



Politechnika Wroclawska

Laboratorium Metrologii Elektronicznej

Ćwiczenie nr 7

Pomiary mocy, wyznaczanie sprawności odbiornika

I. Zagadnienia do przygotowania na kartkówkę:

1. Moc czynna, bierna i pozorna oraz współczynnik mocy – podaj definicje oraz jednostki, w jakich wyrażamy te wielkości.
2. Energia – podaj definicje oraz jednostki, w jakich wyrażamy te wielkości.
3. Opisać stosowane układy pomiaru mocy czynnej wykonywane metodą techniczną.
4. Opisać stosowane układy pomiaru mocy czynnej wykonywane watomierzem.
5. Jakie są różnice w konstrukcji i działaniu watomierza i waromierza? Czemu one służą?
6. Na czym polega pomiar energii? Dlaczego dąży się do minimalizacji obciążenia sieci mocą bierną?
7. Związek między reaktancją, rezystancją a impedancją a charakterem obciążenia generowanym przez odbiornik.

II. Literatura:

1. S. Tumański, *Technika pomiarowa*, WNT, Warszawa 2007.
2. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, *Metrologia elektryczna*, WNT, Warszawa 1998.

W czasie wykonywania ćwiczeń przestrzegaj przepisów BHP!

1. Wstęp

1.1. Definicje

Moc jest skalarną wielkością fizyczną określającą pracę wykonaną w jednostce czasu przez układ fizyczny. Z definicji, moc określa wzór:

$$P = \frac{W}{t}$$

gdzie:

P – moc,
W – praca,
t – czas.

Wzór ten jest prawdziwy, gdy praca wykonywana jest w tym samym tempie (nie zmienia się w czasie). W przeciwnym wypadku powyższy wzór będzie określał moc średnią. Aby obliczyć moc chwilową, należy skorzystać z innego wzoru:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Moc może być również definiowana jako prędkość emisji energii (na przykład dla źródła światła, anteny, głośnika). Wzór na moc (przy stałym tempie emisji) przybiera wówczas postać:

$$P = \frac{E}{t}$$

gdzie E jest energią emitowaną w czasie t.

Jednostką mocy w układzie SI jest wat (W). Moc jest równa 1 wat, jeśli praca 1 dżula wykonywana jest w czasie 1 sekundy

$$P = \frac{1J}{1s} = \frac{kg\ m^2}{s^3}$$

Jednostką rozliczeniową energii elektrycznej w gospodarstwach domowych jest kilowatogodzina [kWh], która jest równa energii $1000\ W * 3600\ s = 3\ 600\ 000\ J = 3,6\ MJ$.

Często używane wielokrotności:

$$1\ mW = 0,001\ W$$

$$1\ kW = 1\ 000\ W$$

$$1\ MW = 1\ 000\ 000\ W$$

W obwodach elektrycznych prądu stałego moc wylicza się jako iloczyn napięcia na zaciskach odbiornika oraz prądu przepływającego przez ten odbiornik.

$$P = U \times I.$$

Dysponując wiedzą na temat rezystancji obciążenia można wyliczyć **moc**, jaka jest wydzielana przez dany element:

$$P = U \cdot I \text{ lub } P = \frac{U^2}{R} \text{ lub } P = I^2 \cdot R$$

Uogólniona zależność pozwalająca wyznaczyć chwilową wartość mocy zdefiniowana jest następująco:

$$p(t) = u(t) \times i(t) \quad [VA]$$

energia W pobrana przez odbiornik w przedziale czasu od t_1 do t_2 jest całką z mocy chwilowej po czasie:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad [J]$$

Moc czynna P dla przebiegów okresowych jest równa średniej wartości mocy chwilowej za okres T sygnału:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt \quad [W]$$

Stosuje się trzy podstawowe wielkości określające moc w obwodach prądu przemiennego sinusoidalnego: moc czynna P (active power), moc bierna Q (reactive power) oraz moc pozorna S (apparent power). Definiowane są one następująco:

$$S = U \times I$$

$$P = U \times I \times \cos(\varphi)$$

$$Q = U \times I \times \sin(\varphi)$$

gdzie U jest wartością skuteczną napięcia (rms voltage), I jest wartością skuteczną prądu (rms current), a φ jest różnicą faz przebiegów napięcia i prądu, nazywaną również kątem przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem a prądem (phase angle).

Moc czynna odpowiada mocy przetwarzanej w odbiorniku bezpośrednio na energię cieplną, moc bierna odpowiada mocy oscylującej między odbiornikiem, a źródłem t.j. między pojemnościami i indukcyjnościami. Moc pozorna jest iloczynem wartości skutecznych napięcia i prądu.

Dla sinusoidalnych przebiegów napięcia i prądu moce są związane następującą zależnością:

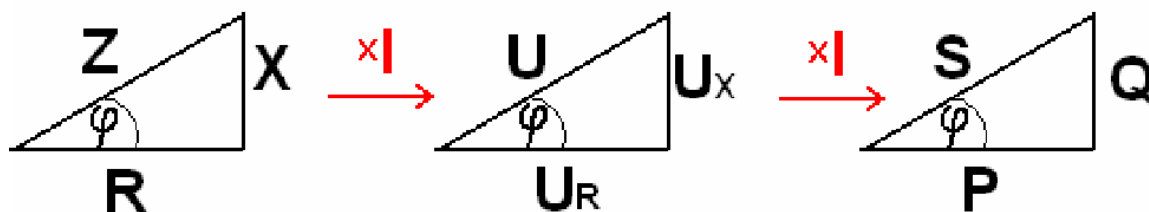
$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Wielkość równą $\cos(\varphi)$ nazywamy współczynnikiem mocy (power factor). Dla sinusoidalnych przebiegów napięcia i prądu współczynnik mocy można wyznaczać jako:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$$

Pomiar mocy odbiornika jednofazowego można wykonać bezpośrednio, za pomocą watomierza, bądź pośrednio, metodą techniczną, mierząc wartości napięcia, prądu oraz przesunięcia fazowego.

Mając na względzie zależność między impedancją, reaktancją i rezystancją, mocą czynną, bierną oraz pozorną oraz składową rzeczywistą i urojoną wskazu napięcia oraz ich wypadkową, współczynnik mocy można zapisać również w następujący sposób:



Rys. 1. Wykresy ukazujące zależności między: impedancją, reaktancją i rezystancją, mocą czynną, bierną oraz pozorną oraz składową rzeczywistą i urojoną wskazu napięcia oraz ich wypadkową.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}$$

1.2. Pomiary mocy i energii

Moc elektryczną możemy mierzyć:

- metodą pośrednią, bazując na pomiarach prądu i napięcia,
- metodą bezpośrednią, z wykorzystaniem watomierza.

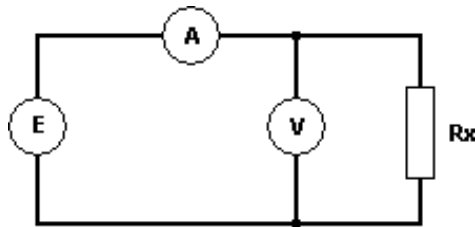
Energię możemy mierzyć:

- watomierzem,
- bazując na wskazaniach przyrządów.

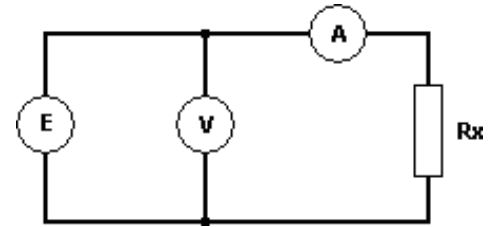
1.2.1. Pomiary mocy metodą pośrednią

W przypadku pomiaru mocy metodą pośrednią, stosuje się układy analogicznie do pomiarów rezystancji, gdzie należy wyznaczyć wartość napięcia zasilania oraz prądu pobieranego przez odbiornik. Wykorzystanie jedynie amperomierza i woltomierza, zgodnie z przedstawionymi powyżej wzorami, pozwoli na wyznaczenie mocy pozornej. Wyznaczenie mocy czynnej oraz biernej będzie wymagało wyznaczenia współczynnika mocy (wartości przesunięcia wskazu prądu oraz napięcia). Pomiaru tego można dokonać metodą oscyloskopową lub za pomocą fazomierza. Znając charakter odbiornika (np. rezystancyjny – czajnik) można przyjąć wartość przesunięcia fazowego za równe 0, co daje cosinus tego parametru równy 1.

Podobnie jak w wyznaczaniu rezystancji, dokładność pomiaru będzie zależała od rezystancji (impedancji) obciążenia. Dla małych wartości wskazane jest stosowanie układu z dokładnym pomiarem napięcia, natomiast dla dużych wartości obciążenia – układu z dokładnym pomiarem prądu.



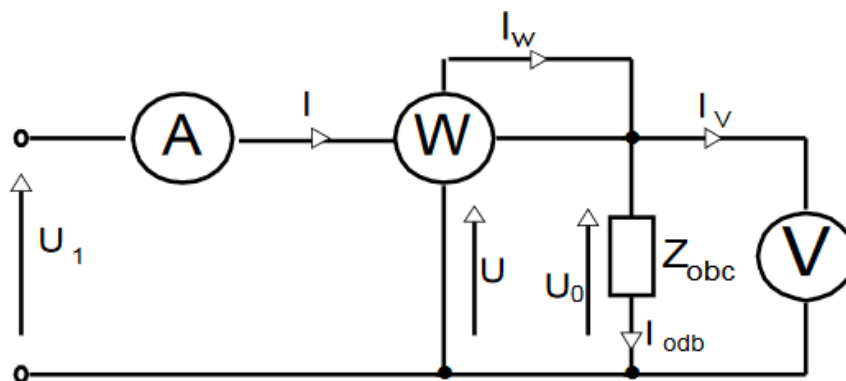
Rys. 2. Układ dokładnego pomiaru napięcia.



Układ dokładnego pomiaru prądu.

1.2.2. Pomiary mocy z pomocą watomierza

Analogowym przyrządem mierzącym moc czynną jest watomierz elektrodynamiczny. Ustrój watomierza elektrodynamicznego złożony jest z dwóch cewek: cewki nieruchomej, o małej rezystancji, przez którą przepływa prąd I proporcjonalny do prądu odbiornika lub płynący bezpośrednio przez odbiornik oraz cewki ruchomej, o dużej rezystancji, przez którą przepływa prąd I_w proporcjonalny do napięcia zasilającego odbiornik. Cewka ruchoma znajduje się w polu magnetycznym wytworzonym przez cewkę nieruchomą. Gdy wartości prądów I i I_w są różne od zera, to cewka ruchoma, do której przymocowana jest wskazówka przyrządu, obraca się pod wpływem sił elektrodynamicznych między długimi bokami cewek. Kąt obrotu cewki jest ograniczony momentem hamującym pochodzącym od spiralnej sprężynki. Odchylenie wskazówki przyrządu jest zatem proporcjonalne do iloczynu prądów I i I_w . Zmiana kierunku przepływu prądu w jednej z cewek powoduje zmianę kierunku wychylenia wskazówki. Początki uzwojeń (cewek) są na obudowie przyrządu oznaczone najczęściej symbolem gwiazdki. Oznaczenia początków uzwojeń pozwalają na poprawne przyłączenie watomierza do obwodu z zachowaniem wybranego kierunku przepływu prądu przez cewki. Zakres watomierza jest iloczynem zakresów obu uzwojeń pomiarowych czyli cewek napięciowej i prądowej.



Rys. 3. Schemat przedstawiający pomiar mocy czynnej i pozornej. Układ dokładnego pomiaru napięcia.

Ustrój elektrodynamiczny ma właściwości mnożące i jest wykorzystywany do budowy watomierzy lecz może być także stosowany do budowy amperomierzy i woltomierzy elektrodynamicznych. Mierniki elektrodynamiczne pracują poprawnie przy prądzie stałym i przemiennym. W obwodach prądu przemiennego wskazują wartość skuteczną, nawet jeśli przebieg prądu jest odkształcony. Watomierz z ustrojem ferrodynamicznym różni się od wyżej opisanego tym iż posiada magnetowód, na którym nawinięta jest cewka prądowa, powodujący koncentrację pola magnetycznego wokół cewki napięciowej. Zaletą tej konstrukcji jest większa odporność na zewnętrzne pola magnetyczne, a wadą histereza magnetowodu powodująca nieliniową zależność wychylenia wskazówki od mocy mierzonej (stąd często nieliniowa podziałka). Głównym polem zastosowania watomierzy ferrodynamicznych są pomiary mocy prądu przemiennego, a ich klasa dokładności z reguły nie jest lepsza od 0,5.

Przy pomiarach niewielkich mocy należy się liczyć z błędami wywołanymi przez własny pobór mocy watomierzy. W układzie połączeń (układ poprawnie mierzonego napięcia) watomierz mierzy moc

$$P = P_0 + \Delta P$$

gdzie

ΔP - moc pobierana przez mierniki (uzwojenia)

$$\Delta P = P_W + P_V = \frac{U^2}{R_W} + \frac{U^2}{R_V} = \frac{U^2(R_W + R_V)}{R_W + R_V}$$

W przypadku watomierza konieczne jest zastosowanie przesuwника fazowego wskazu napięcia zasilania, aby zapewnić warunek

$$Q = U \times I \times \cos(\varphi + 90^\circ)$$

czyli zależności podanej wcześniej.

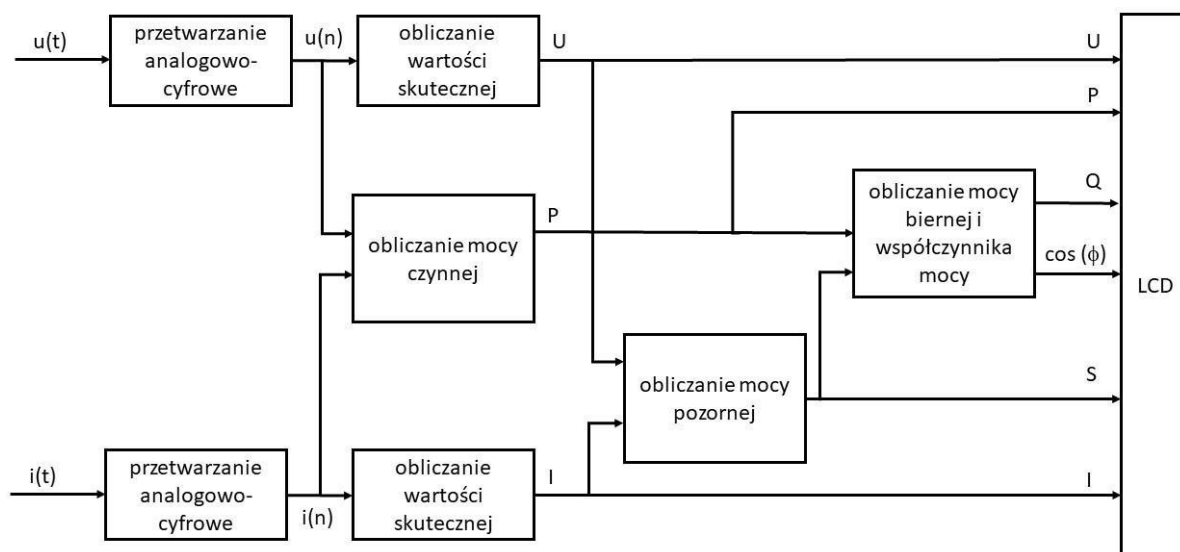
Analogiczne rozwiązanie stosuje się w licznikach energii czynnej i biernej, jako że w tamtych układach również stosowane są dwie cewki pomiarowe (prądowa i napięciowa), które generują współdziałające pola magnetyczne.

Aktualnie popularne są watomierze cyfrowe, które działają na odmiennym zasadzie. Ich działanie polega na dyskretyzacji czasowej (próbekowaniu) przebiegów napięcia $u(t)$ i prądu $i(t)$, a następnie wyznaczeniu na podstawie próbek $u(n)$, $i(n)$, mocy czynnej, liczonej jako średnia z mocy chwilowej zgodnie z zależnościami:

$$p(n) = u(n) \times i(n) \quad [\text{VA}]$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n_0}^{n_0+N} p(n) \quad [W]$$

gdzie N jest liczną próbek przypadających na pojedynczy okres T sygnału. Ze względu na łatwość wyznaczania innych wielkości na podstawie próbek przebiegu prądu i napięcia, większość cyfrowych watomierzy udostępnia ponadto wyniki pomiaru wartości skutecznych prądu i napięcia oraz mocy pozornej S , mocy biernej Q i współczynnika mocy $\cos(\phi)$.



Rys. 4. Schemat blokowy cyfrowego miernika mocy.

1.3. Metoda pomiaru energii elektrycznej

Pomiar energii wykonuje się przez pomiar mocy z jednoczesnym całkowaniem jej w czasie. Do pomiaru energii czynnej i biernej w obwodach prądu przemiennego lub energii w obwodach prądu stałego służą liczniki. Liczniki dzielą się na dwie podstawowe grupy: liczniki elektromechaniczne i liczniki elektroniczne.

Elektromechanicznym licznikiem energii prądu przemiennego jest tarczowy watomierz indukcyjny wyposażony w mechanizm liczący liczbę obrotów tarczy. Moment napędowy działający na tarczę aluminiową licznika jest proporcjonalny do mocy mierzonej

$$M = c_1 P$$

gdzie: c_1 - stała konstrukcyjna.

Na organ ruchomy licznika tzw. wirnik, nie działa moment zwracający (nie ma sprężyny), a kąt obrotu wirnika jest nieograniczony. Na obracającą się pod wpływem momentu napędowego M tarczę działa moment hamujący M_h , proporcjonalny do prędkości obrotowej

$$M_h = c_2 \theta$$

Moment hamujący pochodzi głównie od pola magnetycznego magnesu trwałego obejmującego tarczę. Wartość tego momentu zależy od prądów wirowych indukowanych w tarczy. Prądy indukowane są proporcjonalne do prędkości θ przecinania pola magnetycznego przez tarczę. Prędkość tarczy określa zależność:

$$\theta = \frac{dl}{dt} = \frac{d(2\pi r N)}{dt} = 2\pi r \frac{dN}{dT}$$

gdzie:

r - odległość od osi obrotu tarczy do środka strumienia między nabiegunnikami magnesu

$l = 2 \pi r N$ - droga przebyta po N obrotach przez punkt tarczy oddalony o r od osi. Jeśli moment napędowy i hamujący działające na tarczę są równe ($M = M_h$), to tarcza obraca się ruchem jednostajnym. Z porównania obu momentów i po przekształceniach wzorów otrzymujemy zależność:

$$W = c N$$

Wynika stąd, że miarą energii może być liczba obrotów tarczy z uwzględnieniem stałej konstrukcyjnej c . W praktyce na tabliczce znamionowej licznika jest podawana inna stała K , będąca odwrotnością stałej c .

$$k = \frac{1}{c} = \frac{N}{W}$$

która wyraża liczbę obrotów wirnika odpowiadającą jednostce energii elektrycznej, np. 400 obr/1 kWh. Na tabliczce znamionowej licznika jest podana znamionowa stała licznika K_N . Zależnie od warunków pomiaru, rzeczywista stała K_P różni się od stałej znamionowej. Wynika stąd błąd pomiaru energii:

$$\partial = \frac{W - W_p}{W_p} = \frac{\frac{N}{K_N} - \frac{N}{K_P}}{\frac{N}{K_P}} = \frac{K - K_p}{K_p}$$

przy czym: W_w , W_p - wartość energii wskazanej i rzeczywistej lub poprawnej (wartość rzeczywista na ogół nie jest znana - wtedy korzysta się z wartości poprawnej mierzonej przyrządem dostatecznie dokładnym). Wyznaczenie błędu licznika wymaga określenia poprawnej stałej K_P licznika. W tym celu mierzy się watomierzem przepływającą przez licznik moc P stałą w czasie pomiaru, oraz mierzy się sekundomierzem czas t_p , w którym wirnik wykonał N obrotów. Wtedy

$$K_P = \frac{N}{W_p} = \frac{3600 * 1000 N}{P t_p}$$

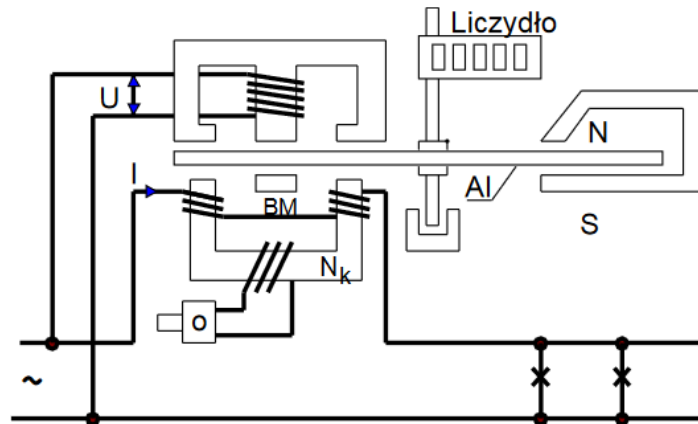
gdzie:

P - moc w watach

t_p - czas mierzony w sekundach

Współczynnik liczbowy $3,6 \cdot 10^6$ pozwala na zamianę watosekund (Ws) na kilowatogodziny (kWh). Na podstawie stałej znamionowej licznika K_N dla obranej liczby N obrotów wirnika i przy pomocy P można obliczyć tzw. czas znamionowy w sekundach

$$t_N = \frac{3600 * 1000 N}{P K_N}$$



Rys. 5. Uproszczony szkic licznika indukcyjnego.

Głównymi zespołami licznika są: elektromagnes napięciowy, elektromagnes prądowy, wirnik, magnes trwały i liczydło. Elektromagnesy mają rdzenie ferromagnetyczne wykonane z blach transformatorowych. Cewka elektromagnesu napięciowego ma dużą liczbę zwojów cienkiego drutu miedzianego. Cewka prądowa jest uzwojona grubym drutem o małej liczbie zwojów w dwóch sekcjach połączonych szeregowo. Wirnikiem jest tarcza aluminiowa osadzona na ułożyskowanej osi połączonej przekładnią zębatą z liczydłem bębnowym o sześciu lub siedmiu bębnach cyfrowych. Pod wpływem sinusoidalnego napięcia i prądu doprowadzonych do odpowiednich cewek licznika powstają przemienne strumienie magnetyczne przenikające tarczę aluminiową w kilku miejscach. Strumienie magnetyczne: napięciowy Φ_u i Φ_i indukują w tarczy prądy wirowe. Współdziałanie indukowanych prądów wirowych ze strumieniami magnetycznymi przesuniętymi względem siebie w przestrzeni i w fazie powoduje powstanie momentu napędowego M wprawiającego wirnik w ruch obrotowy. Można wykazać, że moment ten jest określony wzorem

$$M = k_m \omega \Phi_u \Phi_i \sin\psi$$

gdzie:

k_m - stała konstrukcyjna,

ω - pulsacja strumieni,

ψ - kąt fazowy między strumieniami Φ_u i Φ_i .

Strumienie magnetyczne Φ_u i Φ_i

zamykają w rdzeniach ze szczeliną powietrzną. W związku z tym zależność strumieni od napięcia i prądu jest praktycznie liniowa, czyli

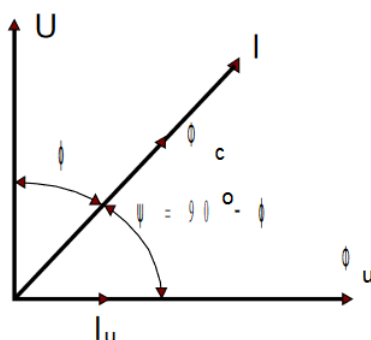
$$M = k U I \sin \psi$$

Aby moment napędowy był proporcjonalny do mocy czynnej przepływającej przez licznik musi być spełnione wymaganie

$$\sin \psi = \cos \varphi$$

w którym φ jest kątem fazowym między napięciem i prądem obciążenia. Z ostatniej zależności wynika

$$\psi = 90^\circ - \varphi$$



Rys. 6. Wykres wektorowy licznika indukcyjnego.

Z wyidealizowanego wykresu wektorowego widać, że wymagania fazowe są spełnione bez dodatkowych zabiegów konstrukcyjnych. Strumień prądowy Φ_i wywołany wymuszonym prądem I odbiornika, jest w fazie z tym prądem. Strumień napięciowy Φ_u wytwarzany przez cewkę napięciową (o dużej indukcyjności L_u), opóźnia się względem napięcia o 90° . Otrzymuje się więc związek

$$\sin \psi = \sin(90^\circ - \varphi) = \cos \varphi$$

decydujący o proporcjonalności momentu napędowego ustroju indukcyjnego do mocy czynnej

$$P_M = k U I \cos \varphi = k P$$

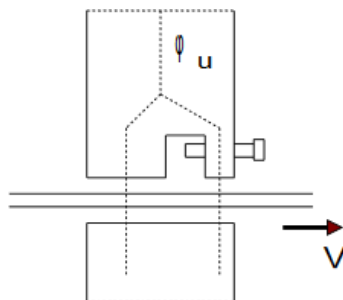
Wykres nie uwzględnia rezystancji uzwojenia napięciowego, strumieni rozproszenia, strat mocy występujących w rdzeniach (na histerezę i prądy wirowe), strat w tarczy licznika itp. W rzeczywistym liczniku przesunięcie fazowe między strumieniem Φ_u a napięciem U jest nieco mniejsze niż 90° , a strumień prądowy jest opóźniony o pewien kąt względem prądu I . Żeby zachować zależność $\psi = (90^\circ - \varphi)$ są stosowane różne metody korelacji przesunięć fazowych w liczniku. Często stosowany sposób korelacji polega na umieszczeniu na rdzeniu prądowym kilku

dodatkowych zwojów N_K obciążonych pętlą z drutu oporowego o rezystancji regulowanej przesuwaną zworą. Rezystancja uzwojenia N_K umożliwia wyregulowanie fazowe licznika.

Moment napędowy jest równoważony momentem hamującym M_h który powstaje w tarczy aluminiowej wirnika na skutek ruchu obrotowego tarczy w polu magnetycznym. W tarczy indukują się prądy proporcjonalne do strumieni magnetycznych przecinających tarczę i do prędkości wirowania. Powstaje moment hamujący proporcjonalny do prędkości wirowania i do kwadratu strumienia magnetycznego.

$$M_h = c \phi^2 \frac{dN}{dt}$$

Główna składowa momentu hamującego pochodzi od strumienia magnesu trwałego, druga składowa pochodzi od strumienia napięciowego a trzecia od strumienia prądowego. Wzrost prądu powoduje szybszy wzrost momentu hamującego niż momentu napędowego (M_h zależy od Φ^2), powstaje więc ujemny błąd pomiaru energii. Powstawaniu tego błędu zapobiega bocznik magnetyczny (B_M) który szybko się nasycza, dzięki czemu strumień magnetyczny prądowy wzrasta szybciej niż prąd. W efekcie następuje korekcja błędu licznika. W licznikach oprócz dwóch głównych momentów: napędowego i hamującego występuje dodatkowo moment tarcia M_t powstający w łożyskach i liczydłach. Błąd licznika wynikający z tarcia ogranicza się przy pomocy momentu kompensującego M_k który jest wytwarzany poprzez rozdzielenie strumienia roboczego Φ_u na dwie składowe. Realizuje się to przez wkręcenie śrubki miedzianej w rdzeń.



Rys. 7. Zasada kontroli momentu kompensującego.

Pomiary z wykorzystaniem elektronicznego miernika mocy realizuje się tak samo, jak pomiary mocy z wykorzystaniem watomierza elektronicznego, z dodatkowo realizowanym całkowaniem mocy w czasie (miernik zawiera moduł pomiaru czasu rzeczywistego).

3. Przebieg ćwiczenia

Uwaga! Na zajęcia proszę przynieść swoje ładowarki do telefonów z wyjściami USB, przewody z kompatybilnymi złączami oraz telefony/ powerbanki/ tablety tak, aby w każdej grupie były trzy urządzenia. Uwaga! Podczas pomiarów niektóre odbiorniki mogą osiągać wysokie temperatury! Zachować szczególną ostrożność!

1. Do listwy przedłużacza podłączyć elektroniczny miernik mocy / energii, a następnie do niego podłączyć ładowarkę telefoniczną, na jej wyjściu miernik mocy USB. W obu miernikach skasować wskazania zmierzonej energii. Odczytać wskazanie poziomu naładowania urządzenia oraz pojemność baterii w urządzeniu. Podłączyć odbiornik (telefon/ powerbank/ tablet). Co 30 sekund zapisywać w tabeli wartości napięcia i prądu ładowania DC, oraz prądu i współczynnika mocy AC. Działanie realizować przez ok. 10 minut. Po zakończeniu odczytać poziom naładowania urządzenia. Odczytać wskazania energii na obu miernikach. Na podstawie notatek obliczyć energię pobraną do naładowania urządzenia z obu mierników. Porównać uzyskane wyniki. Działanie powtórzyć dla pozostałych dwóch urządzeń. Obliczyć koszt pełnego naładowania urządzeń, uwzględniając aktualny koszt kilowatogodziny. Obliczyć ile energii biernej pobierze układ w czasie ładowania i obliczyć jej koszt, przy założeniu że jej cena jest trzykrotnie wyższa od energii czynnej.
2. Do miernika mocy AC podłączyć zasilacz, a do zasilacza podłączyć rezystor z radiatorem. Ustawić maksymalną wartość ograniczenia prądowego na zasilaczu. Dla nastaw napięcia wyjściowego od 0V do 4V z krokiem 0,5V, rejestrować moc pobieraną przez zasilacz oraz prąd płynący przez rezystor. Zanotować zmiany współczynnika mocy w zależności od wartości obciążenia. Ocenić charakter obciążenia. Porównać uzyskane wartości. Obliczyć energię która zostałaby rozproszona przez rezystor w ciągu 60 minut, oraz energię pobraną przez zasilacz. Obliczyć koszt pobranej energii.
3. Przeprowadzić pomiary poboru mocy i współczynnika mocy dla urządzeń przekazanych przez prowadzącego. Na podstawie pomiarów wyznaczyć koszt 24 godzin pracy tego urządzenia, bazując na danych podanych w punkcie 1.
4. Z uzyskanych od prowadzącego przebiegów wyznaczyć charakter obciążenia oraz poziom pobieranej mocy czynnej, biernej, pozornej oraz współczynnika mocy.