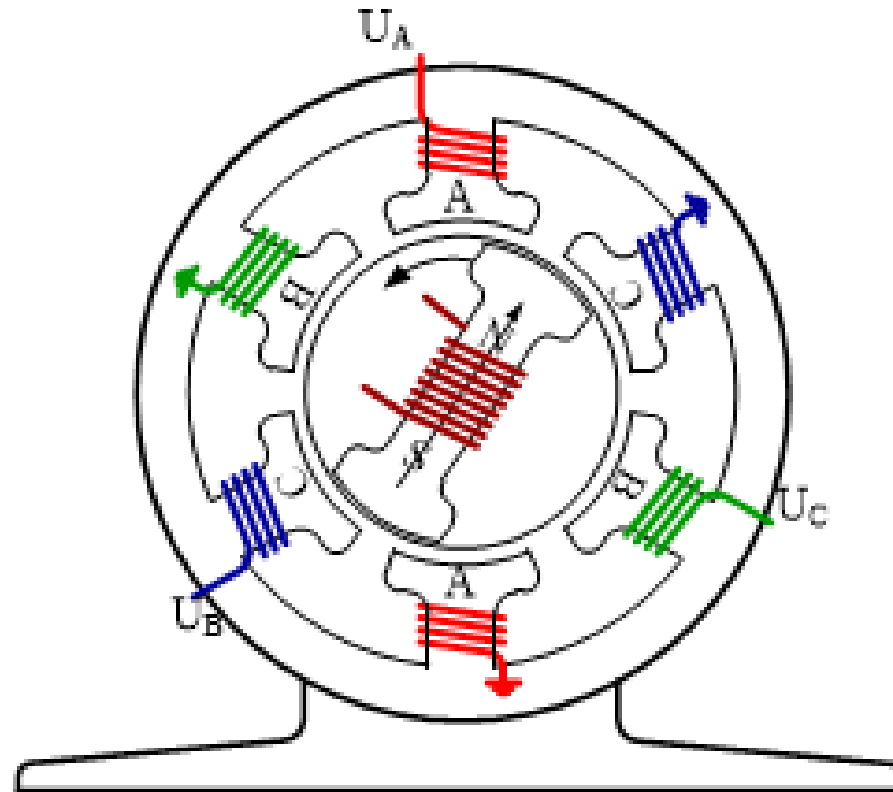


Modelowanie generatorów synchronicznych

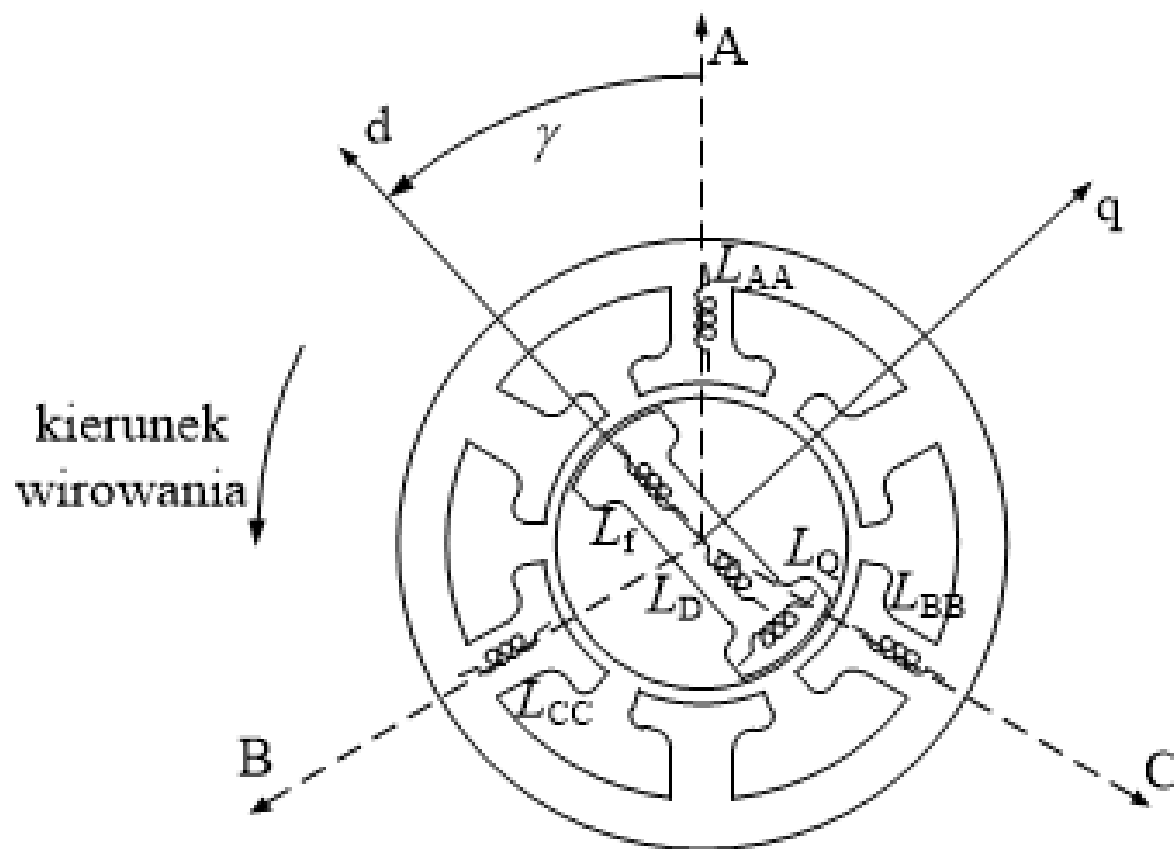
Maszyna synchroniczna:



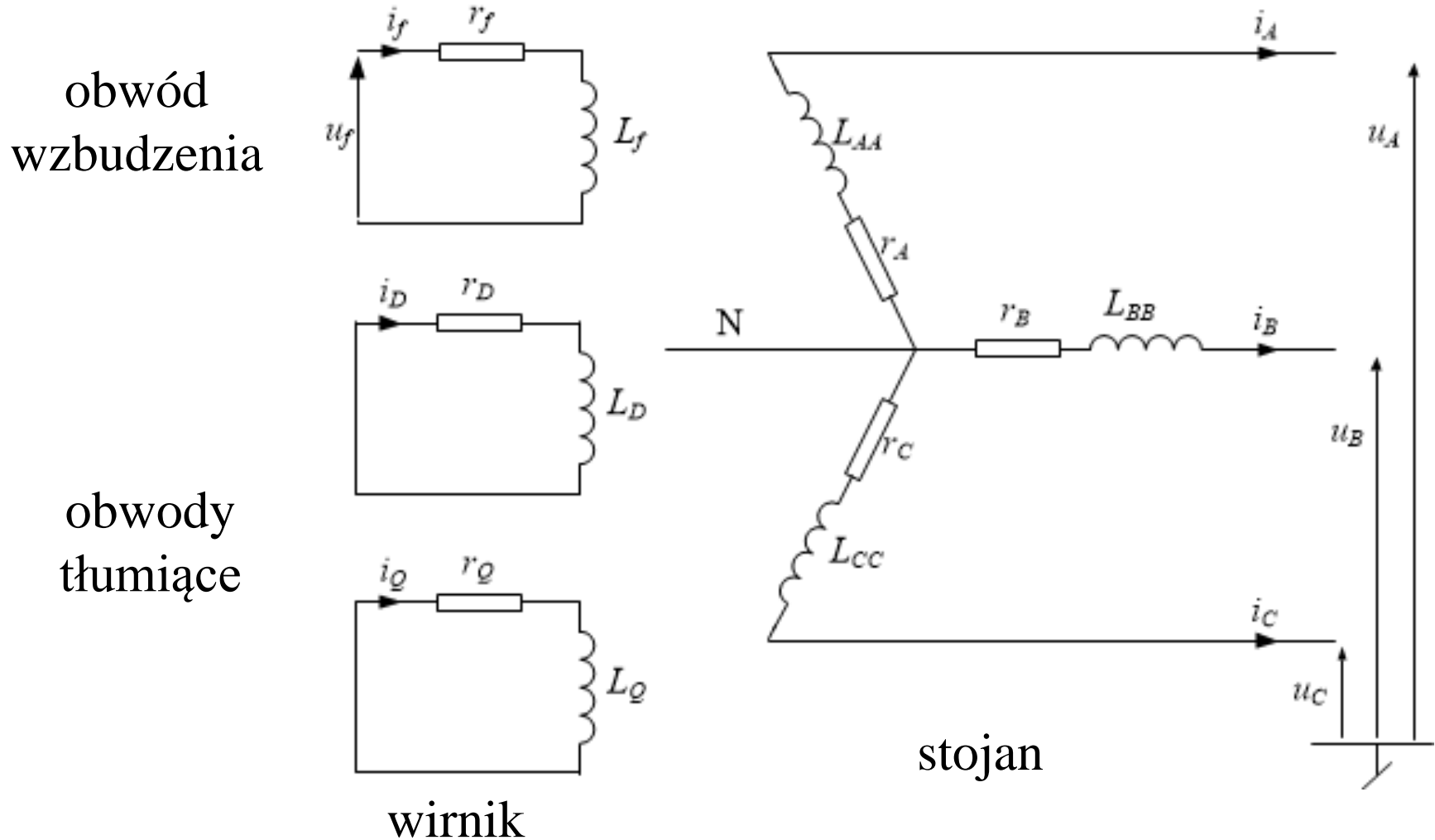
źródłem pola magnetycznego może być także magnes trwały

Modelowanie generatorów synchronicznych

Schemat zastępczy



Modelowanie generatorów synchronicznych



Zastępcze obwody maszyny synchronicznej

Modelowanie generatorów synchronicznych

Model matematyczny w naturalnych składowych fazowych

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}\mathbf{i} - \frac{d\boldsymbol{\psi}}{dt}$$

znaki ujemne przyjmuje się w
tzw. konwencji generatorowej

gdzie:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ -u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_A & & & & & \\ & r_B & & & & \\ & & r_C & & & \\ - & - & - & - & - & - \\ & & & r_f & & \\ & & & & r_D & \\ & & & & & r_Q \end{bmatrix}$$

Modelowanie generatorów synchronicznych

Model matematyczny w naturalnych
składowych fazowych

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} & L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} & L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} & L_{CD} & L_{CQ} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ABC} \\ \Psi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ABC} \\ \mathbf{i}_{fDQ} \end{bmatrix}$$

macierz indukcyjności zmienia się w czasie wraz z kątem
położenia wirnika γ :

$$\Psi = \mathbf{L}(\gamma) \mathbf{i}$$

$$\gamma = \gamma_e = \int_0^t \omega d\tau + \gamma_0 \quad \omega_r = \frac{\omega_e}{p}$$

Modelowanie generatorów synchronicznych

Modelowanie dynamiki (część elektryczna):

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}\mathbf{i} - \frac{d\mathbf{L}(\gamma)}{dt}\mathbf{i} - \mathbf{L}(\gamma)\frac{d\mathbf{i}}{dt}$$

Powyższe równanie może być numerycznie rozwiązywane:

- bezpośrednio – model fazowy
- z zastosowaniem przekształcenia dq0 – model w składowych dq0

W tym ostatnim przypadku macierz indukcyjności zawiera tylko stałe elementy.

Modelowanie generatorów synchronicznych

Transformacja ABC→dq0

$$\mathbf{i}_{0dq} = \mathbf{P}^{-1}(\gamma) \mathbf{i}_{ABC}$$

$$\mathbf{u}_{0dq} = \mathbf{P}^{-1}(\gamma) \mathbf{u}_{ABC}$$

$$\mathbf{i}_{0dq} = \begin{bmatrix} i_0 & i_d & i_q \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{u}_{0dq} = \begin{bmatrix} u_0 & u_d & u_q \end{bmatrix}^T$$
$$\mathbf{P}^{-1}(\gamma) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \gamma & \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

W wyniku tego przekształcenia wszystkie, równania maszyny są zapisane względem wirnika; mają one stałe parametry.

Modelowanie generatorów synchronicznych

Transformacja ABC→dq0

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}(\gamma) & \\ & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{0dq} \\ \mathbf{u}_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{ABC} & \\ & \mathbf{r}_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\gamma) & \\ & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{0dq} \\ \mathbf{i}_{fDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\gamma) & \\ & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{0dq} \\ \boldsymbol{\psi}_{fDQ} \end{bmatrix} \right\}$$

skąd:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{0dq} \\ \mathbf{u}_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{ABC} & \\ & \mathbf{r}_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{0dq} \\ \mathbf{i}_{fDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{0dq} \\ \boldsymbol{\psi}_{fDQ} \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} & \\ & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{0dq} \\ \boldsymbol{\psi}_{fDQ} \end{bmatrix}$$

Występuje tu **6 równań**, np. zmienne odnoszące się do napięcia:

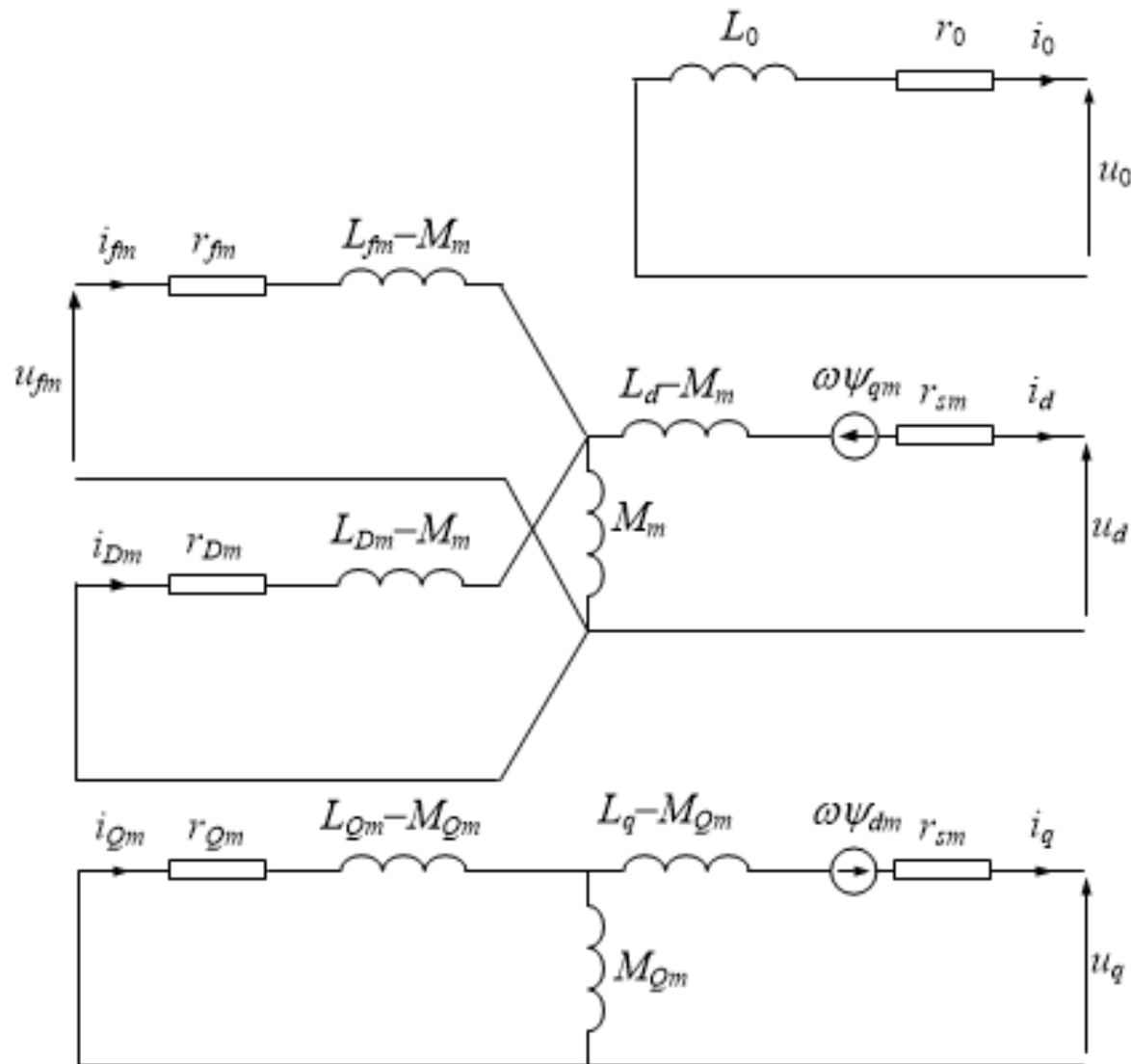
$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{0dq} \\ \mathbf{u}_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & u_d & u_q & u_f & u_D & u_Q \end{bmatrix}^T$$

$$u_D = u_Q = 0 \quad - \text{obwody zwarte}$$

$$u_d, u_f, u_D \quad - \text{w osi } d$$

$$u_q, u_Q \quad - \text{w osi } q$$

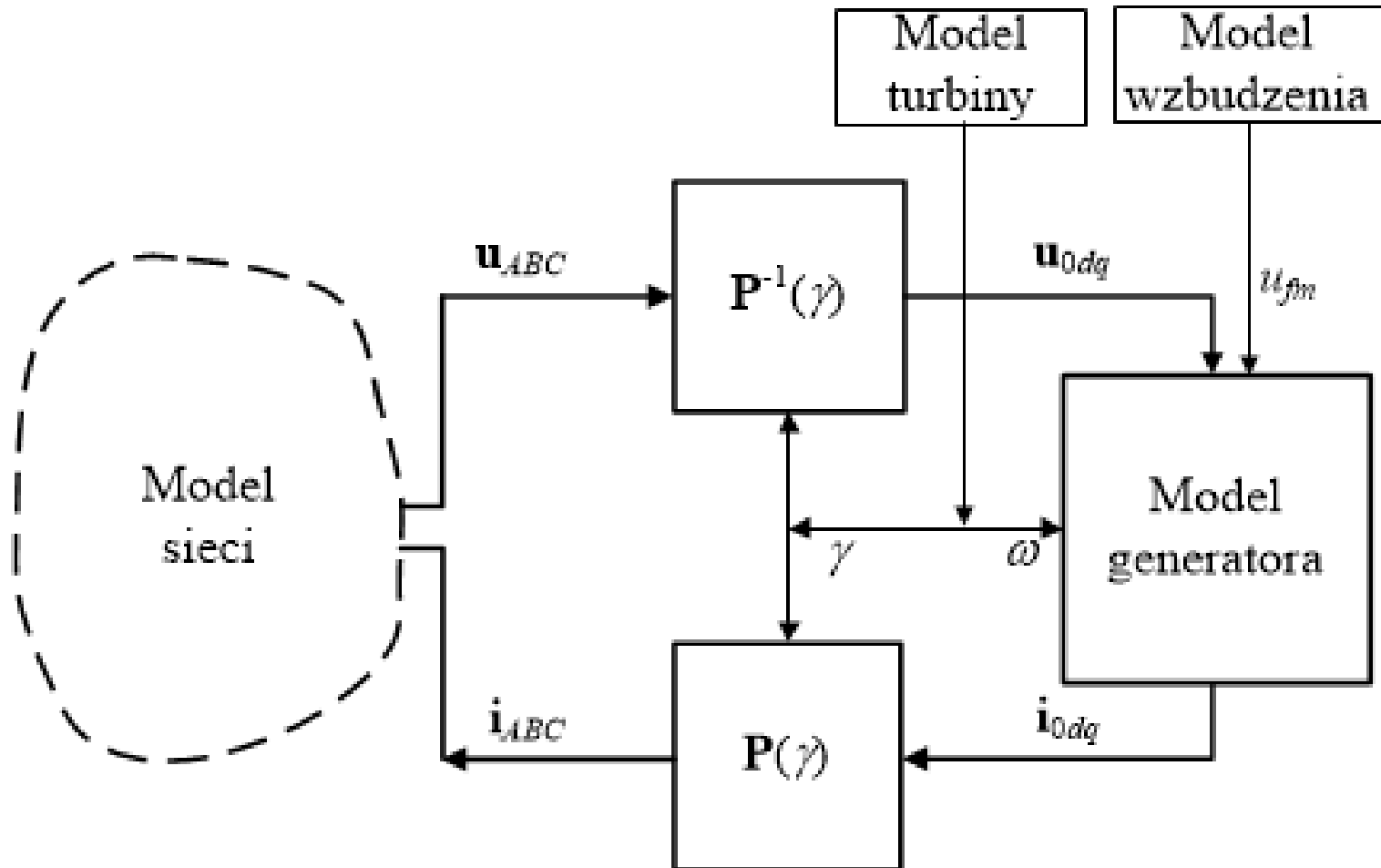
Modelowanie generatorów synchronicznych



Schemat zastępczy w płaszczyźnie dq0

Modelowanie generatorów synchronicznych

Schemat obliczeń w modelu odniesionym do płaszczyzny dq0:



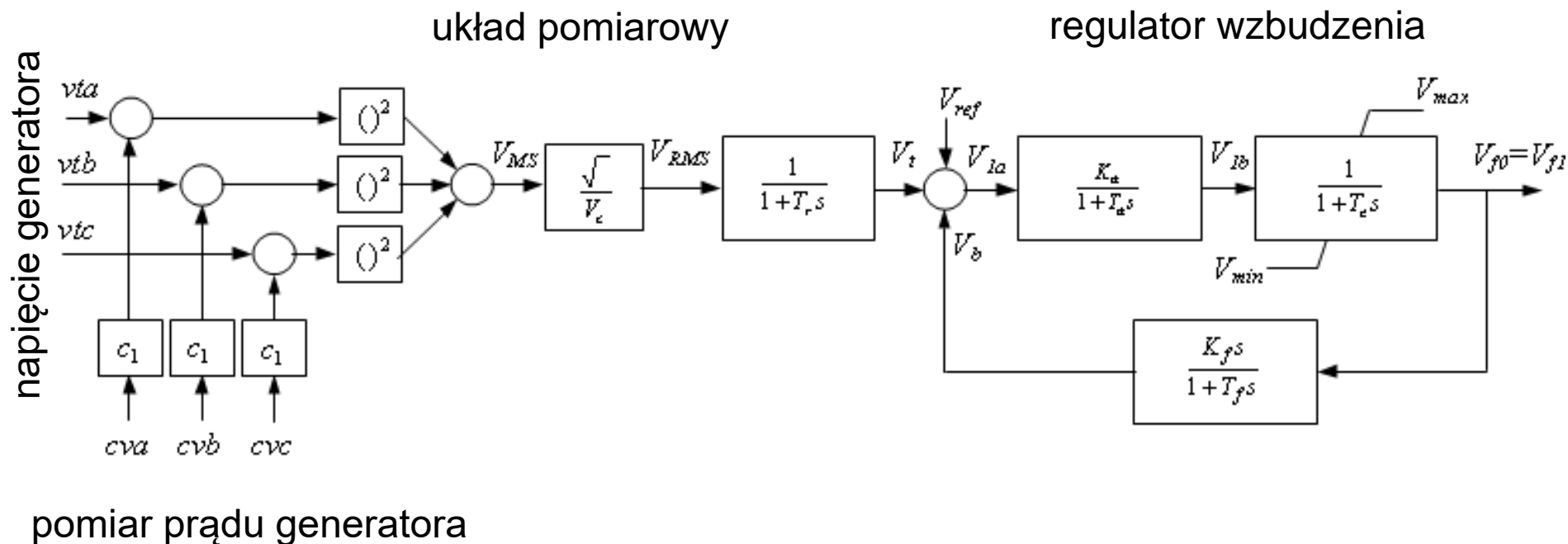
Modelowanie generatorów synchronicznych

Typowy zestaw parametrów służących do budowy modelu generatora synchronicznego:

- R_s – rezystancja uzwojeń stojana (twornika);
- X_l – reaktancja rozproszenia uzwojeń stojana;
- X_0 – reaktancja maszyny dla składowej zerowej;
- X'_d, X'_q – reaktancje przejściowe, odpowiednio: wzdłużna i poprzeczna;
- X''_d, X''_q – reaktancje podprzejściowe, odpowiednio: wzdłużna i poprzeczna;
- τ'_d, τ'_q – stałe czasowe przejściowe, odpowiednio: wzdłużna i poprzeczna;
- τ''_d, τ''_q – stałe czasowe podprzejściowe, odpowiednio: wzdłużna i poprzeczna.

Regulacja generatora synchronicznego

Typowy układ regulacji wzbudzenia



Regulator wzbudzenia służy do kontroli napięcia generatora (regulacja pierwotna), a tym samym do regulacji mocy biernej ($\cos \varphi$)

Regulator turbiny służy do kontroli prędkości obrotowej generatora, a tym samym do regulacji mocy czynnej (P)

Model generatora synchronicznego

Model części mechanicznej generatora

$$J \frac{d^2 \gamma_r}{dt^2} + D \frac{d\gamma_r}{dt} = T_t - T_e$$

Zakłada się tu, że wszystkie obracające się elementy związane z wirnikiem są reprezentowane w postaci wspólnej masy o momencie bezwładności J . Model ten może być rozbudowany, gdy dostępne są informacje o poszczególnych elementach (turbina, wzbudnica, wirnik generatora itp.).

Moment elektromagnetyczny generatora:

$$T_e = \frac{p}{2} \mathbf{i}^T \left(\frac{d\mathbf{L}}{d\gamma} \right) \mathbf{i} = p (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

T_t – moment turbiny

Model generatora synchronicznego

Model części mechanicznej generatora

W miejsce momentu bezwładności J często jest stosowane pojęcie stałej czasowej bezwładności H (ang. inertia constant), która jest definiowana następująco:

$$H = \frac{E_N}{S_N} \quad 1 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{VA}} = 1 \frac{\text{MW} \cdot \text{s}}{\text{MVA}}$$

gdzie:

$$E_N = \frac{1}{2} J \omega_{rN}^2 \times 10^{-6} \text{ (MW} \cdot \text{s)} \quad - \quad \text{energia mas wirujących ze znamionową prędkością}$$

ω_{rN} - znamionowa (synchroniczna) prędkość kątowa wirnika (1/s);

S_N - znamionowa moc pozorna maszyny (MVA).

Relacja $H - J$

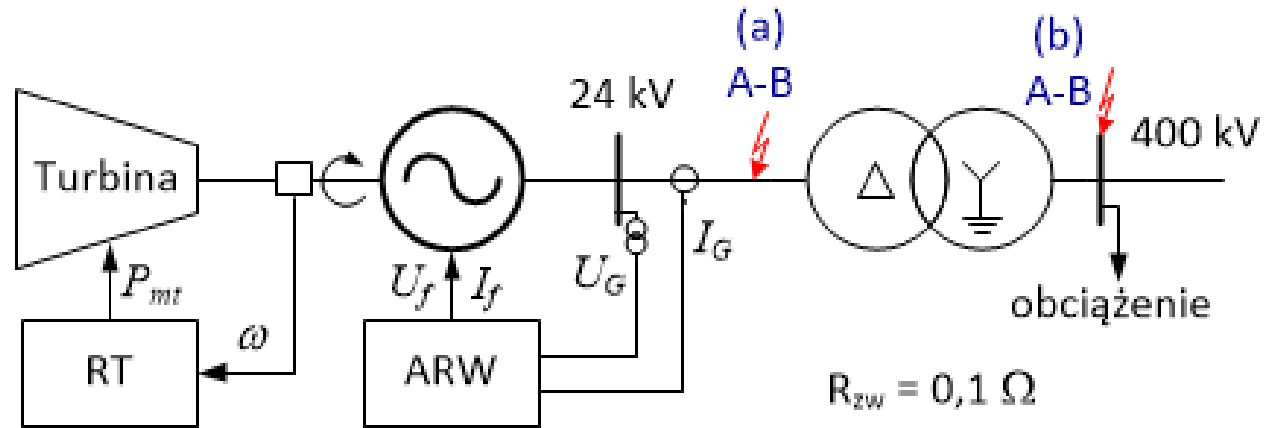
$$H = \frac{0,5 J \omega_{rN}^2 \times 10^{-6}}{S_N} = 5,4831 \times 10^{-9} \frac{J \cdot n_N^2}{S_N}$$

Generator synchroniczny - przykład

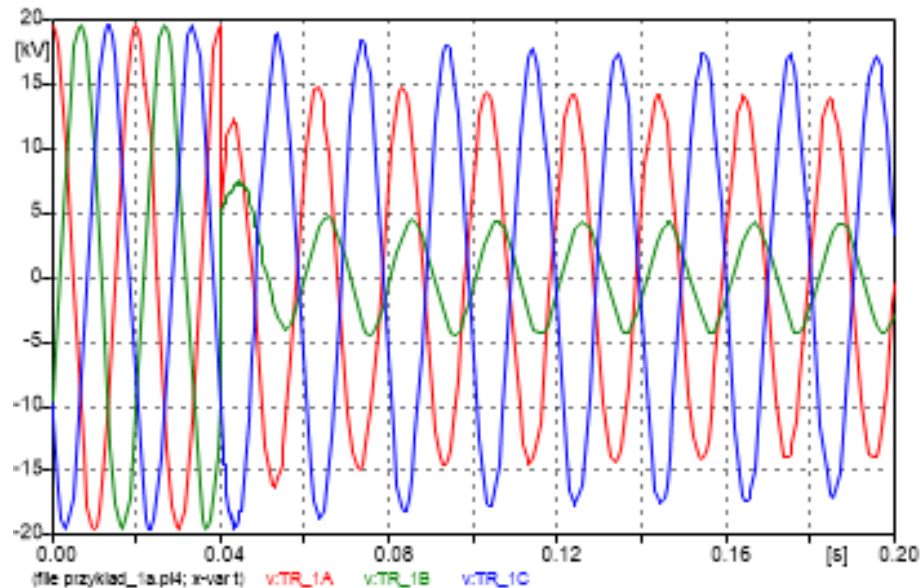
Przykład:

$$S_N = 818 \text{ MVA},$$

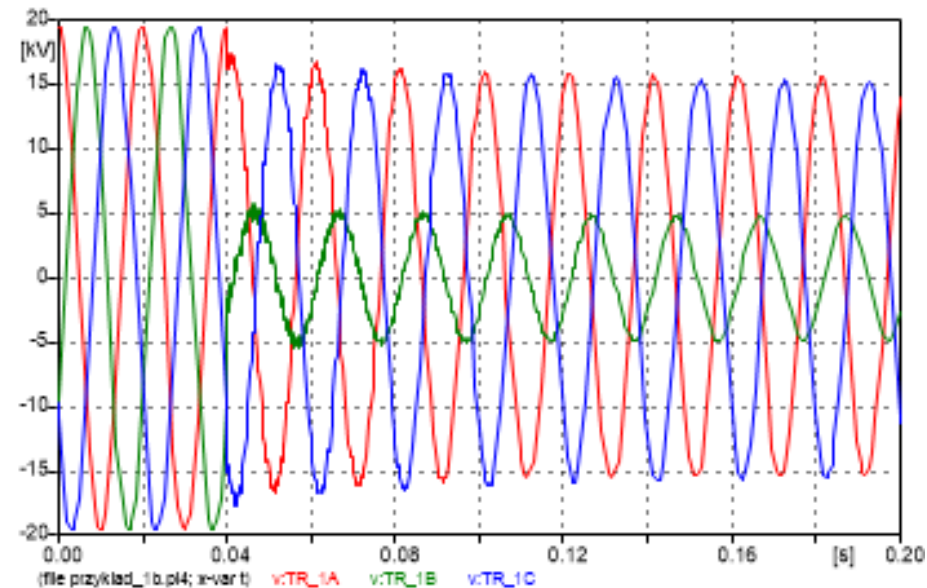
$$U_N = 24 \text{ kV}$$



zwarcie (a)

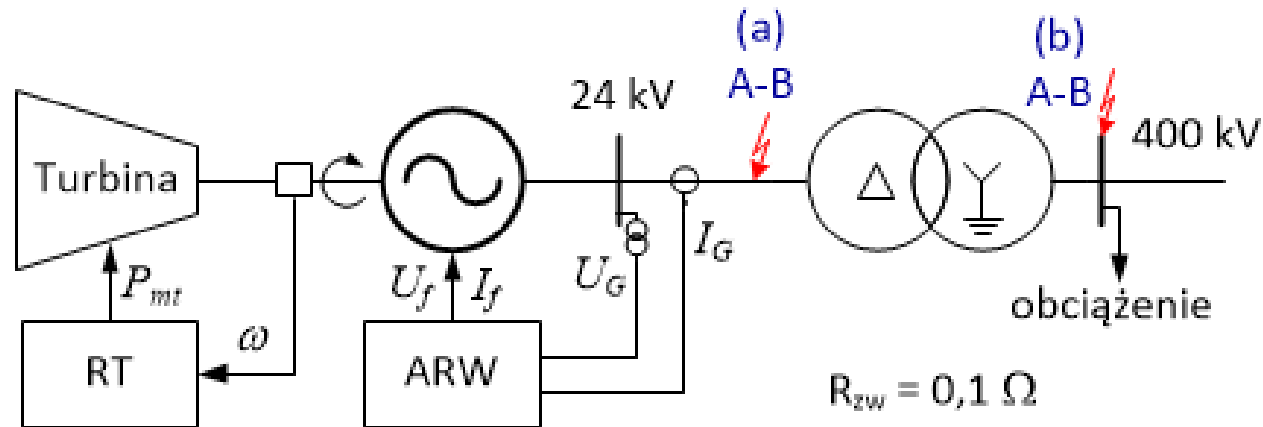


zwarcie (b)

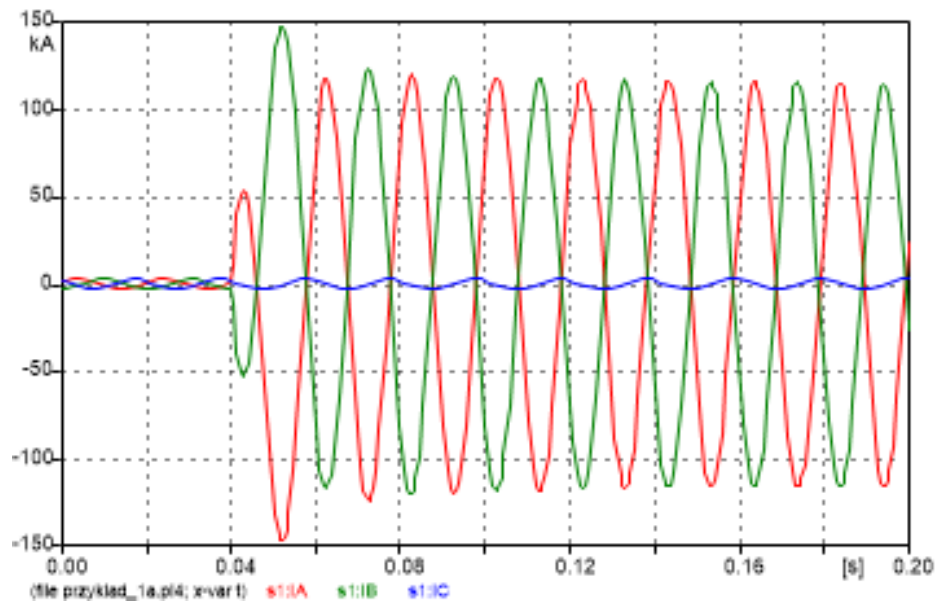


Napięcia na zaciskach generatora

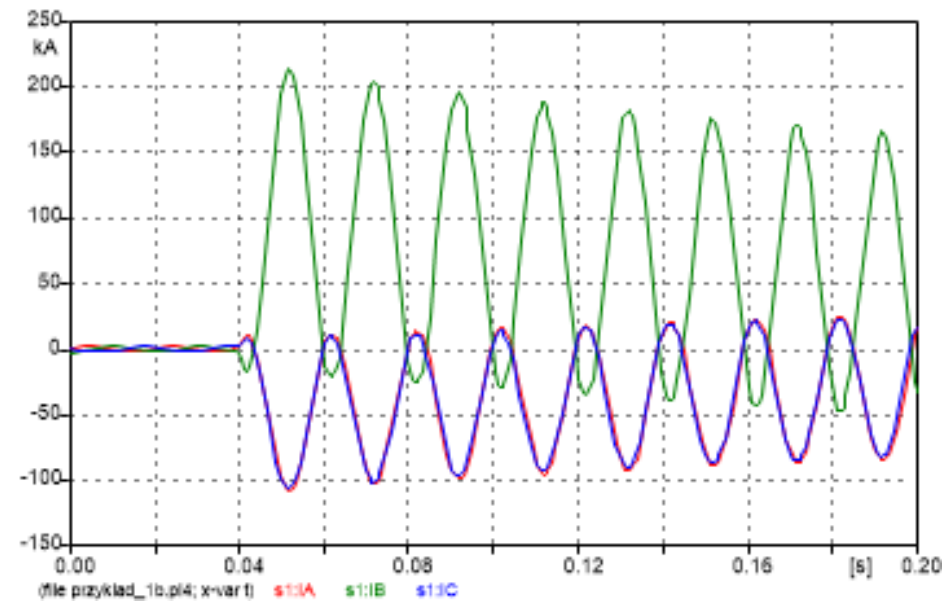
Generator synchroniczny - przykład



zwarcie (a)

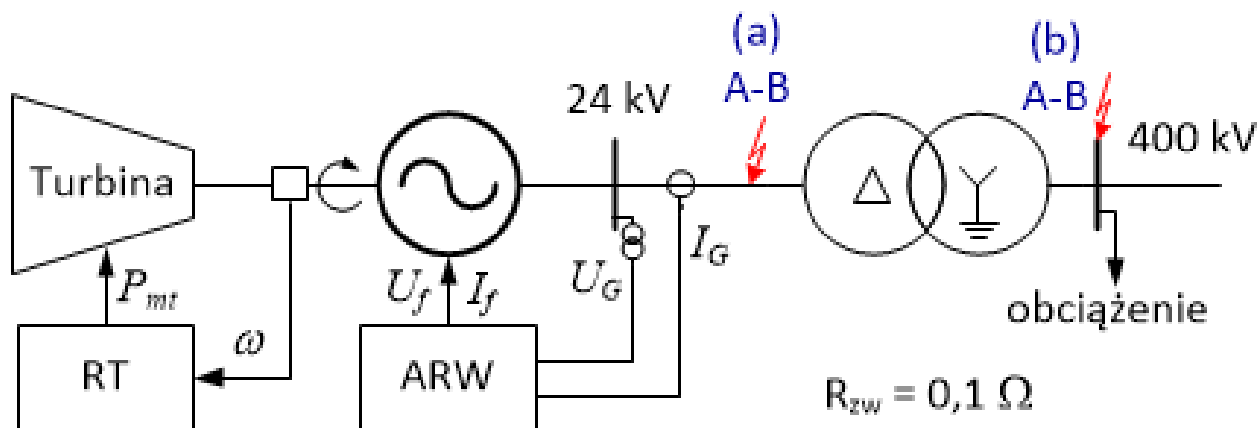


zwarcie (b)



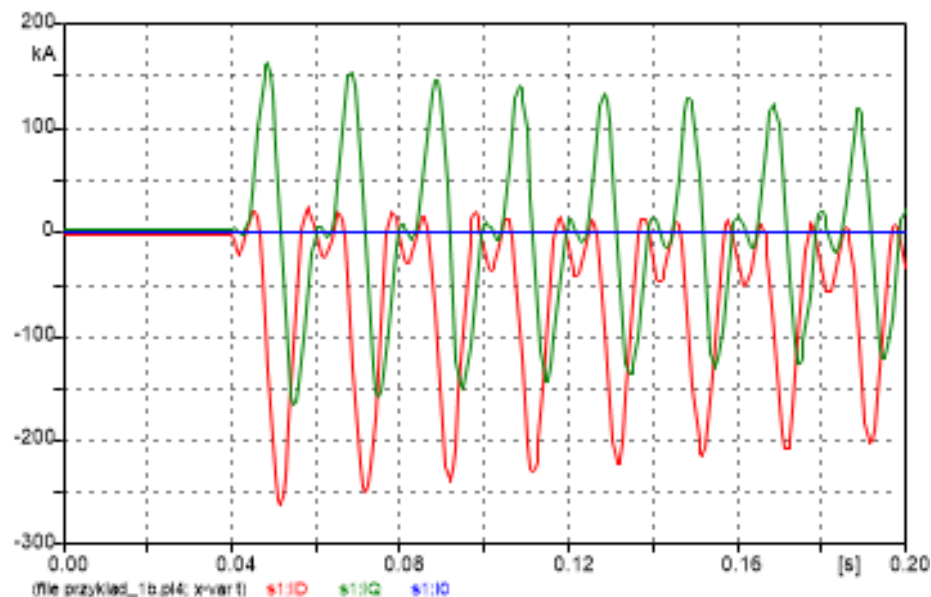
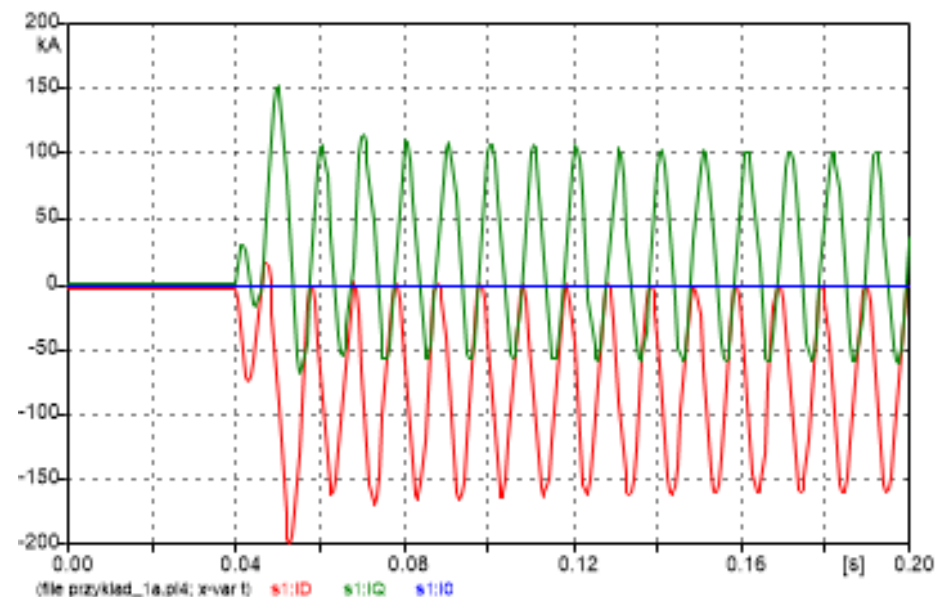
Prądy fazowe generatora

Generator synchroniczny - przykład



zwarcie (a)

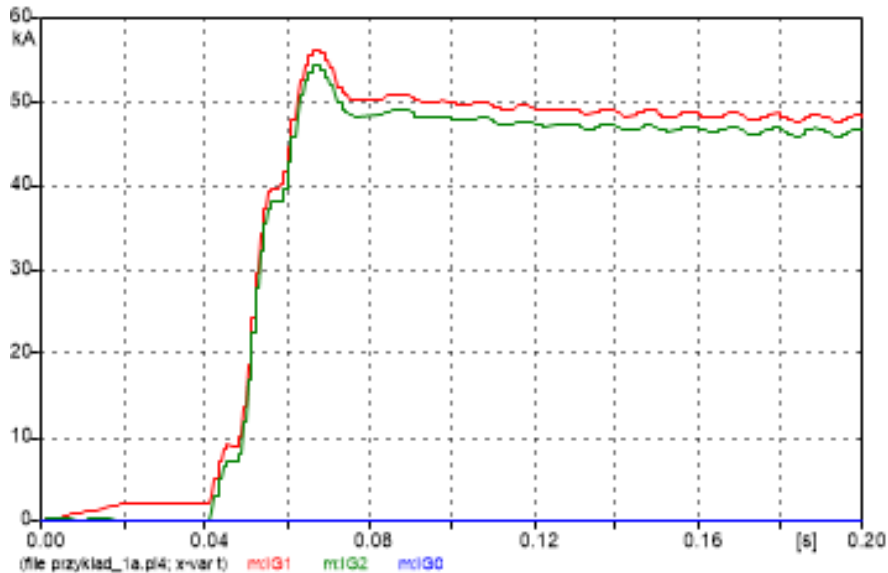
zwarcie (b)



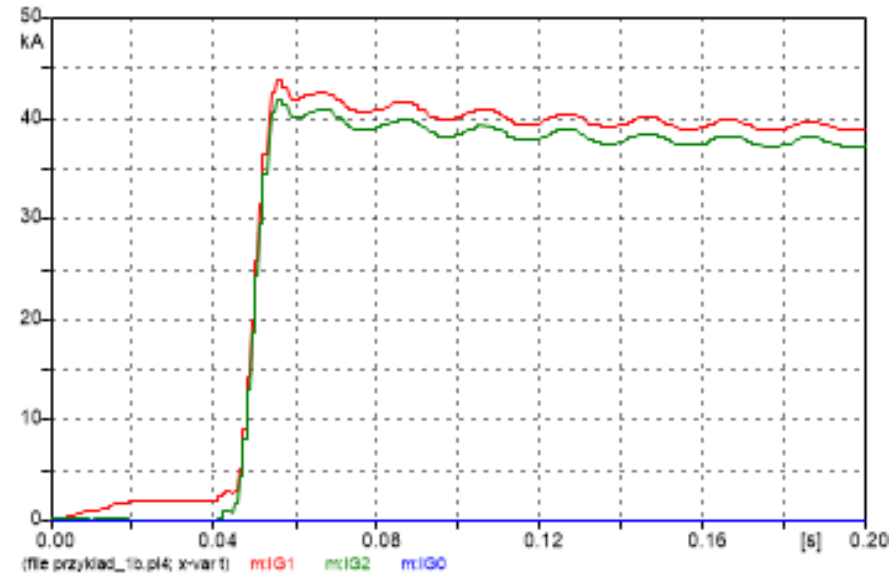
Prądy wirnika i_d , i_q , i_0

Generator synchroniczny - przykład

zwarcie (a)



zwarcie (b)



Składowe symetryczne prądów generatora: I_1 , I_2 , I_0

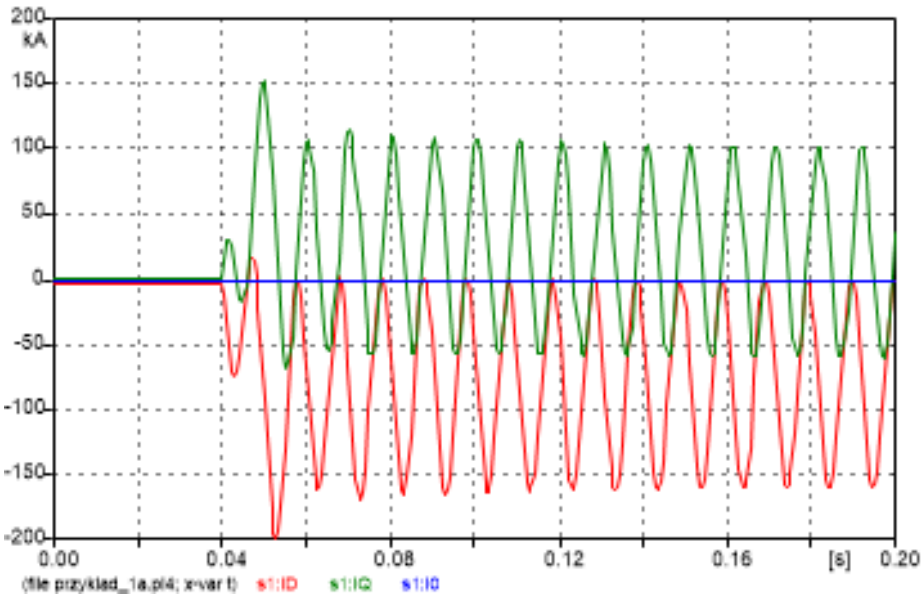
W stanie ustalonym prądy $I_2 = I_0 = 0$.

Po zwarcu A-B w prądach występują duże prądy ze znaczną obecnością składowej przeciwnej ($I_1 \approx I_2$).

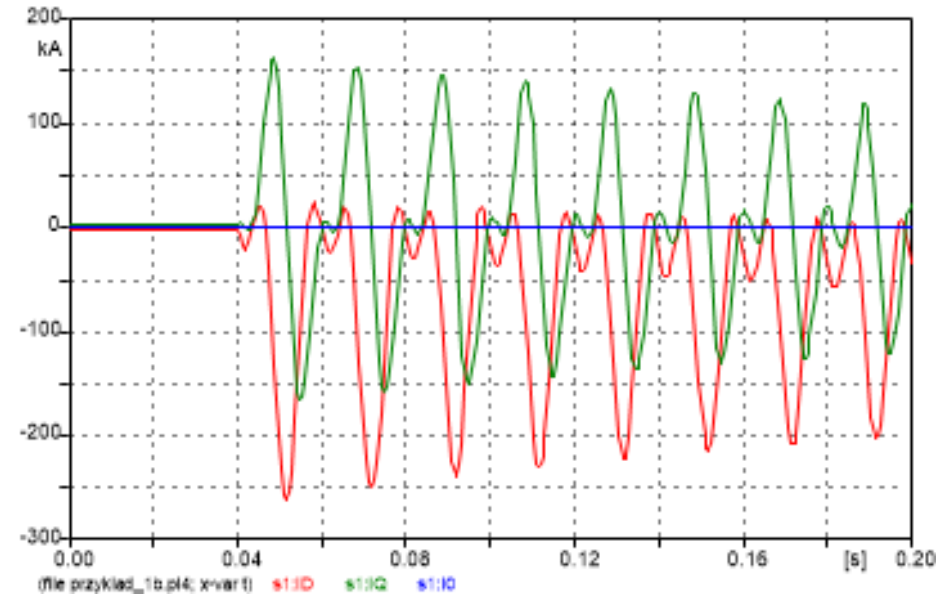
Jest to duże zagrożenie dla wytrzymałości termicznej i dynamicznej generatora.

Generator synchroniczny - przykład

zwarcie (a)



zwarcie (b)



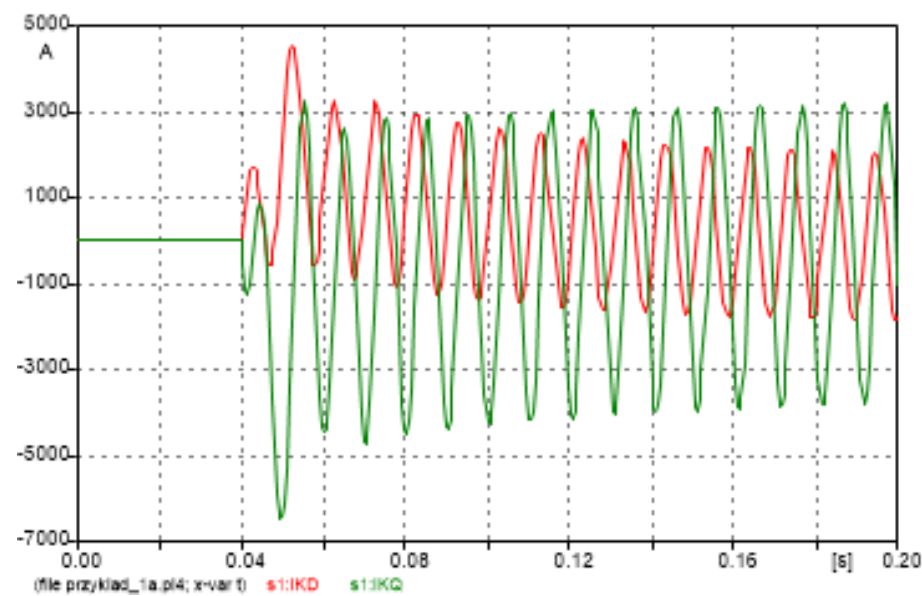
Prądy sprowadzone do wirnika: i_d , i_q , i_0

W stanie ustalonym prądy i_d , i_q są stałe, $i_0 = 0$.

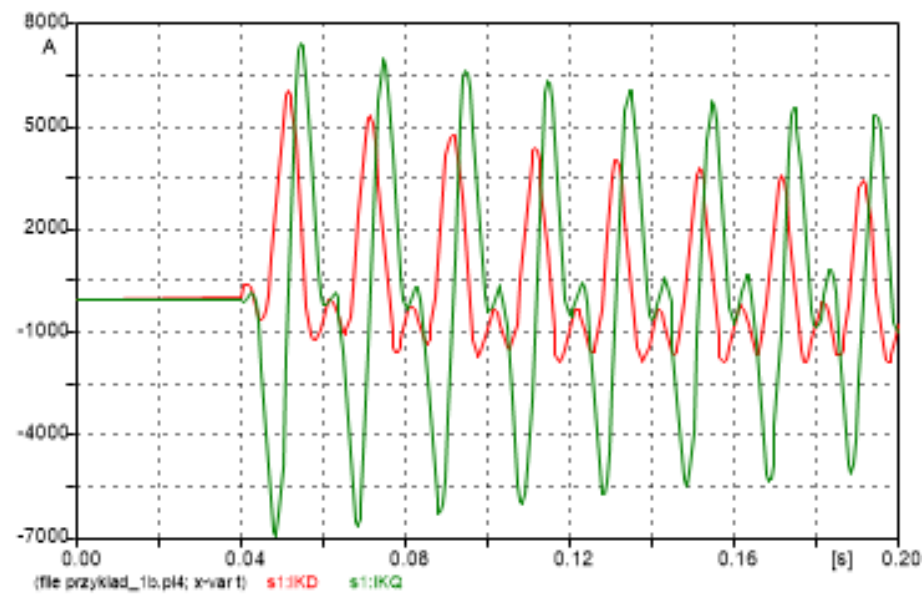
Po zwarcu A-B w prądach występuje składowa przeciwna ($I_1 \approx I_2$), przez co prądy i_d , i_q mają podwójną częstotliwość (2-ga harm.). Powoduje to szybkie nagrzewanie się uzwojeń i żelaza wirnika.

Generator synchroniczny - przykład

zwarcie (a)



zwarcie (b)



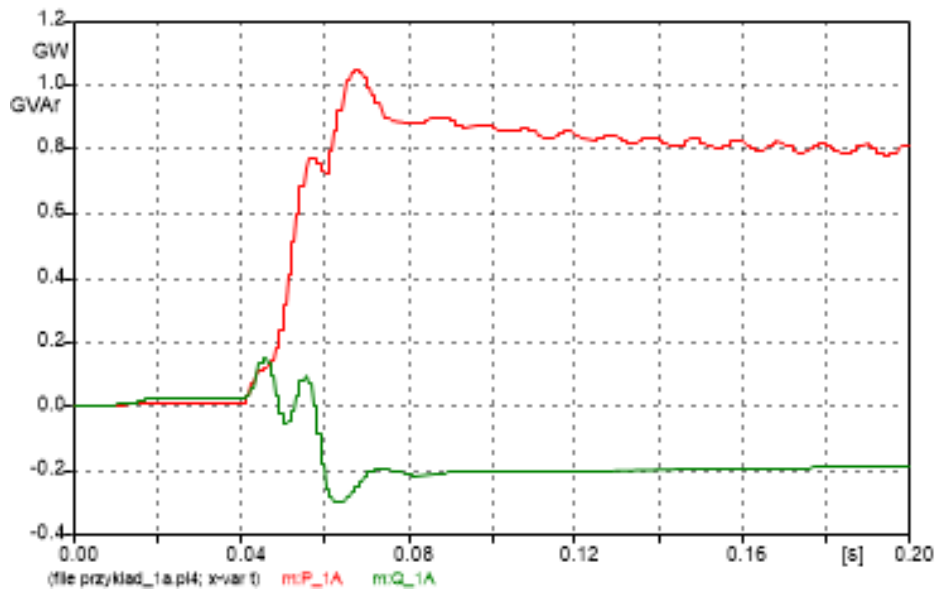
Prądy w ekwiwalentnych obwodach tłumiących: i_D , i_Q

W stanie ustalonym (przed zwarcie) prądy: $i_D \approx i_Q \approx 0$.

Po zwarcu A-B prądy te przyjmują duże wartości o charakterze podwójnej częstotliwości, co powoduje szybkie nagrzewanie się żelaza wirnika (ze względów wytrzymałościowych jest on zbudowany w postaci jednolitej odkuwki).

Generator synchroniczny - przykład

zwarcie (a)



zwarcie (b)



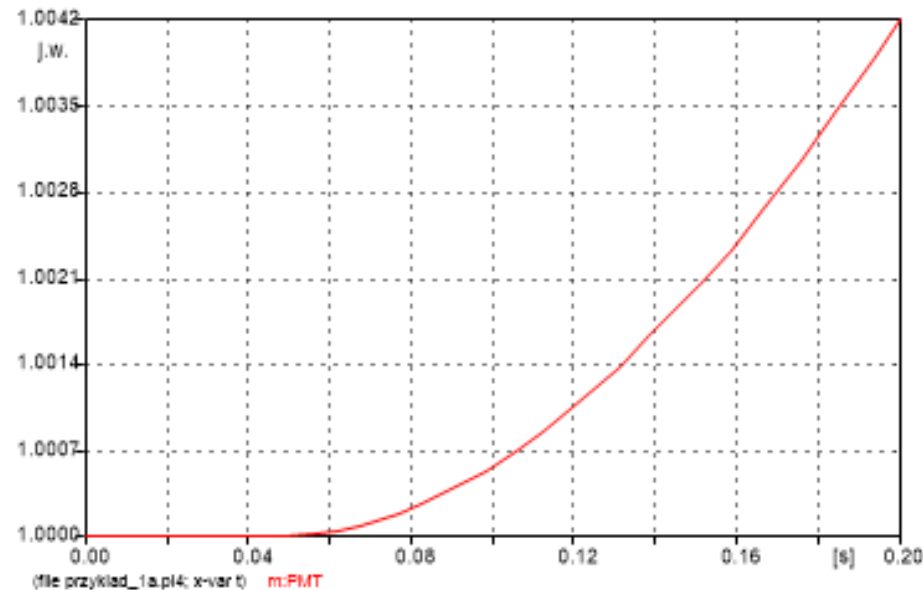
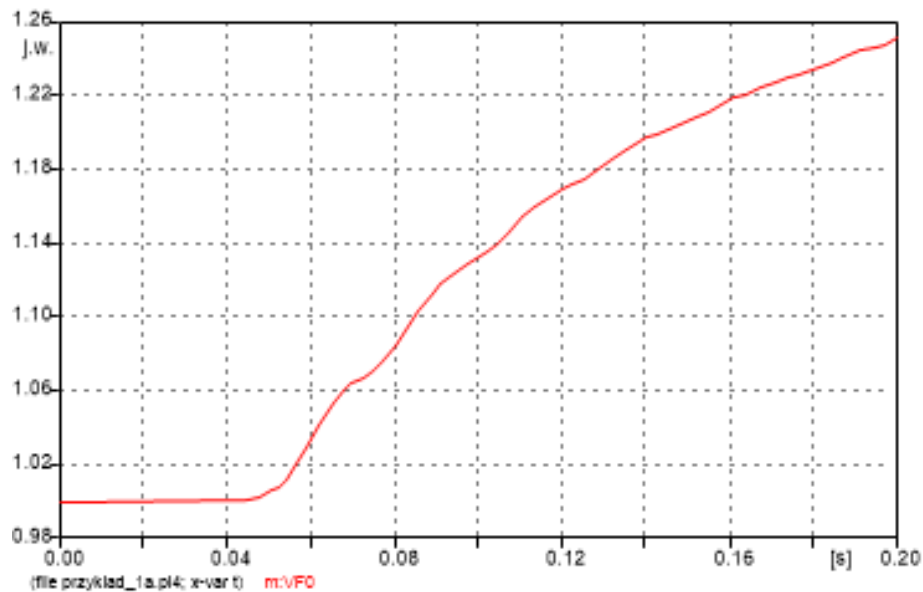
Przebiegi mocy czynnych (P) i biernych (Q)

W stanie ustalonym (przed zwarcie) moce są stałe (P , Q).

Po zwarcu A-B moc czynna P rośnie, natomiast kierunek i wielkość zmian mocy biernej Q zależy od charakteru pętli zwarciowej.

Generator synchroniczny - przykład

zwarcie (a)



Działanie regulatorów: wzbudzenia (rys. lewy) i turbiny (rys. prawy)

Po zwarcu następuje obniżenie napięcia na zaciskach generatora, co wywołuje działanie ARW w kierunku jego wzrostu (rys. lewy).

Wzrost czynnej mocy oddawanej do sieci wywołuje spadek prędkości obrotowej, co stara się skompensować regulator turbiny.

Widać duże zwłoki w tym działaniu, zwłaszcza w odniesieniu do turbiny.

