

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Radiofizikos katedra

Mikrobangų galios matavimas

Mikrobangų laboratorinis darbas Nr. 15

Paruošė doc. V. Kalesinskas

Vilnius 2012

Turinys

Metodiniai nurodymai.....	4
GALIOS MATAVIMO PAGRINDAI.....	8
Matuojamosios galios keitimas.....	8
Vatmetrai.....	8
Jungimas į matavimo traktą.....	9
Keitiklio konstrukcija.....	11
Mikrobangų jutiklių tipai.....	12
Ekvivalentiškumo principas.....	13
Matavimo metodo paklaidos.....	13
Termistoriniai matavimo blokai.....	13
Literatūra.....	14

Laboratorinis darbas Nr. 15**Mikrobangų galios matavimas**

Darbo tikslas. Susipažinti su mikrobangų galios matavimo metodais ir įgyti praktinių matavimo įgūdžių.

Darbo uždutis

1. Susipažinti su mikrobangų galios jutikliais (termistoriniais, termoporiniais, diodiniais).
2. Ištirti termistoriaus varžos priklausomybę nuo jį veikiančios nuolatinės srovės galios.
3. Išmatuoti duotojo mikrobangų šaltinio galią naudojant Witstono tiltą ir termistorinę galvutę.
4. Įjungus matavimo liniją tarp mikrobangų šaltinio ir termistorinės galvutės išmatuoti stovinčiosios bangos koeficientą šiame trakte.
5. Patikslinti 3-e punkte atliktus matavimus naudojantis 4-e punkte išmatuotu stovinčiosios bangos koeficientu.
6. Analogiškus mikrobangų galios matavimus atlikti su Agilent firmos galios matuokliu ir juos palyginti su 5-e punkte gautais rezultatais.

Pastaba:

2 punkte nurodytus tyrimus atliekame naudodami Witstono tiltą. Paaiškiname matavimo esmę remiantis Witstono tilto balanso sąlyga.

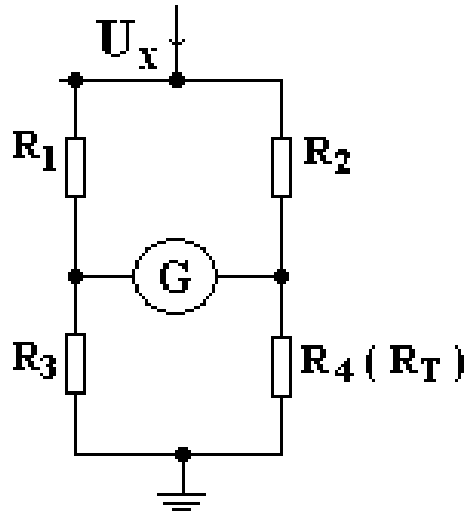
3 punkte nurodytus matavimus atliekame 0,1 – 10 mW mikrobangų galių srityje. Mikrobangų galią keičiame kas 3 dB.

Rekomenduojama Literatūra

1. Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements, Application Note 64 – 1B, Copyright © 2000 Agilent Technologies, Printed in USA 04/2000.
2. M3-10A sugeriamos galios termistorinis vatmetras. Aprašas ir vartojimo instrukcija.
3. M5-31 ir M5-32 termistorinės galvutės. Aprašas ir vartojimo instrukcija (2,3-rusų kalba).
4. EPM-P Series Peak and Average Power Meters. User-s Guide, Agilent Technologies.
5. Agilent 8480 Series Coaxial Power Sensors Operating and Service Manual, Agilent Technologies.

Metodiniai nurodymai

Mikrobangų energijai veikiant termistorių, jo varža mažėja. Tikslus varžos kitimas yra matuojamas Wistsono tiltu (1 pav.).



1pav. Wistsono tiltas

Mikrobangų galios matavimas su įjungtu į Wistsono tiltą R_T termistoriumi yra paremtas ekvivalentiškumo principu: laikoma, kad tokia pat mikrobangų galia, kaip ir nuolatinės srovės galia, pašildo termistorių (ir pakeičia jo varžą) tuo pačiu dydžiu. Todėl yra matuojama nuolatinės srovės galia, kurią nesunku apskaičiuoti, ir lyginama su tokiu pat mikrobangų poveikiu.

Panagrinėkime Wistsono tiltą (1pav.). Jo balanso sąlyga:

$$R_1/R_3 = R_2/R_4. \quad (1)$$

Tilte išsiskirianti nuolatinės srovės galia

$$P_0 = (U_{x0})^2 / R_b, \quad (2)$$

čia U_{x0} – veikianti tiltą nuolatinė įtampa (be mikrobangų poveikio), R_b - tilto visa varža.

$$R_b = (R_1 + R_3) * (R_2 + R_4) / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4). \quad (3)$$

(Galvanometro varža būna daug didesnė už tilto varžas ir, todėl, jos neįskaitome).

Kai $R_1 = R_2$ ir $R_3 = R_4$,

$$P_0 = 2(U_{x0})^2 / (R_1 + R_3) = 2(U_{x0})^2 / (R_2 + R_4), \quad (4)$$

o R_4 rezistoriuje išsiskirianti galia

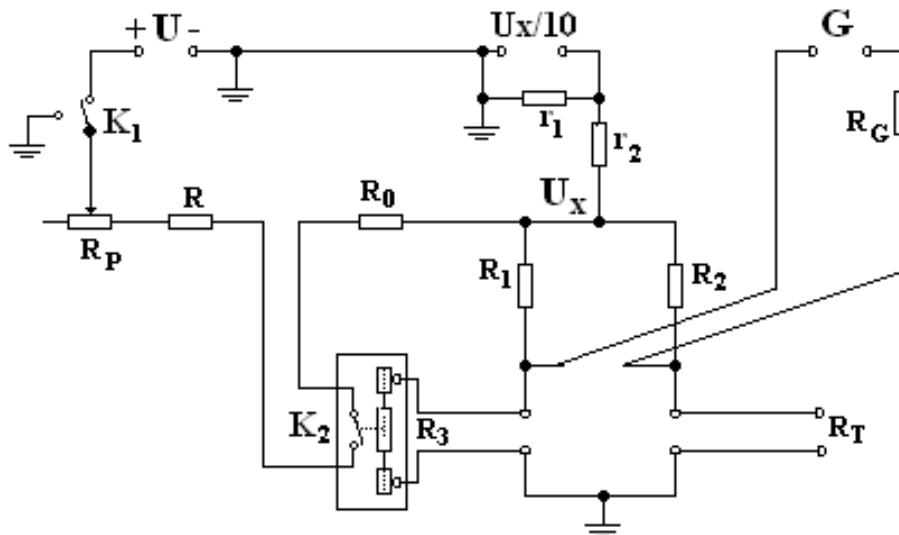
$$P_4 = R_4 * (U_{x0})^2 / (R_2 + R_4)^2. \quad (5)$$

Esant $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$,

$$P_4 = (U_{x0})^2 / 4R_4 . \quad (6)$$

(Matuojant mikrobangų galią vietoj R_4 yra jungiamas R_T termistorius).

Matavimų maketo schema parodyta 2 pav., o prie maketo jungiamų prietaisų **struktūrinė schema** – 3pav., maketo nuotrauka – 4 pav.



2 pav. Mikrobangų galios matavimas.

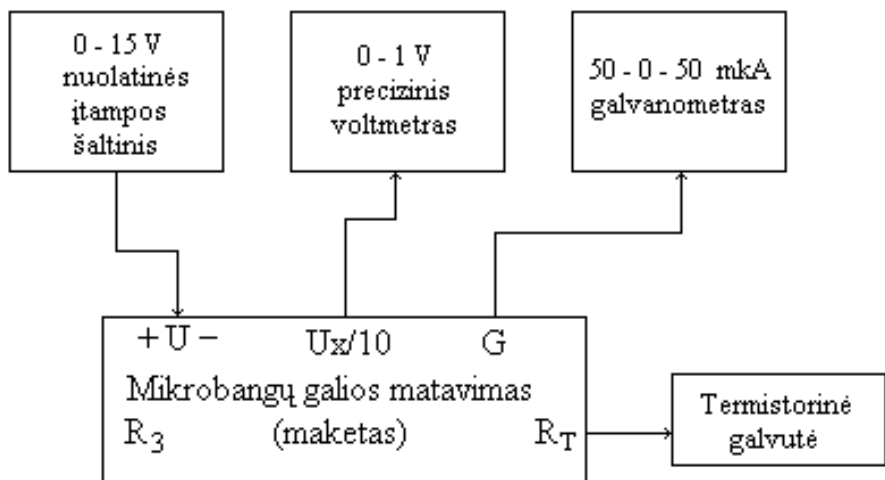
Schemoje (2pav.) esamų detalių vertės ir paaiškinimai.

$R_p=1k\Omega$ (precizinis potenciometas); $R=100\Omega$ (vielinis rezistorius); $R_0=100\Omega$; $R_1=R_2=100\Omega$;

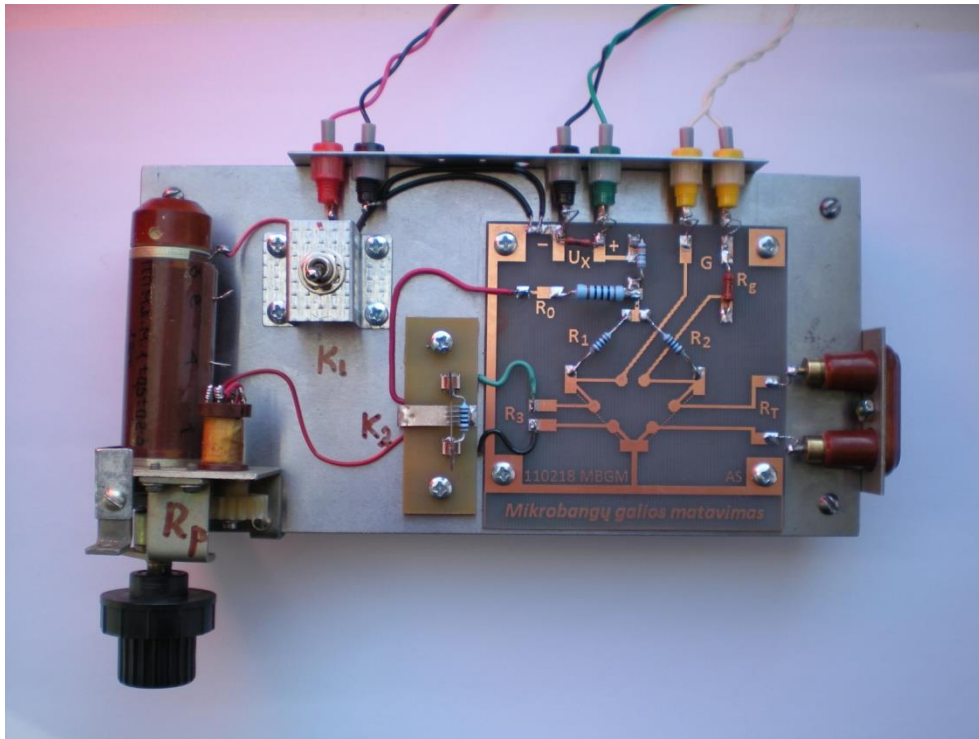
R_3 – keičiami rezistoriai (100, 120, 180, 220, 330, 390 ir 470 Ω); $R_G=3k\Omega$;

R_T – termistorius (jis yra sumontuotas termistorinėje galvutėje); $r_1=20k\Omega$; $r_2=180k\Omega$.

K_1 ir K_2 – maitinimo šaltinio jungikliai.



3 pav. Prietaisų sujungimo schema.



4 pav. Maketo nuotrauka

Witstono tiltą sudaro du pastoviai įjungti R_1 ir R_2 rezistoriai, termistorinėje galvutėje esantis R_T termistorius bei keičiami R_3 rezistoriai. Tiltas yra maitinamas nuolatine įtampa per K_1 ir K_2 jungiklius bei apribojančius srovę R ir R_0 rezistorius ir R_p potenciometrą. Potenciometru reguliuojame tiltu tekančią srovę ir R_T termistoriaus varžą. Tiltą veikianti įtampa per r_1 ir r_2 (10:1) dalytuvą patenka į precizinį voltmetrą. Tilto balansavimas yra stebimas G galvanometru.

Išimant R_3 rezistorių, pirmiausia K_2 jungiklis atjungia nuo tilto įtampą ir tuo apsaugo galvanometrą nuo didelių perkrovų.

Antrąją užduotį atliekame naudodami tik nuolatinės įtampos šaltinį. Termistoriaus pradinė varža yra didesnė už keičiamas R_3 varžas. Todėl, įjungus bet kurį rezistorių, ir reguliuojant U_{x0} įtampą (tai darome sukiojant R_p potenciometrą ir(arba) keičiant $U \leq 10V$), subalansuojame tiltą ($R_3 = R_T$). Užsirašome U_{x0} vertę ir pagal 5-ą formulę apskaičiuojame termistoriuje susidariusią nuolatinės srovės galią. Analogiškai atliekame matavimus su visomis R_3 varžomis. Nubraižome termistoriaus varžos priklausomybės nuo jį veikiančios nuolatinės srovės galios grafiką.

Trečiąją užduotį atliekame taip. Naudojame tik $R_3 = 100 \Omega$ rezistorių (nes tiramojo termistoriaus darbinė varža yra 100Ω). Įjungiamo $U=10V$ įtampą. Potenciometru pasiekiamo tilto balanso sąlygą $R_3 = R_T$. Užsirašome U_{x0} vertę.

Dabar įjungiamo mikrobangų generatorių ir įvedame į termistorinę galvutę norimą mikrobangų galią $P_{MB} \leq 10mW$. Dėl mikrobangų poveikio termistoriui jo varža sumažės ir bus sutrikdyta tilto balanso sąlyga. Mažindami tiltą veikiančią įtampą U_x , vėl subalansuojame tiltą. Užsirašome U_x vertę. Apskaičiuojame į termistorinę galvutę patenkančią galią P_{MB} . Akivaizdu, kad

$$P_{MB} = [(U_{x0})^2 / 4R_T] - [(U_x)^2 / 4R_T]. \quad (7)$$

Taip išmatuojame mikrobangų galią 0,1 – 10 mW ribose. Galią keičiame kas 2 – 3 dB.

Ketvirtosios ir penktosios užduoties esmė. Kadangi termistorinė galvutė atspindi dalį mikrobangų galios, todėl išmatuojame ne visą generatoriaus skleidžiamą galią. Su matavimo linija išmatavus stovinčiosios bangos koeficientą ρ , galime patikslinti generatoriaus skleidžiamą galią P_x pagal formulę:

$$P_x = (1 + \rho)^2 \cdot P_{MB} / 4 \rho \quad (8)$$

Šeštąją užduotį atliekame matuodami mikrobangų generatoriaus galią su Agilent firmos galios matuokliu. Jo jutiklį jungiame prie mikrobangų generatoriaus lygiagrečiai su termistorine galvute. Galią keičiame tose pačiose ribose, kaip ir trečiame punkte.

GALIOS MATAVIMO PAGRINDAI

Mikrobangų diapazone galios matavimas yra bene vienintelis būdas kiekybiškai įvertinti spinduliavimo intensyvumą. Tokie lauko parametrai kaip srovė, įtampa ar elektrinio ir magnetinio laukų stipriai netenka prasmės dėl neapibrėžtumo, kai bangos ilgis pasidaro palyginamas su skersiniais perdavimo linijos matmenimis. Galia mikrobangų diapazone yra apibrėžiama kaip vidutinė per periodą energija perduodama per tam tikrą paviršių. Bangolaidžiams ar bendraašėms linijoms šis paviršius yra perdavimo linijos skerspjuvis, statmenas bangos sklidimo kryptčiai. Todėl yra prasmė kalbėti apie galią tik tam tikroje plokštumoje. Aišku, kad galios srautas per paviršių S yra apibrėžiamas per Pointingo vektorių, todėl galia yra lygi

$$P = \operatorname{Re} \int_S (\vec{E} \times \vec{H}) d\vec{S} = \frac{1}{2} \int_S E_m H_m \cos(\varphi) dS, \quad (9)$$

kur \vec{E}, \vec{H} yra harmoninio elektromagnetinio lauko vektoriai, E_m, H_m skaliarinės laukų amplitudės, φ – fazių skirtumas tarp \vec{E}, \vec{H} .

Linijose su nevienalytiškumais sklinda kritusios ir atsispindėjusios bangos, todėl galima kalbėti ir apie kritusią, atspindėtą bei perduodamą galias, be to $P_{per} = P_{kr} + P_{atp}$.

Matuojamosios galios keitimas

Kadangi mikrobangų galios tiesiogiai išmatuoti negalima, ją reikia pasiversti kitokios rūšies fizikiniais dydžiais, kuriuos jau būtų galima stebėti ar registruoti. Mikrobangų galios keitimas visuomet būna daugiapakopis: spinduliavimo energija \rightarrow srovė \rightarrow indukuota srovė \rightarrow šiluma.

Galimi ir kitokie galios keitimo būdai. Visi matuojamojo lauko jėgos charakteristikos keitimo būdai yra susiję su netiesiškumu: arba atliekant detektavimą, arba pagal Džaulio Lenco dėsnį arba pagal Kulono dėsnį. Netiesinis keitimas matuojant galią yra neišvengiamas, kadangi pati galia yra apibrėžiama per netiesinę energijos srauto transformaciją. Dauguma mikrobangų galios matavimo prietaisų yra pagrįsti spinduliavimo energijos keitimu į šilumą.

Vatmetrai

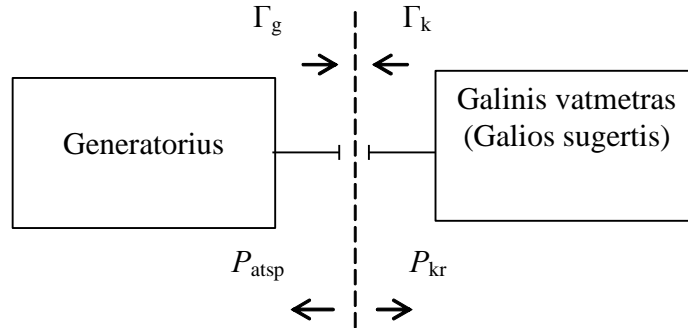
Mikrobangų energijos keitimui ir matavimo rezultatų atvaizdavimui naudojami specialūs prietaisai – mikrobangų vatmetrai. Jų pagrindą sudaro vienas arba keletas pradinių keitiklių ir matavimo blokas. Keitiklių paskirtis – matuojamosios galios pakeitimas į įtampą, srovę, termo- EVJ , pastoviosios srovės varžą. Matavimo bloko – tolimesnis keitimas: signalo dalinimas arba stiprinimas, įvairių matuojamojo dydžio funkcijų skaičiavimas, keitimas į skaitmeninę formą, kodavimas, suderinimas su kitais prietaisais ir matavimo sistemomis.

Visi mikrobangų vatmetrai dažnių diapazone nuo 10^7 iki 10^{11} Hz skirstomi pagal šiuos požymius:

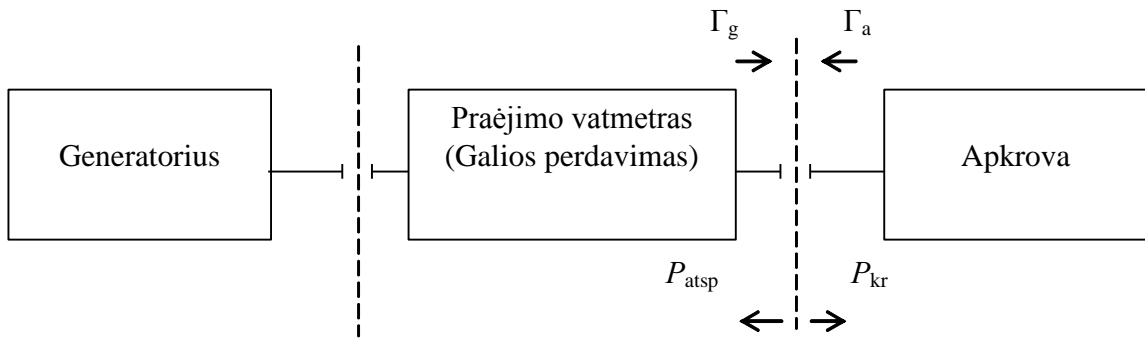
- 1) pagal matuojamosios galios dydį: mažos galios (iki 10^{-2} W), vidutinės galios (10^{-2} – 10 W) ir didelės galios (virš 10 W);
- 2) pagal pirminio keitiklio tipą: bangolaidiniai ir koaksialiniai;
- 3) pagal jungimą į traktą: praėjimo ir galiniai (sugeriantys galią);
- 4) pagal keitimo principą: šiluminiai ir elektroniniai;
- 5) impulsinius, skirtus matuoti impulsais moduluotus signalus.

Jungimas į matavimo traktą

Naudojami du vatmetrų jungimo į traktą būdai: a) matavimo šaltinio galios matavimas, kai generatoriaus galia laikoma į suderintą apkrovą patenkusi galia (sugerties vatmetrai); b) apkrovoje išsiskyrusios galios matavimas (praėjimo vatmetrai), 5 pav, a, b.



5 pav, a



5 pav. b

Šiais paminėtais atvejais naudojami visiškai skirtingi matavimo metodai. Atveju a) visa generatoriaus galia yra sugerama galiniame vatmetre, kuris tuo pačiu yra ir generatoriaus apkrova. Atveju b) tarp generatoriaus ir apkrovos yra praėjimo vatmetras, kuriame sugerama tik maža perduodamos galios dalis. Idealiu atveju vatmetras nedaro jokios įtakos perduodamai iš generatoriaus į apkrovą galiai.

Pirminiai sugerties vatmetrų galios keitikliai kaip elektrinės grandinės elementai yra dvipoliai. Idealaus vatmetro keitiklio varža Z_k turi būti suderinta su generatoriaus varža Z_g . Tokiu atveju keitiklio atspindžio koeficientas yra lygus nuliui. Praktikoje siekiant idealaus suderinimo, tiek generatoriaus tiek ir keitiklio varžos daromos tokios pat kaip standartinio juos jungiančio bangolaidžio varža Z_0 . Idealaus suderinimo neįmanoma pasiekti plačioje dažnių juostoje. Dėl daugkartinių atspindžių trakte sugerta vatmetro keitiklyje galia yra lygi

$$P_{sug} = P_{kr} - P_{atsp} = P_g \frac{1 - |\Gamma|^2}{|1 - \Gamma_k \Gamma_g|^2}, \quad (10)$$

kur P_g yra generatoriaus perduodama į apkrovą galia. Jeigu $|\Gamma_k|, |\Gamma_g| \ll 1$

$$P_{sug} \cong P_g \left[1 - |\Gamma_k|^2 + 2|\Gamma_k||\Gamma_g| \cos(\varphi_k + \varphi_g) \right]. \quad (11)$$

Matome, kad vatmetro keitiklyje sugerta galia nėra lygi generatoriaus generuojamai galiai. Dydis $1 - P_{sug}/P_g$ yra sisteminė matavimo metodo paklaida. Paprastai dydį $|\Gamma_k|^2$ galima išmatuoti ir todėl nesunku įvesti matavimų pataisą. Įvertinti narį $2|\Gamma_k||\Gamma_g|\cos(\varphi_k + \varphi_g)$ sunku, kadangi jis priklauso nuo atspindžio koeficientų $|\Gamma_k|, |\Gamma_g|$ fazių ir gali įgyti bet kurią vertę ribose $\pm 2|\Gamma_k||\Gamma_g|$. Jis sudaro neįvertintą sisteminę matavimų paklaidą. Maksimalią šios paklaidos vertę galima nustatyti išmatavus $|\Gamma_k|, |\Gamma_g|$. Ši specifinė paklaida vadinama išderinimo paklaida ir yra būdinga visoms matavimų schemoms, kuriose yra daugkartiniai atspindžiai.

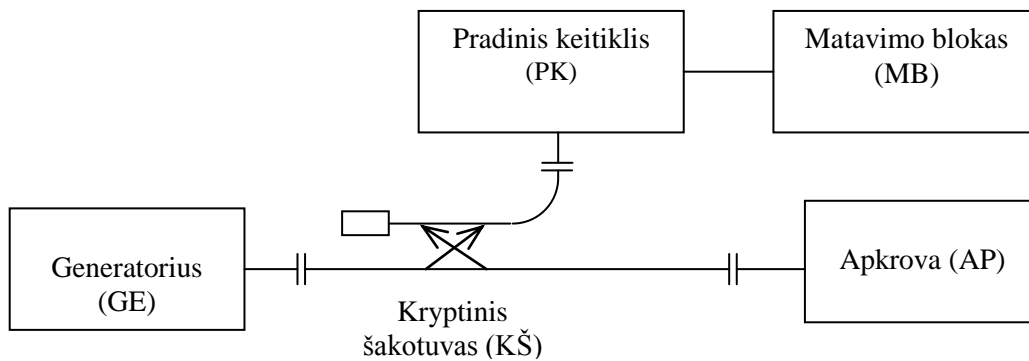
Matuojant pagal 5 pav. b schemą, išderinimo paklaida taip pat yra, ir vatmetro parodymai apytikriai išreiškiami tokia formule:

$$A = K_k P_{kr} \left[1 + B|\Gamma_a|^2 + C|\Gamma_a|F(\varphi_a) \right], \quad (12)$$

kurioje K_k yra pastovus vatmetro keitiklio kalibracinis koeficientas, lygus santykiui P_{kr}/A , kai apkrovos atspindžio koeficientas $\Gamma_a = 0$, C – pastovus vatmetro koeficientas, nusakantis atspindžio nuo apkrovos įtaką vatmetro parodymams, B – koeficientas nusakantis atspindėtos galios indėlį į vatmetro parodymus, $F(\varphi)$ – periodinė atspindžio koeficiento funkcija.

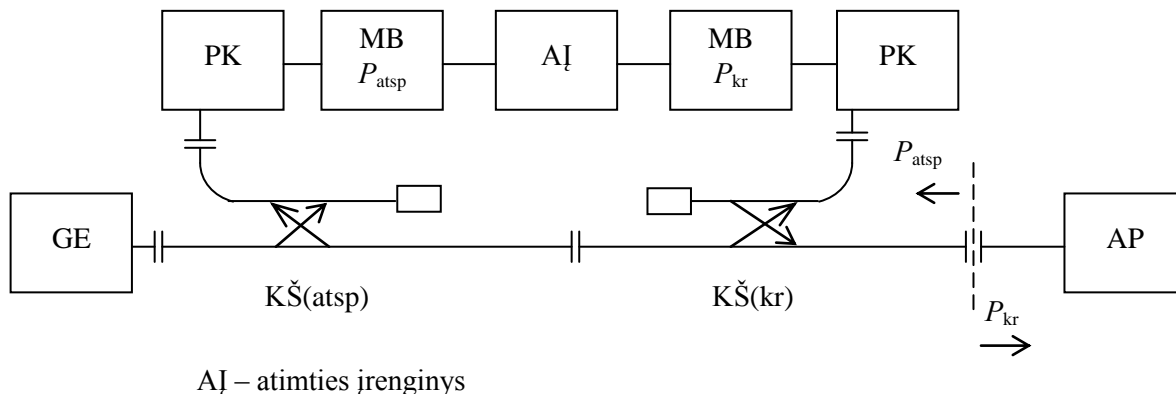
Pagal B koeficiento vertę visi praėjimo vatmetrai yra skirstomi į tris grupes.

Kai $B = 0$, vatmetro parodymai yra lygūs kritusiai galiai. Tokį vatmetrą galima padaryti pritaikius kryptinį šakotuvą (su begaliniu kryptinio šakojimo koeficientu) ir šalutiniame šakotuvo petyje prijungus galinį vatmetrą (6 pav.).



6 pav.

Kai $B = -1$, vatmetro parodymai yra lygūs praėjusiai galiai (kuri sugeriama apkrovoje). Jo realizacijos schema pateikta 7 pav.



7 pav.

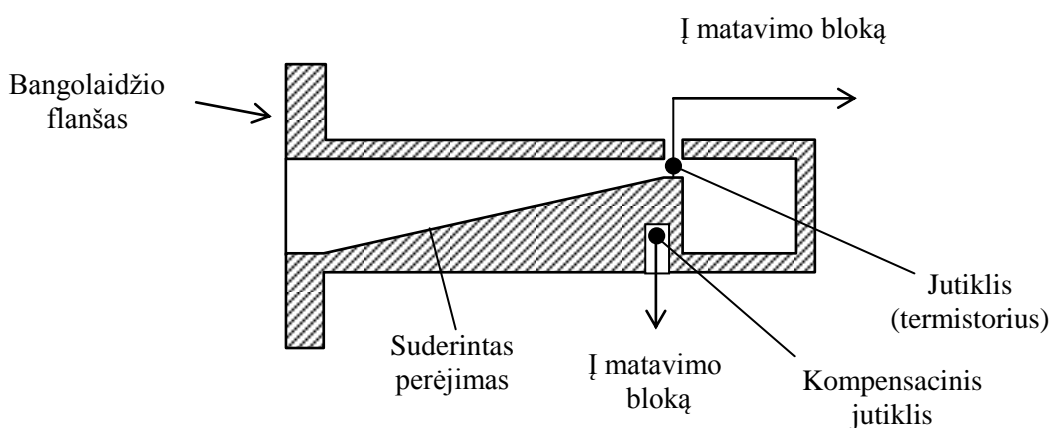
Kai $0 \leq B \leq 1$, matuoklis turi vieną arba keletą zonų, matuojančių lauko stiprio kvadratą zondo vietoje, arba kitaip sakant, turi baigtinį kryptingumą. Pavyzdžiui, matavimo linijos zondas su kvadratiniais detektoriais gali būti tokio praėjimo vatmetro variantas nors ir su didele išderinimo paklaida.

Keitiklio konstrukcija

Pirminio galios keitiklio konstrukcija turi užtikrinti tokius reikalavimus:

- 1) prijungimą prie generatoriaus (galios sugerties atveju) arba generatoriaus ir apkrovos (galios praėjimo atveju) bei matavimo bloko;
- 2) jutiklio suderinimą reikalingame dažnių intervale;
- 3) jutiklio apsaugą nuo išorinių veiksnių (mechaninių, šiluminių, elektromagnetinių).

Pirminis galios sugerties keitiklis paprastai yra sudarytas iš perdavimo linijos (bangolaidinės ar bendraašės) atkarpos, kurios viduje yra talpinamas mikrobangų galios jutiklis su mikrobangų sugertuku (8 pav.).



8 pav.

Jutiklis su jėgimo linija yra suderinamas panaudojant įvairius linijos derinimo elementus: varžų transformatorius, diafragmas, strypus ir kitokius linijos nevienalytiškumus. Už jutiklio, tam tikrame atstume, linija užtrumpinama. Prie jutiklio privedami laidai, kuriais perduodama informacija, o kartais ir paduodamas maitinimas, apie mikrobangų galią į matavimo bloką.

Termistoriaus atveju mikrobangų sugertuko funkciją atlieka pats termistoriaus elementas. Aplinkos temperatūros poveikiui minimizuoti, paprastai naudojamas identiškas kompensacinis elementas, kuris nėra veikiamas mikrobangų.

Mikrobangų jutiklių tipai

Mažų galių matavimui naudojami balometrai, termistoriai, detektoriniai diodai, termoporos.

Balometrai, arba termorezistoriai tai varžos, kurių dydis priklauso nuo temperatūros. Būna teigiamo varžos temperatūrinio koeficiento – bareteriai, ir neigiamo – termistoriai. Bendras abiejų pavadinimas – mikrobangų termorezistoriai. Jie dažniausiai būna cilindro arba rutuliuko formos, kurių dydis yra dalys milimetro (platininiai bareteriai gali būti 1 – 2 μm diametro vielytės). Kartais bareteriai daromi pritaikant plėvelinę technologiją ant specialių padėklų. Pagrindiniai balometrų parametrai: temperatūrinis varžos koeficientas

$$\alpha = \frac{1}{R} dR/dT [\text{deg}^{-1}]$$

ir jautrumas

$$S_p = dR/dP [\Omega/\text{mW}].$$

Taip pat svarbūs yra ir šiluminė laiko pastovioji, maksimali leistina galia bei šilumos atidavimo koeficientas. Akivaizdu, kad jautrumas tuo didesnis, kuo mažesnis šilumos atidavimo koeficientas ir didesnis temperatūrinis varžos koeficientas. Termorezistoriai naudojami mažų galių matavimui. Matavimų principas – termorezistorius pirmiausia pašildomas nuolatine srove iki tokios vertės, kuri tampa lygi perdavimo linijos banginei varžai ir tokiu būdu jis yra suderinamas su traktu. Dėl to jis sugeria praktiškai visą mikrobangų galią. Paveikus rezistorių mikrobangomis jis papildomai išyla ir pasikeičia jo varža, dėlto jis jungiamas į tiltinę schemą, kuri leidžia varžą vėl sukompensuoti. Balansavimą ir galios apskaičiavimą atlieka matavimo blokas.

Termoporos. Aukštadažnės termoporos gaminamos vakuminio garinimo būdu, užgarinant ant dielektrinio padėklo du skirtingus metalus (pvz., chromelį ir kopelį, arba bismutą ir švino telūridą) su bendra abiems metalams kontaktine sritimi. Paprastai padėklu būna cilindrinis maždaug 20 μm stiklo audinys. Termoporos varža nuolatinei srovei parenkama taip, kad ji būtų maždaug lygi trakto banginei varžai. Mikrobangos pašildo termoporos vieną iš kontaktų ir dėl šilumos gradiento atsiranda termo-*EVJ*. Termoporinio jutiklio jautrumas yra

$$S_p = d(EVJ)/dP [\text{V/mW}].$$

Toliau ši elektovaros jėga pastiprinama ir perskaičiuojama į galią matavimo bloke. Termoporų talpinimo trakte būdai yra analogiški termovaržų talpinimo būdams.

Kiti jutikliai. Tam tinka aukšto dažnio diodai, puslaidininkiniai varžiniai keitikliai, veikiantys krūvininkų kaitimo pagrindu, feromagnetinės plėvelės, puslaidininkiniai Holo keitikliai. Visi jie priskiriami elektroniniams keitikliams, kuriems yra būdingos mažos laiko pastoviosios, t.y. didelė greitaveika, ir jie tinka matuoti moduluoto signalo gaubtinei.

Vidutinių ir didelių galių matavimas. Galioms didesnėms už 10^{-2} W mažų matmenų jutikliai netinka, nes jų paviršius yra mažas, atiduodamos į aplinką šilumos kiekis mažas, ir dėl to jie įkaista iki maždaug 80–100 laipsnių jau prie maždaug 10–20 mW. Vidutinėms ir didelėms galioms matuoti naudojami kalorimetriniai keitikliai, kuriuose galią sugeria suderintos, didelių matmenų apkrovos varžos. Jutiklis šiuo atveju gali būti paprasčiausias varžinis termometras.

Ekvivalentiškumo principas

Ekvivalentiškumo principas pagrįstas prielaida, kad šiluminis jutiklis vienodai pakeičia mikrobangų ir nuolatinės srovės galią į šilumą. Keitiklio „ekvivalentiškumas“ pasireiškia tuo, kad jo jautrumas, arba transformacijos koeficientas, yra toks pat keičiant mikrobangų ir nuolatinės srovės galias į šilumą. Jei ši prielaida yra teisinga, tai galimas toks mikrobangų galios matavimo būdas:

- 1) pirmiausia į keitiklį paduodama tokia nuolatinės (arba žemo dažnio) srovės galia, kuri tenkina įjungtam į tiltinę schemą (žr. 1 pav.) jutikliui (pvz., termistoriui) tilto balanso sąlygą, t.y. galvanometro srovė lygi nuliui. Termistoriaus varža parenkama taip, kad subalansavus tiltą ji būtų lygi linijos banginei varžai.
- 2) Atlikus tilto balansavimą, į jutikli paduodama mikrobangų galia, kuri dar labiau pakaitina jutiklį ir išbalansuoja tiltą.
- 3) Sumažinama nuolatinės srovės galia ir vėl subalansuojamas tiltas.

Mikrobangų galia bus lygi nuolatinės galios sumažėjimui po tilto balanso atstatymo. Kadangi nuolatinės galios matavimas yra santykinai paprastas ir pakankamai tikslus, tai ekvivalentiškumo principo dėka ir pats mikrobangų galios P_{mkr} matavimas tampa pakankamai tiksliau, ypač jei balansavimo procesas ir ekvivalentinės galios P_{ekv} skaičiavimas atliekamas skaitmeniniame matavimo bloke.

Matavimo metodo paklaidos

Akivaizdu, kad išmatuota ekvivalentinė galia bus lygi mikrobangų galiai tik tuo atveju, jeigu keitiklio jautrumas nuolatinės srovei ir mikrobangoms yra toks pat. Dėl įvairių fizikinių priežasčių keitimo koeficientas priklauso nuo dažnio. Tokios priežastys gali būti skin-efektas, stovinčių bangų susidarymas matuojamajame trakte, keitimo koeficiento temperatūrinė ir dažninė priklausomybė ir t. t. Jeigu, pavyzdžiui, termistoriui, $\Delta R/P_{mkr} = K_{mkr}$, o $\Delta R/P_{DC} = K_{DC}$, tai mikrobangų ir nuolatinės srovės galios bus lygios, jeigu $K_{mkr} = K_{DC}$. Praktikoje, dėl aukščiau paminėtų priežasčių, šie koeficientai niekuomet nebūna lygūs. Santykis $K_e = K_{mkr}/K_{DC}$ priklauso nuo dažnio ir yra vadinamas efektyvumo koeficientu, o dydis $1 - K_e$ vadinamas ekvivalentiškumo paklaida.

Termistoriniai matavimo blokai

Termistoriniai vatmetrai turi visą eilę privalumų, dėl kurių jie yra gana plačiai naudojami: jie atsparūs išorės poveikiui, gana jautrūs ir veikia plačiame dažnių ruože. Termistorinių vatmetrų matavimo metodas yra pagrįstas tilto balansu. Paprasčiausias yra rezistorinis tiltas, kurio viename iš pečių yra jungiama termovarža (1 pav.). Termovarža R_T patalpinta keitiklyje ir sugeria mikrobangų energiją. Papildomai keitiklyje, apsaugotoje nuo mikrobangų poveikio vietoje, talpinama identiška termovarža aplinkos temperatūros kitimui kompensuoti. Tiltas varžų vertės R_1 , R_2 , R_3 parenkamos taip, kad esant nustatytai maitinimo šaltinio įtampai termovarža turėtų tam tikrą reikalingą trakto suderinimui varžą. Tiltas subalansuojamas keičiant maitinimo grandinės srovę.

Aplinkos temperatūros nepastovumams sukompensuoti naudojamas kitas tiltas, į kurio pečių jungiama kompensacinė termovarža.

Literatūra

1. Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements, Application Note 64 – 1B, Copyright © 2000 Agilent Technologies, Printed in USA 04/2000.
2. M3-10A sugeriamos galios termistorinis vatmetras. Aprašas ir vartojimo instrukcija.
3. M5-31 ir M5-32 termistorinės galvutės. Aprašas ir vartojimo instrukcija (2,3-rusų kalba).
4. EPM-P Series Peak and Average Power Meters. User-s Guide, Agilent Technologies.
5. Agilent 8480 Series Coaxial Power Sensors Operating and Service Manual, Agilent Technologies.