

3. Poprawa współczynnika mocy. 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 metodą techniczną
- 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. Wiadomości ogólne

3.1.1. Moc chwilowa, moc czynna, bierna i pozorna

Mocą chwilową nazywamy iloczyn wartości chwilowych napięcia i prądu

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

Jeżeli napięcie $u(t)$ oraz prąd $i(t)$ są sinusoidalnymi funkcjami czasu, czyli

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

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

gdzie φ_u i φ_i - fazy początkowe odpowiednio napięcia i prądu, to po uwzględnieniu równań (3.2) i (3.3), otrzymuje się:

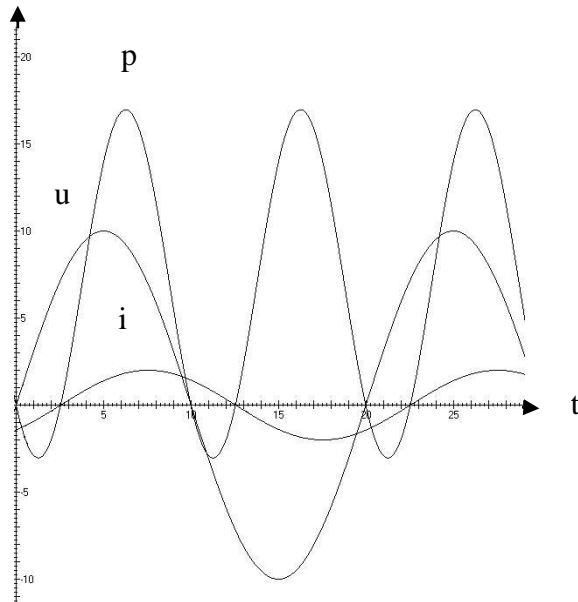
$$\begin{aligned} p &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u) I_m \sin(\omega t + \varphi_i) = \\ &= U_m I_m \frac{1}{2} [\cos(\varphi_u - \varphi_i) - \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Po uwzględnieniu, że

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

oraz po wprowadzeniu kąta przesunięcia fazowego $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ równanie mocy chwilowej przybiera postać:

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i) \quad (3.5)$$



Rys.3.1. Wykresy napięcia, prądu i mocy chwilowej opisane równaniami (3.2), (3.3) i (3.5)

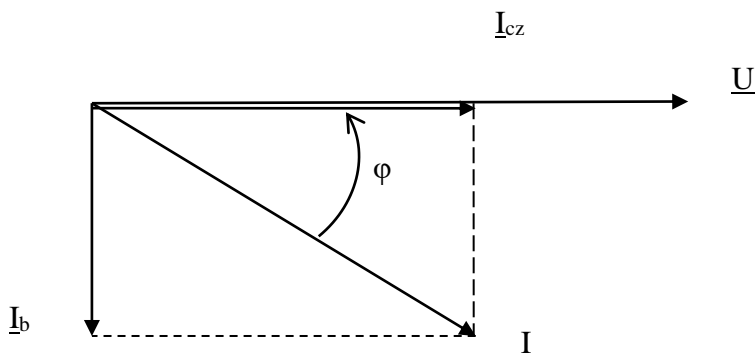
Ze wzoru (3.5) wynika, że moc chwilowa p oscyluje z podwójną pulsacją 2ω wokół stałej wartości mocy równej $UI \cos \varphi$. Moc ta, równa wartości średniej mocy chwilowej obliczonej w okresie T , nazywa się mocą czynną P . Tak więc

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

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

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



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 zasilającej. Jest ona potrzebna do wytworzenia np. zmiennego pola magnetycznego w transformatorach, silnikach elektrycznych, itp.

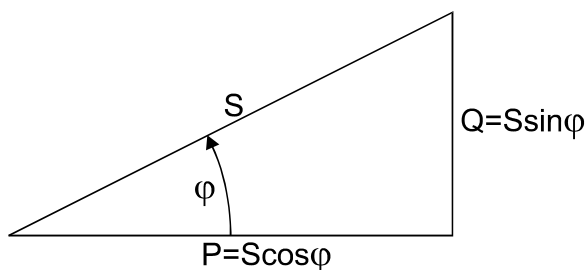
Mocą pozorną S nazywa się iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu

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

Jednostką mocy pozornej jest 1 VA (voltamper).

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).

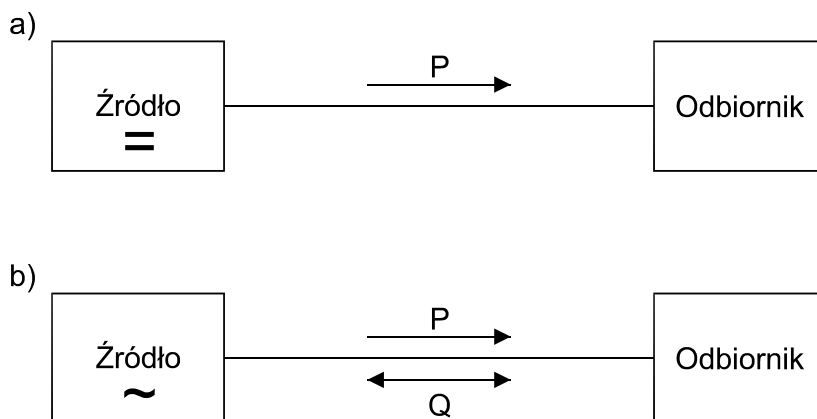
* Składowe: czynna i bierna prądu są wielkościami w ogólnym przypadku czysto matematycznymi, wynikającymi z rozkładu wektora I na dwie składowe. Nie należy więc ich kojarzyć z określonymi wartościami prądu występującymi w układzie.



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, prądnica
 b) sieć prądu przemiennego; źródło: generator

Dla odbiornika prądu stałego bilans dotyczy tylko mocy czynnej P . Sytuację tę przedstawiono 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 φ jest kątem przesunięcia fazowego napięcia i prądu odbiornika**, przy czym (rys.3.3)

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

Wartość skuteczna prądu 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 więc większą wartość prądu, a tym samym **wzrost strat mocy ΔP oraz spadku napięcia ΔU w linii przesyłowej**, bowiem obowiązują zależności

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

gdzie R_p, Z_p - rezystancja i impedancja linii przesyłowej.

Małą wartością 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 zalicza 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.

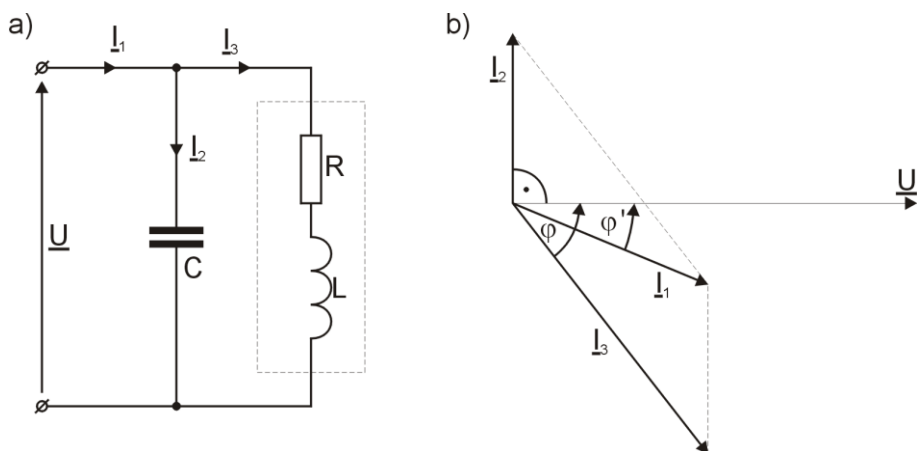
Poprawa współczynnika mocy (kompensacja mocy biernej indukcyjnej - zmniejszenie wartości Q) polega na zastosowaniu sposobów naturalnych lub specjalnych.

Do naturalnych sposobów należą:

1. prawidłowy dobór mocy silników - zastosowanie silnika asynchronicznego o zbyt dużej mocy w stosunku do istniejących potrzeb zmniejsza $\cos \varphi$, gdyż 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 małą wartość.

Do specjalnych sposobów poprawy $\cos \varphi$ (kompensacji mocy biernej) zaliczamy włączanie równoległe do odbiornika o charakterze rezystancyjno-

indukcyjnym kondensatora kompensującego częściowo moc bierną indukcyjną odbiornika.



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

Z wykresu wskazowego przedstawionego na rys. 3.5b wynika, że wartość skuteczna prądu w sieci I_1 po włączeniu kondensatora jest mniejsza niż wartość skuteczna prądu przed włączeniem kondensatora (I_3).

Uwaga: wartość prądu odbiornika I_3 a tym samym moc pobierana przez odbiornik pozostaje niezmiennona.

Jednocześnie jest spełniony warunek

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

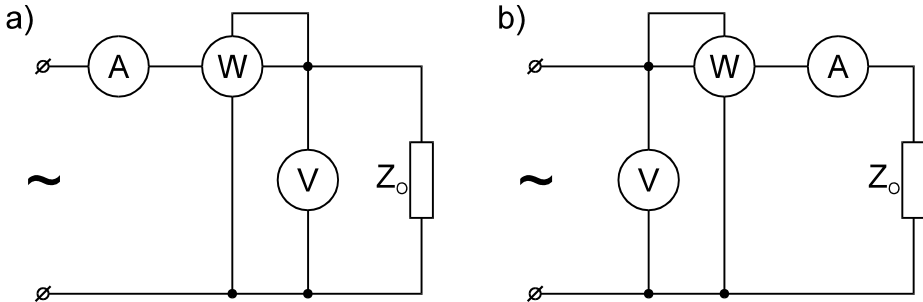
Przy niezmięnionej mocy czynnej odbiornika jednofazowego ($UI_1 \cos\phi' = UI_3 \cos\phi$), pojemność kondensatora jaki należy włączyć, żeby „poprawić” współczynnik mocy do wartości $\cos\phi'$, wynosi

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

Taki sposób kompensacji nosi nazwę kompensacji indywidualnej (dla pojedynczego odbiornika). Kompensacji mocy biernej za pomocą kondensatorów można też dokonywać dla grupy odbiorników (zespoły 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 prądu 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 woltomierzu i 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, zaś 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.

Stałą 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., że $\cos \varphi_{zn}=1$), α_{zn} - znamionowa liczba działek skali watomierza.

W celu uniknięcia przeciążenia 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 $\left[\frac{\text{obr}}{\text{kWh}} \right]$

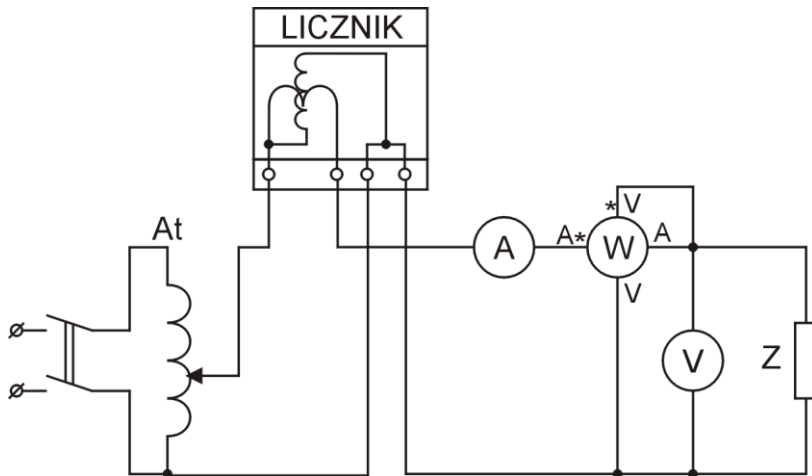
Moc czynną odbiornika określa natomiast wzór

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

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 przeprowadzić dla różnych odbiorników. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 3.1.

Podać przykłady obliczeń 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												

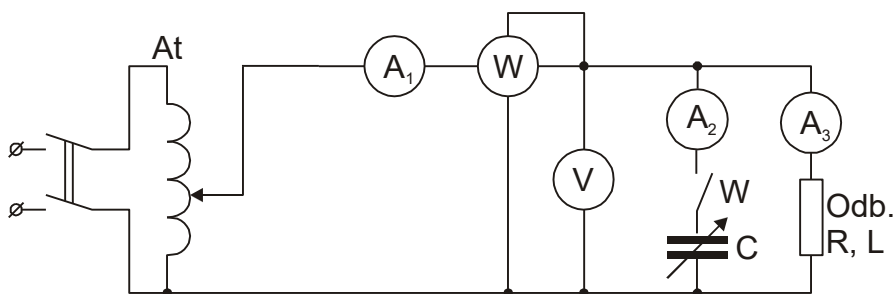
3.2.2. Poprawa współczynnika mocy

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

Pomiary wykonać przy otwartym oraz przy zamkniętym wyłączniku dla różnych wartości pojemności kondensatora. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawzić w tabeli 3.2. Podać 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 obliczeń wykonać wykres wskazowy prądów i napięć 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'	φ	φ'	C
	V	A	A	A	α	k _w	P _w	-	-	deg	deg	μF
					dz	W/dz	W					
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, Łódź 1971.
- [2] Praca zbiorowa, Laboratorium elektrotechniki i elektroniki, PWN, Warszawa 1976.
- [3] Praca zbiorowa, Elektrotechnika i elektronika dla nie elektryków, WNT, Warszawa 1978.
- [4] Praca zbiorowa, Laboratorium metrologii [elektrycznej elektronicznej](#), Gliwice, 1983.
- [5] Nowicz R. i in.: Laboratorium elektrotechniki. Skrypt wydany przez Katedrę Elektrotechniki Ogólnej i Przekładników Politechniki Łódzkiej, 1993.