Uniwersytet Wrocławski

Wydział Fizyki i Astronomii
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9
50-204 Wrocław
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65
fax +48 71 328 73 65
e-mail: sekr@ifd.uni.wroc.pl
www.ifd.uni.wroc.pl

Elektrotechnika elektronika miernictwo

Franciszek Gołek (golek@ifd.uni.wroc.pl)

www.pe.ifd.uni.wroc.pl

Wykład 4.

Energia elektryczna

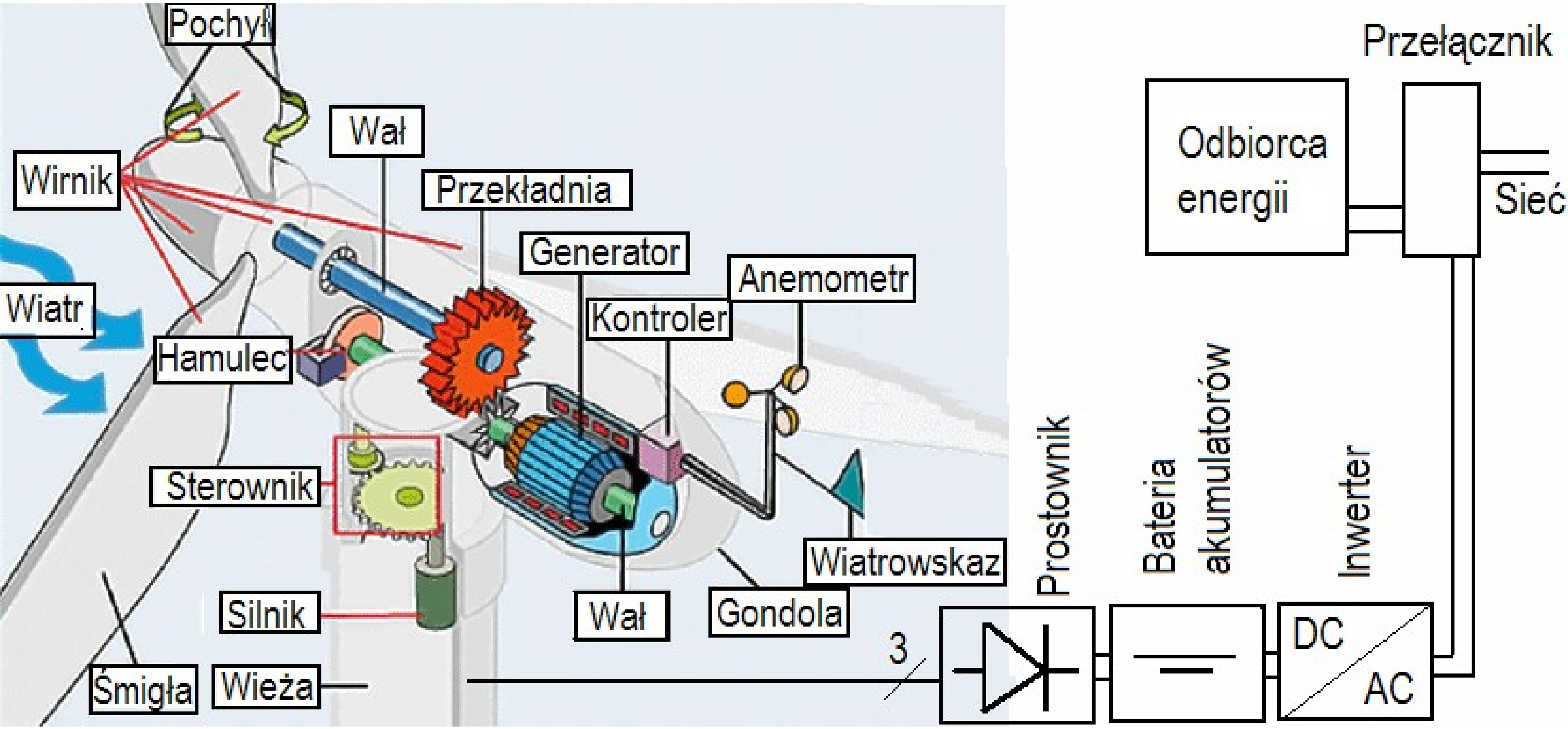
W energetyce krajowej jak i międzynarodowej powszechnie zamienia się rozmaite zasoby energii na energię elektryczną. Przewaga energii elektrycznej nad innymi formami energii polega na łatwości i ekonomiczności jej transportu na znaczne odległości.

Zamieniane na energię elektryczną są różne zasoby: paliwa jak węgiel czy ropa naftowa, paliwa jądrowe, energia rzek i wiatrów, bieżąca energia słoneczna. Energia paliw zamieniana jest najpierw na energię mechaniczną z wydajnością 30 – 40% (jest to wymuszanie wirowania turbin sprzężonych z generatorami) a następnie na elektryczną z wydajnością bliską 100%.

Elektrownie wiatrowe.

Przy średnicy wirnika turbiny wiatrowej około 50 m jedna siłownia wiatrowa może dać do około 1 MW mocy zależnie od obecności i natężenia wiatrów.

Takie siłownie mogą zaspakajać potrzeby lokalne w regionach o większym natężeniu wiatrów (np. nad Bałtykiem).

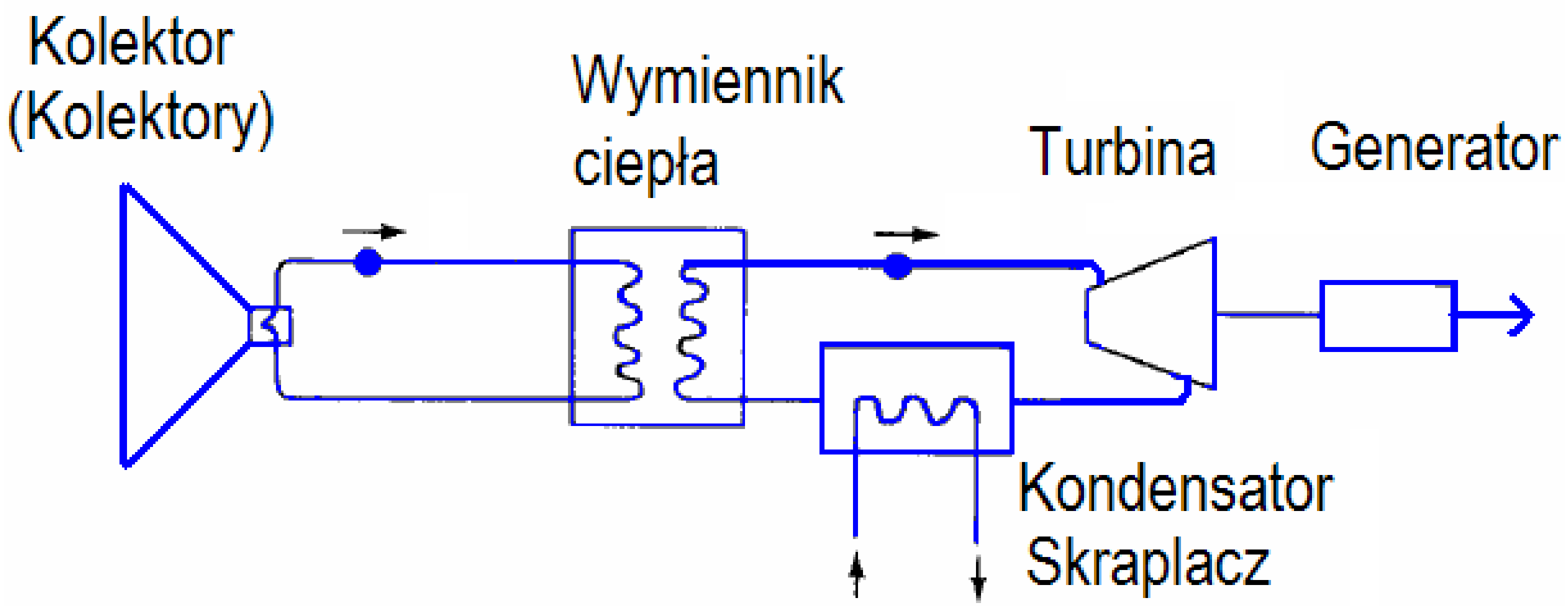


Uproszczony schemat elektrowni wiatrowej.

Elektrownia słoneczna

Wykorzystuje energię (bieżącą) promieniowania słonecznego poprzez **konwersję fotowoltaiczną, konwersję fotochemiczną lub fototermiczną**.

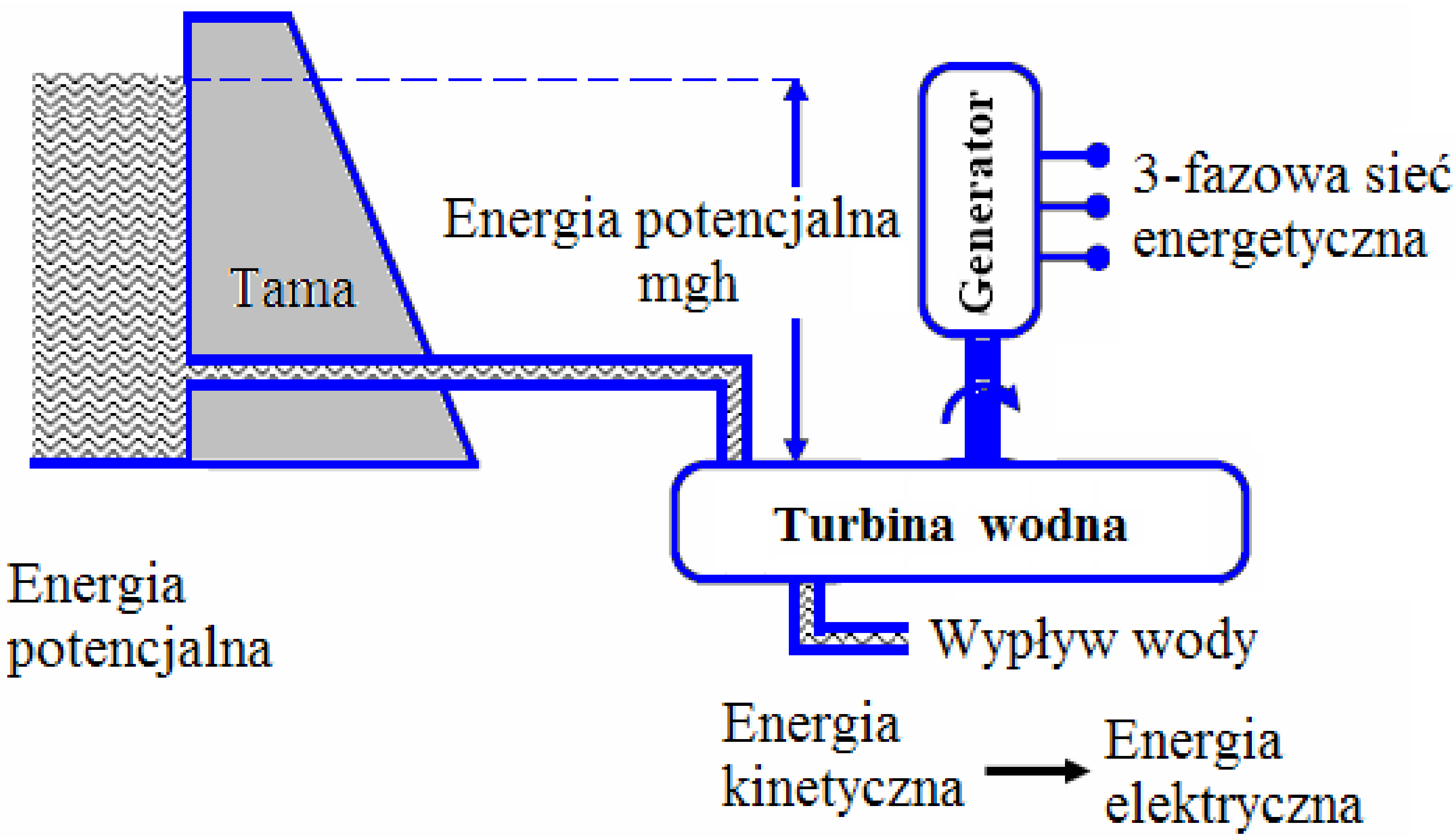
Przed wejściem do atmosfery moc promieniowania wynosi około 1400 W na metr kwadratowy prostopadły do promieni słonecznych z czego około 1000W/m^2 dociera do powierzchni Ziemi. Średnie roczne nasłonecznienie zależy od szerokości geograficznej i od pogody. W Polsce nasłonecznienie to wynosi około 1100 kWhm^{-2}rok^{-1}.



Generator foto-termoelektryczny

Elektrownie wodne

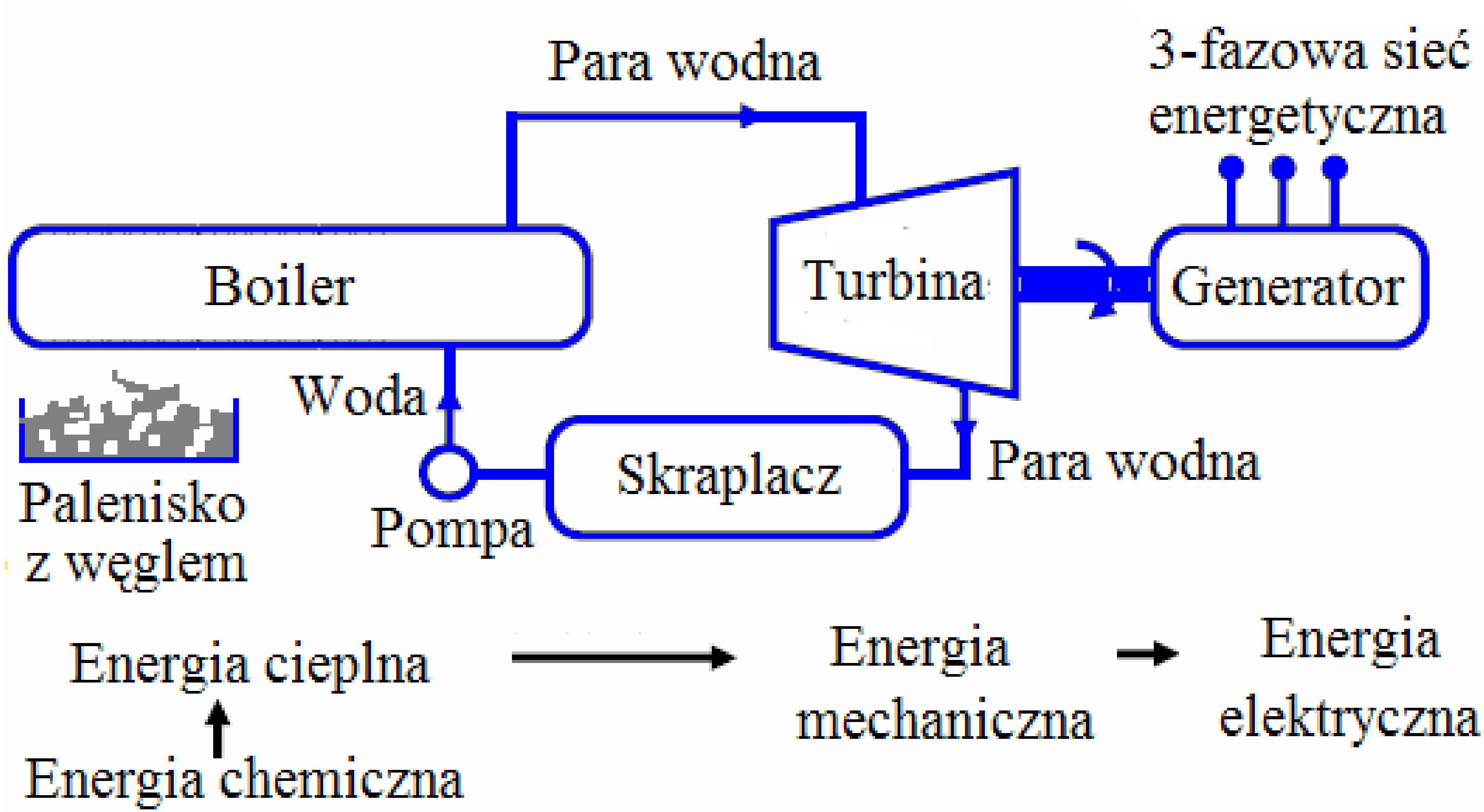
Elektrownie wodne dostarczają około 20% światowej energii elektrycznej. Elektrownie wodne dzielą się na przepływowe i szczytowo-pompowe, które służą tylko do magazynowania energii wyprodukowanej w inny sposób.



Uproszczony schemat hydroelektrowni

Elektrownie cieplne

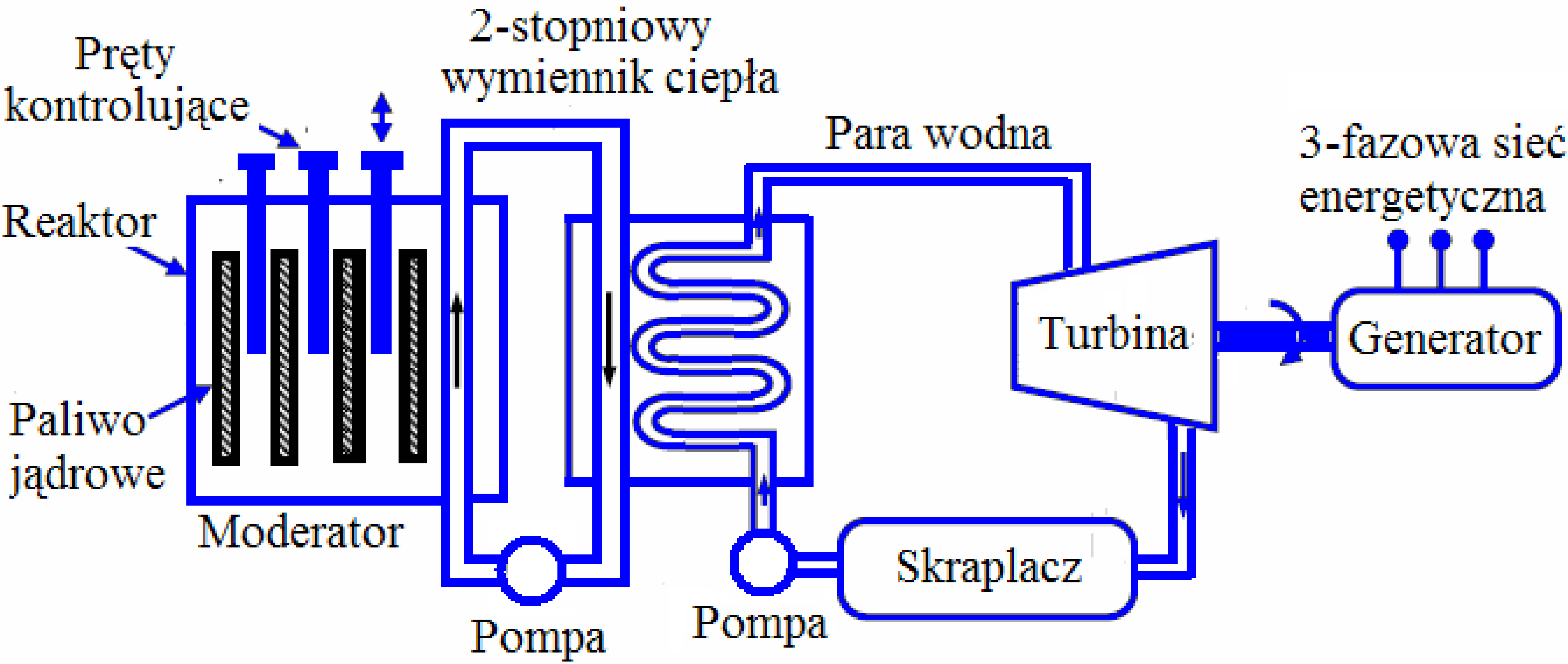
Elektrownie cieplne dzielimy na konwencjonalne i jądrowe. W tych elektrowniach paliwo jądrowe lub konwencjonalne jest źródłem energii cieplnej, która służy do odparowania wody i przegrzania pary wodnej. Para wodna porusza turbinę, która z kolei napędza generator energii elektrycznej.



Uproszczony schemat elektrowni węglowej

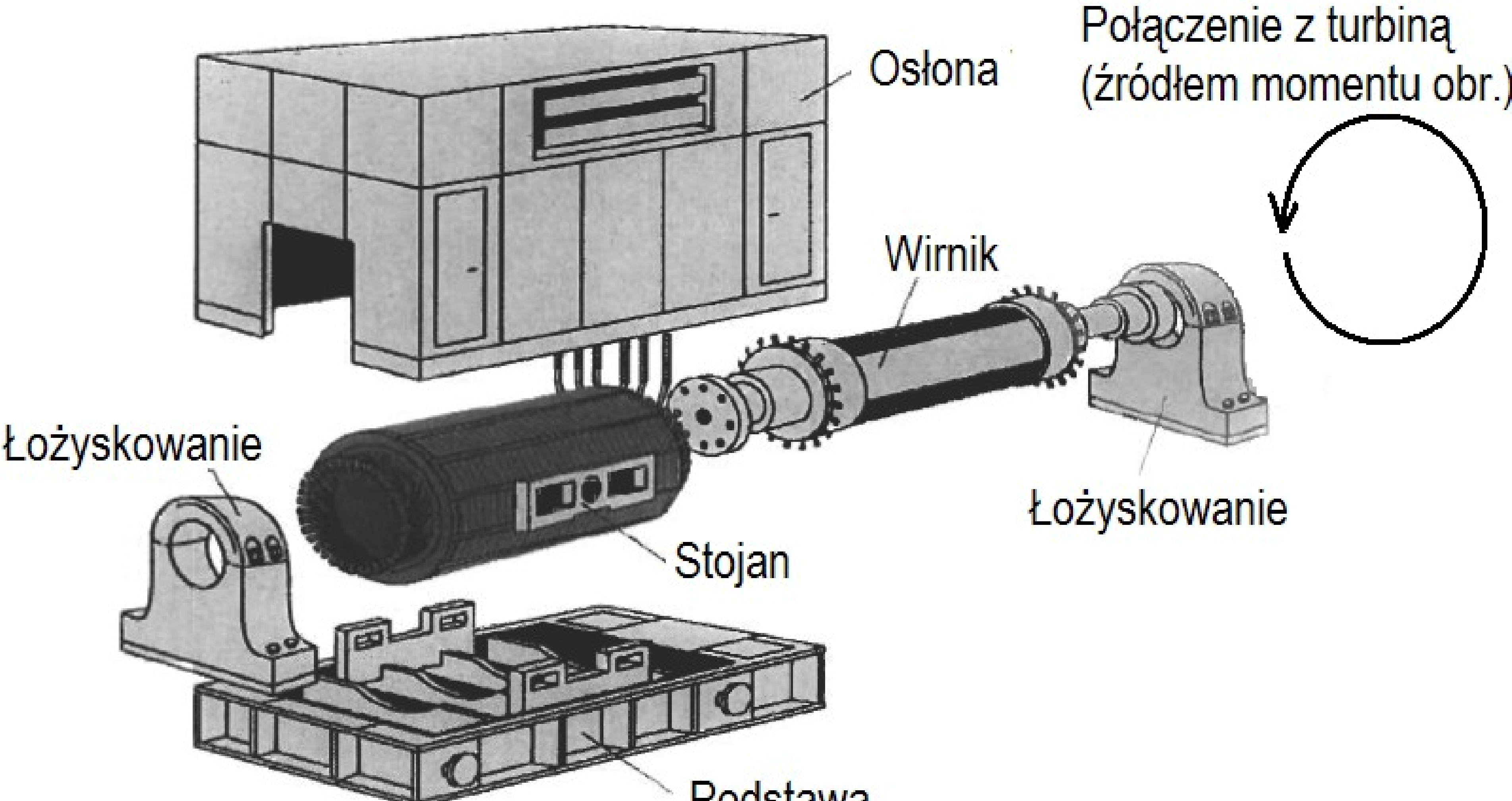
Elektrownie cieplne jądrowe

Elektrownie jądrowe wykorzystują energię pochodzącą z rozszczepienia jąder atomów (uranu naturalnego lub wzbogaconego w izotop U235) do odparowania wody i przegrzania pary wodnej. Para wodna porusza turbinę, która z kolei napędza generator energii elektrycznej.

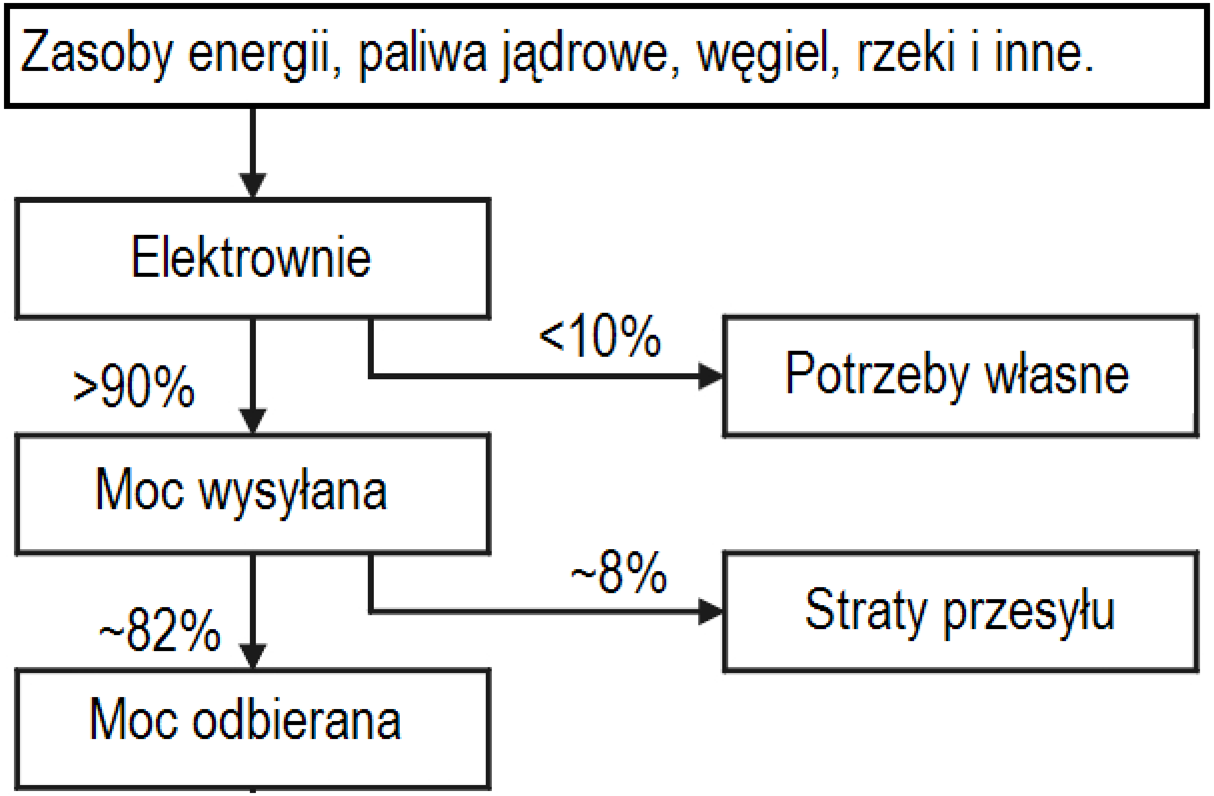


Uproszczony schemat elektrowni atomowej

Konstrukcja generatora



Energetyka



W obwodach prądu sinusoidalnego wyróżniamy:

1. Moc czynna $P = UI\cos\varphi$ [W], φ - różnica faz między U i I,
2. Moc bierna $Q = UI\sin\varphi$ [war] lub [var] lub [VAR],
3. Moc zespolona $\mathbf{S} = \mathbf{UI}^* = S\cos\varphi$ W $+ jS\sin\varphi$ war.
4. Moc pozorna $S = |\mathbf{S}| = UI$ [VA],
5. Współczynnik mocy: $\cos\varphi$ (jest idealny gdy $\cos\varphi = 1$)

U oraz I - wartości skuteczne! **U** oraz **I** - wartości skuteczne zespolone!

Przypomnienie.

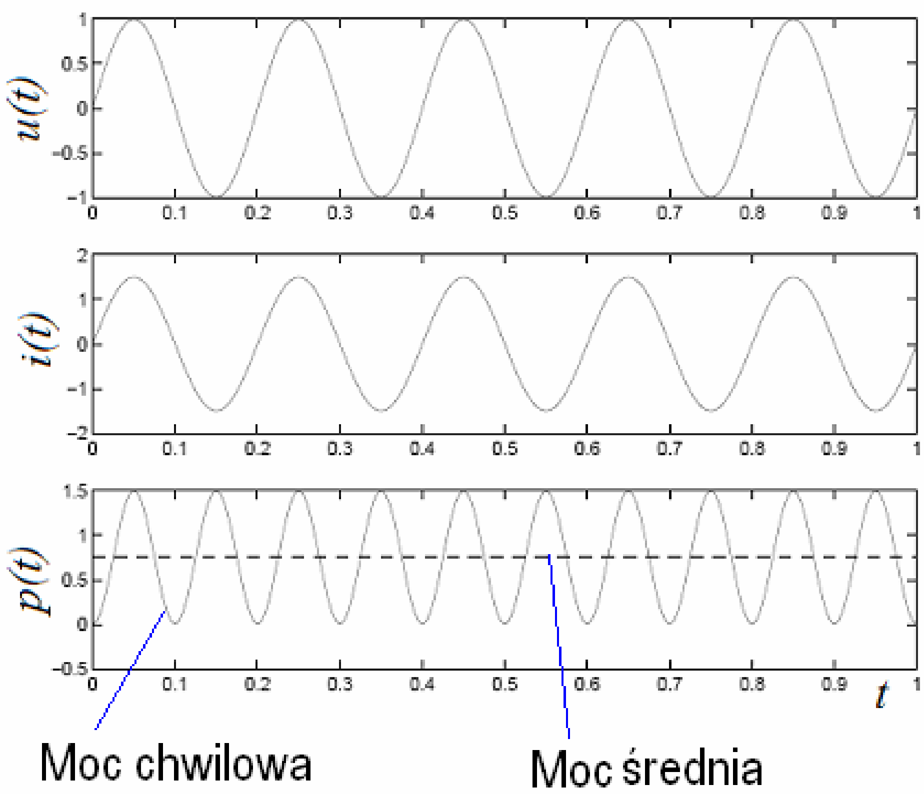
Co to jest **Wartość skuteczna?** (ang. **RMS** = root mean square).

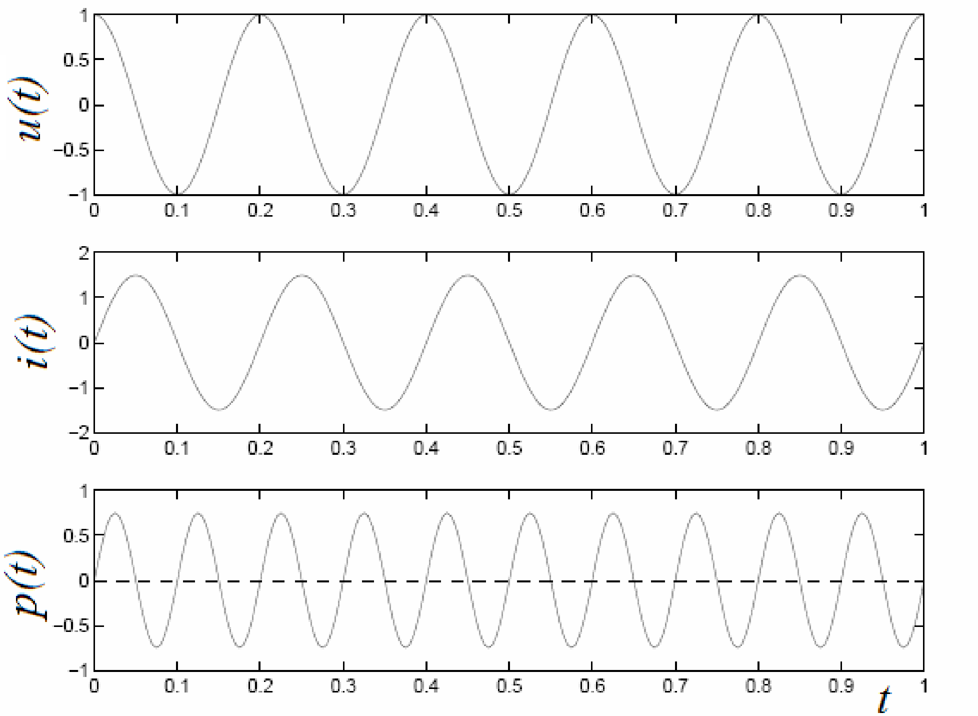
„Wartość skuteczna to taka wartość stała, która może zapewnić taki skutek jak dana wartość zmienna.” Wartości skuteczne periodycznych napięć i prądów zdefiniowane są jako:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2\,dt}{T}} \qquad I_{sk} = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2\,dt}{T}}$$

U_{sk} (danego U) to taka wartość, że napięcie stałe o tej wartości, w czasie T, n•T (T = okres przebiegu) lub w bardzo długim, wporównaniu do okresu, czasie zapewnia identyczny skutek energetyczny jak samo U – czyli identyczną ilość energii w odbiorniku: $\Sigma_{\Delta Ti}\, \Delta T_i\, [U(t_i)]^2/R = T(U_{sk})^2/R$. To samo dotyczy I_{sk}. I_{sk} oraz samo I skutkują tą samą ilością energii w czasie T, n•T lub bardzo długim okresie czasu.

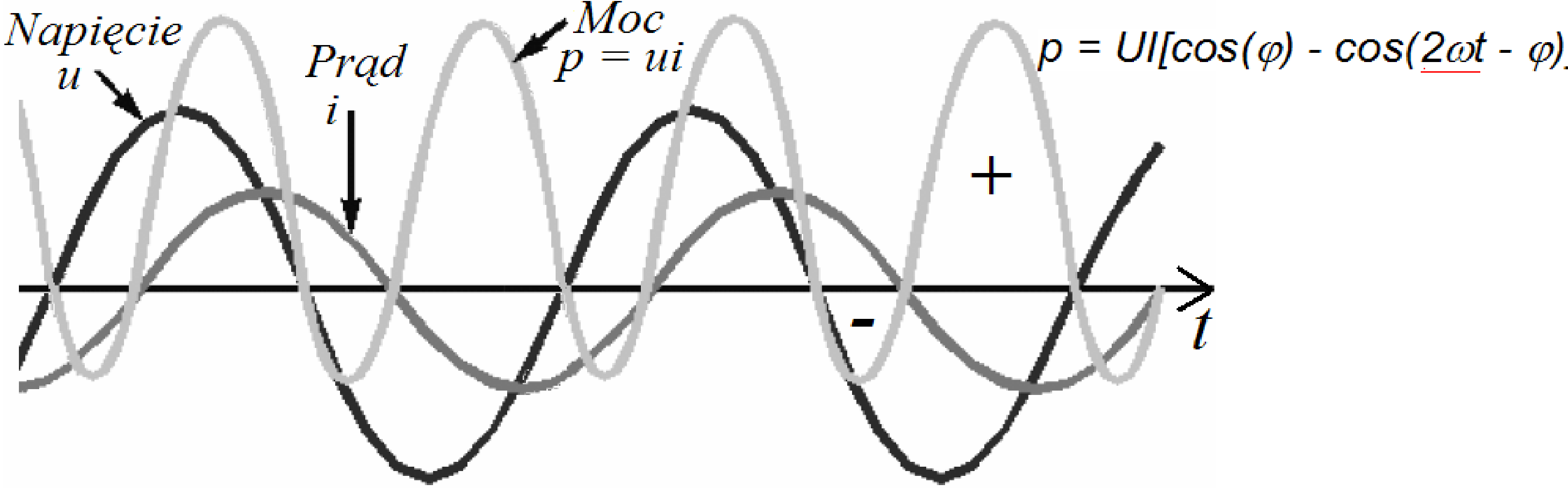
Dla przebiegów sinusoidalnych: całka z $[U_m \sin(\omega t)]^2$ po całym okresie T to połowa całki z $[U_m \sin(\omega t)]^2 + [U_m \cos(\omega t)]^2 = (U_m)^2 \cdot 1$ zatem dla przebiegu sinusoidalnego wartość skuteczna jest pierwiastek z 2 razy mniejsza od amplitudy. Wartości skuteczne używamy do obliczeń energii lub mocy. Mierniki napięć i prądów zwykle pokazują wartości skuteczne.





Średnia wartość przekazanej mocu = 0, gdy przesunięcie fazowe między napięciem i prądem wynosi 90^o.

Gdy obciążenia (odbiorniki mocy) źródeł napięcia sinusoidalnego mają częściowo charakter indukcyjny (lub pojemnościowy) to między napięciem i prądem może występować znaczna różnica faz. To przesunięcie fazowe decyduje o ilości przekazywanej mocy do obciążenia. Zwykły iloczyn chwilowych wartości napięcia i prądu nazywamy mocą chwilową **$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t)\sin(\omega t - \varphi) = (1/2)U_m I_m[\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)] = UI[\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)]$.** Widać, że ze wzrostem przesunięcia fazowego między napięciem i prądem maleje wartość przekazywanej mocy tak jak maleje **$\cos(\varphi)$.**

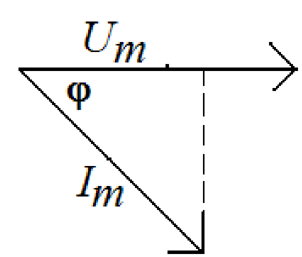


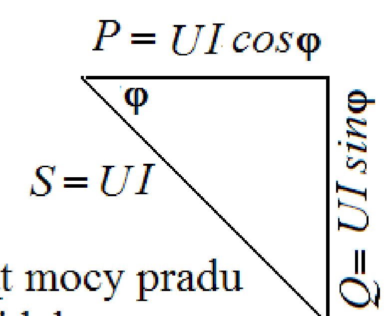
We wzorze na moc chwilową: $p = U_{sk}I_{sk}[cos(\varphi) - cos(2\omega t - \varphi)]$ mamy dwa składniki, z których pierwszy $UIcos\varphi$ jest niezależny od czasu i równy wartości średniej. Drugi składnik $UIcos(2\omega t - \varphi)$ z biegiem czasu oscyluje symetrycznie wokół zera. Gdy cos(φ) <1 średnia moc: p < UI, a chwilowa wartość mocy bywa momentami ujemna czyli momentami moc wraca do źródła. Pierwszy składnik nazywamy mocą czynną: P = UIcosφ**.** Obok mocy czynnej definiujemy moc bierną jako Q = UIsin(φ). Geometryczna suma tych mocy $S = [(UIcos\varphi)^2 + (UIsin\varphi)^2]^{0,5} =_{\textbf{oczywiście}} UI$ nazywana jest mocą pozorną:

$S = (P^2+Q^2)^{0,5}$, [S] = VA,

[P] = wat, [Q] = war lub VAR,

cosφ = P/S, sinφ = Q/S, tgφ = Q/P.





Trójkąt mocy pradu sinusoidalnego

<u>φ - różnica faz między napięciem i prądem!</u>

Prosty zapis.

Po opanowaniu zapisu zespolonego w elektrotechnice dostrzegamy, że podobnie jak wartości skuteczne (lub amplitudy) napięć i prądów **<u>różnica faz między napięciem i prądem</u>** jest istotną wielkością w analizie i obliczeniach elektrotechniki.

W elektrotechnice ważną wielkością jest też pulsacja ω, *ale ta wielkość jest niezmienna i wynosi 2*π50 rad/s i wszyscy o tym wiemy (w Ameryce $\omega = 2\pi 60$).

Te fakty doprowadziły do stosowania uproszczonego zapisu, w którym pomijamy pulsację (o której przecież wszyscy wiedzą):

Zamiast przykładowo: $\mathbf{U = U_{max} e^{j(\omega t + \pi/4)}}$

piszemy po prostu: $\mathbf{U = U_{skut.}}\angle\pi/4$.

Wykonujemy działania:

np.: $U_L = IX_L = (5\angle -\pi/4 \text{ A})(3\angle \pi/2 \ \Omega) = 15 \angle \pi/4 \text{ V}$.

Albo: $I_0 = U_0/Z = (230\angle 0 \text{ V})/(23\angle 0{,}3 \ \Omega) = 10\angle -0{,}3 \text{ A}$.

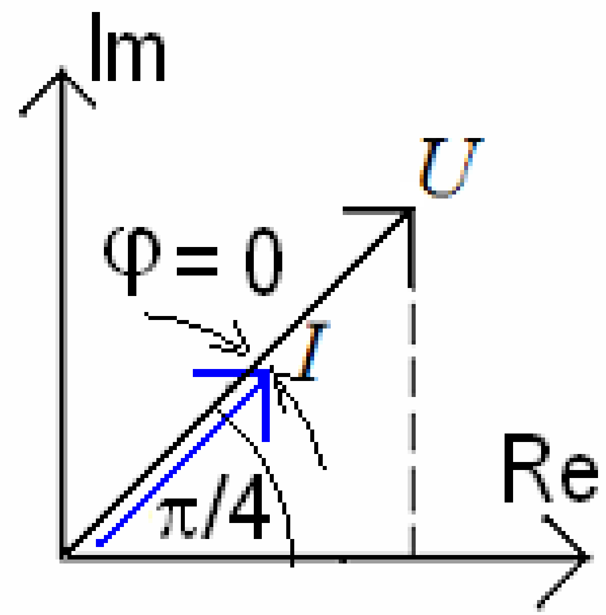
Moc zespoloną wyliczamy ze wzór: **S = UI*** a nie **S = UI. Dlaczego?**

Przykładowo jeżeli napięcie i prąd pozostające w zgodnej fazie zapiszemy w postaci: U = $50\angle\pi/4$, **I =** $2\angle\pi/4$ wtedy wyrażenie **S = UI*** = $50\angle\pi/4 \times 2\angle -\pi/4$ =

$100\angle(\pi/4-\pi/4) = 100\angle 0$ = 100 W + j0 VAR jest poprawnym wynikiem bo $\varphi = 0$ i $\cos\varphi = 1$.

Natomiast stosując (**S ≠**) **UI** = $50\angle\pi/4 \times 2\angle\pi/4 = 100\angle\pi/2$ = 0 W + j 100 VAR – wynik błędny. Wyrażenie: **S** =**UI** daje poprawny wynik gdy albo U albo I wyrażone jest z fazą początkową „0” czyli albo **U** = $U\angle 0$ albo **I** = $I\angle 0$.

Zatem moc zespolona to iloczyn skutecznego zespolonego napięcia I skutecznej zespolonej <u>sprzężonej</u> wartości prądu **S = UI***. Część rzeczywista mocy zespolonej to moc czynna P a część urojona to moc bierna Q.



Oznaczenia

Impedancja: $Z = Ue^{j(\omega t+\alpha)}/Ie^{j(\omega t+\beta)} = |Z|e^{j(\alpha-\beta)} = |Z|e^{j\varphi}$.

$R = |Z|\cos\varphi$ - **rezystancja**, $X = |Z|\sin\varphi$ - **reaktancja**.

Moc czynna: $P = (½)U_m I_m\cos\varphi = (½)(U_m^2/|Z|)\cos\varphi = (½)I_m^2|Z|\cos\varphi$.

$P = U_{sk}I_{sk}\cos\varphi = UI\cos\varphi = (U^2/|Z|)\cos\varphi = I^2|Z|\cos\varphi = I^2R$, *(odnotujmy, że φ mieści się w przedziale -90° do +90° gdzie $\cos\varphi$ jest dodatnie co zgadza się z zawsze dodatnią wartością R)*

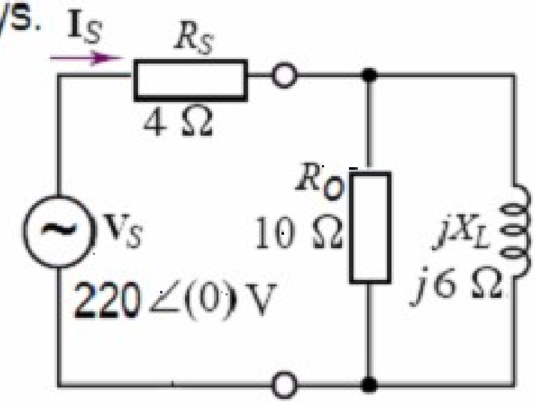
Moc bierna: $Q = U_{sk}I_{sk}\sin\varphi = UI\sin\varphi = (U^2/|Z|)\sin\varphi = I^2|Z|\sin\varphi = I^2X$, *(odnotujmy, że dla φ z przedziału -90° do +90° $\sin\varphi$ zmienia znak co zgadza się ze zmianą znaku X przy zmianie przewagi X_L nad X_C, gdy X_L przeważa X i $\sin\varphi$ są dodatnie a gdy przeważa X_C: X i $\sin\varphi$ są ujemne).* **Moc zespolona**: $\mathbf{S = UI^*} = P + jQ = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = I^2R + jI^2X = \mathbf{I^2Z = I^2ZZ^*/Z^* = I^2Z^2/Z^* = U^2/Z^*}$.

Moc pozorna: $|\mathbf{S}| = |\mathbf{UI^*}| = |UI|$.

Ponieważ Q - część reaktywna mocy jest związana z reaktywną częścią obciążenia jej znak zależy od znaku tej urojonej (reaktywnej) części obciążenia czyli od tego czy reaktancja obciążenia jest indukcyjna czy pojemnościowa. To prowadzi do ważnego stwierdzenia:

Jeżeli obciążenie zawiera reaktancję indukcyjną, wtedy kąt między napięciem a prądem jest dodatni – prąd opóźnia się względem napięcia. W związku z tym, gdy φ (i Q) są dodatnie mówi się, że „współczynnik mocy jest opóźniony” (w literaturze angielskiej: „lagging power factor”). I przeciwnie, przy obciążeniu typu pojemnościowego, Q i φ będą ujemne a współczynnik mocy nazwiemy wyprzedzającym (w literaturze angielskiej: „leading power factor”), bo wtedy prąd w obciążeniu będzie wyprzedzał napięcie.

Przykład 4.1. Oblicz moc rzeczywistą i reaktywną dla obciążenia jak na rys. Powtórz obliczenia po usunięciu indukcyjności L i porównaj efektywność przekazywania mocy w obu przypadkach.



Rozw. Impedancja obciążenia $Z_O =$

$$Z_O = R_O \| j\omega L = \frac{10 \times j6}{10 + j6} = \frac{j60 \times (10 - j6)}{(10 + j6)(10 - j6)} = \frac{360 + j600}{136} =$$

$$\frac{360}{136} + j\frac{600}{136} = \sqrt{\left(\frac{360}{136}\right)^2 + \left(\frac{600}{136}\right)^2} \angle \operatorname{arctg}\left(\frac{600}{360}\right)\,\Omega = \sqrt{26{,}47}\,\angle 1{,}03 \quad \Omega = \underline{5{,}145\angle 1{,}03 \quad \Omega}$$

Napięcie na zaciskach obciążenia $\mathbf{V}_O = \dfrac{Z_O}{R_S + Z_O}\mathbf{V}_S = \dfrac{5{,}145\angle\, 1.03}{4 + 5{,}145\angle\, 1.03} \times 220 =$

$$\frac{5{,}145\angle\, 1.03}{4 + 2{,}649 + j\,4.411} \times 220 = \frac{5{,}145\angle\, 1.03}{7{,}979\angle\, 0.586} \times 220 = 141{,}8\angle\,(1{,}03 - 0{,}586) = \underline{\underline{141{,}8\angle(0.444)\ \mathrm{V}}}$$

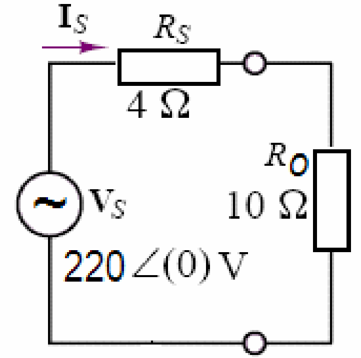
Prąd w obciążeniu $\mathbf{I}_O = \dfrac{\mathbf{V}_O}{Z_O} = \dfrac{141{,}8\angle 0{,}444}{5{,}145\angle 1{,}03} = \underline{27{,}6\angle(-0{,}586)\ \mathrm{A}}$

Zespolona moc w pierwszym przypadku (a)

$$S_a = \mathbf{V}_O\mathbf{I}_O^* = 141{,}8\angle(0.444) \times 27{,}6\angle 0.586 = 3915\angle 1.03\ \ \mathrm{VA} = \underline{\underline{2015\ \mathrm{W} + j\,3356\ \mathrm{war}}}$$

$$P_a = 2015\ \mathrm{W} \qquad\qquad Q_a = 3356\ \mathrm{war}$$

Drugi przypadek, indukcja usunięta (b)



Teraz impedancja obciążenia wynosi: $Z_O = R_O = 10\ \Omega$

Napięcie na obciążeniu $\mathbf{V}_O$ wynosi:

$$\mathbf{V}_O = \frac{Z_O}{R_S + Z_O}\mathbf{V}_S = \frac{10}{4+10} \times 220 = 157\angle 0$$

Prąd w obciążeniu $\mathbf{I}_O$

$$\mathbf{I}_O = \frac{\mathbf{V}_O}{Z_O} = \frac{157\angle(0)}{10} = 15{,}7\angle 0$$

Zespolona moc w drugim przypadku (b) $S_b =$

$$S_b = \mathbf{V}_O \mathbf{I}_O^* = 157\angle(0) \times 15{,}7\angle(0) = 2465\angle(0)\ \mathrm{W} = 2465\ \mathrm{W}$$

$\underline{P_b = 2465\ \mathrm{W} \quad Q_b = 0\ \mathrm{war}}$

Aby obliczyć sprawność układu najpier policzymy moce oddawane przez źródło.

(a)
$$\mathbf{I}_S = \frac{\mathbf{V}_S}{R_S + Z_O} = \frac{220}{4 + 5{,}145\angle 1{,}03} = 27{,}6\angle\text{-}0{,}586\ \mathrm{A}$$

$$S_a = \mathbf{V}_S \mathbf{I}_S^* = 220\ \mathrm{V} \times 27{,}6\angle 0{,}586\ \mathrm{A} = 5056\ \mathrm{W} + j3352\ \mathrm{war}$$

$$\text{Sprawniość}_a = \frac{P}{P_S} \times 100 = \frac{2015\,\mathrm{W}}{5056\,\mathrm{W}} \times 100 = \underline{38{,}8\%}$$

(b)
$$\mathbf{I}_S = \frac{\mathbf{V}_S}{R_S + R_O} = \frac{220}{4+10} = 15{,}7\angle 0\ \mathrm{A}$$

$$S_b = \mathbf{V}_S \mathbf{I}_S = 220 \times 15{,}7 = 3454\ \mathrm{W} \qquad \text{Sprawniość}_b = \frac{P}{P_S} \times 100 = \frac{2465\ \mathrm{W}}{3454\ \mathrm{W}} \times 100 = \underline{71{,}4\%}$$

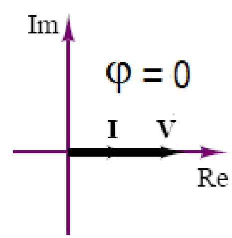
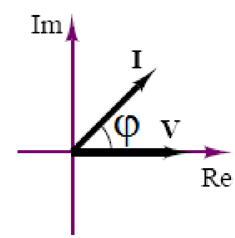
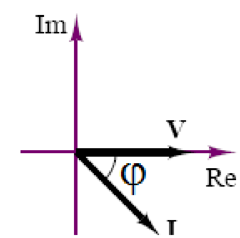
Z porównania sprawności wynika, że energia związana z przepływem prądu przez indukcyjność nie jest konsumowana u odbiorcy (w indukcyjności) lecz na rezystancji źródła Rs.

Poprawianie cosφ

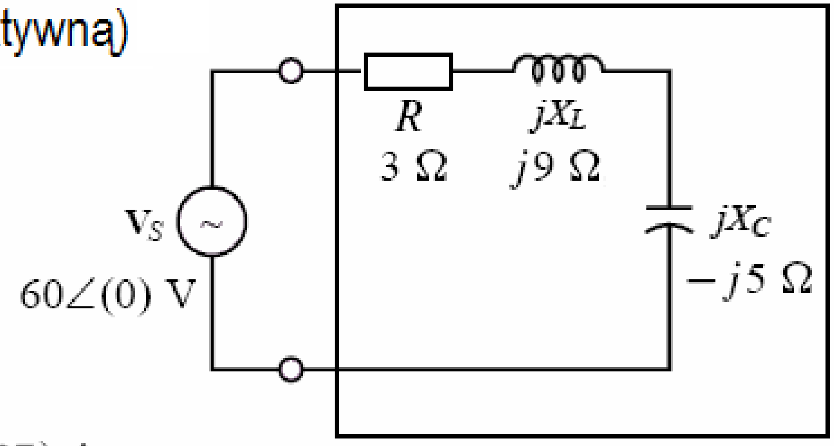
cosφ = współczynnik mocy = power factor = pf.

Z powyższego przykładu widać, że eliminowanie reaktywnej część impedancji zwiększa odsetek mocy dostarczonej do odbiornika. Takie eliminowanie reaktywnej impedancji nazywa się korekcją (poprawianiem) współczynnika mocy - cosφ. Wartość cosφ, gdzie φ jest różnicą faz między napięciem i prądem w odbiorniku. Ten współczynnik mocy odgrywa istotną rolę w energetyce zmiennoprądowej. Gdy cosφ = 1 źródło wymusza **najmniejszą** wartość prądu przy dostarczaniu określonej mocy P do odbiorcy.

Gdy obciążenie posiada reaktancję indukcyjną prąd opóźnia się za napięciem, gdy natomiast obciążenie zawiera reaktancję pojemnościową prąd wyprzedza napięcie.

	Obciążenie rezystywne	Obciążenie pojemnościowe	Obciążenie indukcyjne
Impedancja	$Z_0 = R_0$	$Z_0 = R_0 - jX_0$	$Z_0 = R_0 + jX_0$
Kąt fazowy	$\varphi = 0$	$\varphi < 0$	$\varphi > 0$
Wskazy			

Przykład 4.2. Obliczyć moc rzeczywistą i bierną (reaktywną) dla układu na rysunku. Narysować trójkąt mocy.



Obciążenie

Rozw.

Używamy wartości skutecznych napięcia i pradu.

Prąd w obciążeniu :

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{Z} = \frac{60\angle(0)}{3 + j9 - j5} = \frac{60\angle(0)}{5\angle(0{,}927)} = 12\angle(-0{,}927)\ \text{A}$$

Moc zespolona:

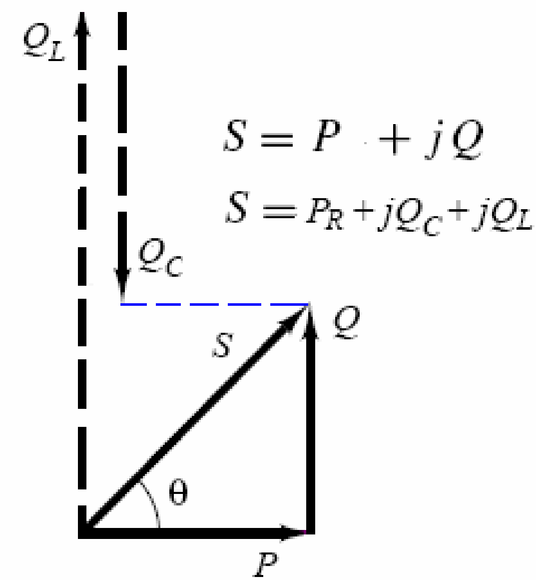
$$S = \mathbf{V}\ \mathbf{I}^* = 60\angle(0) \times 12\angle(0{,}927) = \underbrace{720}_{\text{Moc pozorna}}\angle(0{,}927) = \underbrace{432 + j576}_{\text{Moc zespolona}}\ \text{VA}$$

$$P = 432\ \text{W} \qquad Q = 576\ \text{VAR}$$

$$Q_C = |\mathbf{I}|^2 \times X_C = (144)(-5) = -720\ \text{VAR}$$

$$Q_L = |\mathbf{I}|^2 \times X_L = (144)(9) = 1296\ \text{VAR}$$

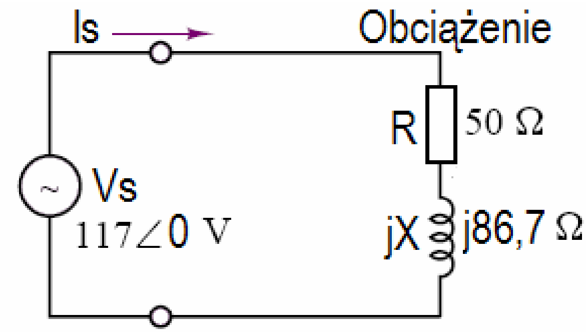
$$Q = Q_L + Q_C = 576\ \text{VAR}$$



Widać, że moce bierne Q_L i Q_C mają przeciwne znaki, pokazuje to jak można korygować współczynnik mocy. Wystarczy podłączyć szeregowo albo lepiej (bo łatwiej) równolegle dodatkową i odpowiednią reaktancję. Zwykle odbiornikami są silniki o znacznej indukcyjności wówczas wystarczy podłączyć równolegle odpowiednią pojemność.

Przykład 4.3. Wyliczyć moc zespoloną w odbiorniku a następnie dokonać korekty współczynnika mocy do jedności. (Użyć wartości skutecznych dla wszystkich wskazów).
Rozw.

Zawada przed korektą $Z = R + jX = 50 + j86{,}7 = 100\angle 1{,}047\ \Omega$

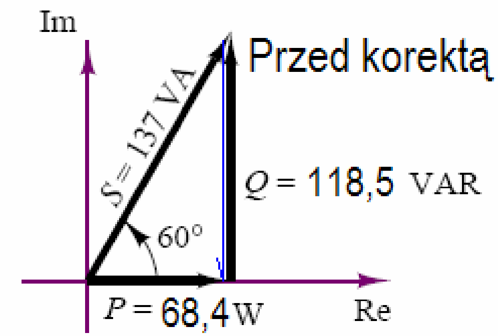


Prąd $\mathbf{I} = \dfrac{\mathbf{V}}{Z} = \dfrac{117\angle 0}{50 + j86{,}7} = \dfrac{117\angle 0}{100\angle 1{,}047} = 1{,}17\angle{-1{,}047}\ \mathrm{A}$

i moc zespolona przed korektą

$S = \mathbf{V}\,\mathbf{I}^* = 117\angle 0 \times 1{,}17\angle 1{,}047 = 137\angle 1{,}047 = 68{,}4\ \mathrm{W} + j118{,}5\ \mathrm{VAR}$

Czyli $P = 68{,}4\ \mathrm{W}$ $Q = 118{,}5\ \mathrm{VAR}.$ Rysujemy trójkąt mocy -->

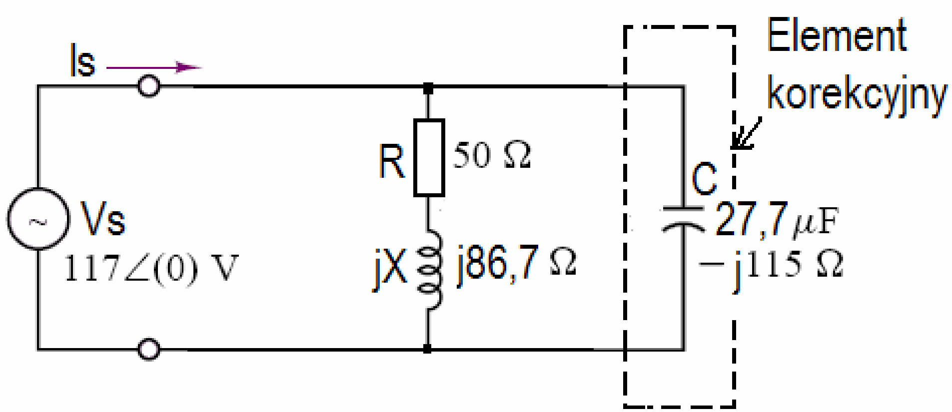


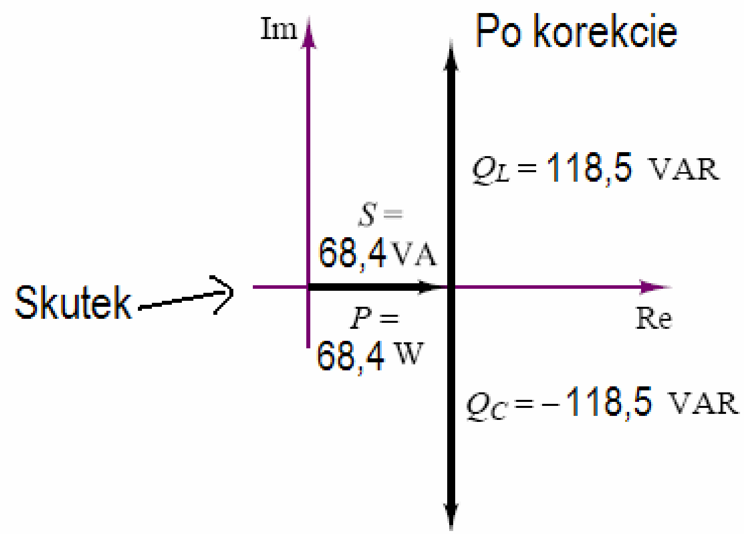
Z trójkąta mocy wynika, że dla korekty należy dodać pojemność, dla której
Qc = -Q = -118,5 VAR.

$$X_C = \frac{|\mathbf{V}|^2}{Q_C} = -\frac{(117)^2}{118.5} = -115\ \Omega$$

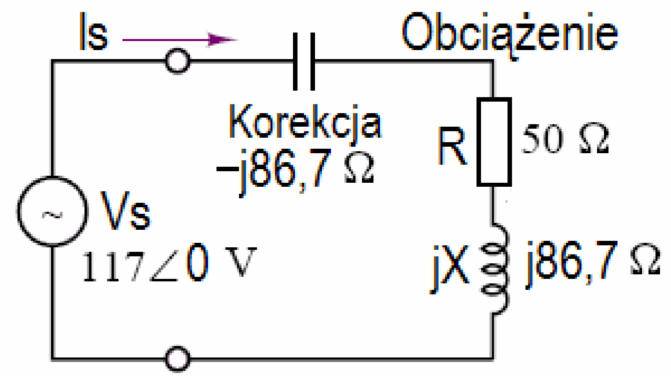
W sieci $\omega = 314$ rad/s

Xc = -j/ωC $\longrightarrow$ $C = -\dfrac{1}{\omega X_C} = -\dfrac{1}{314 \times (-115)} = 27{,}7\,\mu\mathrm{F}$





Przykład 4.4. Czy można korygować powyższy układ przez szeregowe włączenie odpowiedniego kondensatora?
Odpowiedź uzyskamy z analizy prostego przykładu pokazanego na rysunku, gdzie obciążenie w postaci zespolonej Z = 50 + j86,7 Ω jest korygowane szeregowo włączonym kondensatorem o impedancji równej – j86,7 Ω.



Prąd przed korektą wynosił (jak w poprzednim przykładzie):

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{Z} = \frac{117\angle 0}{50 + j86{,}7} = \frac{117\angle 0}{100\angle 1{,}047} = \underline{1{,}17\angle -1{,}047 \ \text{A}}$$

Zawada po takiej korekcie czyli po szeregowym włączeniu kondensatora wyniesie:

$$Z = R + jX = 50 + j86{,}7 - j86{,}7 \ \Omega = 50\,\Omega \angle 0$$

Prąd $\quad \mathbf{I} = \dfrac{\mathbf{V}}{Z} = \dfrac{117\angle 0}{50\angle 0} = 2{,}34 \ \text{A}$ ← Uzyskana jest zgodność prądu i napięcia ale mamy tu dwukrotne zwiększenie prądu czyli zwiększenie wymagań wobec źródła napięcia !
Ponadto do takiej korekty potrzebna jest chwilowa przerwa w obwodzie.

W praktyce znacznie łatwiej korygować obciążenia poprzez równoległe dołączanie reaktancji (zwykle kondensatorów). Można to robić nie przerywając pracy obciążenia.

A jaki był prąd po równoległym dołączeniu kondensatora $\mathbf{I} + \mathbf{I_c}$?

$$\mathbf{I} = 1{,}17\angle -1{,}047 \ \ \mathrm{A} \ = 1{,}17[\cos(-1{,}047)+j\sin(-1{,}047)] = 0{,}585 - j1{,}013 \quad \mathrm{A}$$

Prąd mniejszy!

$$\mathbf{I_c} = \frac{\mathbf{V}}{Z_c} = \frac{117\angle 0}{-j\,115} = \frac{117 \quad 0}{115\angle -\frac{\pi}{2}} = 1{,}017\angle\frac{\pi}{2} = 0 + j1{,}017 \qquad \mathbf{I} + \mathbf{I_c} = 0{,}585 + j0{,}005\,\mathrm{A} \approx 0{,}585 \ \ \mathrm{A}$$

Wnioski z powyższych przykładów:

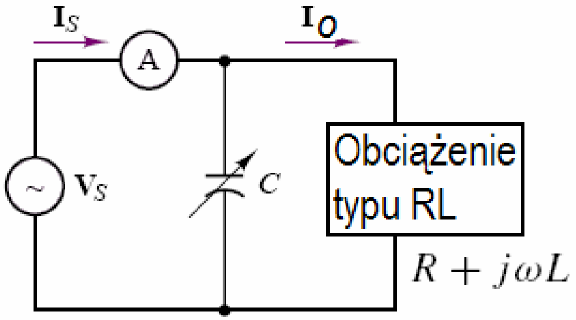
Przy równoległym włączeniu korekty prąd z elektrowni jest mniejszy i mniejsze straty na linii przesyłowej. To jest najważniejszy argument za stosowaniem korekty równoległej.

Dlaczego korekta równoległa daje mniejsze straty? Łopatologicznie wyjaśniając możemy powiedzieć, że przy równoległym połączeniu korekty powstaje lokalny układ L i C i duży prądy rezonansowy przeładowywania kondensatora przez indukcyjność występuje tylko lokalnie, nie płynie przez linię przesyłową! Natomiast przy szeregowym połączeniu w obwód rezonujący jest szeregowo włączona linia przesyłowa!

Czy można korygować współczynnik mocy cosφ poprzez monitorowanie natężenia prądu i jego minimalizację?

Prąd w obciążeniu wyrazimy jako:

$$\mathbf{I}_O = \frac{V_S\angle 0^\circ}{R + j\omega L} = \frac{V_S}{R^2+\omega^2 L^2}(R - j\omega L) = \frac{V_S R}{R^2+\omega^2 L^2} - j\frac{V_S\omega L}{R^2+\omega^2 L^2}$$



a prąd kondensatora C jako: $\mathbf{I}_C = \frac{V_S\angle 0^\circ}{1/j\omega C} = jV_S\omega C$

Monitorowane natężenie prądu jest sumą: $\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_O + \mathbf{I}_C =$

$$\frac{V_S R}{R^2+\omega^2 L^2} + j\left(V_S\omega C - \frac{V_S\omega L}{R^2+\omega^2 L^2}\right)$$

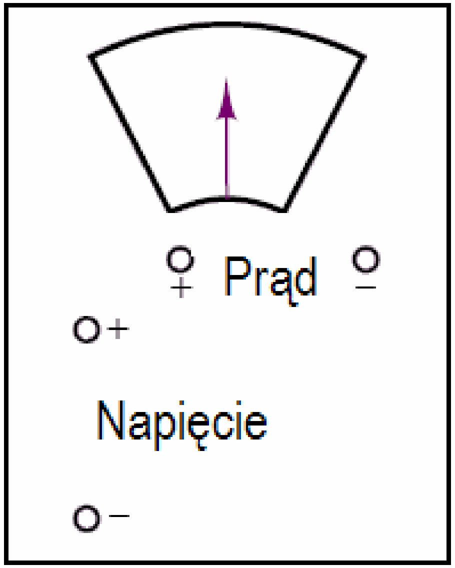
a jego moduł : $I_S = \sqrt{\left(\frac{V_S R}{R^2+\omega^2 L^2}\right)^2 + \left(V_S\omega C - \frac{V_S\omega L}{R^2+\omega^2 L^2}\right)^2}$

Skoro dla współczynnika mocy równego 1 (cosφ= 1) prąd ma zgodną z napięciem fazę φ=0 to w naszym wyrażeniu na prąd część urojona powinna być równa 0 ($\mathbf{V}_S = V_S\angle 0^\circ$ to i $\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_S\angle 0^\circ$)

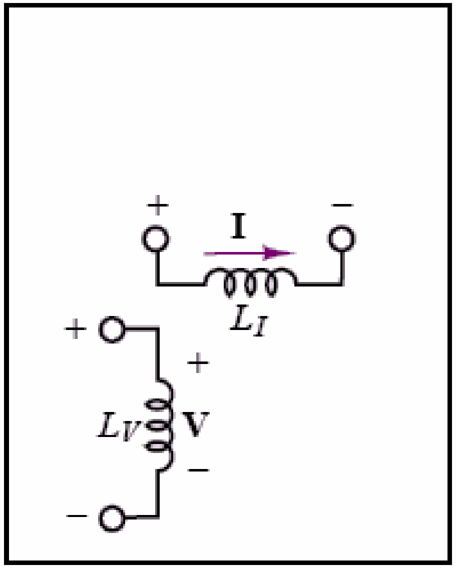
$$V_S\omega C - \frac{V_S\omega L}{R^2+\omega^2 L^2} = 0$$

wtedy też prąd będzie minimalny.

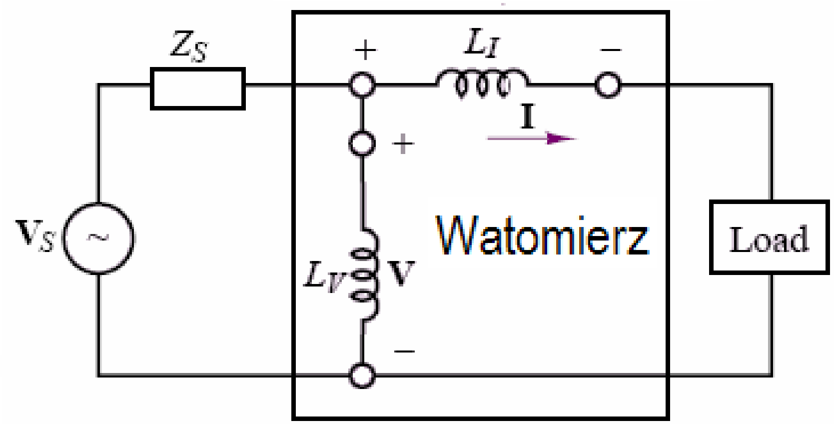
Watomierze dzielimy na: indukcyjne, elektrodynamiczne i ferrodynamiczne. Watomierze elektrodynamiczny (najczęściej spotykany) służą do pomiaru pobieranej mocy w obwodach prądu stałego i zmiennego. Zawiera 4 zaciski, dwie cewki – nieruchomą prądową o znikomej impedancji i ruchomą napięciową o dużej impedancji. Cewka prądowa jest włączana szeregowo a napięciowa równolegle do obciążenia. Dzięki takiemu podłączeniu watomierz mierzy moc czynną $P = \mathrm{Re}(S) = \mathrm{Re}(VI^*)$.

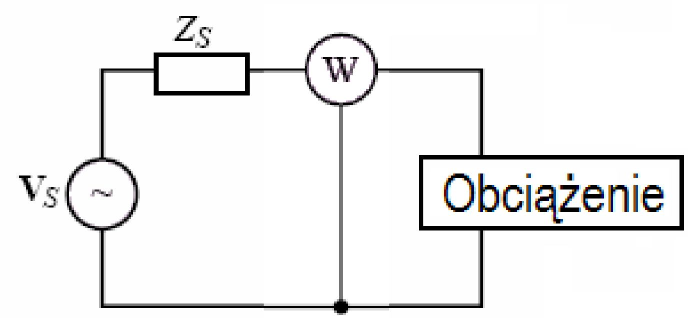


Zewnętrzne zaciski



Uzwojenia wewnątrz watometru





Sposób podłączenia

Liczniki energii elektrycznej – to mierniki całkujące pobieraną przez obciążenia moc. Stosowane są liczniki indukcyjne i elektroniczne. Są też liczniki energii biernej.

Licznik indukcyjny jest maszyną indukcyjną w której aluminiowa tarcza porusza się pod wpływem wirowego pola magnetycznego generowanego przez dwie cewki. Jedna z cewek zawiera prąd proporcjonalny do napięcia na obciążeniu a druga prąd proporcjonalny do prądu w obciążeniu. Powstający moment napędowy jest proporcjonalny do iloczynu chwilowych wartości napięcia i prądu.

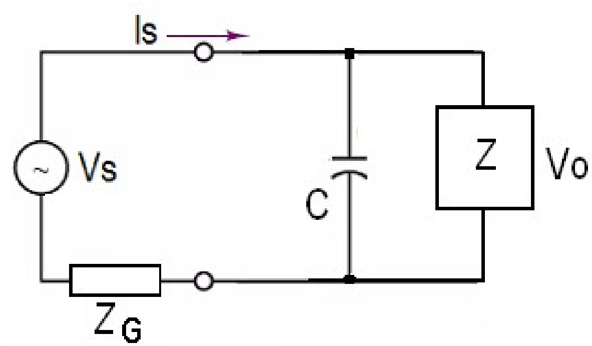
Moment ten jest równoważony przez moment hamujący proporcjonalny do szybkości obrotów tarczy. Moment hamujący uzyskuje się dzięki umieszczeniu tarczy między biegunami magnesu trwałego.

Liczniki elektroniczne zawierają specjalizowane układy scalone, które generują impulsy o częstotliwości proporcjonalnej do iloczynu prądu i napięcia w monitorowanym obwodzie elektrycznym. Ilość impulsów jest przeliczana i zamieniana na informacją o ilości pobranej energii.

E-E-M. lista 04

1. Po włączeniu pewnego odbiornika do sieci 220 V pojawił się prąd o wartości skutecznej 10 A z fazowym opóźnieniem $\pi/3$. Oblicz pobór mocy, wartość współczynnika mocy i narysuj trójkąt mocy.

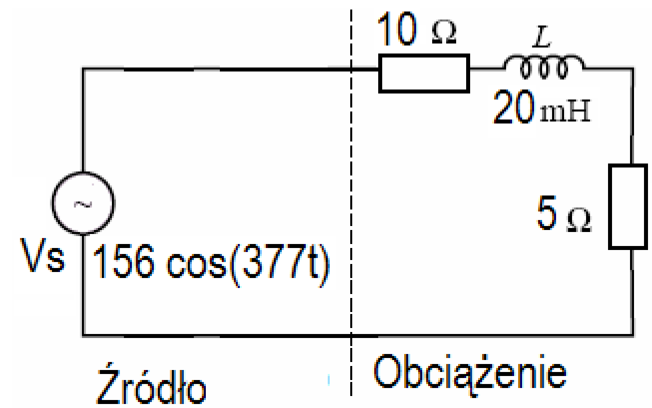
2. Oblicz wartość C taką aby współczynnik mocy ($\cos\varphi$) wynosił 1. Wiadomo, że $V_s = 311 \cos(314t)$ V, $Z = 1 + j1\ \Omega$, $Z_G = 1 + j\ 0{,}1\ \Omega$.



3. Dobierz wartość C w układzie z zadania 2 tak aby uzyskać minimalny prąd Is. Wiadomo, że: $V_s = 220\ \angle 0$ V, $Z = 7\angle 0{,}2\ \Omega$.

4. Ile wyniesie minimalny prąd Is gdy w zadaniu 3 zastosujemy niewłaściwą korektę: zamiast równoległego włączenia kondensatora C włączymy go szeregowo?

5. Narysować sposób podłączenia watomierza do układu obok i obliczyć jego wskazania.



6. Jak podłączyć watomierz aby zmierzyć moc wydzielaną w samym rezystorze 5 Ω z poprzedniego zadania, ile ta moc wynosi.