

Aleksander ŻYWIĘC

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej

## ANALIZA I BADANIE PRZEPIĘĆ I PRZETĘŻEŃ W OBWODZIE WZBUDZENIA MASZYNY SYNCHRONICZNEJ Z LITYM WIRNIKIEM WZBUDZANEJ ZE ŹRÓDŁA PROSTOWNIKOWEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono metodę analityczną obliczania przepięć i przetężeń, ujawniających się w obwodzie wzbudzenia maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym, przy założeniu stałej prędkości wirnika. Uwzględniono zmodyfikowany sposób reprezentacji wpływu zjawisk elektromagnetycznych w rdzeniu litym wirnika maszyny. Przedstawiono wybrane wyniki badań przepięć i przetężeń dla turbo-generatora o mocy 50 MW.

### 1. Uwagi wstępne

Źródła wzbudzenia dużych maszyn synchronicznych są zwykle wykonywane jako układy prostownikowe (diodowe, tyrystorowe). Takie źródła - poza szeregiem istotnych zalet - mają podstawową wadę, wynikającą z dużej wrażliwości diod i tyrystorów na przecięcia prądowe (przetężenia) i napięciowe (przepięcia). Jest zatem uzasadnione wykonywanie prac badawczych, zmierzających do wyznaczenia przetężeń i przepięć ujawniających się w obwodzie wzbudzenia maszyny synchronicznej, pracującej zarówno w stanach ustalonych, jak i w stanach zakłóceń.

Przepięcia i przetężenia, występujące przy dowolnym zakłóceniu pracy maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym, można wyznaczyć w wyniku rozwiązania równań stanu elektrodynamicznego maszyny metodą obliczeń komputerowych [4], [5]. Wyniki obliczeń komputerowych są niezbyt wygodne przy badaniu wpływu parametrów maszyny i źródła wzbudzenia na wartości przepięć i przetężeń. Przy takich badaniach korzystniejsze są zależności analityczne, określające w jawnej postaci przepięcia i przetężenia jako funkcję parametrów zastępczych i warunków pracy maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym.

Na podstawie wykonanych komputerowych badań symulacyjnych różnych stanów zakłóceńowych maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym stwierdzono, że ekstremalne przepięcia i przetężenia występują w początkowym przedziale czasu trwania stanu niestabilnego, zwykle w przedziale 0.. ...1 s. W tym przedziale czasu prędkość wirowania maszyny ulega niewielkim zmianom [4]. Wynika stąd wniosek, że obliczenia przepięć i przetężeń

mogą być wykonywane przy upraszczającym założeniu stałej prędkości wirowania wirnika maszyny synchronicznej.

W niniejszej pracy wyprowadzono zależności analityczne, określające przebiegi czasowe prądu w zamkniętym obwodzie wzbudzenia oraz napięcia na zaciskach otwartego obwodu wzbudzenia maszyny synchronicznej wzbudzonej ze źródła prostownikowego, z których wynika jawna postać równań określających przetężenia i przepięcia. W analizie założono stałą prędkość wirnika maszyny, pominięto rezystancję uzwojenia twornika oraz uwzględniono zmodyfikowany sposób reprezentacji oddziaływania twornika i rdzenia litego wirnika w modelu matematycznym maszyny. Ponadto przedstawiono wybrane wyniki badań przetężeń i przepięć, występujących w obwodzie wzbudzenia po niesynchronicznym przyłączeniu do sieci trójfazowej turbogeneratorsa o mocy 50 MW.

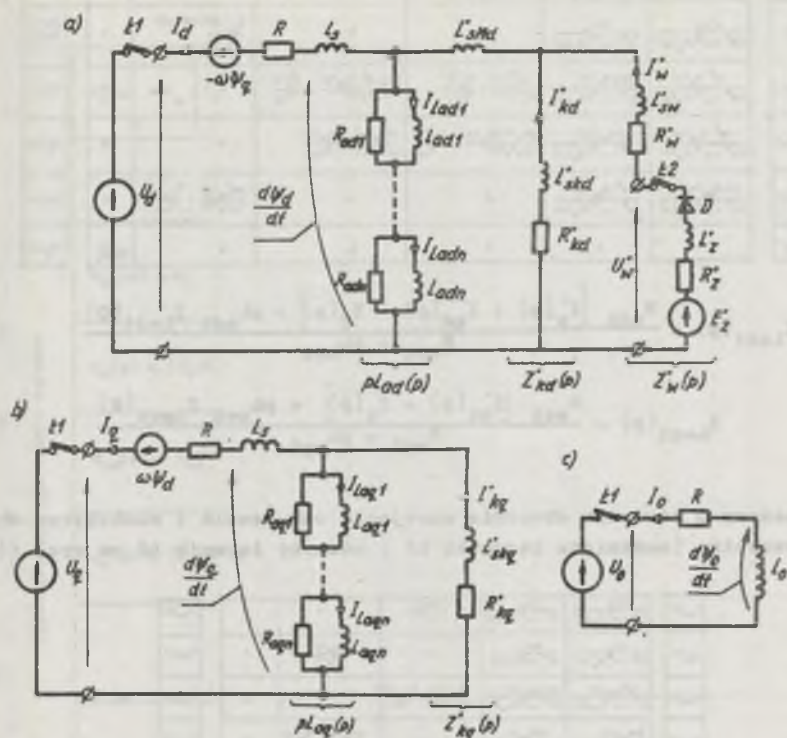
## 2. Funkcje operatorowe prądów w zastępczych obwodach maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym

Do wyznaczenia zależności analitycznych, określających przetężenia i przepięcia w obwodzie wzbudzenia maszyny synchronicznej, jest konieczna znajomość równań przebiegów nieustalonych prądów płynących w obwodach zastępczych maszyny. Takie równania można wyznaczyć metodą analityczną, jeżeli rozpatruje się pracę maszyny przy stałej prędkości wirowania wirnika. W takim przypadku zależności określające prądy w obwodach zastępczych wynikają z rozwiązania równań stanu elektromagnetycznego maszyny.

Na rys. 1 przedstawiono zmodyfikowane schematy zastępcze maszyny synchronicznej wzbudzonej ze źródła prostownikowego, przyjęte do analizy przetężeń i przepięć. Słuszność tych schematów przedyskutowano w pracach [5], [4], [6]. W schematach na rys. 1:

- oddziaływanie elektromagnetyczne uzwojenia twornika i litego rdzenia wirnika jest reprezentowane za pomocą łańcucha  $n$  gałęzi typu  $R_1-L_1$  (przy czym  $i = 1, 2, \dots, n$ ), o indukcyjności operatorowej  $L_{ad}(p)$  - w osi wzdłużnej oraz  $L_{aq}(p)$  - w osi poprzecznej maszyny,
- uzwojenie tłumiące maszyny jest reprezentowane za pomocą gałęzi zastępczej  $R_{kd}^* - L_{kd}^*$  w osi wzdłużnej oraz  $R_{kq}^* - L_{kq}^*$  w osi poprzecznej,
- prostownikowe źródło wzbudzenia jest reprezentowane za pomocą źródła napięciowego o parametrach zastępczych  $E_{\Sigma}^* - R_{\Sigma}^* - L_{\Sigma}^*$  oraz diody  $D$  idealnej,
- łączniki  $L1$  i  $L2$  umożliwiają realizację schematu zastępczego dla maszyny o zamkniętych lub o otwartych obwodach uzwojeń twornika i wzbudzenia.

Pełne rozwiązanie równań stanu elektromagnetycznego maszyny, wynikających z rys. 1, przedstawiono w pracy [4]. W niniejszym punkcie, dla zapewnienia całościowego potraktowania rozpatrywanych zagadnień, przedstawia



Rys. 1. Zmodyfikowany schemat zastępczy maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym

a - w osi wzdłużnej, b - w osi poprzecznej, c - dla składowej zerowej

się równania uproszczone - zaczerpnięte z pracy [4]. Przy pominięciu rezystancji  $R$  zastępczego uzwojenia twornika w osi wzdłużnej i w osi poprzecznej maszyny otrzymuje się następujące funkcje operatorowe (przyjęto przekształcenie Laplace'a-Carsona) prądów płynących w zastępczych obwodach maszyny, po zakłóceniu jej pracy ustalonej:

- dla maszyny o zamkniętych obwodach uzwojeń twornika i wzbudzenia (zamknięte łączniki  $L1$  i  $L2$  na rys. 1):



$I_w(p)$	$\frac{-p \cdot u_w}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{-\omega u_w}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{C_d(p)}{X_d(p)}$	$\frac{C_d(p)}{X_d(p)}$	*	*	$U_w(p)$
$I_q(p)$	$\frac{\omega u_w}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	$\frac{-p u_w}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$			$\frac{C_q(p)}{X_q(p)}$	*	$U_q(p)$
$I_d(p)$	$\frac{-p^2 C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{-p C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{p C_d(p)}{-n X_d(p)} + \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	$\frac{p C_d(p) C_d(p)}{\omega X_d(p)} - \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	*	*	$U_d(p)$
$I_{kd}(p)$	$\frac{-p^2 C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{-p \omega C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{p \omega C_d(p)}{\omega X_d(p)} - \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	$\frac{p C_d(p)}{-n X_d(p)} + \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	*	*	$U_{kd}(p)$
$I_{kq}(p)$	$\frac{p C_q(p)}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	$\frac{-p C_q(p)}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	*	*	$\frac{p C_q(p)}{\omega X_q(p)} - \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	*	$U_{kq}(p)$
$I_d'(p)$	*	*	*	*	*	$\frac{-1}{R_{ad}}$	$U_d'(p)$

$$I_{Ladi}(p) = \frac{R_{adi} [I_w'(p) + I_{kd}(p) - I_d(p)] + pL_{adi} I_{Ladi}(0)}{R_{adi} + pL_{adi}} \quad (1b)$$

$$I_{Laqi}(p) = \frac{R_{aqi} [I_{kq}(p) - I_q(p)] + pL_{aqi} I_{Laqi}(0)}{R_{aqi} + pL_{aqi}} \quad (1c)$$

- dla maszyny o otwartym obwodzie uzwojenia wzbudzenia i zamkniętym obwodzie twornika (zamknięte łączniki Ł1 i otwarty łącznik Ł2 na rys. 1):

$I_w(p)$	$\frac{-p u_w}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{-\omega u_w}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{C_d(p)}{X_d(p)}$	*	*	$U_w(p)$
$I_q(p)$	$\frac{\omega u_w}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	$\frac{-p u_w}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	*	$\frac{C_q(p)}{X_q(p)}$	*	$U_q(p)$
$I_d(p)$	$\frac{-p^2 C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{-p C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{p C_d(p)}{-n X_d(p)} + \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	$\frac{p C_d(p) C_d(p)}{\omega X_d(p)} - \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	*	$U_d(p)$
$I_{kd}(p)$	$\frac{-p^2 C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{-p \omega C_d(p)}{(p^2 + \omega^2)X_d(p)}$	$\frac{p \omega C_d(p)}{\omega X_d(p)} - \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	$\frac{p C_d(p)}{-n X_d(p)} + \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	*	$U_{kd}(p)$
$I_{kq}(p)$	$\frac{p C_q(p)}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	$\frac{-p C_q(p)}{(p^2 + \omega^2)X_q(p)}$	*	$\frac{p C_q(p)}{\omega X_q(p)} - \frac{U_w(p)}{R_{ad}}$	*	$U_{kq}(p)$
$I_d'(p)$	*	*	*	*	$\frac{-1}{R_{ad}}$	$U_d'(p)$

$$I_{Ladi\infty}(p) = \frac{R_{adi} [I_{kd\infty}(p) - I_d'(p)] + pL_{adi} I_{Ladi\infty}(0)}{R_{adi} + pL_{adi}} \quad (2b)$$

$$I_{Laqi\infty}(p) = \frac{R_{aqi} [I_{kq\infty}(p) - I_q'(p)] + pL_{aqi} I_{Laqi\infty}(0)}{R_{aqi} + pL_{aqi}} \quad (2c)$$

Figurujące w tych równaniach transmitanaje operatorowe oraz elementy macierzy napięć wymuszających wynikają z zależności zestawionych w tabeli 1. W równaniach (1) i (2) oraz w tabeli 1:

- indeks i przyjmuje wartości  $i = 1, 2, \dots, n$ ,
- rezystancja zastępcza obwodu wzbudzenia  $R'_{wz} = R'_w + R'_z$ ,
- symbolem  $I(0)$  oznaczono wartości początkowe prądów płynących w obwodach zastępczych maszyny w chwili  $t = +0$ ,
- dodatkowym indeksem  $\infty$  oznaczono funkcje operatorowe obowiązujące dla maszyny o otwartym obwodzie uzwojenia wzbudzenia,

Transmitancje operatorowe i elementy operatorowej macierzy napięć wymuszających wynikające ze zmodyfikowanych schematów zastępczych (rys. 1) maszyny synchronicznej

Nazwa	Maszyna o zamkniętych obwodach uzwojeń twornika i wzbudzenia	Maszyna o otwartym obwodzie uzwojenia wzbudzenia i zamkniętym obwodzie uzwojenia twornika
Transmitancje operatorowe maszyny	$X_d(p) = \omega_n \left[ L_s + \frac{L_{ad}(p) \cdot \left\{ pL_{\sigma Md} \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p) \right\}}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p)} \right]$	$X_{d\infty}(p) = \omega_n \left[ L_s + \frac{L_{ad}(p) \left[ pL_{\sigma Md} + Z'_{kd}(p) \right]}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] + Z'_{kd}(p)} \right]$
	$G_w(p) = \omega_n \frac{L_{ad}(p) Z'_{kd}(p)}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p)}$	-
	$G_{kd}(p) = \omega_n \frac{L_{ad}(p) Z'_w(p)}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p)}$	$G_{kd\infty}(p) = \omega_n \frac{L_{ad}(p)}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] + Z'_{kd}(p)}$
	$H_w(p) = (R'_w + R'_z) \frac{Z'_{kd}(p) + p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right]}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p)}$	-
	$H_{kd}(p) = R'_{kd} \frac{Z'_w(p) + p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right]}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p)}$	$H_{kd\infty}(p) = R'_{kd} \frac{1}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] + Z'_{kd}(p)}$
	$H_w(p) = (R'_w + R'_z) \frac{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right]}{p \left[ L_{ad}(p) + L_{\sigma Md} \right] \left[ Z'_w(p) + Z'_{kd}(p) \right] + Z'_w(p) Z'_{kd}(p)}$	-
Elementy operatorowej macierzy napięć wymuszających	$X_q(p) = \omega_n \left[ L_s + \frac{L_{aq}(p) Z'_{kq}(p)}{p L_{aq}(p) + Z'_{kq}(p)} \right]$	
	$G_{kq}(p) = \omega_n \frac{L_{aq}(p)}{p L_{aq}(p) + Z'_{kq}(p)}$	
	$R_{kq}(p) = R'_{kq} \frac{1}{p L_{aq}(p) + Z'_{kq}(p)}$	
Elementy operatorowej macierzy napięć wymuszających	$U_1(p) = U_d(p) - p \left[ L_s I_d(0) - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{adi} L_{adi} I_{Ladi}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} + \frac{\omega L_{aqi}^2 I_{Laqi}(0)}{R_{aqi} + p L_{aqi}} \right] \right]$	$U_{1\infty}(p) = U_{d\infty}(p) - p \left[ L_s I_{d\infty}(0) - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{adi} L_{adi} I_{Ladi\infty}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} + \frac{\omega L_{aqi}^2 I_{Laqi\infty}(0)}{R_{aqi} + p L_{aqi}} \right] \right]$
	$U_2(p) = U_q(p) - p \left[ L_s I_q(0) - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{aqi} L_{aqi} I_{Laqi}(0)}{R_{aqi} + p L_{aqi}} - \frac{\omega L_{adi}^2 I_{Ladi}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} \right] \right]$	$U_{2\infty}(p) = U_{q\infty}(p) - p \left[ L_s I_{q\infty}(0) - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{aqi} L_{aqi} I_{Laqi\infty}(0)}{R_{aqi} + p L_{aqi}} - \frac{\omega L_{adi}^2 I_{Ladi\infty}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} \right] \right]$
	$U_3(p) = E'_2(p) + p \left[ (L'_{\sigma w} + L'_s + L'_{\sigma Md}) I'_w(0) + L'_{\sigma Md} I'_{kd}(0) + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{adi} L_{adi} I_{Ladi}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} \right] \right]$	-
	$U_4(p) = p \left[ L'_{\sigma Md} I'_w(0) + (L'_{\sigma kd} + L'_{\sigma Md}) I'_{kd}(0) + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{adi} L_{adi} I_{Ladi}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} \right] \right]$	$U_{4\infty}(p) = p \left[ (L'_{\sigma kd} + L'_{\sigma Md}) I'_{kd\infty}(0) + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{adi} L_{adi} I_{Ladi\infty}(0)}{R_{adi} + p L_{adi}} \right] \right]$
	$U_5(p) = p \left[ L'_{\sigma kq} I'_{kq}(0) + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{aqi} L_{aqi} I_{Laqi}(0)}{R_{aqi} + p L_{aqi}} \right] \right]$	$U_{5\infty}(p) = p \left[ L'_{\sigma kq} I'_{kq\infty}(0) + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{R_{aqi} L_{aqi} I_{Laqi\infty}(0)}{R_{aqi} + p L_{aqi}} \right] \right]$
	$U_6(p) = U_0(p) - p L_0 I_0(0)$	$U_{6\infty}(p) = U_{0\infty}(p) - p L_0 I_{0\infty}(0)$

- symbolem  $\omega$  oznaczono prędkość kątową elektryczną maszyny, zaś symbolem  $\omega_n$  - prędkość w warunkach znamionowych.

3. Obliczenie przetężeń w obwodzie wzbudzenia maszyny

Z równań (1) wynika, że w stanach zakłóceńowych prąd płynący w obwodzie wzbudzenia maszyny synchronicznej jest wymuszany przez źródło wzbudzenia oraz przez oddziaływanie elektromagnetyczne uzwojenia twornika, uzwojenia tłumiącego i rdzenia litego wirnika. Jeśli składowa prądu wzbudzenia wywołana przez źródło wzbudzenia jest zgodna ze składową wywołaną przez oddziaływanie elektromagnetyczne twornika i obwodów tłumiących wirnika, to powiększa się wartość obwiloła niestabilnego przebiegu prądu wzbudzenia  $I_w(t)$ . W takim przypadku w obwodzie wzbudzenia mogą wystąpić przetężenia, które określa się z zależności:

$$I_{wm} = \sup \{ I_w(t) \} \quad \text{dla} \quad I_w(t) > 0 \quad (3)$$

Przebieg prądu wzbudzenia  $I_w(t)$  wyznacza się na podstawie równań (1), z których wynika następująca funkcja operatorowa, określająca prąd zastępczego obwodu wzbudzenia maszyny:

$$I_w'(p) = \frac{1}{W(p)} \left\{ - \frac{pL_{ad}(p) Z_{kd}'(p)}{(p^2 + \omega^2) [L_s + L_{ad}(p)]} [pU_1(p) + \omega U_2(p)] + Z_{kd}'(p) U_3(p) + p \left[ L_{sMd}' + \frac{L_s L_{ad}(p)}{L_s + L_{ad}(p)} \right] [U_3(p) - U_4(p)] \right\} \quad (4a)$$

w której:

$$W(p) = Z_w'(p) Z_{kd}'(p) + p \left[ L_{sMd}' + \frac{L_s L_{ad}(p)}{L_s + L_{ad}(p)} \right] [Z_w'(p) + Z_{kd}'(p)] \quad (4b)$$

Do równań powyższych trzeba wprowadzić odpowiednie parametry schematu zastępczego maszyny o wzbudzeniu prostokątowym (rys. 1), w miejsce impedancji operatorowych  $Z_w'(p)$ ,  $Z_{kd}'(p)$  oraz  $pL_{ad}(p)$ . Przy uwzględnieniu odcinków gałęzi typu R-L reprezentujących operatorową impedancję oddziaływania maszyny (tzn. przy założeniu  $n=4$  - rys. 1) otrzymuje się następującą zależność:



$$I'_w(p) = \frac{1}{K'_{Wz} \left[ 1 + \sum_{i=1}^6 (p^i K'_{di}) \right]} \left\{ - \frac{pL_{ad}(1+pT_{skd}) \left[ 1 + \sum_{i=1}^3 (p^i K'_{Gdi}) \right]}{(L_s + L_{ad})(p^2 + \omega^2)} [pU_1(p), \right. \\ \left. + \omega U_2(p)] + \left[ 1 + \sum_{i=1}^5 (p^i K'_{wdi}) \right] U_3(p) - \left[ \sum_{i=1}^5 (p^i K'_{wki}) \right] U_4(p) \right\} \quad (5a)$$

w której:

$K'_{di}, K'_{Gdi}, K'_{wdi}, K'_{wki}$  - stałe jednoznacznie określone przez parametry za-  
stępoze maszyny 4 ,

$T_{skd} = \frac{L'_{skd}}{R'_{kd}}$  - stała czasowa rozproszenia uzwojenia tłumiącego w  
osi wzdłużnej maszyny,

$L_{ad} = \sum_{i=1}^n L_{adi}$  - indukcyjność oddziaływania w osi wzdłużnej maszy-  
ny.

Z zależności (5a) widać, że funkcja  $I'_w(p)$  jest w ogólności ilorazem  
dwóch wielomianów operatorowych:

$$I'_w(p) = \frac{W_{IL}(p)}{W_{IM}(p)} \quad (5b)$$

Dla rozpatrywanych zakłóceń pracy maszyny synchronicznej zadane są wy-  
muszenia  $U_1(p), \dots, U_4(p)$ , wynikające z równań zestawionych w tabelicy 1.  
Zatem wówczas wielomiany  $W_{IL}(p)$  oraz  $W_{IM}(p)$  figurujące w zależności (5b)  
są jednoznacznie określone, przy czym zwykle stopień wielomianu  $W_{IL}(p)$  li-  
cznika jest mniejszy lub co najwyżej równy stopniowi wielomianu  $W_{IM}(p)$   
mianownika. Wtedy można funkcję (5) przedstawić w postaci sumy ułamków pro-  
stych:

$$I'_w(p) = I'_w(p=0) + \sum_{k=1}^x I'_{wk} \frac{p}{p-p_{Ik}} \quad (6a)$$

w której:

- bieguny  $p_{Ik} = p_{Ik1} + jp_{Ik2}$  funkcji  $I'_w(p)$  wynikają z równania

$$\left[ W_{IM}(p) \right]_{p=p_{Ik}} = 0 \quad \text{dla } k = 1, 2, 3, \dots, x \quad (6b)$$

- prądy składowe  $I'_w(p=0)$  oraz  $I_{wk}$  wynikają z zależności

$$I'_w(p=0) = \frac{W_{IL}(p=0)}{V_{IH}(p=0)} \quad (6a)$$

$$I'_{wk} = \left[ \frac{W_{IL}(p)}{p \frac{dW_{IH}(p)}{dp}} \right]_{p=P_{Ik}} = I'_{wk1} + jI'_{wk2} \quad (6d)$$

Na podstawie odwrotnej transformacji operatorowej funkcji (6a) wyznacza się przebieg czasowy prądu  $I'_w(t)$  w następczym obwodzie wzbudzenia maszyny:

$$I'_w(t) = \int_0^{p^{-1}} I'_w(p) = I'_w(p=0) + \sum_{k=1}^x I'_{wk} e^{P_{Ik}t} \quad (7)$$

Ostateczną postać funkcji  $I'_w(t)$  otrzymuje się, grupując w zależności (7) odpowiednie składniki o sprzężonych współczynnikach  $I'_{wk}$  i sprzężonych biegunach  $P_{Ik}$ .

Z kolei wyznacza się przebieg prądu  $I_w(t)$  w rzeczywistym obwodzie wzbudzenia maszyny wykorzystując zasady sprowadzania parametrów wirnika na stronę uzwojenia twornika, przy czym obowiązuje relacja:

$$I_w(t) = I'_w(t) \frac{\omega_n L_{ad} I_{won}}{\sqrt{2} U_{fn}} \quad (8)$$

w której:

$I_{won}$  - prąd wzbudzenia maszyny pracującej jako prądnicą przy znamionowym biegu jałowym,

$U_{fn}$  - wartość skuteczna znamionowego napięcia fazowego twornika maszyny synchronicznej.

Mając w ten sposób określony przebieg czasowy prądu wzbudzenia  $I_w(t)$  można - na podstawie zależności (3) - wyznaczyć poszukiwaną wartość przetężenia  $I_{wm}$  występującego w obwodzie wzbudzenia przy rozpatrywanym zakończeniu pracy maszyny synchronicznej.

#### 4. Obłożenie przepięć w obwodzie wzbudzenia maszyny

Przepięciem w obwodzie wzbudzenia maszyny nazywa się największą wartość obwiloową napięcia  $U_{w\infty}(t)$ , ujawniającą się na zaciskach otwartego uzwojenia wzbudzenia:

$$U_{w\infty} = \sup \left\{ U_{w\infty}(t) \right\} \quad \text{przy} \quad \begin{matrix} I_{w\infty}(t) = 0 \\ U_{w\infty}(t) > 0 \end{matrix} \quad (9)$$



W maszynie synchronicznej o prostownikowym źródle wzbudzenia może wystąpić otwarcie obwodu wzbudzenia w wyniku:

- zamierzonego lub awaryjnego odłączenia źródła wzbudzenia (otwarcie łącznika  $L_2$  na rys. 1),
- zmiany kierunku prądu wzbudzenia  $I_w(t)$  przy założonym źródle wzbudzenia (zamknięty łącznik  $L_2$  na rys. 1), w stanach zakłóceń w pracy maszyny, jako efekt właściwości jednokierunkowego przewodzenia prądu przez źródło prostownikowe.

Przebieg napięcia  $U_{woc}(t)$  można wyznaczyć na podstawie schematu zastępczego maszyny o otwartym obwodzie uwjojenia wzbudzenia (otwarty łącznik  $L_2$  na rys. 1). Z prawa Kirehhoffa wynika następujące równanie operatorowe przy  $I_w'(p) = 0$ :

$$U_{woc}'(p) = -Z_{kd}'(p) I_{kdoo}'(p) + pL_{skd}' I_{kdoo}'(0) - pL_{sw}' I_{woc}'(0) \quad (10)$$

Ograniczając się do analizy przepięć ujawniających się w obwodzie wzbudzenia maszyny pracującej przy założonym źródle prostownikowym, trzeba w zależności (10) podstawić  $I_{woc}'(0) = 0$  oraz uwzględnić funkcję  $I_{kdoo}'(p)$  wynikającą z równań (2). Wówczas otrzymuje się po przekształceniach:

$$U_{woc}'(p) = \frac{Z_{kd}'(p)}{U_{woc}'(p)} \left\{ \frac{pL_{ad}(p)}{(p^2 + \omega^2) [L_a + L_{ad}(p)]} [pU_{1oc}(p) + \omega U_{2oc}(p)] - U_{koc}(p) \right\} + pL_{skd}' I_{kdoo}'(0) \quad (11a)$$

przy czym

$$U_{woc}(p) = Z_{kd}'(p) + p \left[ L_{skd}' + \frac{L_a L_{ad}(p)}{L_a + L_{ad}(p)} \right] \quad (11b)$$

Wprowadzając odpowiednie parametry schematu zastępczego maszyny w miejsca impedancji operatorowych  $Z_{kd}'(p)$  oraz  $pL_{ad}(p)$  funkcję (11) można zapisać w następującej postaci (przy założeniu  $n = 4$  - rys. 1):

$$U_{woc}'(p) = \frac{1 + pL_{skd}'}{1 + \sum_{i=1}^5 (p^i K_{dod}^i)} \left\{ \frac{pL_{ad} \left[ 1 + \sum_{i=1}^3 (p^i K_{Gdod}^i) \right]}{(L_a + L_{ad})(p^2 + \omega^2)} [pU_{1oc}(p) + \omega U_{2oc}(p)] - \left[ 1 + \sum_{i=1}^4 (p^i K_{koc}^i) \right] U_{koc}(p) \right\} + pL_{skd}' I_{kdoo}'(0) \quad (12a)$$

w której stałe  $K_{dosi}$ ,  $K_{Gdosi}$ ,  $K_{kdbol}$  są jednoznacznie określone przez parametry schematu zastępczego maszyny synchronicznej [4].

W ogólności funkcję  $U'_{Woo}(p)$ , określoną zależnością (12), można traktować jako iloraz dwóch wielomianów operatorowych:

$$U'_{Woo}(p) = \frac{W_{UL}(p)}{W_{UM}(p)} \quad (12b)$$

Dla najczęściej rozpatrywanych zakłóceń pracy maszyny stopień wielomianu  $W_{UL}(p)$  licznika funkcji (12b) jest zwykle mniejszy lub równy stopniowi wielomianu  $W_{UM}(p)$  mianownika. Wówczas po rozłożeniu funkcji (12) na ułamki proste otrzymuje się następującą zależność:

$$U'_{Woo}(p) = \sum_{k=1}^y U'_{Woo k} \frac{p}{p - P_{Uk}} \quad (13a)$$

w której:

- bieguny  $P_{Uk} = P_{Uk1} + jP_{Uk2}$  funkcji  $U'_{Woo}(p)$  wynikają z równania

$$\left[ \frac{W_{UM}(p)}{p - P_{Uk}} \right] = 0 \quad \text{dla } k = 1, 2, 3, \dots, y \quad (13b)$$

- napięcia składowe  $U'_{Woo k}$  wynikają z zależności

$$U'_{Woo k} = \left[ \frac{W_{UL}(p)}{p \frac{dW_{UM}(p)}{dp}} \right]_{p=P_{Uk}} = U'_{Woo k1} + jU'_{Woo k2} \quad (13c)$$

Przebieg czasowy napięcia  $U'_{Woo}(t)$ , ujawniającego się na zaciskach zastępczego obwodu wzbudzenia, wynika z odwrotnej transformacji operatorowej funkcji (13a):

$$U'_{Woo}(t) = \int_{\sigma}^{-1} U'_{Woo}(p) = \sum_{k=1}^y U'_{Woo k} e^{P_{Uk} t} \quad (14)$$

Po zgrupowaniu w zależności (14) odpowiednich składników o sprzężonych współczynnikach  $U'_{Woo k}$  i sprzężonych biegunach  $P_{Uk}$  otrzymuje się końcową postać funkcji  $U'_{Woo}(t)$ .

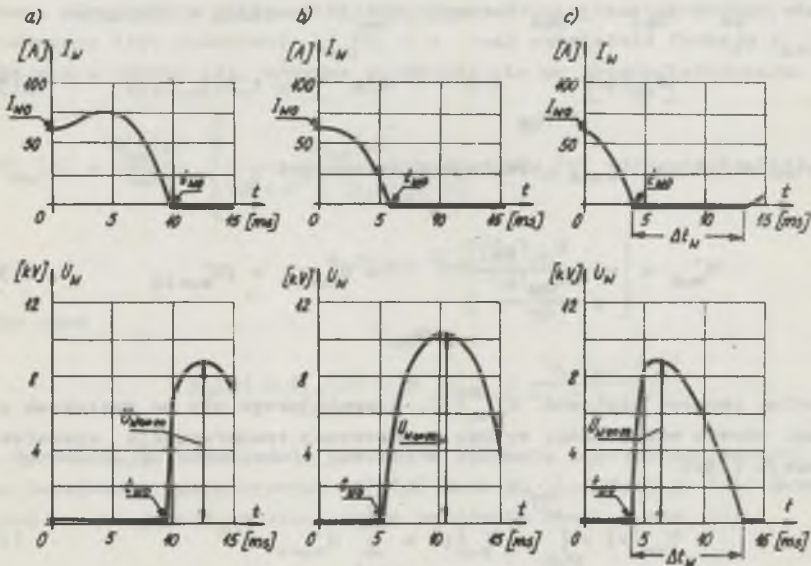
Uwzględniając zasady sprowadzania parametrów uzwojenia wzbudzenia na stronę zastępczego uzwojenia twornika, wyznacza się na podstawie równania (14) przebieg czasowy napięcia  $U_{Woo}(t)$  na zaciskach uzwojenia wzbudzenia maszyny synchronicznej:

$$U_{Woo}(t) = U'_{Woo}(t) \frac{\sqrt{2} U_{fn}}{\omega_n L_{ad} I_{won}} \quad (15)$$

Wartość przepięcia  $U_{w00m}$ , występującego na zaciskach otwartego uzwojenia wzbudzenia przy rozpatrywanym zakłóceniu pracy maszyny synchronicznej, otrzymuje się po wprowadzeniu równania (15) do zależności (9).

### 5. Wybrane wyniki badań

Wykorzystując równania przedstawione w punkcie 3 i 4, przeprowadzono obliczenia prądów i napięć dla turbogeneratora typu T-50-2 produkcji ELEKTROSILA - ZSRR o następujących danych znamionowych: 62,5 MVA, 50 MW, 10,5 kV, 50 Hz wzbudzenie 224V/640A. Z obliczeń wykonanych dla różnych przypadków zakłóceń symetrycznych wynika wniosek, że największe przepięcia i prądy w obwodzie wzbudzenia występują po niesynchronicznym przyłączeniu maszyny do sieci. Z tego powodu w niniejszym punkcie ograniczono się do przedstawienia wybranych wyników badań niesynchronicznego przyłączenia maszyny do sieci symetrycznej.



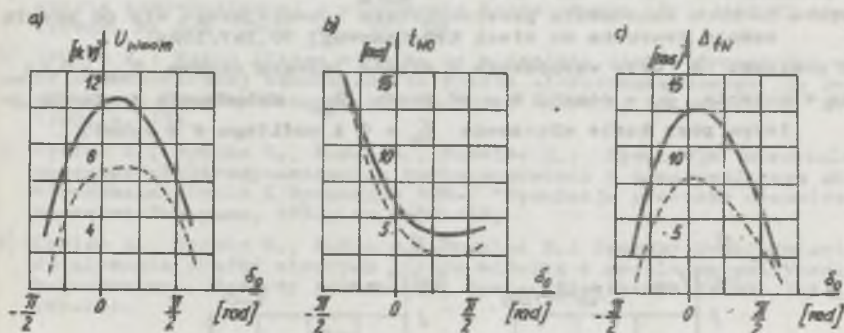
Rys. 2. Przebiegi czasowe prądu  $I_w(t)$  i napięcia  $U_w(t)$  po niesynchronicznym przyłączeniu do sieci trójfazowej 10,5 kV/50Hz turbogeneratora 50 MW wzbudzonego w stanie jałowym prądem  $I_{w0} = 0,2I_{w0n}$  ze źródła prostownikowego przy  $\omega = 0,95\omega_n$ , dla różnych wartości kąta włączenia  $\delta_0$ :

$$a - \delta_0 = -\frac{\pi}{6}; \quad b - \delta_0 = 0; \quad c - \delta_0 = +\frac{\pi}{3}$$

Na rys. 2 przedstawiono obliczone przebiegi czasowe prądu uzwojenia wzbudzenia i napięcia na zaciskach uzwojenia wzbudzenia, występujące po



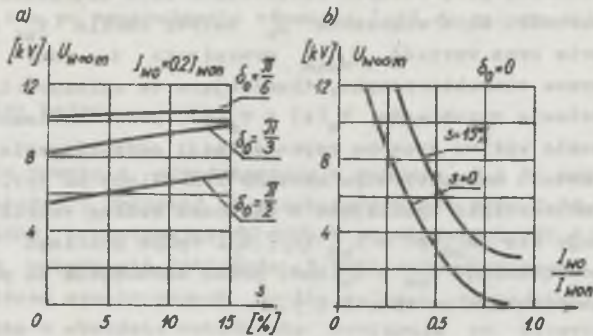
niesynchronicznym przyłączeniu do sieci trójfazowej turbogenerators o wzbudzeniu prostownikowym, przy różnych wartościach kąta włączenia  $\delta_0$ . Z rys. 2 wynika, że od wartości kąta włączenia  $\delta_0$  zależy chwila  $t_{wo}$  rozpoczynania się przepięcia oraz wartość  $U_{wozm}$  przepięcia i czas  $t_w$  trwania przepięcia. Wybrane charakterystyki, ilustrujące te zależności, które wyznaczono na podstawie przebiegów  $I_w(t)$  i  $U_w(t)$ , przedstawiono na rys. 3 [4]. Dla porównania wpływu sposobu reprezentacji oddziaływania rdzenia litego wirnika w modelu matematycznym maszyny wykreślono na rys. 3 linią przerywaną charakterystyki wynikające z obliczeń według teorii klasycznej, w której przyjmuje się  $L_{ad}(p) = L_{ad}$  [1], [4]. Wpływ poślizgu  $s$  maszyny oraz wartości początkowej  $I_{wo} = I_w(t=0)$  prądu wzbudzenia na przepięcia i przetężenia przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys. 3. Wpływ wartości kąta  $\delta_0$  włączenia turbogenerators 50MW do sieci trójfazowej 10,5 kV/50Hz wzbudzonego w stanie jałowym prądem  $I_{wo} = 0,2 I_{won}$  ze źródła prostownikowego przy  $\omega = 0,95 \omega_n$ :

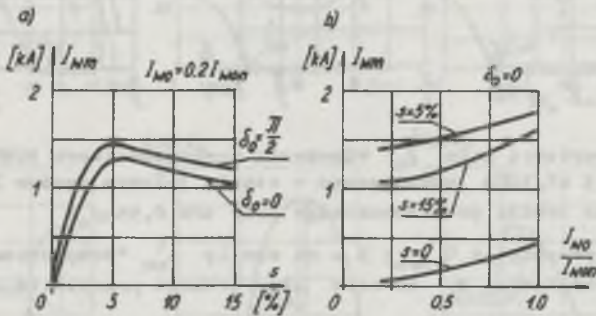
a - na wartość przepięcia  $U_{wozm}$ ; b - na chwilę  $t_{wo}$  "rozpoczynania się" przepięcia, c - na czas  $\Delta t_w$  trwania przepięcia

Z przeprowadzonych badań przy niesynchronicznym przyłączeniu do sieci maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym wynika, że ekstremalne przepięcia w obwodzie wzbudzenia występują w początkowym czasie trwania stanu niestabilnego, bezpośrednio po pierwszym zmniejszeniu się prądu wzbudzenia  $I_w(t)$  do zera. Natomiast ekstremalne przetężenia mogą wystąpić w późniejszym przedziale czasu trwania stanu niestabilnego. Przepięcia i przetężenia osiągają znaczne wartości zależne od kąta włączenia  $\delta_0$ , początkowego prądu wzbudzenia  $I_{wo}$  oraz od poślizgu  $s$  maszyny.



Rys. 4. Zależność wartości przepięcia  $U_{w00m}$  w obwodzie wzbudzenia turbogeneratora 50 MW o wzbudzeniu prostownikowym ujawniającego się po przyłączeniu twornika do sieci trójfazowej 10,5kV/50Hz:

a - od poślizgu  $s$  przy wzbudzeniu w stanie jałowym prądem  $I_{w0} = 0,2 I_{w0n}$  i kącie włączenia  $\delta_0 = \text{const}$ ; b - od prądu  $I_{w0}$  wzbudzenia w stanie jałowym przy kącie włączenia  $\delta_0 = 0$  i poślizgu  $s = \text{const}$ .



Rys. 5. Zależność wartości prądu  $I_{wm}$  w obwodzie wzbudzenia turbogeneratora 50 MW o wzbudzeniu prostownikowym występującego po przyłączeniu twornika do sieci trójfazowej 10,5kV/50Hz:

a - od poślizgu  $s$  przy wzbudzeniu w stanie jałowym prądem  $I_{w0} = 0,2 I_{w0n}$  i kącie włączenia  $\delta_0 = \text{const}$ ; b - od prądu  $I_{w0}$  wzbudzenia w stanie jałowym przy kącie włączenia  $\delta_0 = 0$  i poślizgu  $s = \text{const}$ .

## 6. Uwagi końcowe

Przedstawiona metoda obliczania przepięć i prądów występujących w obwodzie wzbudzenia maszyny synchronicznej o wzbudzeniu prostownikowym

jest dość pracochłonna. Jej istotną korzyścią jest fakt, że umożliwia ona otrzymanie równań określających w sposób jawny przepięcia i przetężenia. Jest to szczególnie istotne przy badaniu wpływu parametrów zastępczych maszyny synchronicznej i prostownikowego źródła wzbudzenia oraz warunków zasilania maszyny uzwojeń na przepięcia i przetężenia.

## LITERATURA

- [1] Paszek W., Żywioł A.: Przepięcia i przetężenia w obwodzie wzbudzenia maszyn synchronicznych z tyrystorowym źródłem wzbudzenia. *Archiwum Elektrotechniki*, t. XXI, Nr 4, 1972, ss. 689-707.
- [2] Paszek W., Żywioł A.: Influence of the solid rotor on overvoltages overcurrents and other disturbances in synchronous generators excited through thyristor rectifiers. *International Conference on Electrical Machines*, Budapest 1982, Proceedings Part 2, pp. 431-434.
- [3] Żywioł A.: Wpływ bloku litego wirnika na przebiegi zakłóceńowe w maszynie synchronicznej o wzbudzeniu tyrystorowym. *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 8-9, 1980, ss. 359-364.
- [4] Żywioł A.: Wpływ litego wirnika na własności elektrodynamiczne maszyny synchronicznej wzbudzonej ze źródła elektromaszynowego lub prostownikowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka"*, Nr 74, 1980, s. 136.
- [5] Żywioł A., Ryzko Z., Kudła J., Pawelec Z.: Symulacja niestabilnych procesów elektrodynamicznych turbogenerators z prostownikowym układem wzbudzenia. *Prace I Symposium SPD-1 "Symulacja procesów dynamicznych"*, Warszawa-Zakopane, 1980, ss. 179-188.
- [6] Żywioł A., Ryzko Z., Kudła J., Pawelec Z.: Sposoby uwzględnienia oddziaływania prądów wirowych litego wirnika w modelu matematycznym turbogenerators. *Zeszyty Naukowe WSI Opole "Elektryka"* Nr 14, 1981, ss. 189-201.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dn. 15.XII.1982 r.

**АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК  
В ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С МАССИВНЫМ РОТОРОМ  
ВОЗБУЖДАЕМОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ**

**Р е з ю м е**

Представлен аналитический метод вычисления перенапряжений и токовых перегрузок в цепи возбуждения синхронной машины с выпрямительным источником возбуждения, при принятой постоянной скорости вращения ротора. Учтено модифицированный способ представления влияния электромагнитных явлений в массивном сердечнике ротора машины. Представлены избранные результаты исследований перенапряжений и токовых перегрузок для турбогенератора мощности 50 МВ.



ANALYSIS AND INVESTIGATION OF OVERVOLTAGES AND OVERCURRENTS DUE TO RECTIFIER SUPPLYING THE EXCITATION WINDING OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH SOLID ROTOR

Summary

It has been presented an analytical method for computation of the overvoltages and overcurrents in the excitation winding supplied by rectifier in the synchronous machine at constant speed. A modified representation of the eddy current reaction in the solid rotor has been taken into account. Some computed results of overvoltages and overcurrents in the turboalternator 50 MW are presented.

