

8

MASURAREA PUTERII SI A ENERGIEI

Pentru regimul electrocinetic al circuitelor electrice si electronice sunt definite urmatoarele **puteri**:

– **în curent continuu**, în cazul general al unui receptor aflat în regim electrocinetic caracterizat de curentul constant I si având tensiunea la borne U , puterea absorbita este:

$$P = UI . \quad (8.1)$$

În caz particular, într-un rezistor de rezistenta R aflat în regim electrocinetic se disipa (conform legii transformarii energiei în conductoare) o putere:

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R} ; \quad (8.2)$$

– **în regim nestationar oarecare** daca un element de circuit (dipol sau cuadripol) are la bornele sale la momentul de timp t , tensiunea $u(t) = u$ si curentul $i(t) = i$, atunci produsul:

$$p = ui \quad (8.3)$$

se numeste *puterea instantanee* absorbita de receptor.

În cazul unui regim electrocinetic periodic, de perioada T , valoarea medie a puterii instantanee se noteaza cu P si se numeste *puterea activa* absorbita de element:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt , \quad (8.4)$$

unitatea de masura fiind wattul [W].

În general, puterea instantanee are o componenta continua (puterea activa P) si una variabila $p'(t)$:

$$p = ui = P + p'(t); \quad (8.5)$$

– **în regim sinusoidal monofazat**, daca $u(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + a_u)$ si $i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + a_i)$, cu $a_u - a_i = \varphi$ defazajul dintre u si i , puterea instantanee este:

$$p = ui = 2UI \sin(\omega t + a_u) \sin(\omega t + a_i),$$

sau:

$$p = UI \cos \varphi - UI \sin \varphi \sin(2\omega t + \alpha_u + \alpha_i) = P + p_{2\omega} \quad (8.6)$$

unde:

$$P = UI \cos \varphi = RI^2$$

se numeste *putere activa* [W] iar

$$p_{2\omega} = UI \cos(2\omega t + \alpha_u + \alpha_i)$$

se numeste *putere oscilanta sau fluctuanta* si se datoreaza câmpurilor electrice si magnetice produse de circuit.

În legatura cu aceste câmpuri electrice si magnetice se defineste puterea reactiva ca fiind valoarea maxima a puterii fluctuante:

$$Q = UI \sin \varphi = XI^2, \quad (8.7)$$

unde $X = L\omega - \frac{1}{C\omega}$, unitatea de masura fiind denumita var (prescurtare de la volt-amper-reactiv).

Produsul dintre valorile efective ale tensiunii si curentului se noteaza cu S si se numeste *putere aparenta*:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (8.8)$$

Unitatea de masura în S.I. este denumita voltamper (VA).

– **în regim nesinusoidal monofazat**, daca u si i sunt marimi de aceeasi frecventa, puterea activa este:

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \cos \varphi_i, \quad (8.9)$$

iar puterea reactiva este, prin definitie:

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \sin \varphi_i, \quad (8.10)$$

unde U_i si I_i sunt valorile efective ale armonicelor de ordinul i ale tensiunii respectiv curentului, iar φ_i defazajele dintre ele. Puterea aparenta este, în acest caz:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (8.11)$$

unde D este *puterea deformanta*.

– **în rețele trifazate** (de curent alternativ sinusoidal) puterile se definesc astfel:

a) puterea activa:

$$P = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3} = \sum_{k=1}^3 U_{fk} I_{fk} \cos \phi_k, \quad (8.12)$$

unde P_{fk} ($k = 1, 2, 3$) sunt puterile active pe fiecare faza. Dacă sistemele trifazate de tensiuni și curenți sunt simetrice, atunci:

$$P = 3U_f I_f \cos \phi = \sqrt{3} UI \cos \phi \text{ [W]}, \quad (8.13)$$

unde U_f și I_f sunt marimile de fază, iar U și I sunt cele de linie;

b) puterea reactivă:

$$Q = Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3}, \quad (8.14)$$

unde Q_{fk} ($k = 1, 2, 3$) sunt puterile reactive pe fiecare fază. Dacă sistemele trifazate de tensiuni și curenți sunt simetrice, atunci:

$$Q = 3U_f I_f \sin \phi = \sqrt{3} UI \sin \phi \text{ [var]}; \quad (8.15)$$

c) puterea aparentă:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

și în cazul sistemelor simetrice:

$$S = 3U_f I_f = \sqrt{3} UI \text{ [VA]}. \quad (8.16)$$

În cazul general, puterea aparentă complexă este:

$$\underline{S} = \underline{S}_{f1} + \underline{S}_{f2} + \underline{S}_{f3} = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3} + j(Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3}). \quad (8.17)$$

Energia în circuitele electrice se determină ca integrala în timp a puterilor. Astfel:

– în curent continuu, în intervalul de timp de la t_1 la t_2

$$W = P(t_2 - t_1) = UI(t_2 - t_1), \quad (8.18)$$

U și I având valori constante în timp;

– în curent alternativ sinusoidal, în intervalul de timp de la 0 la t energia activă este:

$$W_p = \int_0^t P dt \text{ [Ws]}, \text{ industrial [kWh]} \quad (8.19)$$

iar energia reactiva este:

$$W_Q = \int_0^t Q dt \text{ [vars], industrial [kvarh] ,} \quad (8.20)$$

unde P si Q pot fi monofazate sau trifazate.

Metodele de masurare a puterii si energiei se împart în mai multe categorii, în functie de frecventa si forma semnalului, de tipul sarcinii, de marimea puterii si de precizia urmarita. În continuare vom analiza pe rând aceste metode.

8.1. MASURAREA PUTERII ÎN CIRCUITELE DE CURENT CONTINUU

Se face, practic, prin una din metodele: masurarea indirecta (cu ampermetre si voltmetre) si masurarea directa (cu wattmetre).

8.1.1. Masurarea indirecta a puterii în curent continuu

Expresia puterii consumate într-o sarcina rezistiva R , sub curent continuu de intensitate I si având la borne tensiunea U , este:

$$P = UI = RI^2 = \frac{1}{R}U^2 = GU^2 . \quad (8.21)$$

Metoda voltampermetrica. Se bazeaza pe aceasta expresie si se foloseste atunci când rezistenta de sarcina R este necunoscuta. Metoda consta în utilizarea simultana a unui voltmetru si a unui ampermetru, conectate conform uneia din schemele prezentate în figura 8.1. Daca U si I sunt indicatiile voltmetrului si ampermetrului, atunci când rezistorul este alimentat de la o sursa cu tensiunea U_s la bornele montajului, puterea absorbita de receptor P_R , în ipoteza ca se cunosc rezistentele interne ale aparatelor R_V si R_A , este:

– în cazul montajului amonte la care $I_R = I$ si $U = U_R + R_A I$:

$$P_R = U_R I_R = (U - R_A I) I = UI - R_A I^2; \quad (8.22)$$

– în cazul montajului aval la care $U_R = U$ si $I_R = I - I_V$:

$$P_R = U_R I_R = U(I - I_V) = U \left(I - \frac{U}{R_V} \right) = UI - \frac{U^2}{R_V} . \quad (8.23)$$

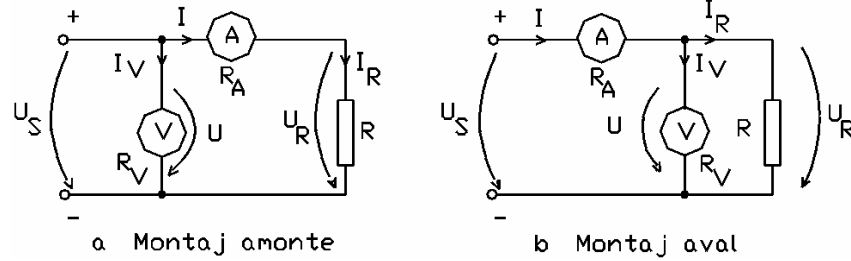


Fig. 8.1

Puterea consumata de receptorul R este egala cu produsul indicatiilor aparatelor de masurat, din care se scad puterile consumate de aparate ($P_A = R_A I^2$ – puterea consumata de ampermetru si $P_V = \frac{U^2}{R_V}$ – puterea consumata de voltmetru).

Erorile absolute de metoda sunt:

– pentru montajul amonte

$$\Delta P_{am} = R_A I^2, \quad (8.24)$$

– pentru montajul aval

$$\Delta P_{av} = \frac{U^2}{R_V}, \quad (8.25)$$

iar cele relative:

$$\epsilon_{am} = \frac{\Delta P_{am}}{R I^2} = \frac{R_A}{R} \quad (8.26)$$

si

$$\epsilon_{av} = \frac{\Delta P_{av}}{\frac{U^2}{R}} = \frac{R}{R_V}. \quad (8.27)$$

Se poate trage de aici concluzia ca – daca nu se pot face corectiile $C_{am} = -R_A I^2$ si $C_{av} = -U^2 / R_V$ – montajul amonte se recomanda când $R \gg R_A$, iar montajul aval când $R \ll R_V$.

Metoda unui singur aparat. În cazul în care rezistenta R are o valoare constanta si cunoscuta, se masoara fie tensiunea U , fie curentul I , cu ajutorul unui instrument de curent continuu. Cunoscând rezistenta R si măsurând tensiunea U (sau curentul I) se calculeaza puterea:

$$P_R = \frac{U^2}{R} \quad \text{sau} \quad P_R = R I^2. \quad (8.28)$$

8.1.2. Masurarea directa a puterii prin metoda wattmetrului

S-au construit aparate care masoara direct produsul UI . Aceste aparate se numesc *wattmetre* si ele pot fi *analogice* – cu ac indicator (asa-numitele wattmetre electrodinamice) sau *numerice* (wattmetre electronice cu afisaj digital).

Electrodinamometrul. Asa cum rezulta din figura 8.2 electrodinamometrul (aparatur electrodinamic) este format dintr-o bobina fixa (1-1' cu bornele b_1-b_1'), la wattmetre numita si *bobina de curent* (cu bornele zise de curent), constituita din doua jumatati identice, cu un numar N_1 spire, strabatuta de curentul i_1 , si dintr-o bobina mobila (2-2', cu bornele prinse la arcurile spirale 4-4' ce produc cuplul rezistent) la wattmetre numita *bobina de tensiune* (cu bornele $b_2 - b_2'$ zise de tensiune), cu N_2 spire si parcursa de curentul i_2 . Bobina mobila se roteste odata cu axul 3 si acul indicator 6 si formeaza impreuna echipajul mobil al aparatului. De axul aparatului se mai fixeaza dispozitivul de amortizare a oscilatiilor 5, resorturile spirale plane 4 si 4' cu ajutorul carora se realizeaza cuplul rezistent, ele servind totodata si la conectarea bobinei mobile 2 cu bornele fixe b_2 si b_2' .

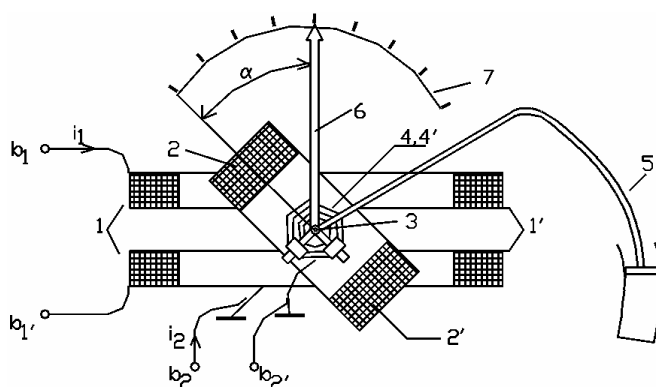


Fig. 8.2

Când cele doua bobine sunt în regim electrocinetic, caracterizat de curentii i_1 si i_2 , se produc între ele forte electrodinamice care vor da nastere unui cuplu activ sau motor ce poate fi exprimat prin relatia:

$$M_a = k i_1 i_2,$$

în care k este o constanta ce depinde de forma si dimensiunile bobinelor, de numerele de spire N_1 si N_2 etc. Prin constructie se asigura o variatie liniara a inductivitatii mutuale fata de deviatia a , deci un $k = \text{constant}$. Cuplul rezistent mecanic M_r , dat de arcurile spirale 4 si 4', este proportional cu deviatia a , astfel ca la echilibru $M_a = M_r$ si se obtine:

$$k_r a = k i_1 i_2,$$

de unde deviatia a are expresia:

$$a = k(a)i_1 i_2 . \quad (8.29)$$

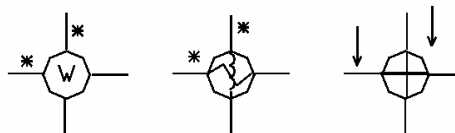


Fig. 8.3

Daca printr-un sunt se cupleaza bobina fixa în circuitul unui rezistor de sarcina parcurs de curentul I , obținându-se $i_1 = k_1 I$ si la bornele unui ansamblu format dintr-o rezistenta aditionala conectata în serie cu bobina mobila se aplica tensiunea U de la bornele sarcinii obținându-se $i_2 = k_2 U$, atunci electrodinamometrul este un wattmetru, deviatia lui fiind:

$$a = k(a)k_1 k_2 UI = kUI = kP. \quad (8.30)$$

Aparatele electrodinamice se reprezinta pe scheme prin unul din simbolurile prezentate în figura 8.3, bornele polarizate aratând sensul de bobinare identic al bobinelor fixa si mobila.

Metoda wattmetrului. Consta în masurarea directa a puterii consumate de un element de circuit (dipol sau cuadripol) receptor, cu ajutorul unui aparat electrodinamic care – pentru aceasta utilizare – are bobina fixa (de curent) realizata cu un numar mic de spire din fir conductor gros (fiind parcursa de curentul receptorului $i_1 = I$) si bobina mobila (de tensiune) realizata cu un numar mare de spire din fir conductor foarte subtire care printr-o rezistenta aditionala R_a este conectata direct la bornele receptorului de rezistenta R (fig. 8.4,a.).

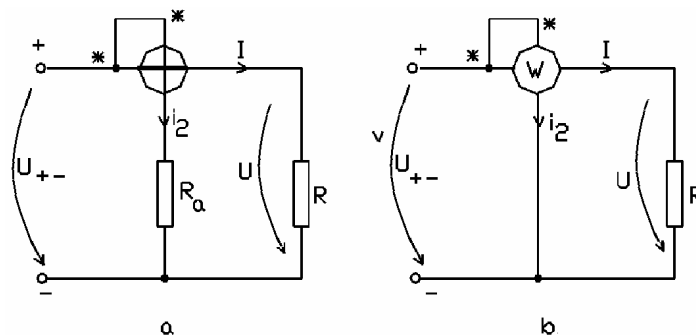


Fig. 8.4

De obicei, rezistenta aditionala R_a este a unui rezistor înglobat (introdus) în cutia wattmetrului, asa ca schema de conectare a aparatului devine, în acest caz, cea prezentata în figura 8.4,b. În aceasta situatie, curentul i_2 din bobina mobila este:

$$i_2 = \frac{U_{+-}}{r_v + R_a} = \frac{U + r_A I}{r_v + R_a},$$

unde r_v este rezistenta proprie a bobinei de tensiune, r_A – rezistenta proprie a bobinei de curent si U_{+-} tensiunea în amonte de wattmetru. Relatia de mai sus este

valabila daca bornele de tensiune si curent marcate (cu *, ↓, V1, A1 etc.) sunt legate împreuna; în acest caz se comite o eroare sistematica absoluta $r_A I$ pe ramura de tensiune, a carei bobina este legata la tensiunea din amonte: $U_{+ -} = r_A I + U$. Daca borna marcata de tensiune se leaga la borna nemarcata de curent atunci:

$$i_2 = \frac{U}{r_V + R_a} = k_2 U, \quad (8.31)$$

în schimb:

$$i_1 = I + i_2 = I + \frac{U}{r_V + R_a}, \quad (8.32)$$

rezultând o alta eroare de metoda, de data aceasta pe ramura de curent (în valoare absoluta $\frac{U}{r_V + R_a}$).

Erorile $r_A I$ si $U/(r_V + R_a)$ sunt foarte mici deoarece r_A este extrem de mica, iar r_V si R_a sunt extrem de mari.

Erorile relative de metoda, în cazul celor doua modalitati de conectare a bobinei de tensiune în raport cu bobina de curent (amonte sau aval) sunt:

– în montaj amonte:

$$\varepsilon_{am} = \frac{P - P_{m,am}}{P} = \frac{UI - (U + r_A I)I}{UI} = \frac{r_A I}{U} = \frac{r_A I^2}{P}; \quad (8.33)$$

– în montajul aval:

$$\varepsilon_{av} = \frac{P - P_{m,av}}{P} = \frac{UI - U(I + i_2)}{UI} = \frac{i_2}{I} = \frac{U}{(r_V + R_a)I} = \frac{U^2}{r_V + R_a} \cdot \frac{1}{P}, \quad (8.34)$$

erori extrem de mici, care fac ca – indiferent de montaj – wattmetrul electro-dinamic sa poata avea o clasa de precizie chiar de 0,2.

Practic, fabricantul indica (prin marcare) bornele de curent si de tensiune ce trebuie legate împreuna pentru ca wattmetrul sa masoare puterea în limita clasei de precizie înscrisa pe aparat. De aceea, la montarea wattmetrului marcajul bornelor trebuie respectat strict, cu precizarile:

– bornele de curent si tensiune marcate trebuie legate împreuna (altminteri eroarea de masurare iese din clasa de precizie);

– bornele marcate se leaga la conductorul care vine de la borna " + " a sursei de alimentare si borna de tensiune nemarcata la borna " - " a sursei (altminteri, acul wattmetrului "bate" invers).

Wattmetru de curent continuu numeric. La actualul nivel la care a ajuns tehnologia electronica, cel mai ieftin wattmetru, cu masa si dimensiuni mici, rezistent la socuri, usor de manipulat si în acelasi timp foarte precis este cel numeric.

În principiu, wattmetrul de c.c. numeric este format dintr-un multiplicator analogic (realizat cu un amplificator operational având elemente de reacție ne-liniare, mai precis diode, v. cap. 2) și un voltmetru numeric de c.c. (de obicei având tipul de conversie tensiune – frecvență sau tensiune – timp, v. cap. 7).

Multiplicatorului i se aplica, la cele două intrări, semnale proportionale (fig. 8.5): unul cu tensiunea U de la bornele elementului receptor și altul cu I – curentul prin receptor. La ieșirea lui, multiplicatorul furnizează o tensiune proporțională cu produsul semnalelor de intrare (deci cu $UI = P$), adică o tensiune continuă care este o măsură a puterii $P = UI$. Printr-o conversie de tip tensiune-timp sau tensiune-frecvență, rezulta pe ecranul de afișaj numeric valoarea (etalonată în wati) a puterii.

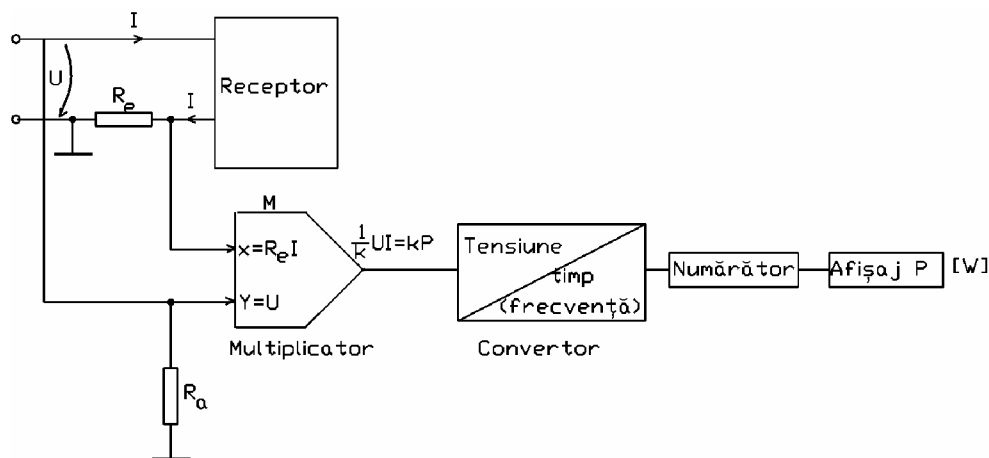


Fig. 8.5

8.2. MASURAREA PUTERII ÎN CIRCUITELE DE CURENT ALTERNATIV

Există numeroase metode de măsurare a puterilor care depind – în principal – de frecvență, de forma de undă a tensiunilor sau/si a curenților, de felul circuitului, de puterea receptorului, de precizia dorită în măsurare etc.

În continuare, vor fi prezentate numai metodele mai des utilizate.

8.2.1. La frecvențe industriale

În curent alternativ se pune problema măsurării puterii active; în instalațiile electroenergetice industriale interesează și măsurarea puterii reactive.

Metodele de măsurare depind mult de domeniul frecvenței marimilor electrice de circuit (tensiune u și curent i). În ceea ce privește măsurarea puterii active și

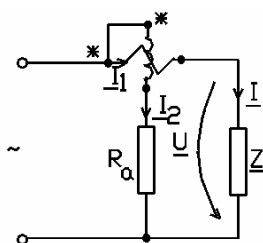


Fig. 8.6

reactive în rețelele de 50 Hz, ea se face aproape exclusiv prin metode directe (cu wattmetre și varmetre).

Metoda wattmetrului electrodinamic. Aceasta metoda are la baza aparatul electrodinamic care se montează în funcție de felul sursei (rețelei) de curent alternativ.

În **curent alternativ monofazat** se folosește un singur wattmetru electrodinamic montat cu bobina de curent în serie cu sarcina de impedanță complexă $\underline{Z}$ și cu bobina de tensiune în paralel (fig. 8.6). Momentul mediu al cuplului de forțe la care va fi supusă bobina mobilă este:

$$M = M_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T k i_1(t) i_2(t) dt = \frac{k}{T} \int_0^T \sqrt{2} I_1 \sin \omega t \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t - \varphi) dt =$$

$$= \frac{k}{T} \int_0^T [I_1 I_2 \cos \varphi - I_1 I_2 \sin \varphi \cos(2\omega t - 2\varphi)] dt .$$

Deci:

$$M = k I_1 I_2 \cos \varphi , \quad (8.35)$$

unde I_1 și I_2 sunt valorile efective ale curenților prin cele două bobine, iar φ – defazajul dintre acești curenți. Dacă $I_1 = I$, curentul prin sarcină, iar $I_2 = U/Z_a$, unde Z_a este valoarea impedanței totale a circuitului de tensiune, atunci –

considerându-se că bobinele nu produc defazaje suplimentare – defazajul φ este chiar defazajul dintre tensiunea la bornele sarcinii $\underline{Z}$ și curentul prin sarcină. Din condiția de echilibru dinamic $M_r = M$, rezultă $K_r a = K U I \cos \varphi$ și indicația a a wattmetrului electrodinamic este proporțională cu puterea activă:

$$a = K_p U I \cos \varphi = K_p P . \quad (8.36)$$

Wattmetrele electrodinamice pot măsura puteri active începând cu valori de ordinul watilor până la valori de ordinul kilowatilor. În circuitele de curenți mari ($I > 50A$) și tensiuni ridicate ($U > 500V$), wattmetrele se conectează în circuit prin intermediul transformatoarelor de curent (TI), respectiv de tensiune (TU), care “reduc” curentul la 5 A (fig. 8.7) și tensiunea la 100 V (fig. 8.8). Clasa de precizie a wattmetrelor electrodinamice este cuprinsă între 0,5 și 2,5.

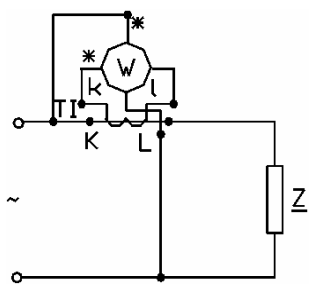


Fig. 8.7

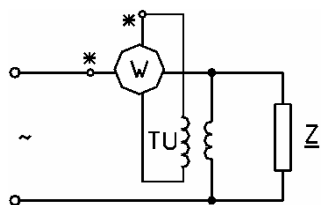


Fig. 8.8

Pentru masurarea corecta a puterii este important ca bornele “polarizate” sa fie conectate în acelasi punct. În caz contrar, deviatia α are sens invers si acul aparatului “bate în stânga” deoarece unghiul de defazaj devine egal cu $(180^\circ - \varphi)$ si:

$$\alpha = K_p UI \cos(180^\circ - \varphi) = -K_p UI \cos \varphi = -K_p \cdot P. \quad (8.37)$$

În **curent alternativ trifazat** puterea activa este definita prin relatia (8.12). În functie de tipul retelei de alimentare si de tipul receptorului caruia i se masoara puterea absorbita, exista mai multe scheme de montare a wattmetrelor:

Metoda celor trei wattmetre. Relatia (8.12) sugereaza posibilitatea masurarii puterii cu ajutorul a trei wattmetre (W_1, W_2, W_3) conectate câte unul pe fiecare faza. În cazul unui receptor trifazat conectat în stea cu fir neutru (fig. 8.9), bobinele de curent ale celor trei wattmetre sunt înseriate pe cele trei conductoare 1, 2 si 3 ale liniei de alimentare, iar bobinele de tensiune sunt conectate între cele trei linii de alimentare 1, 2, 3 si conductorul neutru. Fiecare wattmetru va indica astfel puterea consumata pe faza sa (P_{f1}, P_{f2}, P_{f3}), astfel ca puterea activa consumata de receptorul trifazat se va calcula prin însumarea celor trei indicatii:

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (8.38)$$

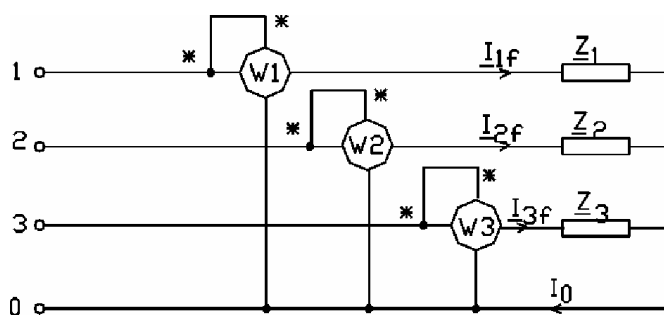


Fig. 8.9

Daca receptorul este conectat în stea fara neutru accesibil sau este conectat în triunghi (fig. 8.10) se creeaza un nul, zis *artificial*, cu ajutorul a trei rezistoare aditionale identice (cu aceeasi rezistenta R_0) înseriate cu bobinele de tensiune ale celor trei wattmetre. Puterea consumata de receptorul trifazat va fi calculata tot prin însumarea indicatiilor celor trei wattmetre.

Metoda celor trei wattmetre este aplicabila tuturor tipurilor de sisteme trifazate (simetrice sau nesimetrice) si tuturor tipurilor de receptoare (echilibrate sau nu).

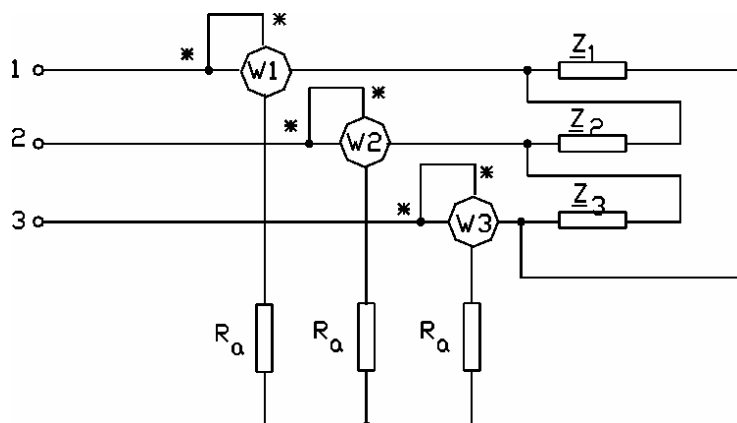


Fig. 8.10

Metoda celor doua wattmetre. Este aplicabila la receptoare conectate în stea fara fir neutru si la receptoare conectate în triunghi. Consideram un receptor conectat în stea fara neutru accesibil (fig. 8.11). Puterea instantanee absorbita de acesta are expresia :

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = u_{1f} \cdot i_1 + u_{2f} \cdot i_2 + u_{3f} \cdot i_3. \quad (8.39)$$

Cum în punctul neutru, conform teoremei întâi a lui Kirchhoff, suma curenților este nula ($i_1 + i_2 + i_3 = 0$), putem face înlocuirea:

$$i_3 = -i_1 - i_2$$

și se obține:

$$p = (u_{1f} - u_{3f})i_1 + (u_{2f} - u_{3f})i_2 = u_{13}i_1 + u_{23}i_2, \quad (8.40)$$

iar în valori efective :

$$P = P_{13} + P_{23} = U_{13}I_1 \cos(U_{13}I_1) + U_{23}I_2 \cos(U_{23}I_2). \quad (8.41)$$

La același rezultat se ajungea și în cazul receptorului conectat în triunghi, la care, aplicând teorema a II-a a lui Kirchhoff, suma tensiunilor de fază pentru un ochi de rețea este nula.

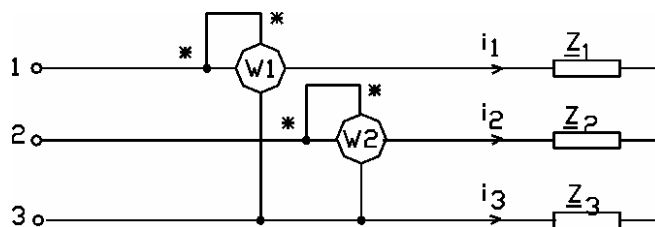


Fig. 8.11

Din relatia (8.41) se poate deduce ca în cazul receptoarelor în stea fara neutru accesibil si al receptoarelor conectate în triunghi, pentru masurarea puterii absorbite sunt necesare doua wattmetre având bobinele de curent înseriate pe doua din liniile de alimentare (în figura 8.11 pe liniile 1 si 2), iar bobinele de tensiune conectate între liniile în care au fost introduse bobinele de curent si cea de a treia linie (în figura 8.11 între 1 si 3 primul wattmetru si 2 si 3 al doilea wattmetru).

În practica, în loc de doua wattmetre se utilizeaza un singur aparat electro-dinamic de constructie speciala, continând doua electrodinamometre montate pe acelasi ax, conectate în circuit ca în figura 8.11, deviatia α fiind proportionala cu suma celor doua puteri.

Metoda este utilizabila pentru orice retea trifazata cu trei conductoare.

Metoda cu un singur wattmetru. Este utilizabila numai în cazul sistemelor de tensiuni simetrice si al receptoarelor echilibrate la care $P_{f1} = P_{f2} = P_{f3}$ si în consecinta:

$$P = 3U_f I_f \cos \varphi = 3P_f . \quad (8.42)$$

Se poate masura cu un wattmetru monofazat puterea absorbita de o faza, iar puterea trifazata se calculeaza conform relatiei (8.42). Modul de conectare în circuit a wattmetrului pentru un receptor echilibrat în stea cu neutru accesibil este prezentat în figura 8.12, iar pentru un receptor în stea fara fir neutru sau în triunghi este prezentat în figura 8.13.

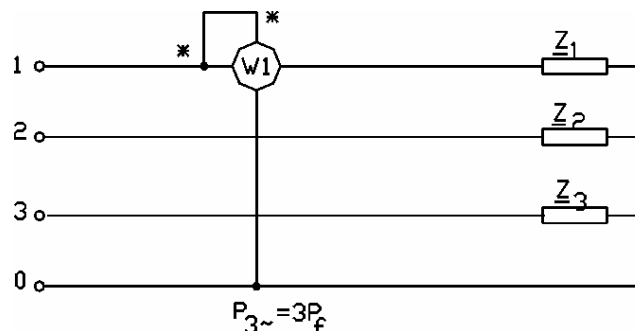


Fig. 8.12

În cazul conexiunilor cu trei conductoare (fig. 8.13) este necesara crearea unui nul artificial pentru masurarea tensiunii pe faza. Rezistentele aditionale R de pe fazele 2 si 3 au o valoare egala cu suma dintre rezistenta bobinei de tensiune a wattmetru-lui si a rezistentei aditionale R_a .

Metoda de masurare a puterii trifazate cu un singur wattmetru nu se recomanda în cazul microreceptoarelor deoarece introduce nesimetrii datorita conectarii pe o singura faza.

Scala wattmetrelor monofazate sau a celor cu mai multe bobine montate pe echipamentul mobil, care sunt conectate permanent în circuitele trifazate echilibrate, este gradata direct în valorile puterii trifazate $P_{3\sim}$.

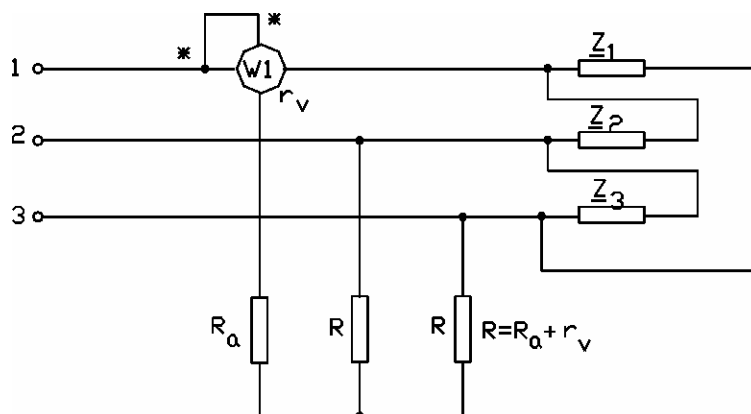


Fig. 8.13

Masurarea puterii cu wattmetrul electronic numeric. Elementul de baza al unui wattmetru electronic numeric este multiplicatorul care poate fi analogic sau numeric (v. cap. 2).

Un **wattmetru electronic cu multiplicare analogica**, având schema de principiu prezentată în figura 8.14, este format din: un multiplicator (M), un filtru trece jos FTJ (de tip RC), un detector de vârf DV (pentru măsurarea puterii reactive ca maximum al puterii instantanee fluctuante ce iese din multiplicator), un convertor tensiune-timp sau tensiune-frecvență CTF , un numărator și un sistem de afișare numerică (ecran cu cristale lichide sau diode electroluminescente) etalonat în wati (mW sau kW).

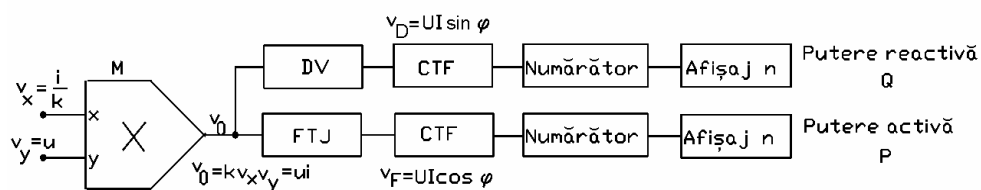


Fig. 8.14

O schema a unui wattmetru electronic monofazat este prezentată spre exemplificare în figura 8.15. Tensiunea u_1 la prima bornă a multiplicatorului analogic este obținută de la divizorul de tensiune R_4, R_5 :

$$u_1 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot u = k_1 \cdot u. \quad (8.43)$$

Tensiunea la bornele suntului este :

$$u_s = -R_1 \cdot i, \quad (8.44)$$

iar tensiunea u_2 la a doua borna de intrare a multiplicatorului analogic este :

$$u_2 = -\frac{R_3}{R_2} u_s = \frac{R_1 R_3}{R_2} i = k_A i. \quad (8.45)$$

La borna x de iesire din multiplicator obtinem o tensiune variabila (sinusoidală, cu frecvența $2f$, unde f este frecvența sursei sau rețelei de alimentare) care reprezintă (la scara k_p) puterea instantanee:

$$p = u \cdot i = P - Q \cos(2\omega t - 2\phi), \quad (8.46)$$

ce are, deci, o componenta continuă – puterea activă $P = UI \cos \phi$ și una fluctuantă (cu frecvența $2f$) a cărei amplitudine este puterea reactivă $Q = U \cdot I \sin \phi$.

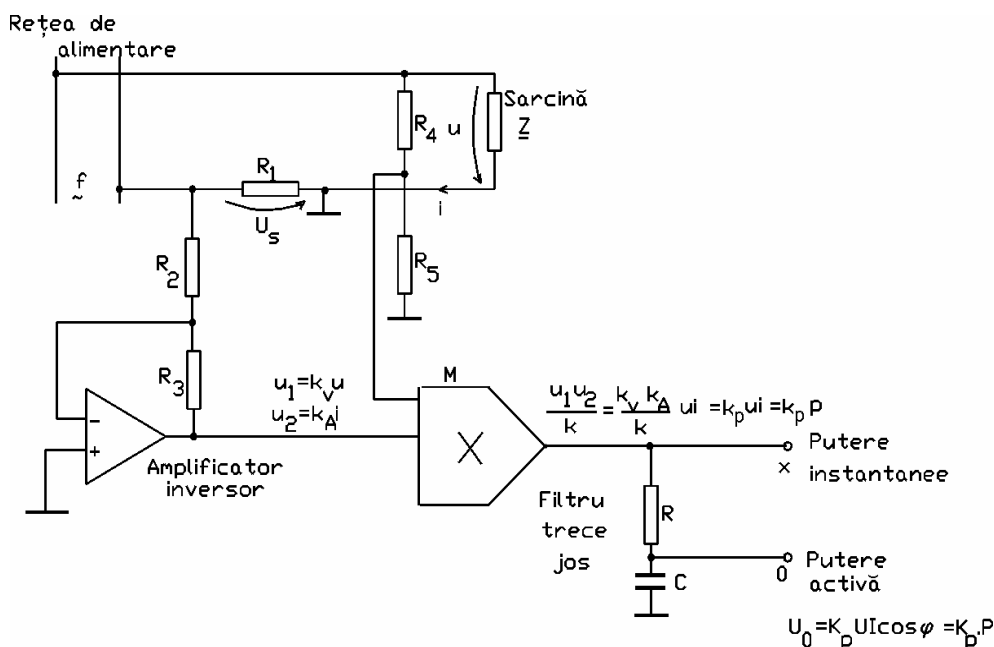


Fig. 8.15

La borna 0 a filtrului trece jos $\Gamma(R, C)$ se obține o tensiune continuă U_0 ce reprezintă (la scara k_p) puterea activă. Aceasta tensiune aplicată lantului de prelucrare format din convertor tensiune-frecvență, numărător, afișaj numeric (v. fig. 8.14), va produce afișarea puterii active P consumată de sarcina Z .

Tensiunea de la borna x , variabilă în timp, dacă se aplică unui lant de prelucrare format din detector de vârf și apoi un convertor tensiune-frecvență, numărător și dispozitiv de afișare numerică va avea ca urmare afișarea numerică a puterii reactive Q consumată de sarcina Z (se obține un varmetru electronic numeric). Folosind un comutator manual de la x sau 0 la convertor

si modificând corespunzator unitatea de masura a afisajului (constantei de citire) putem sa determinam puterea activa P sau cea reactiva Q , dupa cum dorim .

În figura 8.15 a fost prezentat un wattmetru numeric la care adaptarea între multiplicator si circuitul la care se cere masurarea puterii se face prin intermediul unui divizor de tensiune si a unui sunt. Sunt situatii în care adaptarea se face prin intermediul transformatoarelor de masurat de tensiune si de curent (fig. 8.16). Transformatorul de curent TC are raportul de transformare k_i ($i = k_i \cdot i'$) si la bornele rezistentei R_1 se produce caderea de tensiune $u_2 = \frac{R_1}{k_i} i$. Transformatorul de masura de tensiune TU are raportul de transformare k_u ($u = k_u \cdot u'$).

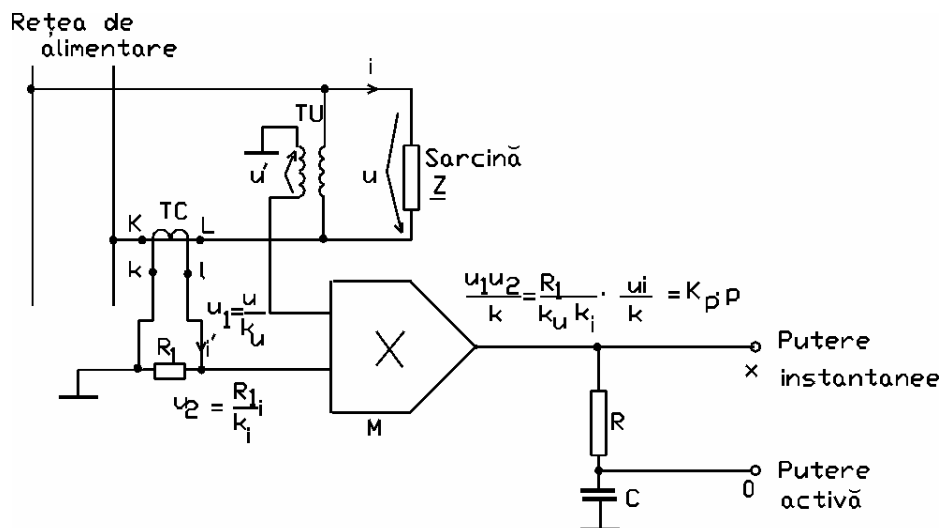


Fig. 8.16

Wattmetrele electronice cu multiplicare analogica folosesc de cele mai multe ori multiplicatorul cu modulatie în amplitudine si durata. Erorile acestui multiplicator, cu unele rafinamente ale circuitelor electronice pe care le cuprinde, pot fi reduse la 0,02-0,03%, în asa fel încât wattmetrul are o eroare globala de 0,05% sau 0,1%.

Wattmetrele electronice cu multiplicare numerica masoara valorile instantanee ale curentului si ale tensiunii într-o perioada, le supun unor conversii analog-numerice rapide, le multiplica digital si mediaza valorile produselor astfel obtinute. Operatia poate fi reprezentata prin relatia:

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u \left(\frac{kT}{n} \right) \cdot i \left(\frac{kT}{n} \right) \quad (8.47)$$

în care k este numarul de ordine al esantionului de curent si de tensiune, în cursul unei perioade.

Se poate arata ca, în cazul curentului si tensiunii sinusoidale, este suficient ca $n \geq 3$ pentru a obtine o precizie ridicata. În cazul în care curentul si/sau tensiunea sunt nesinusoidale, este necesar ca $n \geq 2m + 1$, unde m este ordinul maxim al armonice încă semnificative în semnalele de intrare. În practica n se ia relativ mare, în comparatie cu valoarea care rezulta teoretic. Spre exemplu pentru un aparat de precizie care masoara puterea într-o retea de 50 Hz se adopta $n = 200$.

Schema unui wattmetru electronic trifazat numeric, realizata pe baza metodei celor trei wattmetre, valabila pentru orice retea trifazata (simetrica sau nu) este reprezentata în figura 8.17.

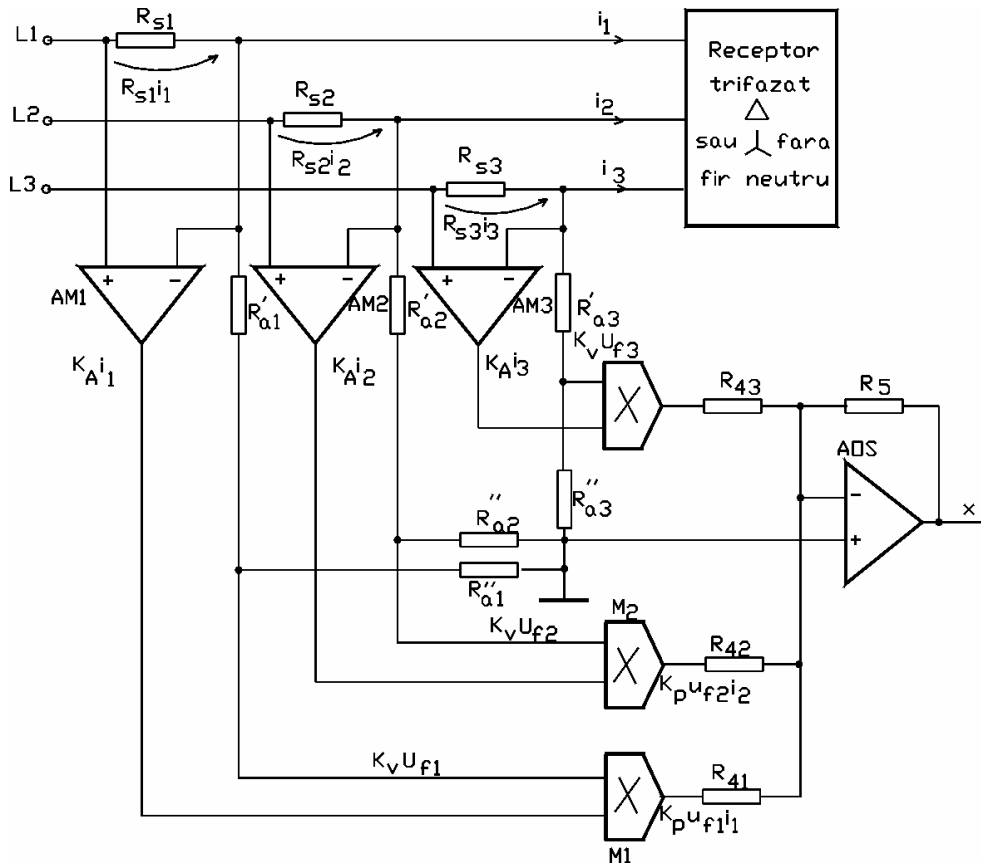


Fig. 8.17

În schema, R_{s1} , R_{s2} si R_{s3} sunt surse pentru prelevarea unei tensiuni proportionale cu curentii de linie i_k , $k = 1, 2, 3$ ce are valoarea $u_{ik} = R_{sk}i_k$; $R_{a1}' - R_{a2}''$, $R_{a2}' - R_{a3}''$, $R_{a3}' - R_{a1}''$ sunt rezistente aditionale ce formeaza divizoare de tensiune pentru prelevarea unei tensiuni u_{fk} , proportionala cu tensiunea pe faza u_k , astfel ca :

$$u_{fk} = u_k \cdot \frac{R_{ak}''}{R_{ak}' + R_{ak}''}, \quad k = 1, 2, 3. \quad (8.48)$$

În plus, rezistoarele R_{a1} , R_{a2} și R_{a3} formează împreună noul artificial cerut de metoda celor trei wattmetre, iar R_{41} , R_{42} și R_{43} sunt rezistențele de intrare în sumatorul operational AOS cu reacția R_5 , la ieșirea căruia se obține suma puterilor instantanee pe cele trei faze :

$$K_p R_5 \sum_{k=1}^3 \frac{u_{fk} i_k}{R_{4k}}.$$

De aici se poate prelua, printr-un filtru RC , componenta continuă a puterii instantanee trifazate (deci puterea activă trifazată) și – printr-un detector de vârf – puterea reactivă (obținându-se un varmetru trifazat). Apoi, prin conversie tensiune timp sau frecvență, numărator și ecran de afișaj se prezintă numeric valorile lui P_3 sau Q_3 .

Masurarea electronică a factorului de putere instantaneu definit ca fiind:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI},$$

se poate face folosind schemele din figurile 8.14 și 8.18 (care sunt utilizabile și în regim nesinusoidal), completate cu un divizor, așa cum reiese din schema prezentată în figura 8.19.

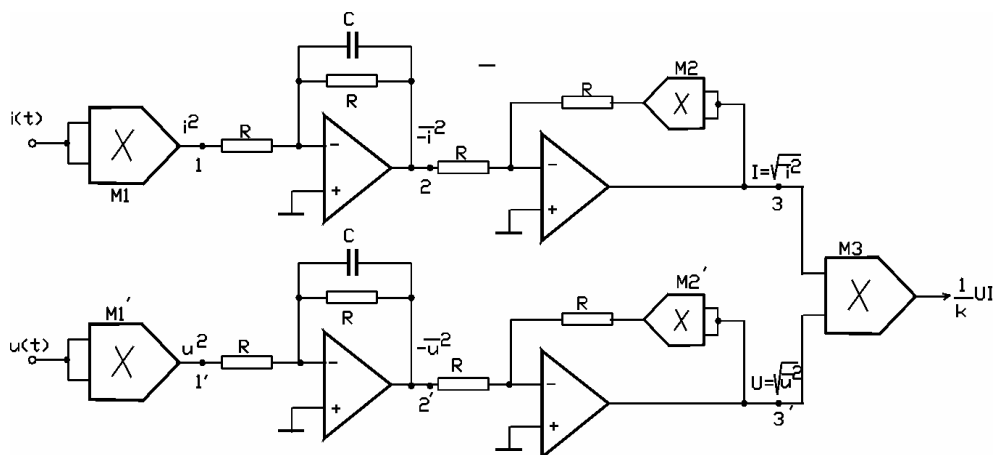


Fig. 8.18

Schema din figura 8.14 determină puterea activă P , iar cea din figura 8.18 determină produsul UI (dintre valorile eficace ale tensiunii și curentului), care se definesc prin:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad \text{și} \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}. \quad (8.49)$$

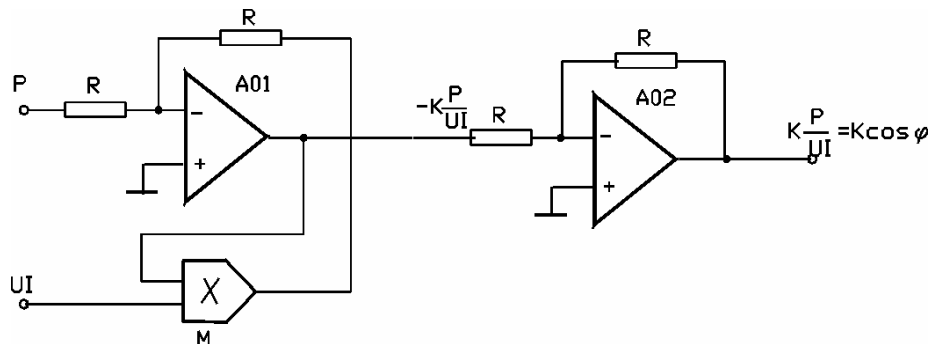


Fig. 8.19

Folosind un sistem de multiplicatoare analogice, la conectarea carora s-a ținut cont de relațiile (8.49), s-a obținut schema de principiu din figura 8.18, care la ieșire da un semnal proporțional cu produsul dintre valorile efective ale tensiunii și curentului.

În punctele 1 și 1' se obțin patratele valorilor instantanee a curentului, respectiv tensiunii, în punctele 2 și 2' rezulta valorile medii patratice ale acelorasi marimi dar cu semn schimbat, iar în 3 și 3' valorile efective ale tensiunii și curentului. La ieșire se va obține o tensiune proporțională cu produsul UI , ale valorilor efective de tensiune și curent.

8.2.2. Masurarea puterii în audio și radiofrecvență

Masurarea puterii (active) în circuitele de audio și radiofrecvență se face prin diverse metode, în funcție de scopul (locul) măsurării, domeniul de frecvență și de mărimea puterii. Dintre acestea prezentăm numai pe cele mai utilizate.

Wattmetrul de ieșire. Se numește în acest fel deoarece aparatul măsoară puterea pe care o furnizează la ieșire sau un circuit electronic oarecare, denumit (la modul generic) *sursa* (un amplificator, un generator de semnale, un autooscilator, un emitor radio etc.).

Wattmetrul de ieșire se bazează pe măsurarea tensiunii la bornele unei rezistențe fixe, care constituie sarcina pentru sursa a cărei putere se măsoară (fig. 8.20). Puterea absorbită de sarcină este:

$$P = \frac{U^2}{R_s}, \quad (8.50)$$

unde U este valoarea efectivă a tensiunii de la bornele de ieșire a sursei, iar R_s rezistența de sarcină a wattmetrului. Rezistența R_s fiind constantă, scala voltmetrului V cu care se fac măsurările poate fi etalonată direct în wați, fiind o scala patrată.

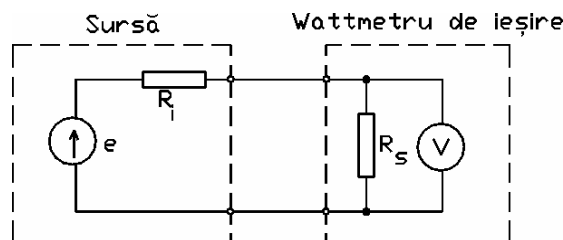


Fig. 8.20

Simplitatea constructivă a acestui aparat este estompată de următoarele dezavantaje:

– având o singură impedanță de intrare, fixă, nu poate fi utilizat pentru orice sarcină;

– având o singură sensibilitate, nu poate măsura puteri de diferite nivele.

Pentru înlăturarea acestor dezavantaje, în practică se utilizează mai multe metode. Una dintre ele variază sensibilitatea wattmetrului prin introducerea între sursă și ansamblul rezistență-voltmetru a unui atenuator în trepte (fig. 8.21). El este conceput în așa fel încât impedanța de intrare să rămână mereu constantă.

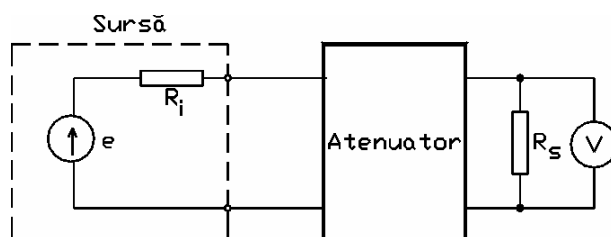


Fig. 8.21

O metodă de măsurare a puterii pe principiul rezistenței de intrare constantă este și cea din figura 8.22. Rezistențele R_s și R_d pot fi variate astfel încât rezistența de intrare să rămână constantă, menținându-se aceeași valoare pentru curentul maxim din aparat. Puterea de ieșire a sursei se calculează astfel:

$$P = R_i I^2,$$

$$\text{unde } R_i = \text{const.} = K_r \text{ și } I = \frac{R_s + R_d}{R_d} \cdot I_A = K_a \frac{R_s + R_d}{R_d} \text{ cu } I_A = \text{const.} = K_a.$$

$$\text{Deoarece, } I_A R_s = I \frac{R_s R_d}{R_s + R_d} \text{ atunci:}$$

$$P = R_i I^2 = K_r \cdot K_a^2 \left(\frac{R_s + R_d}{R_d} \right)^2 = K \frac{(R_s + R_d)^2}{R_d^2}, \quad (8.51)$$

valorile R_s și R_d fiind citite pe placuta indicatoare a comutatoarelor K_d și K_s .

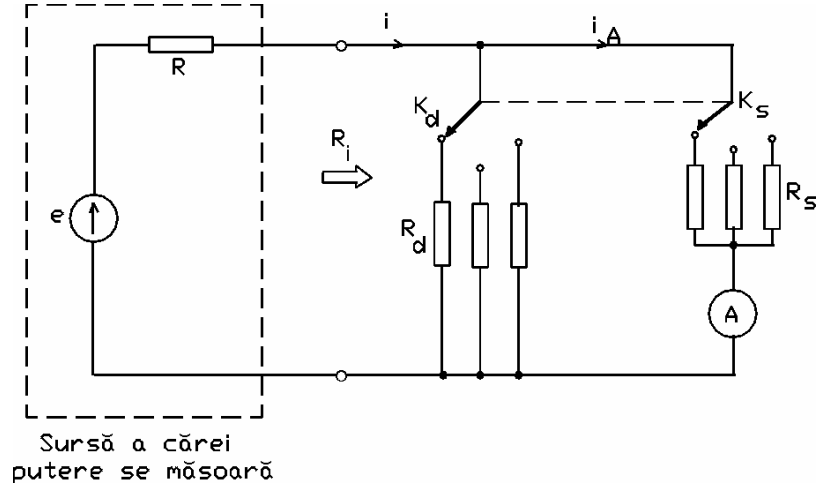


Fig. 8.22

Astfel de aparate pot fi utilizate la frecvențe de până la 10^6 Hz, iar cu precauții speciale până la 10^9 Hz, însă cu precizie relativ slabă, de 5%.

Pentru a se obține diferite impedanțe de intrare pot fi folosite transformatoare cu mai multe prize în secundar (pentru adaptarea impedanțelor) sau cuadripoli de adaptare rezistivi, în Γ sau Π .

În cazul utilizării transformatorului, conform figurii 8.23, dacă considerăm cazul ideal al transformatorului fără pierderi, ($U_1 I_1 = U_2 I_2$) și dacă notăm cu Z_1 impedanța de intrare ($Z_1 = U_1 / I_1$), cu Z_2 impedanța de sarcină ($Z_2 = U_2 / I_2$) și cu n raportul de transformare ($n = U_1 / U_2 = I_2 / I_1$), se poate scrie:

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} \cdot \frac{I_2^2}{I_1^2} \quad \text{sau} \quad Z_1 = n^2 \cdot Z_2 \quad (8.52)$$

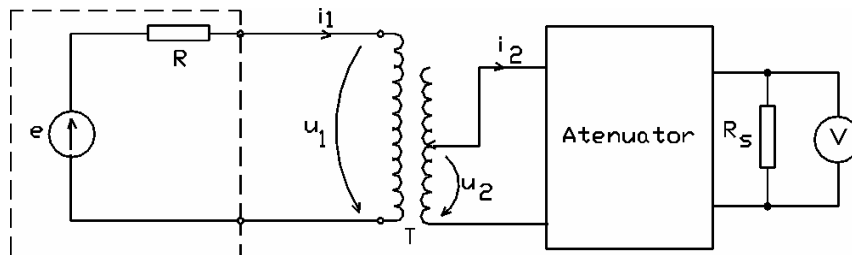


Fig. 8.23

Se obține astfel variația impedanței la bornele de intrare a circuitului primar al transformatorului prin variația raportului de transformare n . Astfel, dacă la intrarea unui wattmetru de ieșire se montează un transformator cu prize, se obține un wattmetru de ieșire cu sensibilitate și impedanță de intrare variabile.

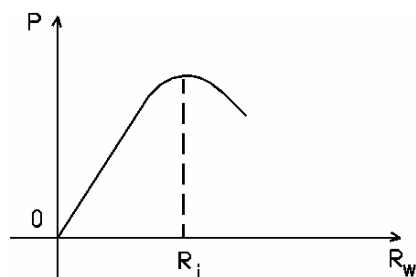


Fig. 8.24

Cu un astfel de wattmetru poate fi determinată cu ușurință rezistența optimă de sarcină a unei surse (generator de semnale, amplificator etc.), conform teoremei transferului maxim de putere. Se variază rezistența de intrare a wattmetrului de ieșire până când indicația acestuia este maximă (ca în figura 8.24). În acest moment rezistența de intrare R_i a wattmetrului este egală cu rezistența optimă pe care trebuie să lucreze sursa.

În locul transformatorului de adaptare a impedanțelor se pot utiliza cuadripoli rezistivi cu rezistoare variabile. Se poate obține la intrare o rezistență variabilă în trepte în limite largi, de exemplu între $2\ \Omega$ și $2\ \text{k}\Omega$. În plus, se mai prevede și un atenuator la intrarea voltmetrului, pentru a măsura puterea în mai multe game. Acest tip de wattmetru prezintă avantaje față de tipul cu transformator, deoarece utilizează numai elemente liniare care se comportă bine într-o gamă de frecvențe mare și care, de asemenea, nu introduc defazaje apreciabile la cele două capete ale benzii de frecvențe. În figura 8.25 este prezentată spre exemplificare, schema de principiu a unui wattmetru de ieșire pentru audiofrecvență cu cuadripol rezistiv în Π .

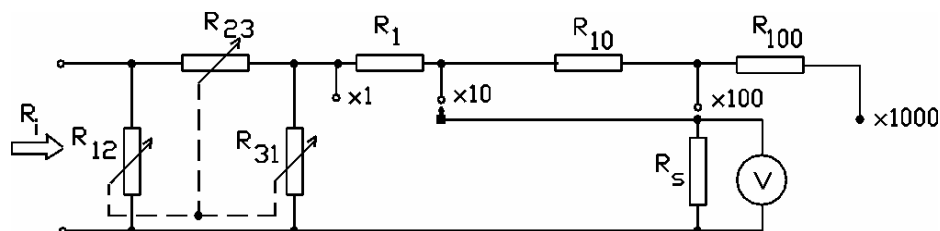


Fig. 8.25

Măsurarea se face între 20 Hz și 20 kHz cu o precizie cuprinsă între 2 și 4%.

Figura 8.26 conține un wattmetru de ieșire dotat cu un cuadripol de adaptare rezistiv în G și un redresor la ieșirea căruia se conectează un voltmetru de c.c. Aparatul este de fapt un voltmetru de curent alternativ ce măsoară tensiuni între 0,5 și 200 V, pe mai multe scări și este gradat în unități de putere.

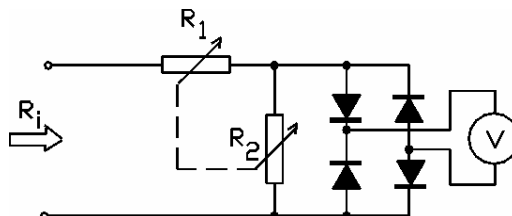


Fig. 8.26

În cazul în care nu se utilizează transformatoare, domeniul de frecvențe al aparatului este determinat de instrumentul de măsurat precum și de ansamblul rezistentelor care formează sarcina. Se pot realiza rezistențe compensate care să prezinte o valoare constantă până la frecvențe de ordinul gigahertilor. În ceea ce privește instrumentul de măsurat, tensiunea se poate determina în mod curent până la 10^6 Hz, iar cu precauții speciale până la 10^9 Hz.

Domeniul de puteri măsurate de aparat depinde de puterea disipată pe rezistența de sarcină și de domeniul de măsură al voltmetrului, precum și de sensibilitatea acestuia.

Precizia aparatului este de ordinul a 5%. Erorile cresc considerabil în cazul semnalelor modulate sau a trenurilor de unde. Pentru eliminarea acestor inconveniente au fost concepute wattmetre de ieșire care măsoară valoarea de vârf a unde.

8.2.3. Metode calorimetrice de măsurare a puterii

Metodele calorimetrice sunt metode de laborator ce se bazează pe măsurarea efectului caloric pe care semnalul, a cărei putere se măsoară, îl dezvoltă într-o sarcină rezistivă. Ele pot fi aplicabile pentru orice formă de undă a semnalului și orice frecvență.

În funcție de modul cum se efectuează măsurarea temperaturii corespunzătoare efectului caloric, calorimetrele se clasifică în calorimetre cu substituție și calorimetre cu comparație.

Calorimetrul cu substituție (fig. 8.27) constă dintr-o încălțită cu lichid în care sunt cufundate două rezistoare și un sistem de măsurare a temperaturii θ a lichidului. La rezistorul de sarcină R_s se cuplează sursa cu puterea de măsurat P_m (de radiofrecvență, audiofrecvență etc.) și se determină creșterea de temperatură $\Delta\theta$ corespunzătoare energiei disipate. Se cuplează apoi la rezistorul R_i o sursă de curent continuu P_c sau de joasă frecvență, a cărei putere se ajustează astfel ca să se înregistreze aceeași creștere de temperatură $\Delta\theta$. Puterea de joasă frecvență (c.c. sau c.a.) măsurată cu una din metodele cunoscute (wattmetru sau voltmetru și ampermetru) este egală cu puterea de măsurat P_m .

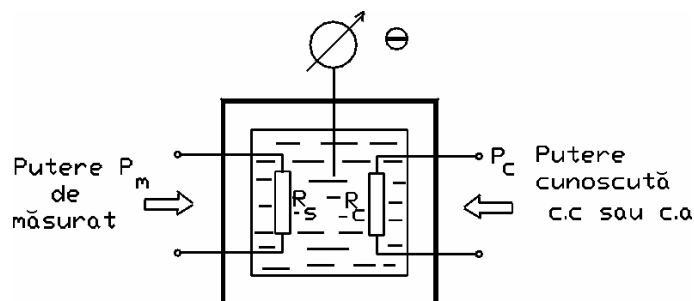


Fig. 8.27

Pentru creșterea preciziei măsurării, în calorimetrele mai perfecționate lichidul este făcut să circule într-un circuit închis, asigurându-se o uniformizare a temperaturii (fig. 8.28).

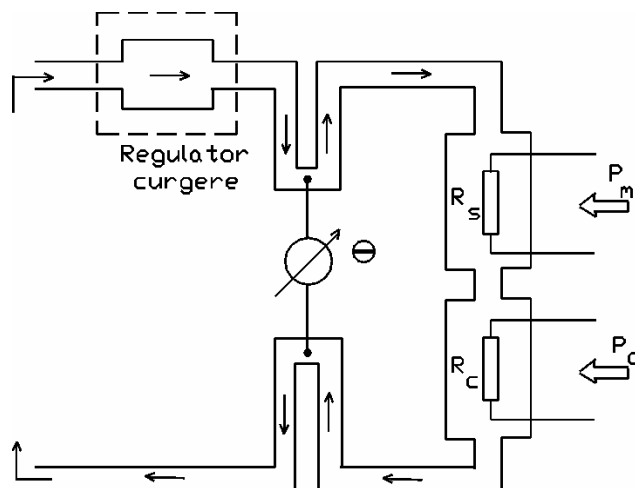


Fig. 8.28

Calorimetrul cu comparație este prezentat în schema de principiu din figura 8.29. Puterea de măsurat P_m dezvoltată în rezistența de sarcină R_s este comparată în permanentă cu puterea dezvoltată în rezistorul de comparație R_c , prin intermediul unui circuit ce conține două traductoare rezistive de temperatură R_{T1} și R_{T2} . Prin intermediul amplificatorului, puterea de comparație dezvoltată în rezistorul R_c este ajustată astfel încât creșterile de temperatură înregistrate de R_{T1} și R_{T2} să fie egale. În felul acesta puterea de măsurat P_m este egală cu puterea cunoscută a sursei de comparație indicată de instrumentul de măsurare.

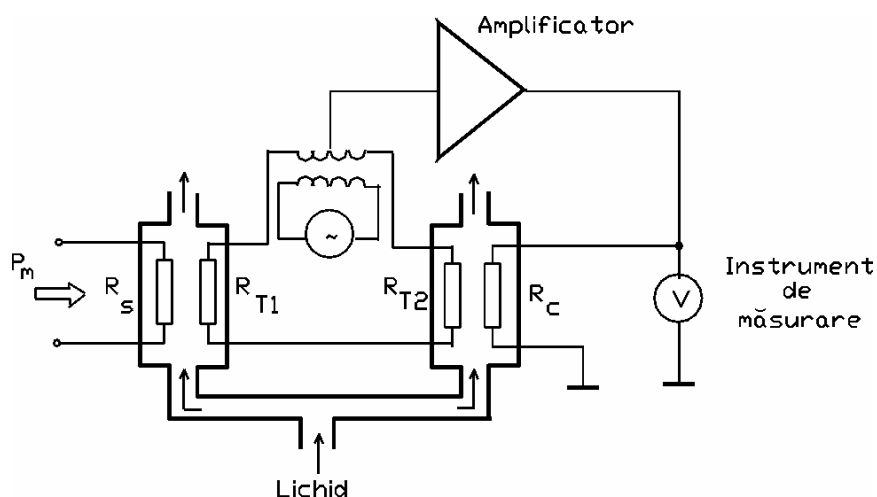
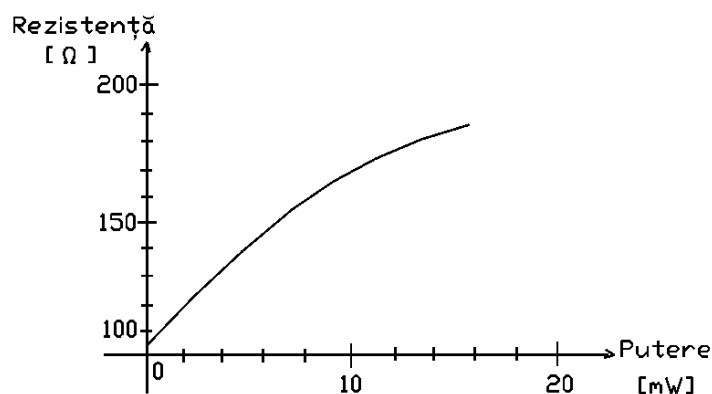
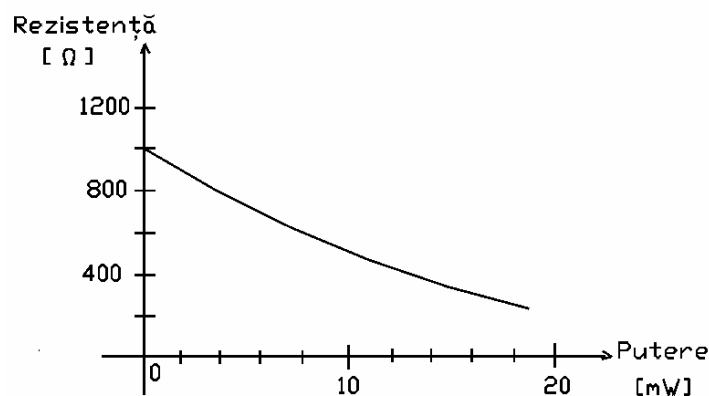


Fig. 8.29

Metode bolometrice de masurare a puterii. Se utilizeaza pentru masurarea puterilor mici, pâna la 10 mW, fiind cea mai raspândita pentru acest domeniu de puteri la frecvente înalte. Puterea de masurat se disipa practic integral în bolometru, care este un dispozitiv miniatural a carui rezistenta variaza cu temperatura. Din aceasta categorie de dispozitive fac parte depunerile de pelicule rezistive (bolometrele propriu-zise), baretoarele si termistoarele. Bolometrele propriu-zise au coeficient de temperatura (de variatie a rezistentei cu temperatura) pozitiv (fig. 8.30,a), iar termistoarele negativ (fig 8.30,b).



a



b

Fig. 8.30

Utilizarea acestei metode pentru masurarea puterii de radiofrecventa are la baza faptul ca efectul caloric datorat unei puteri de curent continuu, de joasa frecventa sau de radiofrecventa, este acelasi, daca aceste puteri sunt egale. Prin montarea bolometrului într-o punte, vor putea fi puse în evidenta variatiile egale de rezistenta ce vor avea loc. Cele mai multe wattmetre bazate pe aceasta metoda folosesc de obicei o punte echilibrata automat, alimentata în curent continuu sau în joasa frecventa.

Pentru o buna precizie a masurarii se impun urmatoarele conditii:

– în tot timpul masurarii, rezistenta bolometrului trebuie sa ramâna constanta, deoarece ea constituie sarcina sursei de radiofrecventa a carei putere se masoara;

– deoarece se lucreaza la înalta frecventa, pierderile în dielectrici sau în alte componente ale circuitului trebuie sa fie reduse la minimum, astfel încât puterea de masurat sa se disipe integral în bolometru;

– rezistenta bolometrului trebuie adaptata la sursa de putere în banda de frecvente în care se face masurarea. În caz contrar masurarea va fi eronata, deoarece o parte din puterea de radiofrecventa va fi reflectata;

– sa existe o buna separare între circuitul de masurat al puntii si circuitul de radiofrecventa.

În functie de respectarea acestor conditii, precizia de masurare se situeaza între 0,5 si 10%, valorile curenți fiind cuprinse între 2% si 3%. Spre exemplificare, un aparat bazat pe acest principiu masoara puteri cuprinse între 1 μW si 10 mW, la frecvente între 0 si 18 GHz cu o eroare de baza de 2%.

În figura 8.31 este prezentata spre exemplificare o punte cu echilibrare manuala. Initial, ea se echilibreaza în curent continuu pentru o rezistenta a bolometrului $R_T = R_0$, prin modificarea tensiunii de alimentare a puntii. Aplicând apoi puterea de radiofrecventa, puntea se dezechilibreaza si pentru readucerea la echilibru, se reduce tensiunea de alimentare la o valoare U_2 . Daca tensiunea la echilibrarea initiala în c.c. a fost U_1 , puterea de radiofrecventa va fi data de relatia:

$$P_{RF} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{4R_0}. \quad (8.53)$$

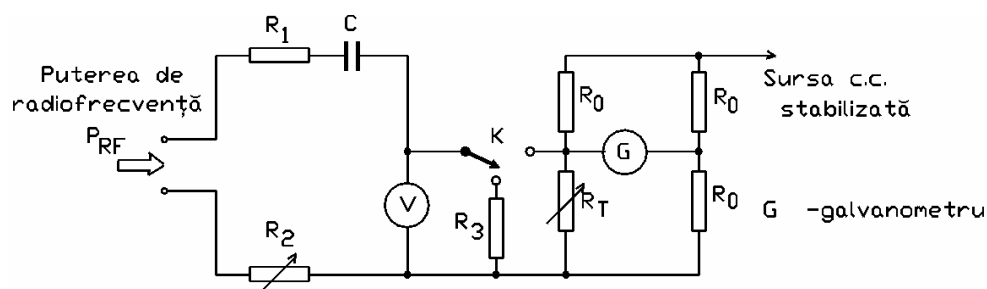


Fig. 8.31

Un alt mod de echilibrare a puntii este mentinerea tensiunii de alimentare constanta si înlocuirea sursei de radiofrecventa cu o sursa de joasa frecventa. Daca echilibrarea puntii se obtine pentru o valoare U a tensiunii de joasa frecventa, atunci puterea de radiofrecventa cautata va fi:

$$P_{RF} = \frac{U^2}{R_0}. \quad (8.54)$$

Înlăturarea influenței variației temperaturii mediului ambiant asupra bolometrului se face prin utilizarea unui montaj de compensare ce conține un al doilea bolometru, pasiv, situat în același mediu ambiant.

8.3. MASURAREA ENERGIEI ELECTRICE

Deoarece energia este integrala puterii în raport cu timpul, măsurarea ei se face cu aparate integratoare denumite **contoare**, acestea putând fi electrodinamice, de inducție sau electronice, ultimele impunându-se din ce în ce mai mult, datorită robusteții, preciziei și facilităților oferite.

8.3.1. Masurarea energiei în circuitele de curent continuu

Se face cu ajutorul contorului electrodinamic. Conectarea lui în circuit se realizează, ca și în cazul wattmetrelor, prin înserierea bobinei de curent cu rezistența de sarcină, iar bobina de tensiune în paralel cu sarcina (fig. 8.32). Cele două bobine pot fi conectate după montajul amonte sau aval. Ca și la wattmetru, bornele sunt polarizate, cele din stânga fiind considerate borne de intrare.

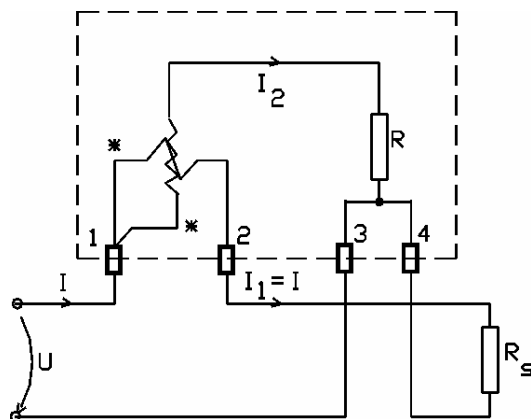


Fig. 8.32

8.3.2. Masurarea energiei în circuitele de curent alternativ monofazat

Această măsurare folosește contorul, care poate fi de inducție sau electronic.

Contorul de inducție. Principiul de funcționare se bazează pe interacțiunea dintre două sau mai multe fluxuri magnetice variabile în timp și curenții electrici induși de ele într-un disc metalic (din aluminiu) ce se poate roti în jurul unui ax.

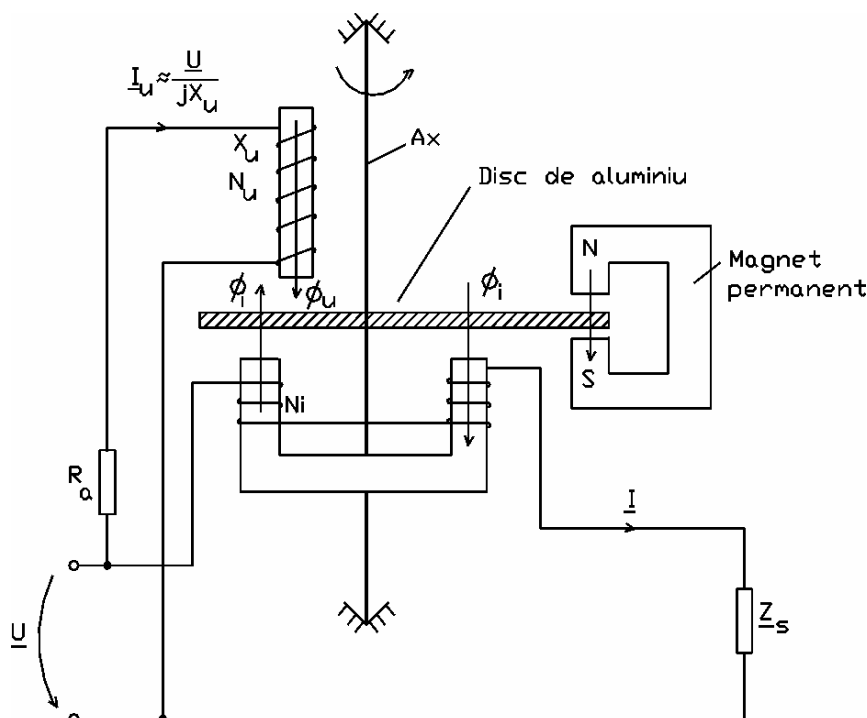


Fig. 8.33

În figura 8.33 este redat schematic un contor monofazat de energie activa care este alcătuit din:

- o bobina cu N_i spire, strabatuta de curentul $I_i \equiv I$ ce reprezinta curentul receptorului (de aceea se numeste si bobina de curent);
- o bobina cu N_u spire, conectata în paralel cu receptorul Z_s strabatuta de curentul I_u proportional cu tensiunea cu care este alimentat receptorul ($I_u = U/Z_0$). De aceea se numeste si bobina de tensiune;
- un disc metalic (de aluminiu) fixat pe un ax ce se poate roti în doua lagare de capat;
- un magnet permanent între polii caruia se poate roti discul de aluminiu si care este destinat pentru producerea cuplului rezistent M_r ;
- un sistem totalizator (cu surub melc si roata dintata ce actioneaza un mecanism totalizator cu transfer zecimal) care înregistreaza si indica numarul de rotatii (însumate) efectuate de disc în timp.

Bobina de curent creeaza un flux Φ_i , iar bobina de tensiune un flux Φ_u . Cu o buna aproximatie se poate neglija rezistenta bobinei de tensiune în raport cu reactanta sa. În aceasta situatie, curentul prin bobina de tensiune I_u este practic decalat cu $\pi/2$ în urma tensiunii U . Cum intensitatea curentului $I = I_i$ este defazata cu f în urma tensiunii U , defazaj impus de sarcina Z_s , între curentii I si I_u va fi decalajul $\Psi = \pi/2 - f$ (fig. 8.34). Fluxurile alternative $\Phi_u(t)$ si $\Phi_i(t)$, care sunt proportionale si în faza cu curentii $i_u(t)$ si $i_i(t) = i(t)$ care le-au produs, strabat discul

de aluminiu si induc în acesta curentii turbionari $i_{\phi u}(t)$ si $i_{\phi i}(t)$. Din interactiunea acestor curenti cu fluxurile Φ_u si Φ_i , asupra discului de aluminiu se vor exercita fortele (fig. 8.35) date de relațiile:

$$F_1 = K_1 \Phi_i i_{\phi u} \text{ si } F_2 = K_2 \Phi_u i_{\phi i}. \quad (8.55)$$

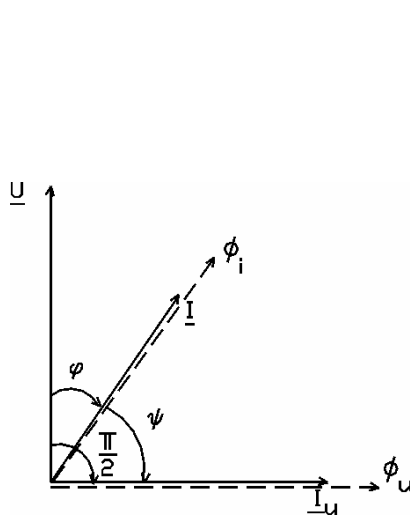


Fig. 8.34

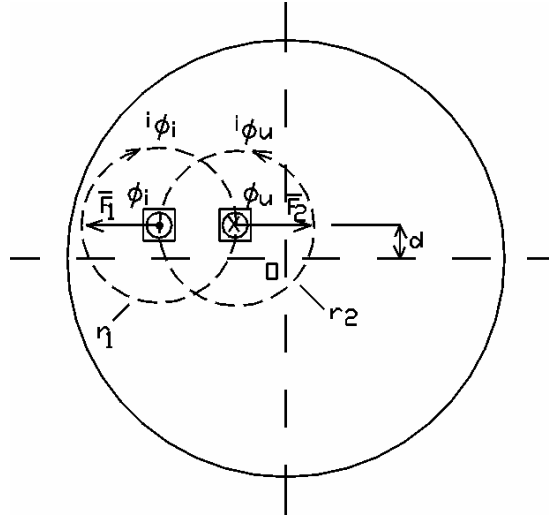


Fig. 8.35

Momentul cuplului activ mediu pe durata unei perioade, determinat de aceste forte, fata de centrul O al discului va fi:

$$M = M_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T (F_1 - F_2) \cdot d \cdot dt = K_M \cdot \phi_{\max i} \cdot \phi_{\max u} \cdot \sin \phi, \quad (8.56)$$

unde K_M este o constanta care depinde de constructia contorului, având expresia

$$K_M = \frac{\omega d}{2\pi} \left(\frac{K_1}{r_1} + \frac{K_2}{r_2} \right), \quad d \text{ fiind distanta de la centrul discului la dreapta ce uneste}$$

punctele de aplicatie ale fortelor F_1 si F_2 , iar r_1 si r_2 rezistentele echivalente, prin disc, ale traseelor curentilor $i_{\phi i}$ si $i_{\phi u}$.

Considerând ca discul este omogen, în ipoteza ca: parametrii R si L ai bobinelor de curent si tensiune sunt constanti, miezurile magnetice de curent si tensiune sunt nesaturate (deci liniare), marimile $i_i = i$ si i_u de forma sinusoidala s.a., fluxurile magnetice ϕ_u si ϕ_i sunt proportionale si în faza cu cei doi curenti care le-au produs (v. fig. 8.34), adica:

$$\phi_u = \phi_{\max u} \sin \omega t \cong k_u i_u = k_u \sqrt{2} I_u \sin \omega t,$$

$$\phi_i = \phi_{\max i} \sin(\omega t - \psi) \cong k_i i_i = K_i i = K_i \sqrt{2} I_i \sin(\omega t - \psi).$$

În aceste conditii expresia cuplului activ mediu exercitat asupra discului devine:

$$M = K_I I_U I_i \sin \Psi, \quad (8.57)$$

unde:

$$I_u = \frac{U}{\omega L}; \quad I_i = I; \quad \Psi = \frac{\pi}{2} - \varphi.$$

Cu aceste notatii expresia cuplului activ mediu devine:

$$M = K_I \cdot \frac{U}{\omega L} \cdot I \sin \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \frac{KI}{\omega L} UI \cos \varphi = K_p \cdot P,$$

ceea ce pune în evidenta faptul ca acesta este proportional cu puterea activa $P = UI \cos \varphi$, din circuitul de curent alternativ monofazat.

Sub actiunea cuplului activ discul se roteste între polii unui magnet permanent. În disc se induc curenti turbionari si din interactiunea lor cu câmpul magnetic constant care l-a produs, se genereaza cuplul rezistent care este proportional cu viteza de rotatie:

$$M_r = K_r \cdot n. \quad (8.58)$$

Când cuplul rezistent echilibreaza cuplul activ, rotirea discului de aluminiu devine uniforma si se poate scrie: $M = M_r$, deci $K_p \cdot P = K_r \cdot n$.

Rezulta:

$$P = \frac{K_r}{K_p} \cdot n. \quad (8.59)$$

Integrând aceasta expresie a puterii active pe intervalul de timp de la 0 la t obținem energia consumata în acest interval

$$W = \int_0^t P \cdot dt = \frac{K_r}{K_p} \int_0^t n \cdot dt = K_w \cdot n_t, \quad (8.60)$$

unde n_t este numarul total de rotatii efectuat de disc în intervalul de timp considerat. De aici rezulta ca numarul de rotatii efectuat de disc pentru un consum de energie activa W este :

$$n_t = \frac{1}{K_w} \cdot W = K_E W, \quad (8.61)$$

K_E purtând denumirea de *constanta contorului* si reprezentând numarul de rotatii efectuat de disc pentru un consum de energie activa de 1 kWh, constanta înscrisa pe placuta aparatului.

Contorul cu inductie este un aparat integrator prin faptul ca este dotat cu un mecanism totalizator care, prin intermediul unui sistem (alcatuit din surub-melc, roata dintata, numarator mecanic cu transfer zecimal), numara permanent rotatiile efectuate de disc. Indicatiile sale sunt afisate direct, numeric, în unitati de energie (de cele mai multe ori în kWh).

Deoarece își bazează funcționarea pe fenomenul inducției electromagnetice, contorul cu inductie se utilizează numai în curent alternativ. Pentru tensiuni ale rețelei de alimentare până la 500 V și pentru curenți mai mici decât 100 A, contoarele se conectează direct în circuitul caruia se măsoară energia, prin înserierea cu sarcina a bobinei de curent și conectarea în paralel cu sarcina a bobinei de tensiune (fig. 8.36).

Pentru valori ale tensiunii și/sau curentului mai mari decât cele menționate mai sus, conectarea contorului se face prin intermediul transformatoarelor de măsură de tensiune (TU) și/sau transformatoare de măsură de curent (TI), ca în schema din figura 8.37. În acest caz domeniul bobinei de curent a contorului este 0-5 A, iar cel al bobinei de tensiune 0-100 V.

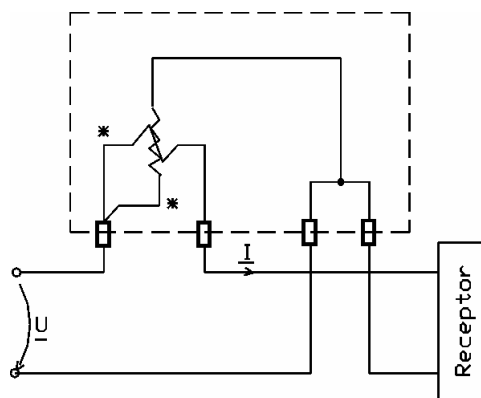


Fig. 8.36

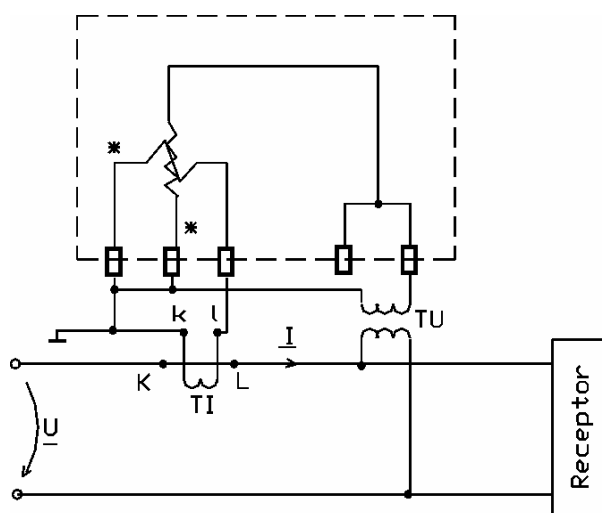


Fig. 8.37

8.3.3. Masurarea energiei active în circuitele de curent alternativ trifazat.

Se face cu contoare trifazate, care pot fi aparate cu inductie sau contoare electronice numerice.

Contoarele trifazate cu inductie sunt aparate cu un singur element de rotatie (în cazul sistemelor de tensiuni simetrice ce alimenteaza receptoare echilibrate), cu doua elemente de rotatie (potrivit “metodei celor doua wattmetre” în cazul receptoarelor conectate în triunghi sau în stea fara fir neutru) sau cu trei elemente de rotatie (în cazul retelelor oarecare cu fir neutru si receptoare dezechilibrate, potrivit “metodei celor trei wattmetre”).

Contorul electronic numeric. Este, în principiu, format dintr-un wattmetru electronic, un integrator si un bloc de afisare numeric. Dupa modul cum se prelucreaza semnalul în diversele blocuri ale contorului distingem:

- contoare cu multiplicare si integrare analogica;
- contoare cu multiplicare analogica si integrare numerica;
- contoare cu multiplicare si integrare numerica.

Contoarele cu multiplicare si integrare analogica sunt alcatuite dintr-un wattmetru electronic ca cel prezentat în figura 8.15 (pentru contoarele monofazate) sau ca cel prezentat în figura 8.17 (pentru contoarele trifazate), un integrator cuantificator operational conectat la iesirea wattmetrului, un convertor tensiune-timp / frecventa, un numarator si un ecran de afisare cu cristale lichide (etalonat în kWh).

Contoarele cu multiplicare analogica si integrare numerica au în componenta lor wattmetre electronice ca cele prezentate în figurile 8.15 si 8.17 la iesirea carora se introduc etaje de digitizare (convertor tensiune-timp/frecventa). Semnalul numeric se însumeaza (digital) si se afiseaza pe un ecran cu cristale lichide (etalonat în kWh).

Energia este contorizata pentru mai multe tarife. Tarifarea diferentiala este o pârghie importanta privind cointerесarea consumatorilor în utilizarea rationala a energiei electrice. Datorita consumatorilor de vârf, în anumite perioade în timpul celor 24 de ore, precum si în anumite zile ale saptamânii, apare necesitatea masurarii differentiate a energiei (în vederea aplatizarii curbei de sarcina si pe aceasta cale) si anume înregistrarea consumului de energie cu un tarif mai ridicat pentru o perioada de vârf de sarcina. Contoarele moderne înregistreaza energia pentru maximum patru tarife.

Afisajul cu cristale lichide permite citirea tuturor datelor masurate împreuna cu unitatea de masura a parametrilor ce caracterizeaza aceste date, precum si a tuturor datelor programate. Afisajului i se pot asocia doua secvente de afisare alese prin programare, una pentru derularea automata a datelor si una pentru afisarea pas cu pas prin intermediul butonului de pe contor. Afisarea unor simboluri speciale permite recunoasterea usoara a unor evenimente aparute (de exemplu lipsa unei faze).

Securitatea datelor în contor pe durata caderilor de tensiune este asigurata de o memorie nevolatila care nu necesita baterii (*EEPROM*), unde sunt înregistrate, în momentul întreruperii tensiunii, datele din configuratie ale contorului si datele cheie de facturare. Când tensiunea revine, datele sunt reîncarcate în memoria *RAM* activa si colectarea datelor este reluata.

Interfata optica permite utilizatorului introducerea de programe sau citirea datelor fara îndepartarea capacului de protectie a contorului. O sonda optica cu doua elemente (un led si un fototranzistor) este atasata temporar pe o ridicatura turnata a capacului contorului. Prin micile ferestre, sonda optica transmite si receptioneaza semnale optice de la portul de comunicatie optic montat direct pe placa de baza a contorului. Toate comunicatiile sunt protejate cu parole specificate de utilizator.

Optional, contoarele pot fi dotate cu interfata *RS 232* necesara pentru programare si citire de la distanta, calibrare si corectare a erorilor.

Contoarele electronice care au configuratie de masurare avansata pot înregistra mai multe curbe de sarcina, pot masura puterea activa în patru cadrane si pot fi programate sa asigure multitarifarea si pentru energia reactiva. De asemenea, se poate masura si afisa factorul de putere mediu.

Din categoria contoarelor electronice ce îndeplinesc asemenea functii se poate aminti contorul *ALPHA*, produs de firma *ABB*, care are o precizie de 0,2% si contorul *INDIGO PXA*, produs de Schlumberger Industries, care are o precizie de 1%.