

Zespół Szkół Technicznych im. J. i J. niadeckich w Grudzi dzu



Laboratorium Elektryczne . Pracownia Automatyki i
Robotyki (s.48)

Instrukcja Laboratoryjna: Pomiar mocy i współczynnika mocy

Opracował mgr inż. Marcin Jabłoński

3. Poprawa współczynnika mocy i Pomiar mocy odbiorników jednofazowych

Celem ćwiczenia jest poznanie metod pomiaru mocy odbiorników prądu przemiennego jednofazowego oraz metody poprawy współczynnika mocy odbiornika za pomocą kondensatora.

3.1. Wiadomości ogólne

- 3.1.1. Moc chwilowa, moc czynna, bierna, pozorna
- 3.1.2. Poprawa współczynnika mocy
- 3.1.3. Pomiar mocy odbiorników jednofazowych metodami technicznymi
- 3.1.4. Wyznaczanie mocy czynnej za pomocą licznika energii elektrycznej czynnej

3.2. Badania laboratoryjne

- 3.2.1 Pomiar mocy odbiornika jednofazowego
- 3.2.2 Poprawa współczynnika mocy

3.3. Uwagi i wnioski

3.1. Wiadomo ci ogólne

3.1.1. Moc chwilowa, moc czynna, bierna i pozorna

Moc chwilow nazywamy iloczyn warto ci chwilowych napi cia i pr du

$$p = u(t)i(t). \quad (3.1)$$

Je eli napi cie $u(t)$ oraz pr d $i(t)$ s sinusoidalnymi funkcjami czasu, czyli

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_u) \quad (3.2)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_i), \quad (3.3)$$

gdzie ϕ_u i ϕ_i - fazy pocz tkowe odpowiednio napi cia i pr du, to po uwzgl dnieniu równa (3.2) i (3.3), otrzymuje si :

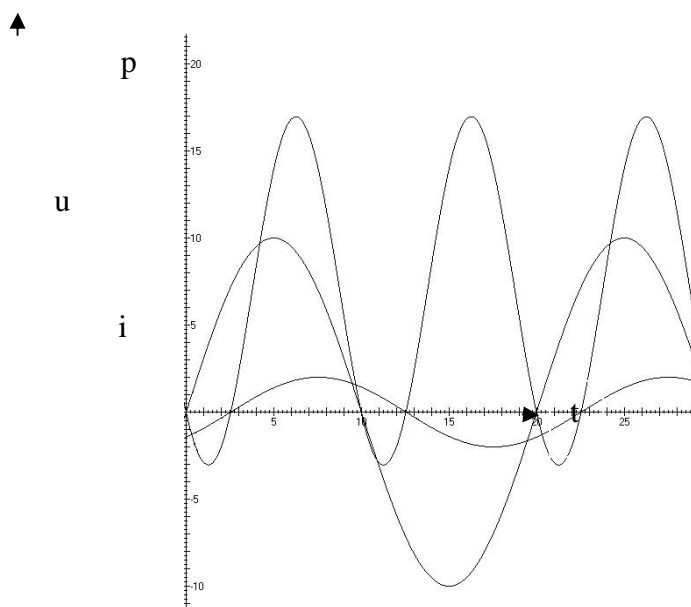
$$\begin{aligned} p &= U_m \sin(\omega t + \phi_u) I_m \sin(\omega t + \phi_i) = \\ &= U_m I_m \frac{1}{2} [\cos(\phi_u - \phi_i) - \cos(2\omega t + \phi_u + \phi_i)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Po uwzgl dnieniu, e

$$U_m = U\sqrt{2} \quad i \quad I_m = I\sqrt{2}$$

oraz po wprowadzeniu k ta przesuni cia fazowego $\phi = \phi_u - \phi_i$ równanie mocy chwilowej przybiera posta :

$$p = UI \cos \phi - UI \cos(2\omega t + \phi_u + \phi_i) \quad (3.5)$$



Rys.3.1. Wykresy napi cia, pr du i mocy chwilowej opisane równaniami (3.2), (3.3) i (3.5)

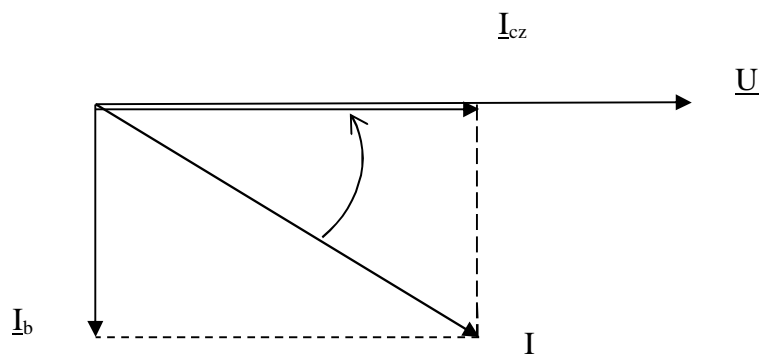
Ze wzoru (3.5) wynika, że moc chwilowa p oscyluje z podwójną pulsacją 2ω wokół stałej wartości mocy równej $UI \cos \varphi$. Moc ta, równa wartości średniej mocy chwilowej obliczonej w okresie T , nazywa się moc czynną P . Tak więc

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi. \quad (3.6)$$

Jednostką mocy czynnej jest 1 W (wat). Energia elektryczna czynna odpowiadająca mocy czynnej jest energią elektryczną, która zostaje zamieniona w odbiornikach w inne rodzaje energii takie jak: ciepła, mechaniczna, chemiczna lub świetlna.

Z wykresu wskazowego przedstawionego na rys.3.2. wynika, że

$$UI \cos \varphi = UI_{\text{cz}} = P \quad (3.7)$$



Rys.3.2. Wykres wskazowy napięcia i prądu opisanych równaniami (3.2) i (3.3)

gdzie I_{cz}^* - składowa czynna prądu.

Drugą ze składowych prądu to składowa bierna I_b^* - odpowiada ona mocy biernej Q , którą oblicza się ze wzoru:

$$UI \sin \phi = UI_b = Q \quad (3.8)$$

Jednostką mocy biernej jest 1var (war). W odróżnieniu od energii czynnej, energia bierna nie jest rozpraszana w odbiorniku. Odpowiadająca jej moc bierna przepływa w układzie źródło-odbiornik powodując dodatkowe obciążenie linii zasilających. Jest ona potrzebna do wytworzenia np. zmiennego pola magnetycznego w transformatorach, silnikach elektrycznych, itp.

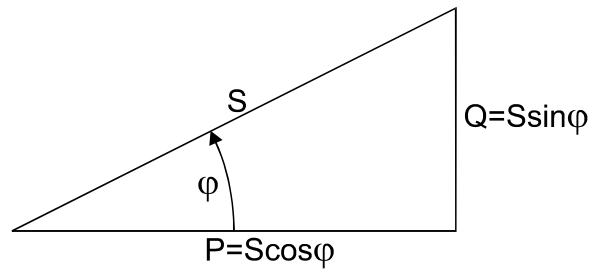
Moc pozorną S nazywa się iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.9)$$

Jednostką mocy pozornej jest 1 VA (woltamper).

Na podstawie zależności (3.6), (3.8) i (3.9) można zauważyć, że wielkości P , Q i S są bokami trójkąta prostokątnego o kącie ostrym ϕ . Nazwano go trójkątem mocy (rys.3.3).

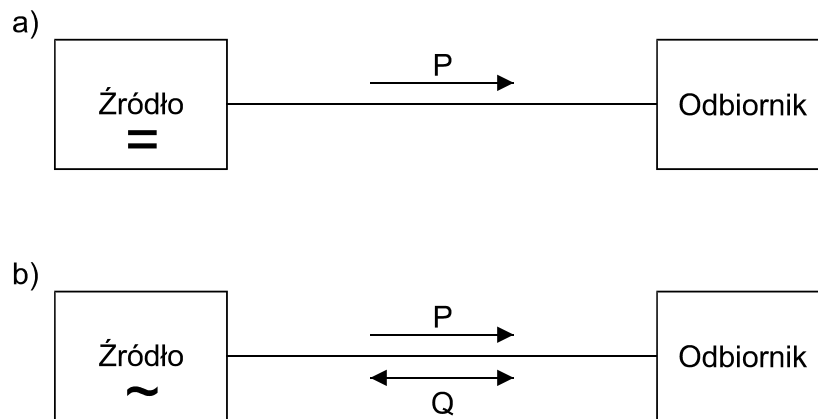
* Składowe: czynna i bierna prądu są wielkościami w ogólnym przypadku czysto matematycznymi, wynikającymi z rozkładu wektora I na dwie składowe. Nie należy więc ich kojarzyć z określonymi wartościami prądu występującymi w układzie.



Rys.3.3. Trójkąt mocy

3.1.2. Poprawa współczynnika mocy

Bilans energetyczny w przypadku odbiornika prądu przemiennego jest bardziej skomplikowany niż w przypadku odbiornika prądu stałego.



Rys.3.4. Schematyczne przedstawienie przepływu mocy w układzie źródło-odbiornik:

a) sieć prądu stałego; źródło: akumulator, odbiornik: dioda

b) sieć prądu przemiennego; źródło: generator

Dla odbiornika prądu stałego bilans dotyczy tylko mocy czynnej P . Sytuacja przedstawiona na rys.3.4a. Odbiorniki prądu przemiennego w praktyce mają charakter rezystancyjno-indukcyjny i dlatego (rys. 3.4b) źródło (generator) musi dysponować oprócz mocy czynnej, również mocą bierną indukcyjną. Wzajemna

relacja między wartościami P i Q odbiornika, zależy od $\cos\varphi$ odbiornika zwanego współczynnikiem mocy, **gdzie jest k tem przesuni cia fazowego napi cia i pr du odbiornika**, przy czym (rys.3.3)

$$P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi \quad (3.10)$$

Warto skuteczna pr du pobieranego przez odbiornik o mocy czynnej P może być obliczona ze wzoru

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \quad (3.11)$$

Mniejsza wartość $\cos\varphi$, której odpowiada większa wartość Q przy $P=\text{const}$ powoduje większą wartość pr du, a tym samym **wzrost strat mocy ΔP oraz spadku napi cia ΔU w linii przesyłowej**, bowiem obowiązuje zależność

$$\Delta P = I^2 R_p \quad \Delta U \cong I Z_p, \quad (3.12)$$

gdzie R_p, Z_p - rezystancja i impedancja linii przesyłowej.

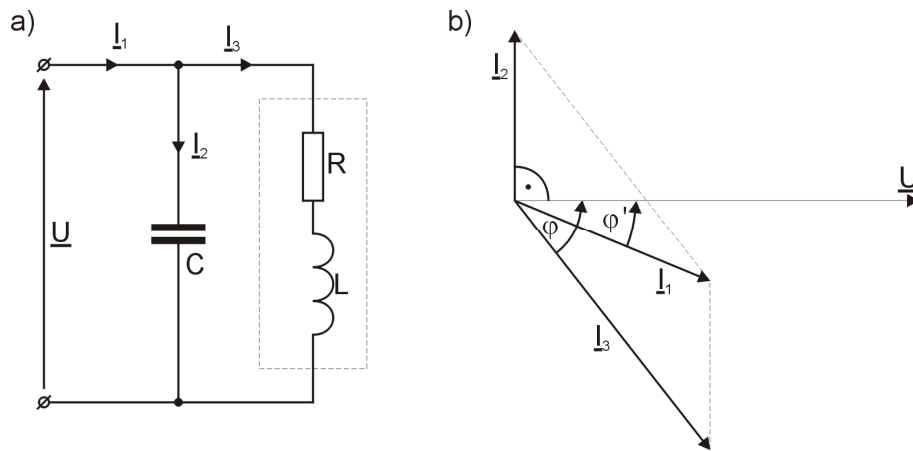
Małe wartości współczynnika mocy charakteryzują się te odbiorniki, których zasada działania wymaga wytworzenia pola magnetycznego. Odzwierciedleniem tego faktu jest odpowiednio duży przepływ mocy biernej indukcyjnej. Do głównych urządzeń elektrycznych pobierających oprócz mocy czynnej także moc bierną indukcyjną zaliczają się silniki asynchroniczne oraz transformatory. Współczynnik mocy silników indukcyjnych w warunkach znamionowych waha się w granicach 0,8...0,97, przy mniejszych obciążeniach maleje, a podczas biegu jałowego osiąga wartość poniżej 0,3.

Poprawa współczynnika mocy (kompensacja mocy biernej indukcyjnej - zmniejszenie wartości Q) polega na zastosowaniu sposobów naturalnych lub specjalnych.

Do naturalnych sposobów należą:

1. prawidłowy dobór mocy silników - zastosowanie silnika asynchronicznego o zbyt dużej mocy w stosunku do istniejących potrzeb zmniejsza $\cos\varphi$, gdy moc czynna pobierana przez silnik nie dostosowany do obciążenia mechanicznego jest w przybliżeniu taka sama jak dla silnika o mniejszej mocy (przy takim samym zapotrzebowaniu na moc mechaniczną) - większa jest natomiast moc bierna,
2. unikanie stanu jałowego silników i transformatorów, gdyż w tym przypadku $\cos\varphi$ ma bardzo małe wartości.

Do specjalnych sposobów poprawy $\cos\phi$ (kompensacji mocy biernej) zaliczamy włączanie równolegle do odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym kondensatora kompensującego czy ciwo moc biern indukcyjn odbiornika.



Rys.3.5. Poprawa $\cos\phi$: a) schemat poŁcze ; b) wykres wskazowy

Z wykresu wskazowego przedstawionego na rys. 3.5b wynika, e warto skuteczna pr du w sieci I_1 po wŁczeniu kondensatora jest mniejsza ni warto skuteczna pr du przed wŁczeniem kondensatora (I_3).

Uwaga: warto pr du odbiornika I_3 a tym samym moc pobierana przez odbiornik pozostaje niezmiennona.

Jednocze nie jest speŁiony warunek

$$\cos\phi' > \cos\phi \quad (3.13)$$

Przy niezminionej mocy czynnej odbiornika jednofazowego ($UI_1 \cos\phi' = UI_3 \cos\phi$), pojemno kondensatora jaki nale y wŁczy , eby „poprawi ” wspóŁczynnik mocy do warto ci $\cos\phi'$, wynosi

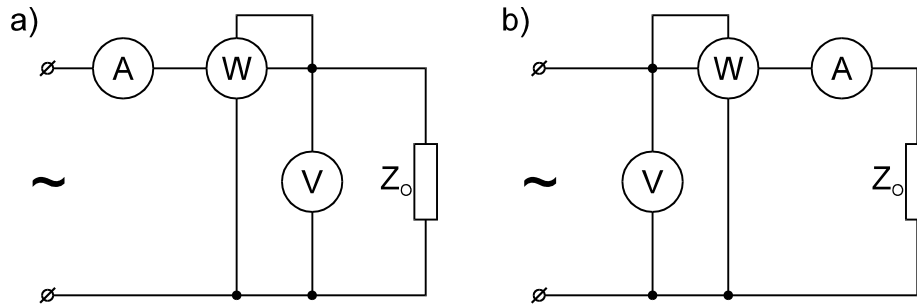
$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\text{tg}\phi - \text{tg}\phi') \quad (3.14)$$

Taki sposób kompensacji nosi nazw kompensacji indywidualnej (dla pojedynczego odbiornika). Kompensacji mocy biernej za pomoc kondensatorów mo na te dokonywa dla grupy odbiorników (zespoŁ kondensatorów w

rozdzielniach elektroenergetycznych), a także centralnie w głównych stacjach zasilania systemu elektroenergetycznego.

3.1.3. Pomiar mocy odbiorników jednofazowych metodą techniczną

Pomiar ten przeprowadza się za pomocą watomierza, woltomierza i amperomierza w układzie jak na rys.3.6a lub 3.6b.



Rys.3.6. Schemat układu do pomiaru mocy przy jednofazowego:
a) układ dla odbiorników o małej impedancji Z_0 ;
b) układ dla odbiorników o dużej impedancji Z_0

W układzie jak na rys.3.6a zmierzona za pomocą watomierza moc czynna jest większa od mocy czynnej odbiornika o moc wydzielaną w obwodzie napięciowym watomierza

$$P_w = P + \frac{U_v^2}{R_{wn}} + \frac{U_v^2}{R_v} \quad (3.15)$$

przy czym R_{wn} , R_v - rezystancja odpowiednio obwodu napięciowego watomierza i woltomierza, Z_0 - impedancja odbiornika.

W układzie jak na rys. 3.6b zmierzona za pomocą watomierza moc czynna jest większa od mocy czynnej odbiornika o moc wydzielaną w obwodzie prądowym watomierza i w amperomierzu.

$$P_w = P + I_a^2 R_{wi} + I_a^2 R_a \quad (3.16)$$

przy czym R_{wi} , R_a - rezystancja odpowiednio obwodu prądowego watomierza i amperomierza, Z_0 - impedancja odbiornika.

Wybór określonego układu musi być dokonany tak, aby zminimalizować dodatkowe moce mierzone, i tak układ a) powinien być stosowany przy małych, a układ b) przy dużych impedancjach odbiornika.

Moc czynną mierzoną za pomocą watomierza wyznacza się ze wzoru

$$P_w = k_w \alpha \quad (3.17)$$

gdzie k_w - stała watomierza [W/dz], α - liczba działek odpowiadająca wychyleniu wskazówki miernika.

Stała watomierza wyznacza się następująco

$$k_w = \frac{U_{zn} I_{zn} \cos \varphi_{zn}}{\alpha_{zn}} \quad (3.18)$$

gdzie U_{zn} , I_{zn} - znamionowa wartość odpowiednio napięcia i prądu zakresów watomierza,

$\cos \varphi_{zn}$ - znamionowy współczynnik mocy watomierza (jeżeli nie jest podany tzn., to $\cos \varphi_{zn}=1$), α_{zn} - znamionowa liczba działek skali watomierza.

W celu uniknięcia przecięcia obwodu napięciowego lub prądowego watomierza razem z nim włącza się zawsze woltomierz i amperomierz.

Na podstawie wskazań woltomierza i amperomierza można wyznaczyć moc pozorną odbiornika

$$S = U_v I_a \quad (3.19)$$

oraz moc bierną

$$Q = \sqrt{S^2 - P_w^2} \quad (3.20)$$

3.1.4. Wyznaczanie mocy czynnej za pomocą indukcyjnego licznika energii elektrycznej czynnej

Dla licznika energii czynnej liczba obrotów jego tarczy jest proporcjonalna do energii czynnej A odbiornika. Jeżeli zmierzymy czas Δt pewnej liczby obrotów N to energia czynna może być obliczona ze wzoru

$$A = \frac{N}{c_L} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ [J]} \quad (3.21)$$

gdzie c_L - stała licznika $\left[\frac{\text{obr}}{\text{kWh}} \right]$

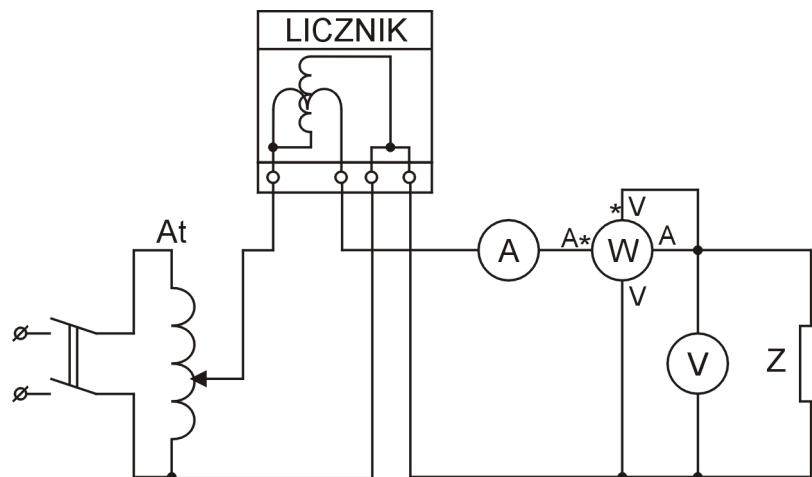
Moc czynną odbiornika określa natomiast wzór

$$P = \frac{A}{\Delta t} = \frac{N}{c_L \Delta t} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ [W]} \quad (3.22)$$

3.2. Badania laboratoryjne

3.2.1. Pomiar mocy odbiornika jednofazowego

Należy dokonać pomiaru mocy czynnej odbiornika jednofazowego za pomocą licznika energii elektrycznej czynnej i watomierza stosując układ z rys.3.7.



Rys. 3.7. Układ do pomiaru mocy czynnej odbiornika jednofazowego
At - autotransformator, A - amperomierz, W - watomierz, V - woltomierz

Pomiary przeprowadzi dla różnych odbiorników. Wyniki pomiarów i obliczenia zestawisz w tabeli 3.1.

Podaj przykład obliczenia według wzoru 3.22:

Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń narysować wykres wskazowy prądów i napięć dla każdego rodzaju odbiornika.

Tabela 2. 3.1.

Odbior- nik	U _v	I _a	P _L			P _w			S	Q	cosφ	φ
			N	Δt	P _L	α	k _w	P _w				
	V	A	-	s	W	dz	W/dz	W	VA	var	-	deg
R												
R												
L												
C												
RL												

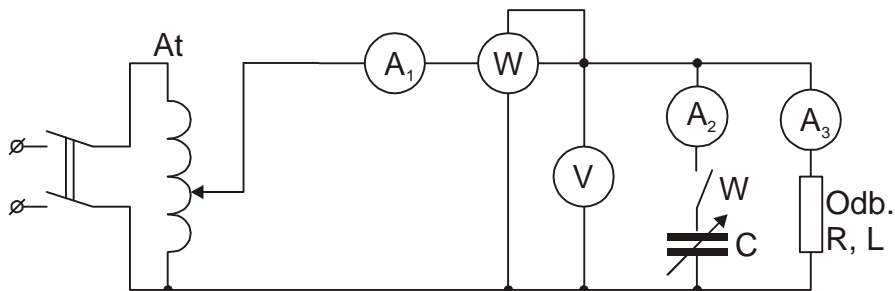
3.2.2. Poprawa współczynnika mocy

Przeprowadzi pomiary napięcia, prądów i mocy bez kondensatora i z załączonym kondensatorem w układzie przedstawionym na rys. 3.8.

Pomiary wykonaj przy otwartym oraz przy zamkniętym wyłączniku dla różnych wartości pojemności kondensatora. Wyniki pomiarów i obliczenia zestaw w tabeli 3.2. Poda przykłady obliczeń według poniższych zależności:

$$\cos \phi = \frac{P_w}{U_v I_3}, \quad \cos \phi' = \frac{P_w}{U_v I_1}$$

$$C = \frac{I_2}{2\pi f U_v} \quad \text{lub} \quad C = \frac{P_w}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \phi')$$



Rys. 3.8. Układ do poprawy współczynnika mocy

A₁, A₂, A₃ - amperomierze, V - woltomierz, W - watomierz,
C - kondensator, Odb. R, L - odbiornik

Na podstawie wyników pomiarów i obliczenia wykonaj wykres wskazowy prądów i napięcia dla każdego badanego układu.

Uwaga: odbiornik R, L to połączenie szeregowe elementów R i L.

Tabela 3.2

Lp.	U _v	I ₁	I ₂	I ₃	P _w			cosφ	cosφ ₀	φ	φ ₀	C
					α	k _w	P _w					
	V	A	A	A	dz	W/dz	W	-	-	deg	deg	μF
1												
2												
3												
4												
5												

3.3. Uwagi i wnioski

Na podstawie materiału teoretycznego oraz wyników pomiarów i obliczeń należy:

- dla p. 3.2.1 porównać wyniki pomiarów mocy uzyskane za pomocą licznika energii elektrycznej, i watomierza oraz uzasadnić ewentualne różnice w wynikach pomiarów
- dla p. 3.2.2 porównać wyniki rozważań teoretycznych z wynikami pomiaru, wykazać zwiększenie wartości skutecznej prądu sieci przy „przekompensowaniu” (zbyt duża wartość C).

Pytania kontrolne:

- Moce w obwodach prądu przemiennego. Podać ich interpretację fizyczną i jednostki.
- Uzasadnić konieczność poprawy współczynnika mocy.
- Wyprowadzić wzór (3.14).
- Omówić sposób pomiaru mocy P, Q, S.

Literatura

- [1] J. Leszczyński, Z. Piotrowski, Laboratorium elektrotechniki ogólnej, / ód 1971.
- [2] Praca zbiorowa, Laboratorium elektrotechniki i elektroniki, PWN, Warszawa 1976.
- [3] Praca zbiorowa, Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków, WNT, Warszawa 1978.
- [4] Praca zbiorowa, Laboratorium metrologii [elektrycznej elektronicznej](#), Gliwice, 1983.

[5] Nowicz R. i in.: Laboratorium elektrotechniki. Skrypt wydany przez Katedr Elektrotechniki Ogólnej i Przekładników Politechniki/ódzkiej, 1993.