

# UKŁADY WZBUDZENIA GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

## Wymagania stawiane układom wzbudzenia

Zadaniem układu wzbudzenia jest dostarczenie prądu stałego do uzwojenia wzbudzającego generatora w celu wytworzenia w nim wymaganego w danych warunkach pracy pola magnetycznego. Układ wzbudzenia powinien zapewnić pracę synchroniczną generatora zarówno w warunkach ustalonych, jak również w stanach nieustalonych czy też awaryjnych. Aby to było możliwe, od układu wzbudzenia żąda się:

- doprowadzenia do wirnika generatora odpowiedniej wartości mocy,
- pewności działania,
- szybko działającego regulatora wzbudzenia,
- możliwości forsowania wzbudzenia,
- możliwości szybkiego odwzbudzenia.

### Zadania układu regulacji wzbudzenia

1. Regulacja napięcia generatora
2. Regulacja mocy biernej
3. Zapewnienie stabilności pracy GS w systemie elektroenergetycznym. Tłumienie kołysania.
4. Zapewnienie stabilności pracy GS przy zwarciach.

W warunkach ustalonych układ wzbudzenia powinien zapewnić ciągłą poprawną pracę maszyny synchronicznej w systemie energetycznym przy obciążeniu znamionowym, jak również w warunkach odbiegających od znamionowych, ale traktowanych jako normalne warunki pracy.

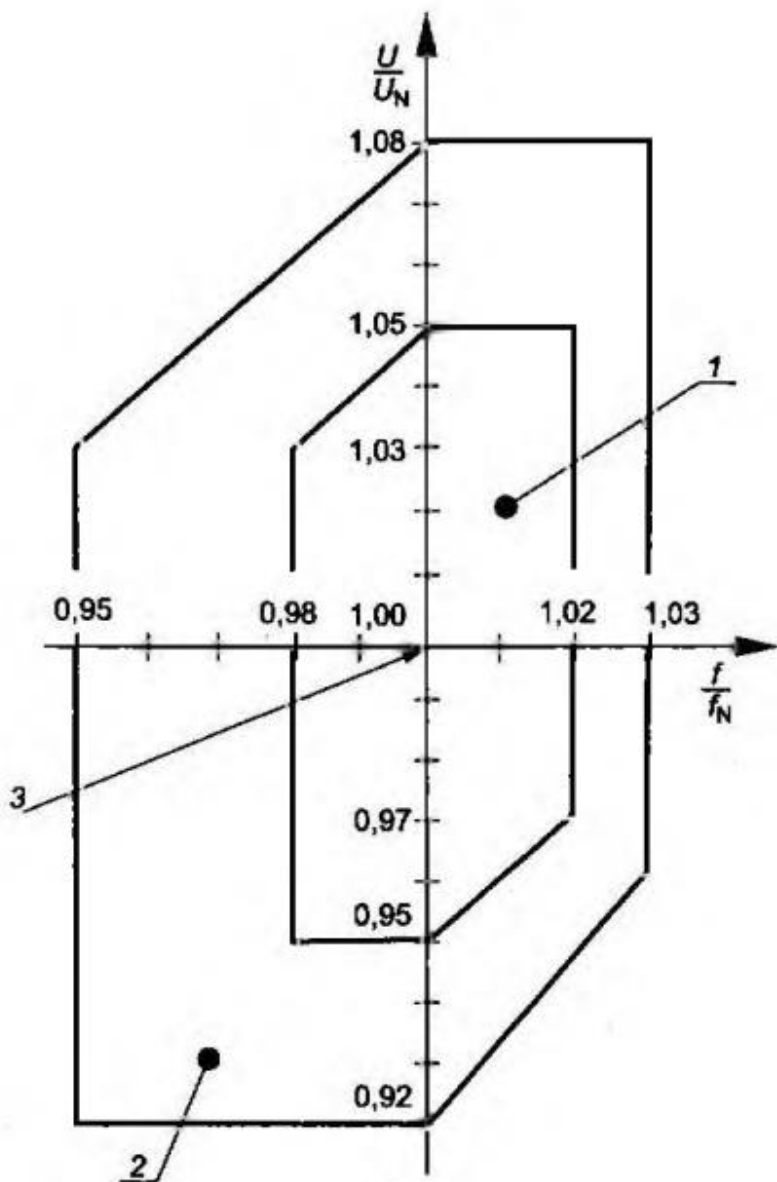
Te znormalizowane warunki przeciążenia prądowego i napięciowego dla generatora są określone następująco:

$$\text{a) } U=U_n, I=1,25 I_n, \cos\varphi_n$$

$$\text{b) } U = 1,05U_n, I = I_n$$

W krańcowym przypadku zaleca się, aby prądnica synchroniczna o mocy znamionowej nie większej niż 1200 MVA wytrzymała przeciążenia prądem równym  $1,5 I_n$  w czasie co najmniej 30 sekund.

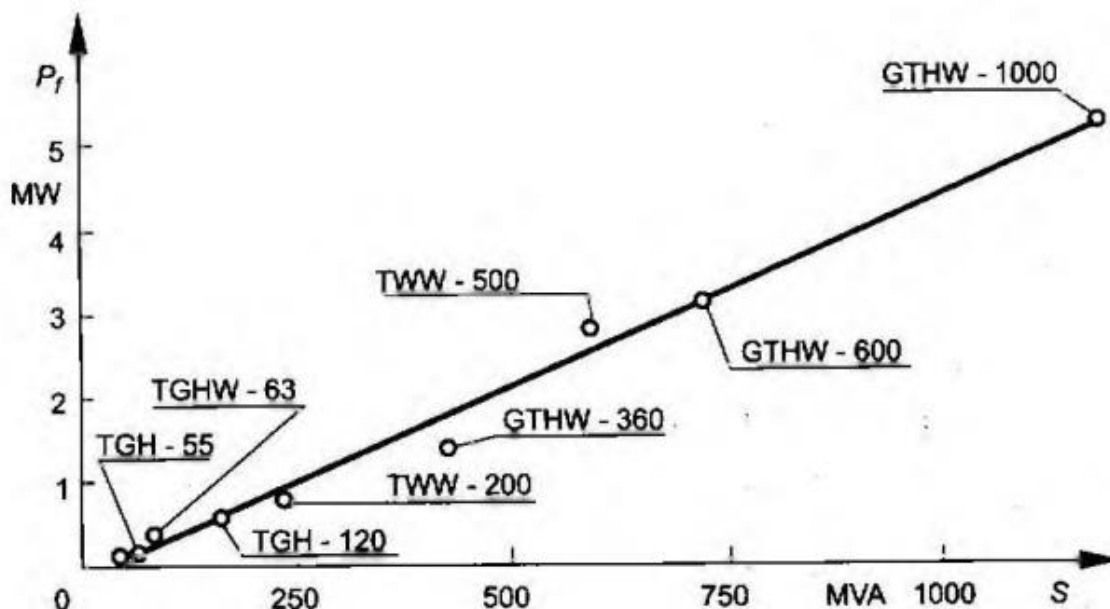
W przypadku przeciążenia napięciowego, gdy dane znamionowe prądnicy określono dla warunków współpracy z siecią o określonej częstotliwości, zmiana napięcia jest powiązana ze zmianą częstotliwości w taki sposób:



Wartości graniczne napięcia i częstotliwości prądnic synchronicznych  
 1 – obszar A, 2 – obszar B (na zewnątrz obszaru A), 3 – punkt odpowiadający danym  
 znamionowym (przedruk za zgodą Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacyjnego –  
 zezwolenie nr 3/P/2004)<sup>1)</sup>

W obszarze A prądnica powinna być zdolna do spełniania swojej podstawowej funkcji w sposób ciągły. Natomiast w obszarze B może wykazywać nieco większe odchylenia od parametrów znamionowych. Dłuższa praca w obszarze B nie jest zalecana.

Moc układu wzbudzenia wynosi około 0.4 – 1 % mocy znamionowej GS.



Zależność mocy układu wzbudzenia  $P_f$  od mocy pozornej  $S$  turbogeneratorów zainstalowanych w Polsce,

TGH – seria TG z chłodzeniem bezpośrednim wodorem (H), GTHW – seria GT z chłodzeniem wirnika (bezpośrednim) wodorem (H) i uzwojeń stojana destylatem wodnym (W), TWW – seria TW z chłodzeniem wirnika (bezpośrednim) wodorem i uzwojeń stojana destylatem wodnym; liczba przy oznaczeniu turbogenerators określa moc znamionową w MW

W warunkach pracy nieustalonej (zakłócenia w systemie energetycznym, zwarcia) układ wzbudzenia ma dostarczyć zwiększoną moc prądu stałego w możliwie krótkim czasie. Musi być on przystosowany do tzw. wzmożonego wzbudzenia, czyli *forsowania wzbudzenia*.

#### Parametry charakterystyczne układu wzbudzenia

- *Znamionowe napięcie układu wzbudzenia*  $U_{EN}$  — Jest to wartość napięcia stałego na zaciskach wyjściowych układu wzbudzenia, którą układ jest w stanie wytworzyć przy przepływie prądu znamionowego wzbudzenia, w określonych warunkach pracy. (Napięcia  $U_{EN}$  nie należy mylić ze znamionowym napięciem wzbudzenia generatora  $U_{fn}$ )
- *Maksymalne napięcie układu wzbudzenia*  $U_p$  - jest to maksymalna wartość napięcia stałego, jaką układ wzbudzenia jest w stanie wytworzyć w określonych warunkach

Podobnie są definiowane:

- *znamionowy prąd układu wzbudzenia*  $I_{EN}$ ,
- *maksymalny prąd układu wzbudzenia*  $I_p$ .

Wymagania wzmożonego wzbudzenia charakteryzują trzy główne parametry:

- współczynnik forsowania napięcia wzbudzenia  $K_u$ ,
- współczynnik forsowania prądu wzbudzenia  $K_i$ .

- nominalna odpowiedź układu wzbudzenia VE (szybkość wzrostu napięcia wzbudzenia).

Współczynnik forsowania napięcia - stosunek maksymalnego napięcia układu wzbudzenia do znamionowego napięcia wzbudzenia

$$K_u = \frac{U_p}{U_{EN}}$$

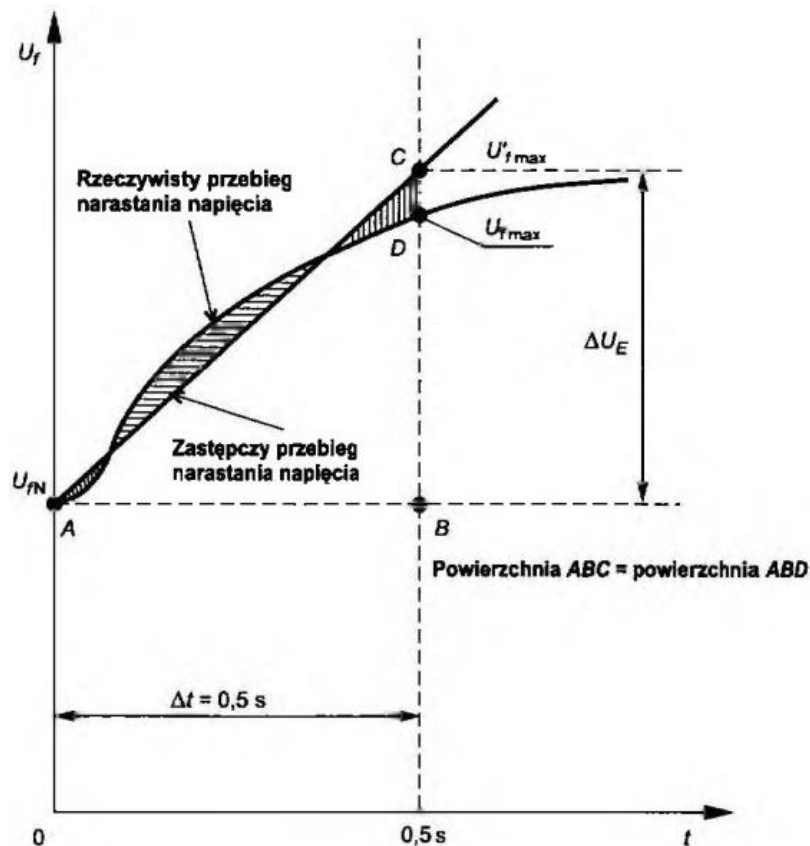
$K_u = 1,5-2(3)$ , dla nowych konstrukcji generatorów wymaga się, aby  $K_u > 2$ .

Współczynnik forsowania prądu wzbudzenia - stosunek maksymalnego prądu układu wzbudzenia do znamionowego prądu wzbudzenia

$$K_i = \frac{I_p}{I_{EN}}$$

Innym parametrem charakteryzującym dynamiczne właściwości układu wzbudzenia jest szybkość (stromość) narastania napięcia wzbudzenia. Parametr ten nazywa się nominalną odpowiedzią układu wzbudzenia VE i równa się współczynnikowi kątowemu prostej linearyzującej rzeczywistą charakterystykę napięciową tego układu w początkowym przedziale czasu  $\Delta t = 0,5$  s odniesionemu do napięcia znamionowego wzbudzenia

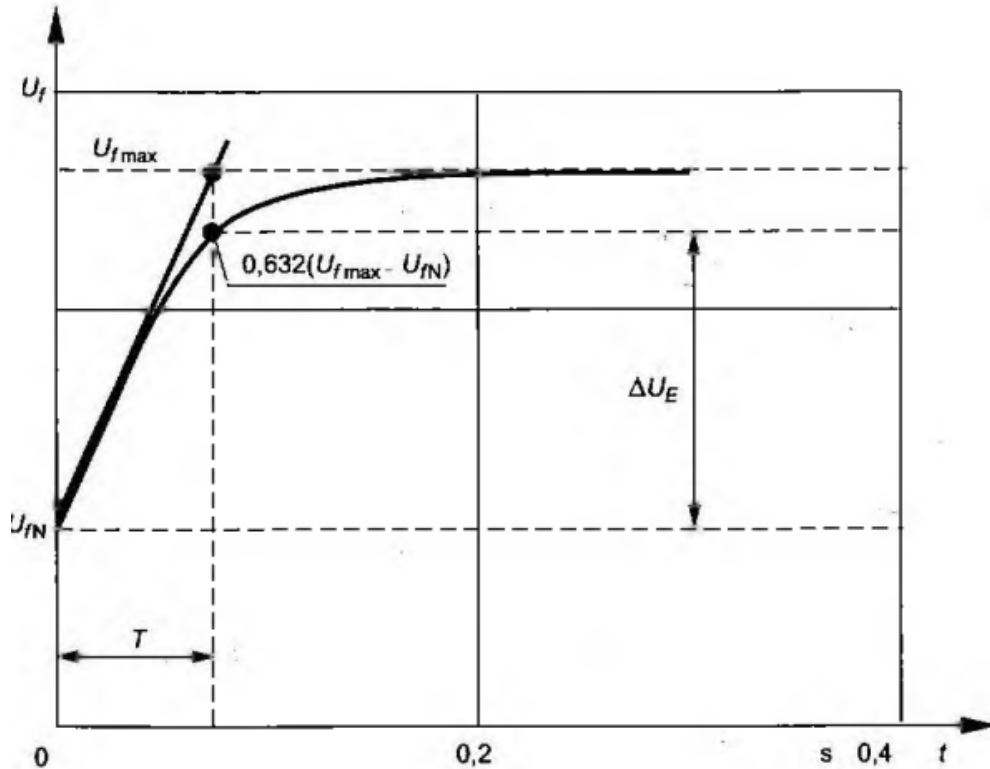
$$V_E = \frac{\Delta U_E}{\Delta t \cdot U_{fn}}$$



Wyznaczanie nominalnej odpowiedzi układu wzbudzenia  $V_E$ .

$$V_E = \frac{2(U'_{fmax} - U_{fn})}{U_{fn}}$$

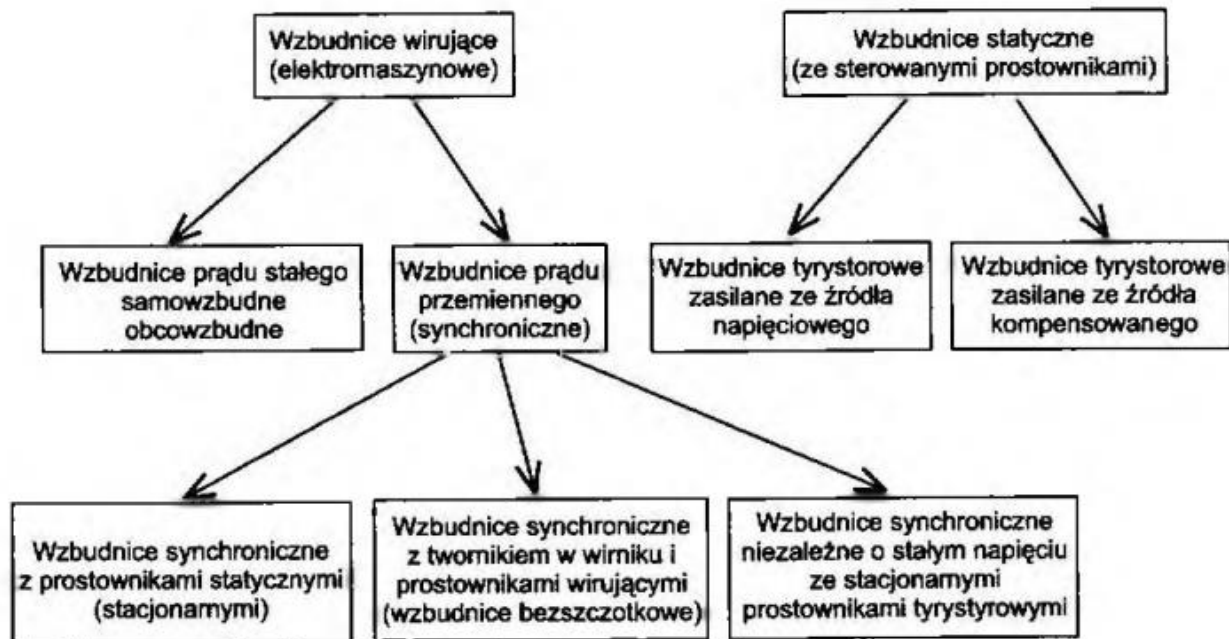
Dla tyrystorowego prostownika nominalną odpowiedź układu wzbudzenia określa się według stycznej do rzeczywistego przebiegu narastania napięcia, który w początkowym zakresie jest przebiegiem w przybliżeniu wykładniczym. Przebieg ten wyznacza się przez pomiar.



Nominalna odpowiedź układu wzbudzenia dla tyrystorowego układu wzbudzenia (np. wzbudnica statyczna zasilana ze źródła napięciowego)

$$V_E = \frac{0.632(U_{fmax} - U_{fn})}{T \cdot U_{fn}} \quad [s^{-1}]$$

### Rodzaje układów wzbudzenia



Klasyfikacja wzбудnic generatorów synchronicznych

Zaletą wzбудnic prądu stałego jest możliwość szybkiego odwzbudzenia generatora przez włączanie do obwodu zasilającego uzwojenie wzbudzenia generatora dodatkowej rezy-stancji lub otwieranie tego obwodu.

Z kolei wzbudnice synchroniczne stanowią już grupę nowoczesnych układów wzbudzenia. Mimo to są one wciąż modernizowane i niekiedy zastępowane wzbudnicami statycznymi.

Do niedawna maszyny synchroniczne z diodowymi prostownikami statycznymi były powszechnie stosowane w polskiej energetyce w układach wzbudzenia generatorów 63 MW i 200 MW. Ich zalety to pewne zasilanie oraz możliwość pełnego forsowania wzbudzenia, niezależnie od warunków panujących w systemie, z którym współpracują.

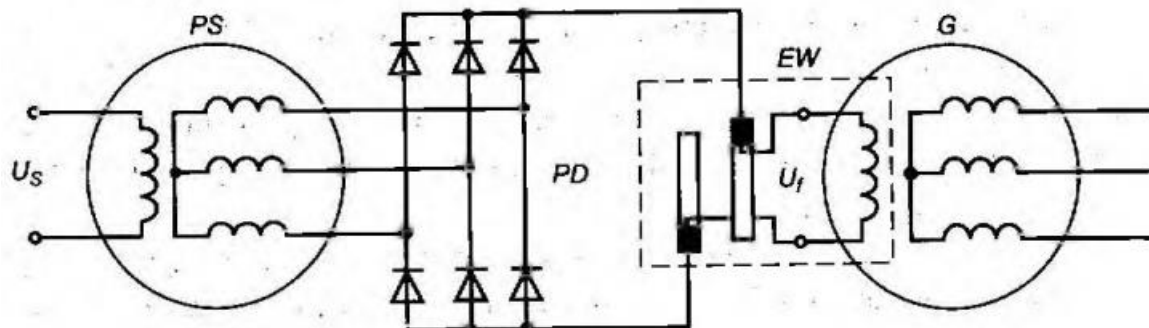
Statyczne układy ze sterowanymi prostownikami zasilanymi z twornika generatora przez transformator wzbudzenia są stosowane w generatorach 240 MW i 360 MW oraz w zmodernizowanych generatorach 120 MW i 200 MW. Ich zaletą są doskonałe właściwości regulacyjne wynikające z dużej stromości narastania napięcia wzbudzenia. Przekładnia transformatora wzbudzenia jest dobierana tak, aby przy napięciu generatora  $0,8U_n$  układ dawał maksymalny prąd forsowania. Wadą tych układów jest brak możliwości forsowania wzbudzenia przy bliskich zwarcich, gdy napięcie generatora znacznie zmniejsza swą wartość.

Statyczne układy tyrystorowe ze skojarzonym zasilaniem napięciowo-prądowym są stosowane do wzbudzenia generatorów o stosunkowo mniejszej mocy, do około 10 MW. W rozwiązaniu tym stosuje się dwa transformatory wzbudzenia: napięciowy (jak w poprzednim układzie) oraz prądowy, który dostarcza energię do układu przy zwarcich zewnętrznych. Wyjścia z obu źródeł mogą być przyłączane po stronie prądu stałego lub też przemiennego układu prostowników, szeregowo lub równolegle. Układ ten ma zalety układu poprzedniego,

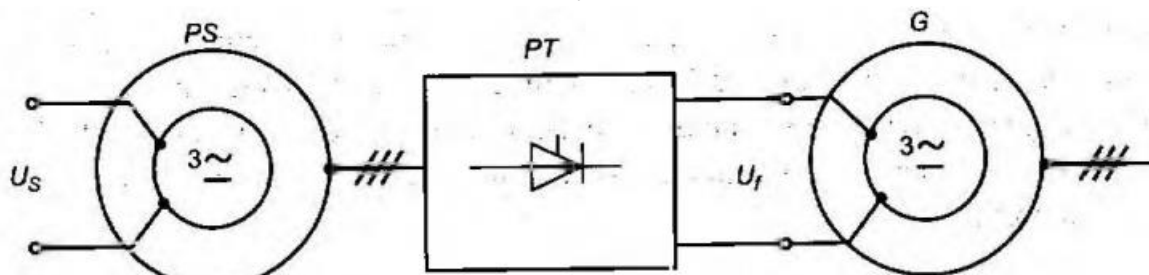
umożliwiając jednocześnie forsowanie wzbudzenia przy bliskich zwarcjach. W dużych generatorach nie jest zazwyczaj stosowany ze względu na stosunkowo wysoki koszt.

### Układy elektromaszynowe

- wzbudnice z klasycznymi prądnicami synchronicznymi (50-100) Hz
- wzbudnice z prądnicami synchronicznymi odwróconymi (twornik w wirniku)

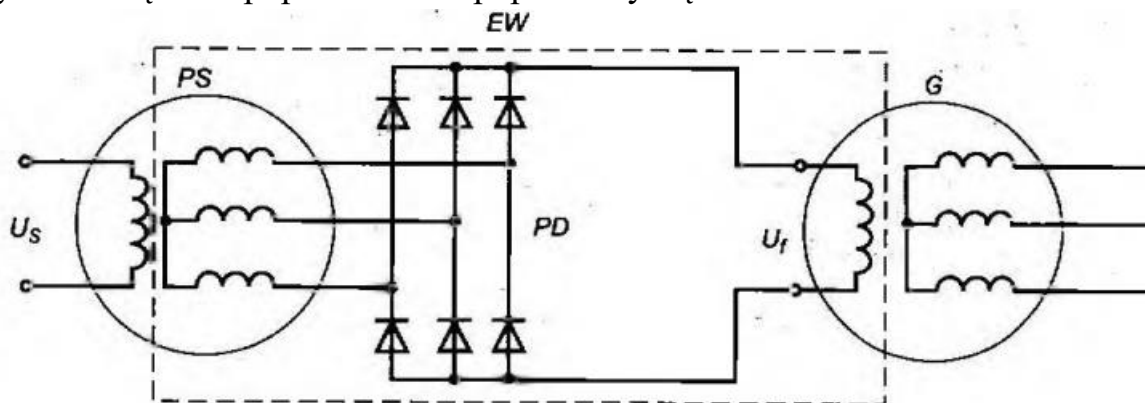


Układ wzbudzenia generatora ze wzbudnicą synchroniczną i prostownikiem statycznym diodowym



Układ wzbudzenia generatora ze wzbudnicą synchroniczną i prostownikiem statycznym tyrystorowym (schemat uproszczony)

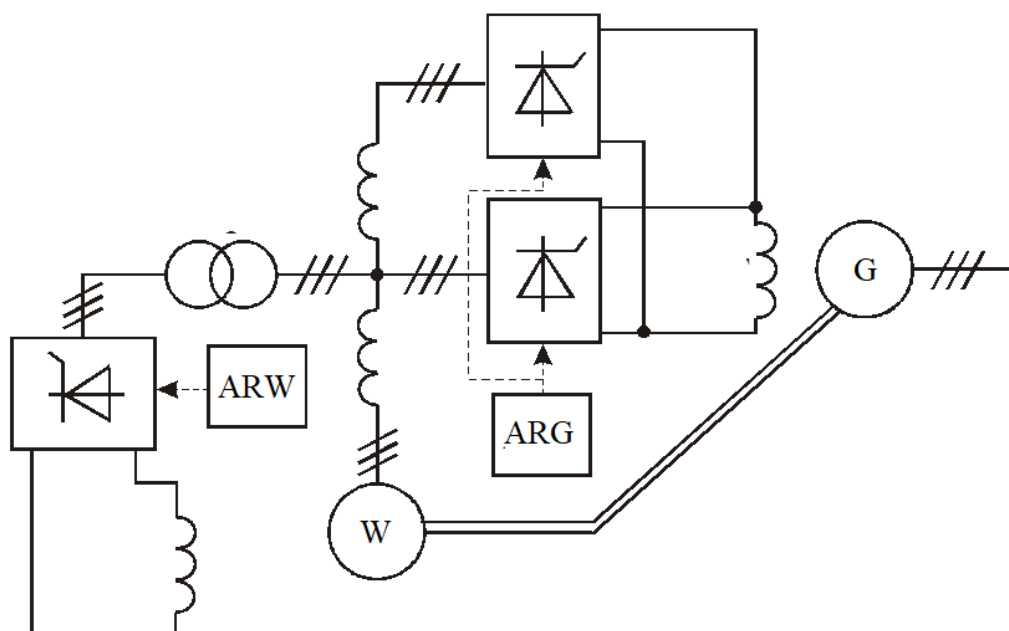
Sposobem na powiększanie mocy układu wzbudzenia i jednocześnie wyeliminowania szczotek i pierścieni ślizgowych jest konstrukcja wzbudnicy złożona z prądnicy synchronicznej o budowie odwróconej i wirującego układu prostowników. Przez usunięcie elementów zestyku ślizgowego uzyskuje się zwartą konstrukcję układu wzbudzenia i zmniejszenie długości turbozespołu. Przewody zasilające uzwojenie wzbudzenia generatora są w tym rozwiązaniu poprowadzone poprzez wydrążenia w wale.



Bezszczotkowy układ wzbudzenia ze wzbudnicą synchroniczną odwróconą i prostownikiem wirującym

Układ bezszczotkowy charakteryzuje się dużą pewnością zasilania. Wzbudnica synchroniczna odwrócona z prostownikiem sterowanym może być układem przyszłościowym nawet dla turbogeneratorów o mocach rzędu 2000 MW z wodnym chłodzeniem uzwojenia wirnika.

Bezczotkowe układy wzbudzenia mają również pewne wady. Wskutek bezpośredniego połączenia obwodu twornika wzbudnicy z prostownikiem i uzwojeniem magnesującym generatora występują trudności z pomiarem prądu i napięcia wzbudzenia (stąd konieczność stosowania specjalnych pierścieni ślizgowych do pomiaru napięcia wzbudzenia). Występują także trudności z bezpośrednim pomiarem temperatury wirnika podczas pracy (np. metodą rezystancyjną). Z powodu niemożności włączenia w obwód wzbudzenia generatora odpowiedniej aparatury w układach bezszczotkowych nie można przeprowadzić szybkiego odwzbudzenia. Czasy odwzbudzenia są zatem długie, 4-5 razy dłuższe niż w układach klasycznych.

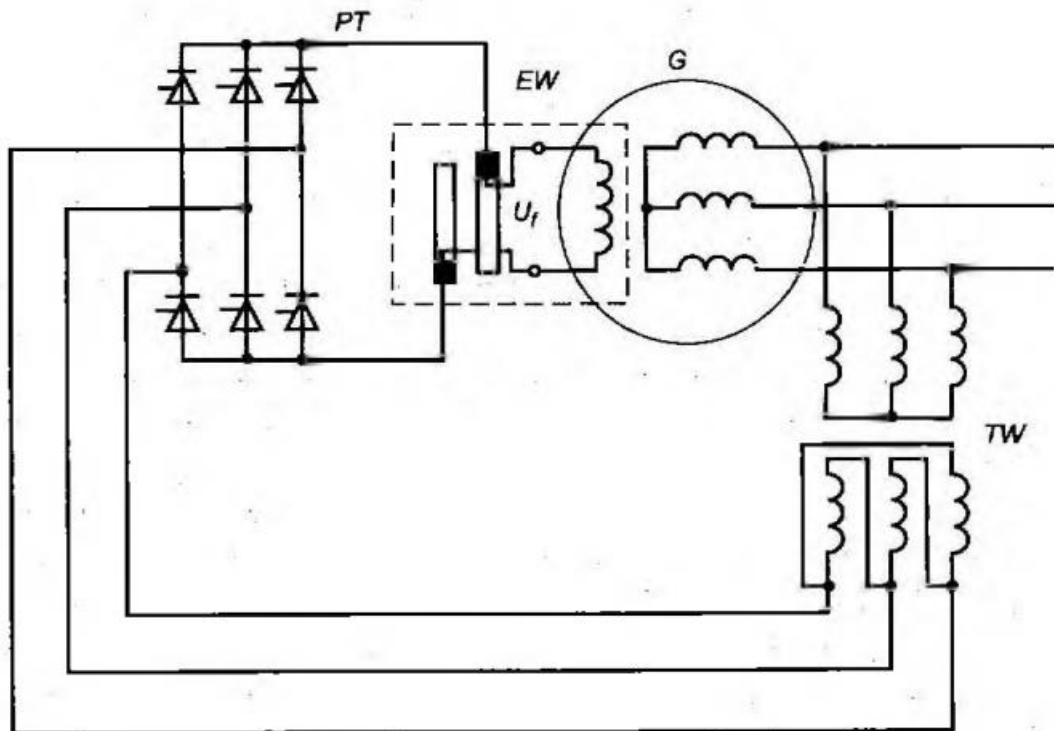


Dwugrupowy układ wzbudzenia hydrogeneratora

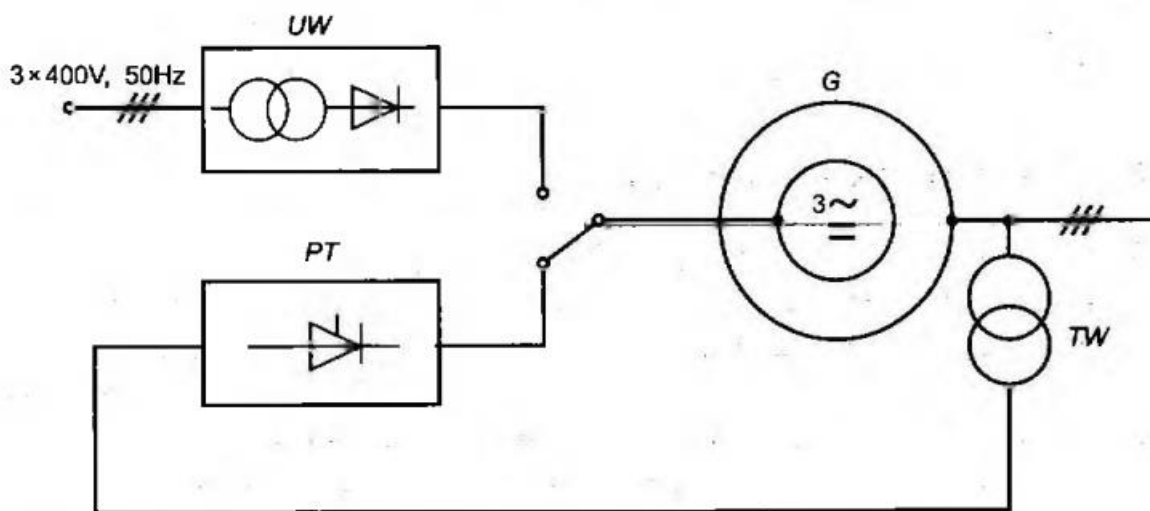
### Układy statyczne

We wzbudnicach statycznych są wyeliminowane pomocnicze zespoły elektromaszynowe. Źródłem prądu wzbudzenia generatora jest sterowany prostownik, zasilany napięciem generatorowym poprzez transformator obniżający napięcie, zwany transformatorem wzbudzenia. Regulacja napięcia odbywa się przez zmianę kąta wyzwalania tyrystorów stosownie do zmian obciążenia. Głównymi zaletami wzbudnicy zasilanej ze źródła napięciowego są bardzo dobre właściwości dynamiczne wynikające z małej wartości stałej czasowej, a także bardzo krótki czas odwzbudzenia. W układzie tym odwzbudzenie generatora realizuje się poprzez przejście prostownika tyrystorowego do pracy inwertorowej, co daje zmianę biegunowości napięcia wzbudzenia.



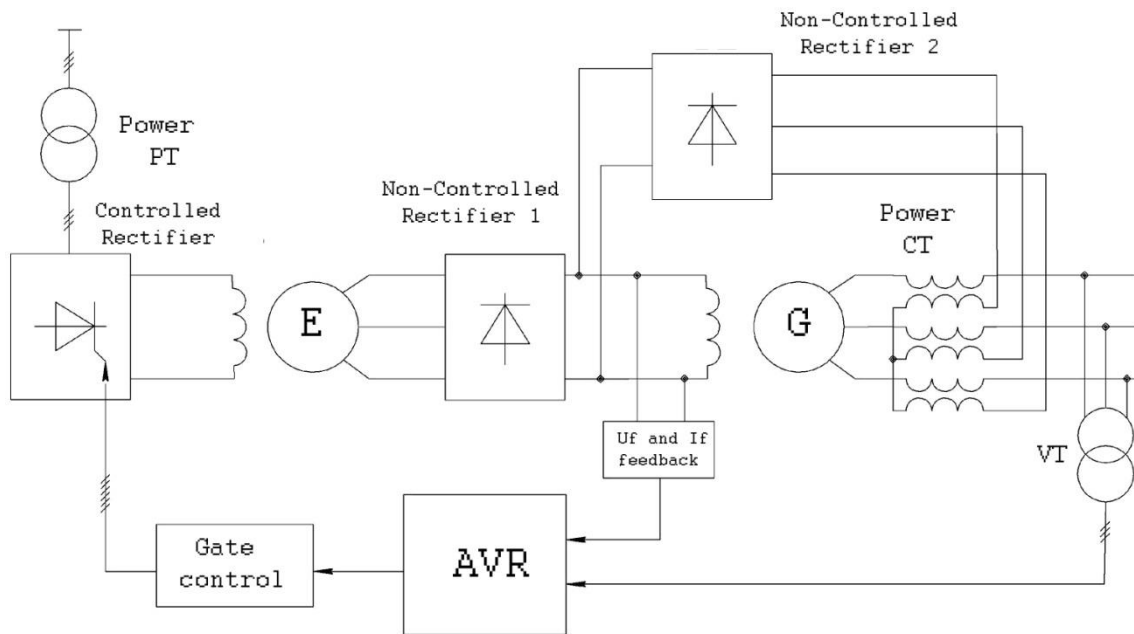


Układ wzbudzenia ze wzбудnicą statyczną

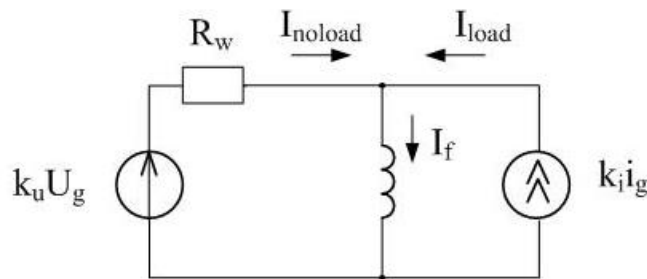


Uproszczony schemat układu z dodatkowo naniesionym układem wstępnego wzbudzenia generatora *UW* zasilanym z sieci potrzeb własnych

Do wad wzbudnic statycznych zalicza się przede wszystkim brak ciągłości zasilania prostownika w stanach awaryjnych podczas zwarć zewnętrznych generatora. Możliwe rozwiązania – wykorzystanie układów wzbudzenia z kompensacją reakcji twornika (wzбудnicy zasilane ze źródła kompensowanego).



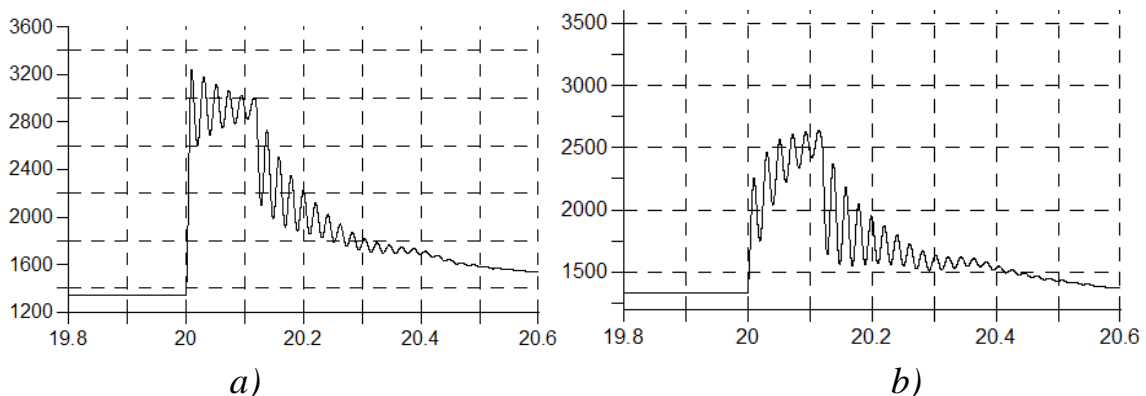
Układ z kompensacją prądową



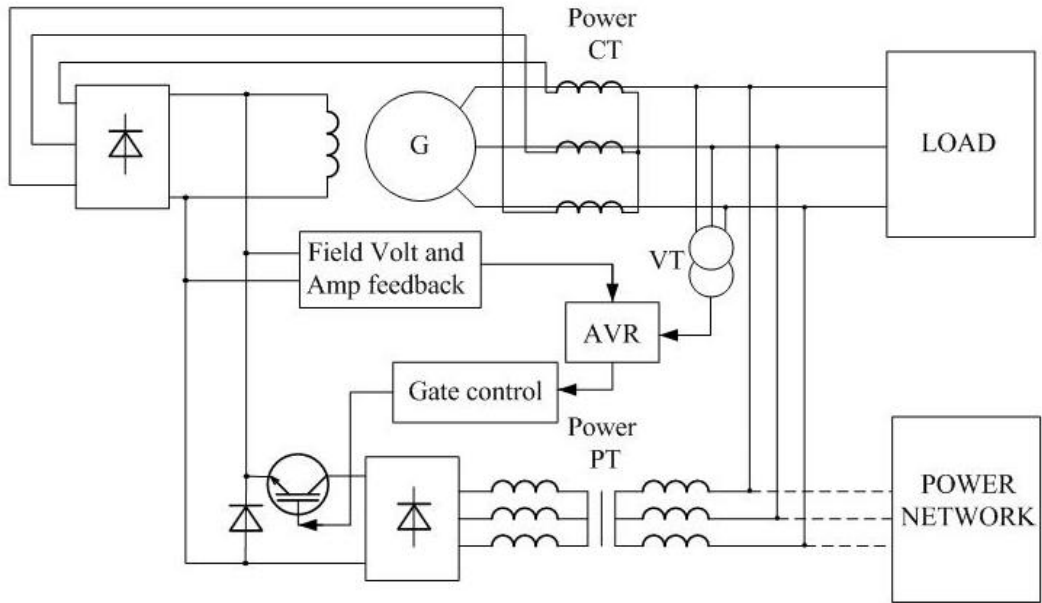
Schemat zastępczy układu wzbudzenia z kompensacją prądową

$$\Delta I_f = \frac{\frac{k_u \Delta U_g}{R_w} + k_i \cdot \Delta I_g}{\left(1 + \frac{R_f}{R_w}\right)}$$

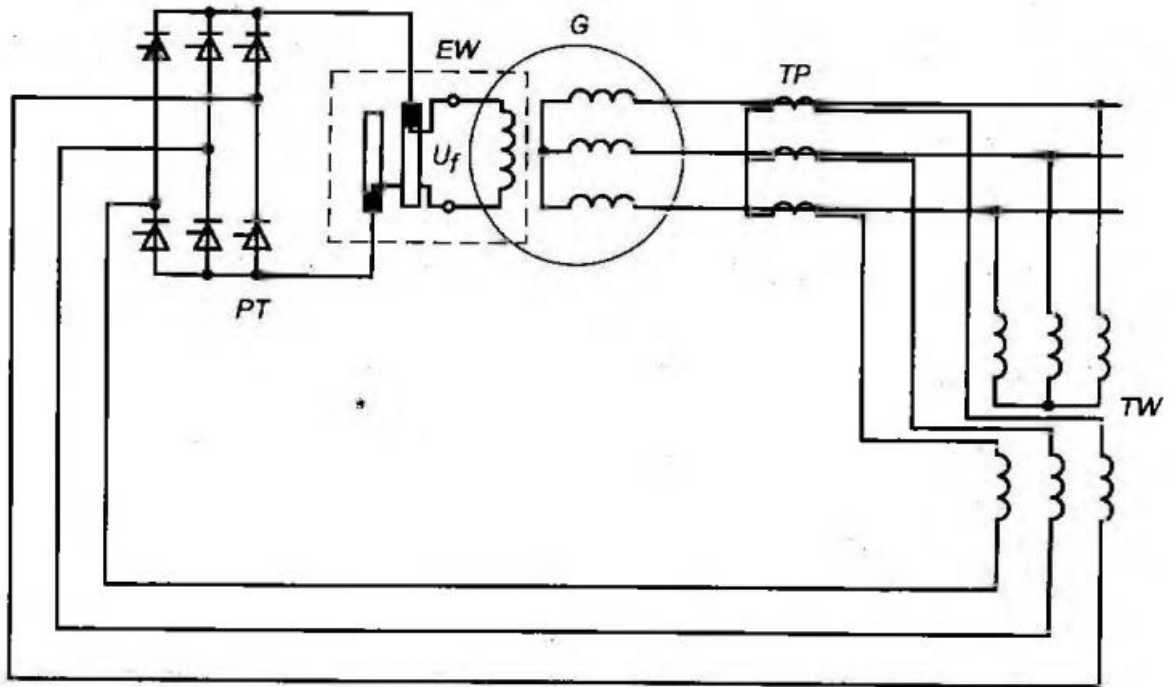
where  $k_i$  – coefficient, which takes into account transformer ratio of current transformer and coefficient of the non-controlled rectifier 2,  $\Delta U_g$  – the terminal-voltage increment,  $\Delta I_g$  – the stator-current increment,  $k_u$  – coefficient, which takes into account transformer ratio of voltage transformer and coefficient of the non-controlled rectifier 1,  $R_f$  – resistance of the excitation winding,  $R_w$  - internal resistance of excitation voltage source of SG.



Field current of SG under three-phase short circuit in power line for  $k_i=0,013$  (a)  $k_i=0,064$  (b)

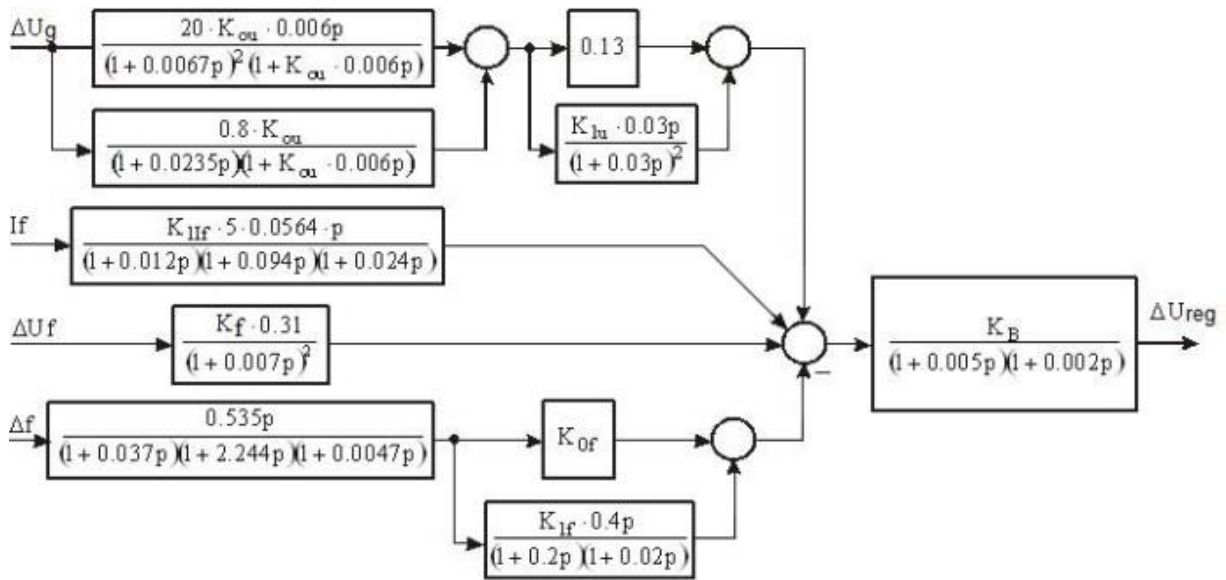


Block diagram of the synchronous generator with current compound excitation system by using DC/DC converter

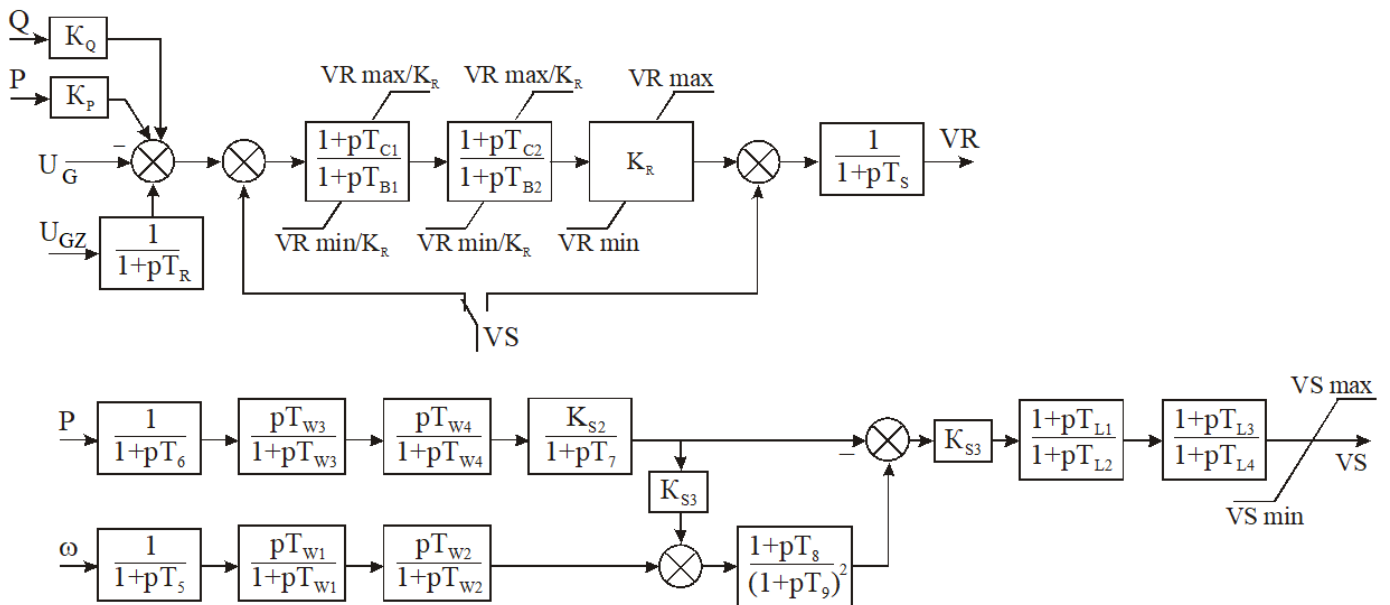


Układ z kompensacją fazową

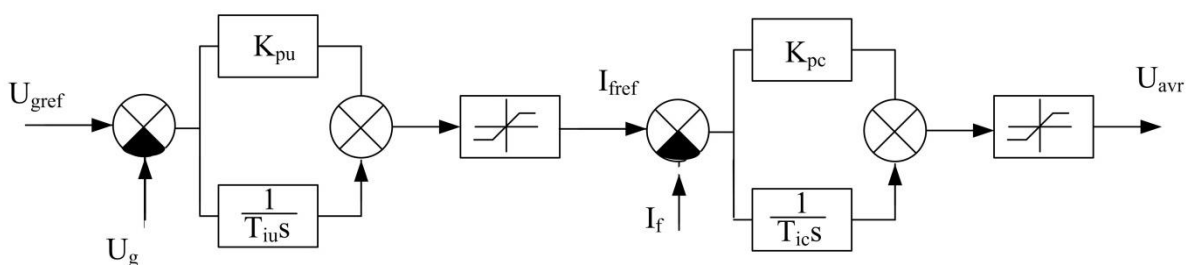
**Regulacja automatyczna wzbudzenia generatorów synchronicznych. Struktury automatycznych regulatorów wzbudzenia.**



### Automatyczny regulator wzbudzenia "strong action"

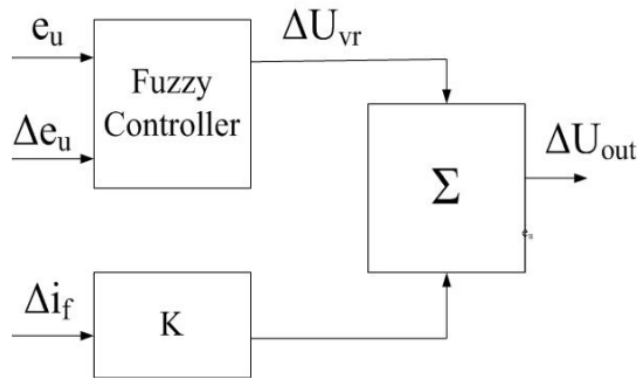


### Automatyczny regulator wzbudzenia UNITROL (ABB) ze stabilizatorem systemowym PSS 2A

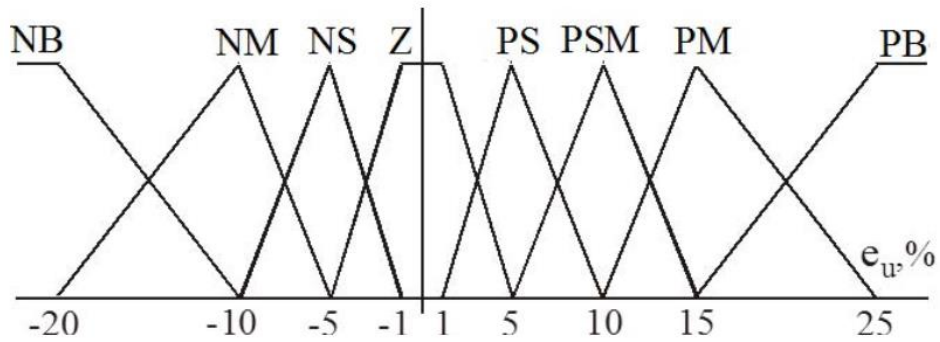


### PI-regulator wzbudzenia

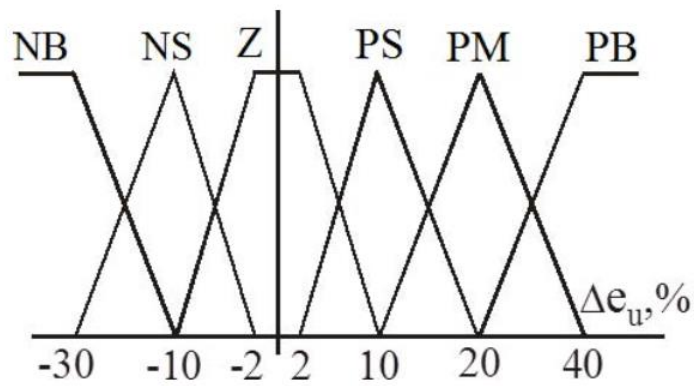
### Fuzzy-regulator



The structure of the fuzzy excitation regulator.



Membership functions for voltage regulation error increment.



Membership functions for voltage regulation error increment.

The rules base for FVR is shown in Table I, where  $y_1 = -7.0$ ,  $y_2 = -3.0$ ,  $y_3 = 0.2$ ,  $y_4 = -0.01$ ,  $y_5 = 0$ ,  $y_6 = 0.01$ ,  $y_7 = 0.2$ ,  $y_8 = 0.5$ ,  $y_9 = 3.0$ ,  $y_{10} = 7.0$ .

TABLE I. FUZZY RULES BASE

$e_u$ $\Delta e_u$	NB	NM	NS	Z	PS	PSM	PM	PB
PB	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_8$	$y_9$	$y_{10}$	$y_{10}$
PM	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_8$	$y_9$	$y_{10}$
PS	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
Z	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_6$	$y_7$	$y_8$
NS	$y_2$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_5$	$y_6$	$y_6$
NB	$y_1$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_4$	$y_5$	$y_5$

$$\Delta u_{vr} = \frac{\mu_1 \mu_2 y_{11} + \mu_1 (1 - \mu_2) y_{21} + (1 - \mu_1) \mu_2 y_{12} + (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) y_{22}}{\mu_1 \mu_2 + \mu_1 (1 - \mu_2) + (1 - \mu_1) \mu_2 + (1 - \mu_1) (1 - \mu_2)} =$$

$$= \mu_1 \mu_2 y_{11} + \mu_1 (1 - \mu_2) y_{21} + (1 - \mu_1) \mu_2 y_{12} + (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) y_{22},$$

$$\Delta u_{out} = k_1 \cdot \Delta u_{vr} - k_2 \cdot \Delta i_f$$