 мкВт-10 мВт	0,2 - 3	0,1 - 103
Проточний калориметр			
Основний	1 - 10 Вт	2 - 5	1 - 100
з заміщенням	10 мВт -100 Вт	1 - 5	1 - 100
Болометри:			
баретерний	10-6-10-2Вт	1 - 5	10-3
термісторний	10-6-10-2Вт	1 - 5	1
хвилевідний	10-3-1 Вт	2 - 5	10
Термопари			
прямого нагрівання	10-3-10-1Вт	2 (до 18 ГГц)	0,1
непрямого нагрівання	10-3-10-1Вт	2 (до 40 ГГц)	1 - 5
вакуумний термоелемент	5 мВт	1 (до 1 ГГц)	0,5

Механічний:

Крутильний	10 - 200Вт	2-3 (до 10 ГГц)	2
Вібраційний	10⁻⁵-1 Вт	3-5 (до10ГГц)	0,2 - 2

Електронний:

вакуумний діод	20 мВт - 200 Вт	10-20 (до2,5ГГц) 	10⁻³
кристалічний діод	10⁻⁶-10⁻³ Вт	5-20 (до 40 ГГц)	10⁻⁶
на ефекті Холла	10⁻³-1 Вт	10 (до 40 ГГц)	10⁻¹⁰
на гарячих носіях	10⁻⁵-10⁻² Вт	15 (до 12 ГГц)	10⁻¹⁰

Зараз існують методи, які дозволяють вимірювати потужність від часток мілівату до одиниць кіловат з похибкою до 1- 2% у широкому діапазоні частот.

ПИТАННЯ 2

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

Терморезисторний метод

Терморезисторний метод полягає в тому, що вимірювана потужність НВЧ розсіюється на термочутливому резисторі. Тепло, яке при цьому виділяється змінює його електричний опір. Ця зміна опору порівнюється з зміною опору під впливом потужності постійного або низькочастотного струму, яка приводить до такого ж самого змінювання опору.

Термочутливий резистор (термістор або болометр) вмикають в НВЧ - приймальний перетворювач, в якому утворюються умови для розсіювання на ньому всієї вимірюваної потужності, як на кінцевому навантаженні.

Терморезистор включається також в мостову схему, яка працює на постійному або низькочастотному струмі.

Мостова схема забезпечує живлення терморезистора постійним струмом і вимірювання зміни опорів під дією НВЧ - коливань і постійного або низькочастотного струму.

Таким чином, основними елементами і вузлами терморезисторного ватметра є терморезистор, приймальний перетворювач і низькочастотні вимірювальний і відліковий пристрої.

Терморезистори - це бусинки діаметром 0,2...0,5 мм або циліндри діаметром 0,2...0,3 мм і довжину 1...1,5 мм (рис. 2), які виконані з напівпровідникової маси, і яка складається з суміші окислів міді, марганцю, кобальту, титану. Терморезистори мають від'ємний температурний коефіцієнт опору.

Болометри - це металеві термочутливі елементи. Вони мають додатний температурний коефіцієнт опору. Болометри виготовляють у вигляді тонкого платинового дроту діаметром приблизно 1мкм або тонкої плівки з платини, яка нанесена на слюду у вакуумі.

Основні параметри терморезисторів і болометрів:

- опір в робочій точці R_T ;
- температурний коефіцієнт опору, який

визначається виразом (7):

- чутливість;

$$S_p = dR / dP \text{ Ом / Вт} \quad (7)$$

- максимальна допустима потужність $P_{сер}$ мВт;
- теплова постійна часу T ;

Терморезистори і болометри застосовують для вимірювання малих значень середньої потужності неперервних і імпульсно - модульованих коливань. Терморезистори більш чутливі і більш стійкі до перевантажень завдяки від'ємному температурному коефіцієнту опору.

Болометри мають малу постійну часу і тому застосовуються для вимірювання малих значень імпульсної потужності.

Стабільність параметрів дрових болометрів дозволяє застосовувати їх в зразковій апаратурі. Плівкові болометри дозволяють збільшити верхню межу вимірюваних потужностей до 1 Вт.

Приймальні перетворювачі складаються з відрізка відповідної лінії передачі з увімкненими одним або двома терморезисторами або болометрами. Призначення приймального перетворювача – узгодження лінії передачі з терморезисторами і забезпечення увімкнення в низькочастотну вимірювальну схему, а також розміщення і увімкнення термокомпенсаційного терморезистора.

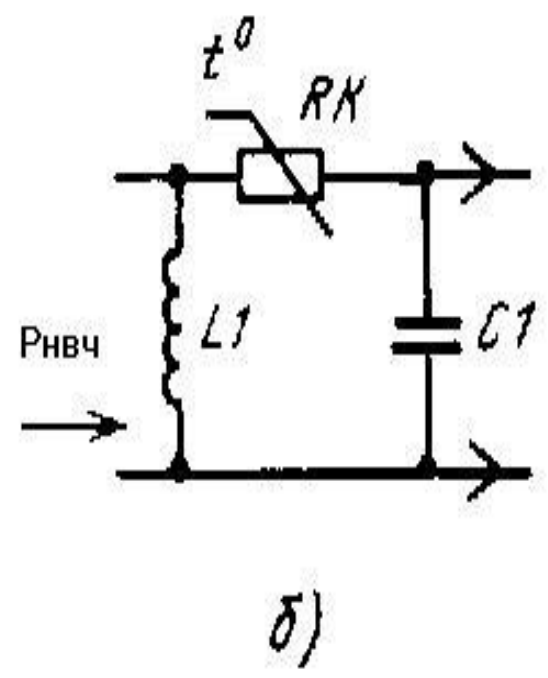
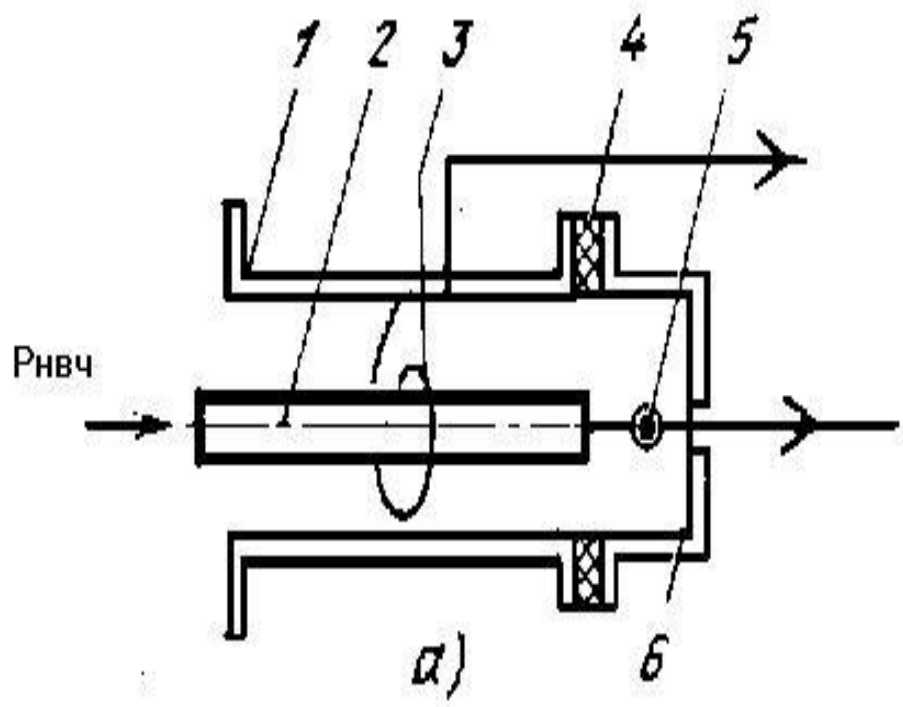


рис. 2

На рис. 2, а показана спрощена конструкція коаксіального приймального перетворювача з одним терморезистором 5, який увімкнений в центральний провідник 2 короткозамкнутого відрізка коаксіального хвилеводу. Один вивід терморезистора з'єднаний з короткозамкнутою заглушкою перетворювача 6, яка утворює з зовнішнім провідником 1 коаксіальної лінії, завдяки прокладці 4, конденсатор С1.

Другий вивід терморезистора через дросель 3 у вигляді спіралі, яка розміщена в площині поперечного перетину коаксіального хвилеводу, з'єднаний з зовнішнім провідником. На рис. 2, б зображена еквівалентна схема.

Коефіцієнт ефективності визначається нееквівалентністю заміщення, тобто неоднаковим розподілом теплових джерел під час нагрівання НВЧ і низькочастотним струмом. Під час нагрівання струми протікають не тільки через терморезистор, а і в стінках лінії передачі, в з'єднувачах, в різних контактах. На основі подібних конструкцій створені серійні коаксіальні і хвилевідні терморезисторні приймальні перетворювачі, які перекривають діапазон частот 0,03 ...78,3 ГГц (М5-40...М5-89). Вхідний КСВН не перевищує 1,7. Коефіцієнт ефективності складає 0,7...1,05.

Мостові схеми призначені для вимірювання потужності постійного або низькочастотного струму, який заміщує потужність НВЧ, тобто яке приводить до такої ж зміни опору терморезистора.

Найпростішою вимірювальною схемою є резисторний міст Уітсона, в одне з плеч якого увімкнений опір терморезистора рис. 3.

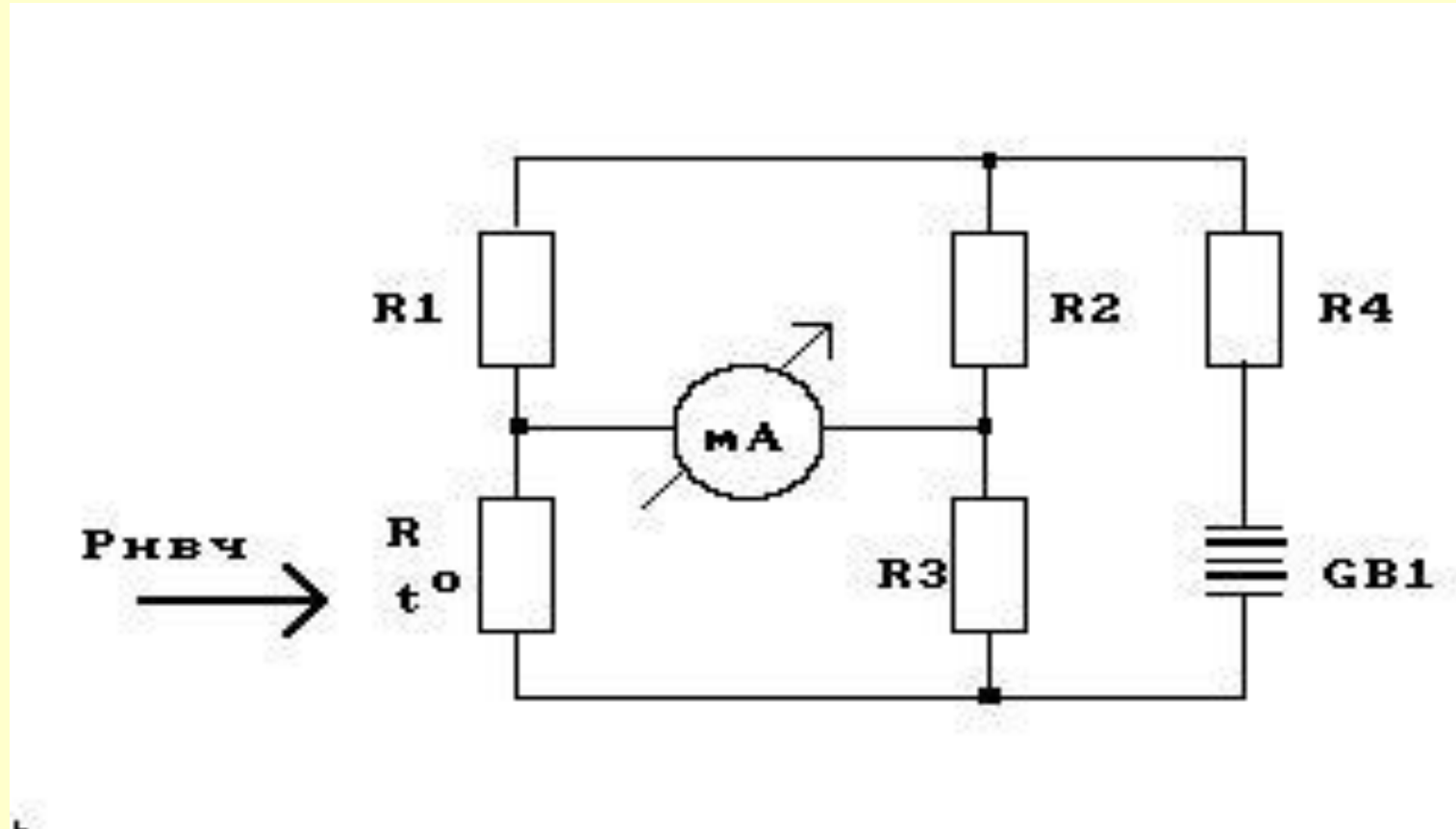


рис.3.

Терморезистор R_{t_0} одночасно вмикається як кінцеве навантаження в лінію передачі. Опір резисторів R_1 , R_2 , R_3 вибирають таким, щоб при заданій напрузі терморезистор мав задане значення опору постійному струму R_t .

Балансується міст зміною струму живлення. Можна записати.

$$P_{\text{НВЧ}} = k I_p, \quad (8)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, який можна визначити калібруванням.

Розглянута схема може застосовуватись для індикації потужності, але не для точних вимірювань. Недоліки пов'язані з малим динамічним діапазоном, неузгодженістю НВЧ тракту при зміні опору терморезистора, зміна чутливості мосту в діапазоні температур оточуючого середовища.

Тому застосовують режим зрівноважуючого мосту.

При розбалансуванні мосту під дією потужності НВЧ баланс відновлюється зменшенням потужності постійного струму в даному плечі. Опір терморезистора R_T приймає попереднє значення.

Потужність НВЧ можна обчислити за формулою

$$P_{\text{НВЧ}} = R_T \times (I_1^2 - I_2^2) \quad (9)$$

де I_1, I_2 - струми через терморезистор при початковому і повторному балансуванні.

Точність вимірювання з використанням (9) низька, якщо струми мало відрізняються один від іншого. Краще вимірювати безпосередньо зміну струму живлення терморезистора ΔI :

$$P_{\text{НВЧ}} = (2 I_1 - \Delta I) \cdot \Delta I \times R_T \quad (10)$$

Прилад, який вимірює струм ΔI , можна тарувати в значеннях потужності $P_{\text{НВЧ}}$.

На рис. 4 зображена схема вимірювача потужності з шунтом, яка дозволяє вимірювати зміну струму через терморезистор. Живлення моста здійснюється від джерела постійного струму ($R_i \gg R_m$), а на терморезистор подається напруга низькочастотного струму.

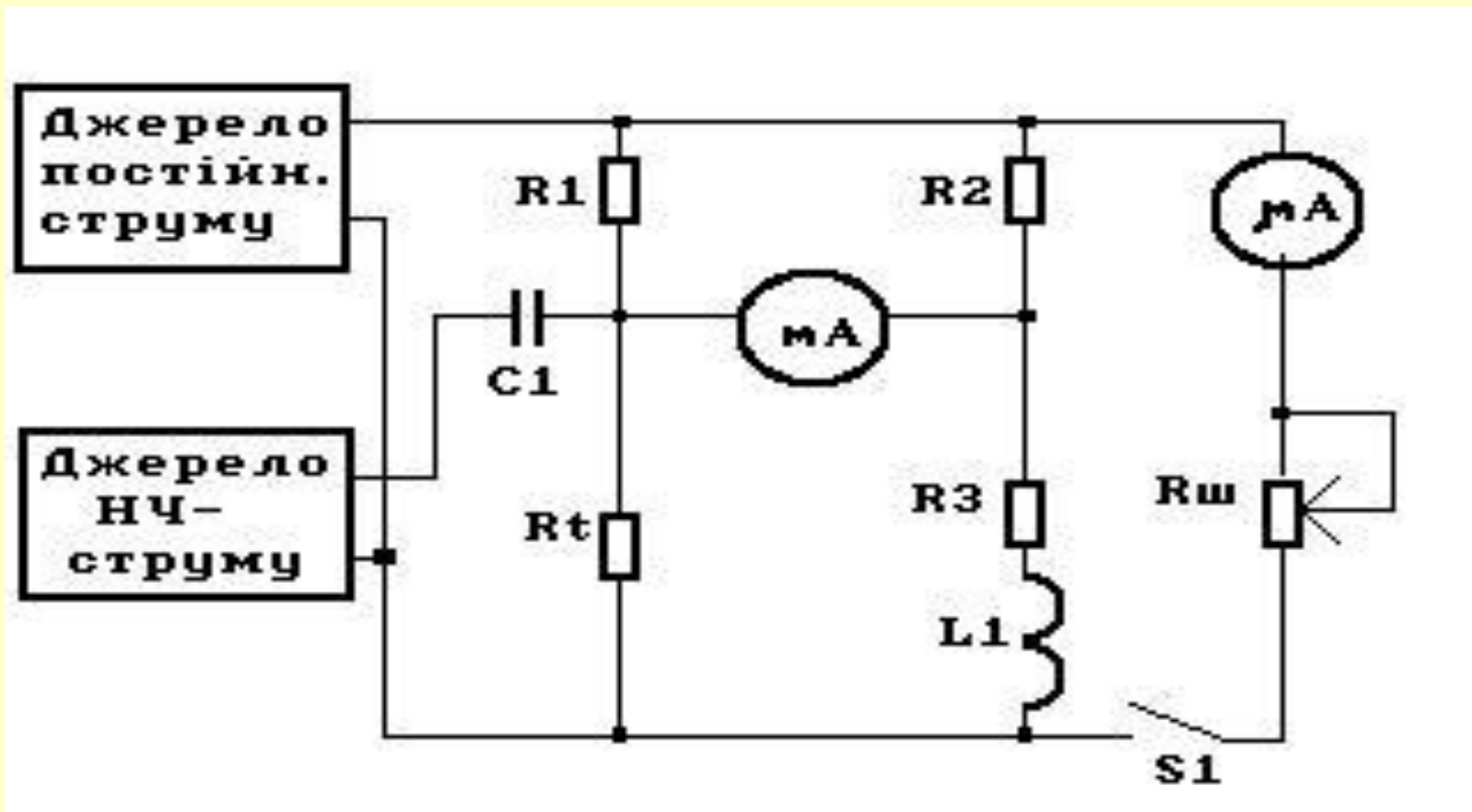


рис. 4.

Ключ S1 при початковому балансуванні розімкнутий. Від джерела постійного струму схема споживає струм $2 \cdot I_0$, початкове балансування виконується зміною струму живлення терморезистора від джерела низькочастотного струму. Під дією потужності НВЧ опір терморезистора зменшується, міст втрачає баланс.

Замикають ключ S1 і, зміною Rш і постійного струму через терморезистор, відновлюють баланс мосту.

Струм через опір шунта можна при рівних опорах моста записати, як

$$I_{Ш} = 2 \cdot I_0 - 2 \cdot I_1 = 2 / \Delta I, \quad (11)$$

де I_1 - струм через терморезистор після повторного балансування, звідки

$$\Delta I = I_{Ш} / 2 \quad (12)$$

Шкала амперметра в ланцюзі шунта може бути тарована в значеннях потужності НВЧ.

В вимірювачах потужності застосовують схеми з автоматичним балансуванням мосту (автобалансні схеми).

Так, у вимірювачі рис. 4 автоматичний баланс мосту може бути досягнутий, якщо опір шунта зробити електрично керованим від напруги в діагоналі мосту.

Важливим чинником, який впливає на точність терморезисторних ватметрів, є зміна температури оточуючого простору.

В автоматичних ватметрах потрібно також зменшувати вплив температури оточуючого середовища. Існують для цього два шляхи - термостатування і створення термокомпенсаційних схем.

Перший значно ускладнює конструкції приймальних перетворювачів, час прогріву досягає 2 години. Тому частіше застосовують термокомпенсаційні схеми. Для термокомпенсації, як правило, використовують компенсаційні мости, в які вмикають компенсаційний терморезистор, ідентичний робочому. При зміні температури оточуючого середовища система слідкування джерел живлення змінює струми живлення терморезисторів настільки, що баланс робочого мосту зберігався.

ПИТАННЯ 3

МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ

Одиниця потужності - ват

відтворюється і зберігається за допомогою ряду Державних спеціальних еталонів в діапазоні 30...10000 МГц (коаксіальні хвилеводи), 2,59.. 37,5 ГГц і 37,5.. 54 ГГц (прямокутні хвилеводи).

Рівні потужності, які відтворюються еталонами, складають в залежності від діапазону частот від 1 мВт до 1 Вт. СКЗ випадкової похибки $S_0 = (0,05...0,3)\%$.

Еталони виконані на основі терморезисторних і калометричних методів. Порядок передачі одиниці потужності від еталону зразковим і даліше робочим засобам встановлюється державною повірочною схемою для засобів вимірювання потужності.

Повірочною схемою передбачається: якщо ватметр, який підлягає повірці, поглинаючої потужності, то зразковий ватметр, за допомогою якого виконується повірка, повинен бути ватметром прохідної потужності відповідної точності.