

WŁADYSŁAW PASZEK

Katedra Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej

WPLYW REGULACJI NAPIĘCIA  
NA RÓWNOWAGĘ WSPÓŁPRACY GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

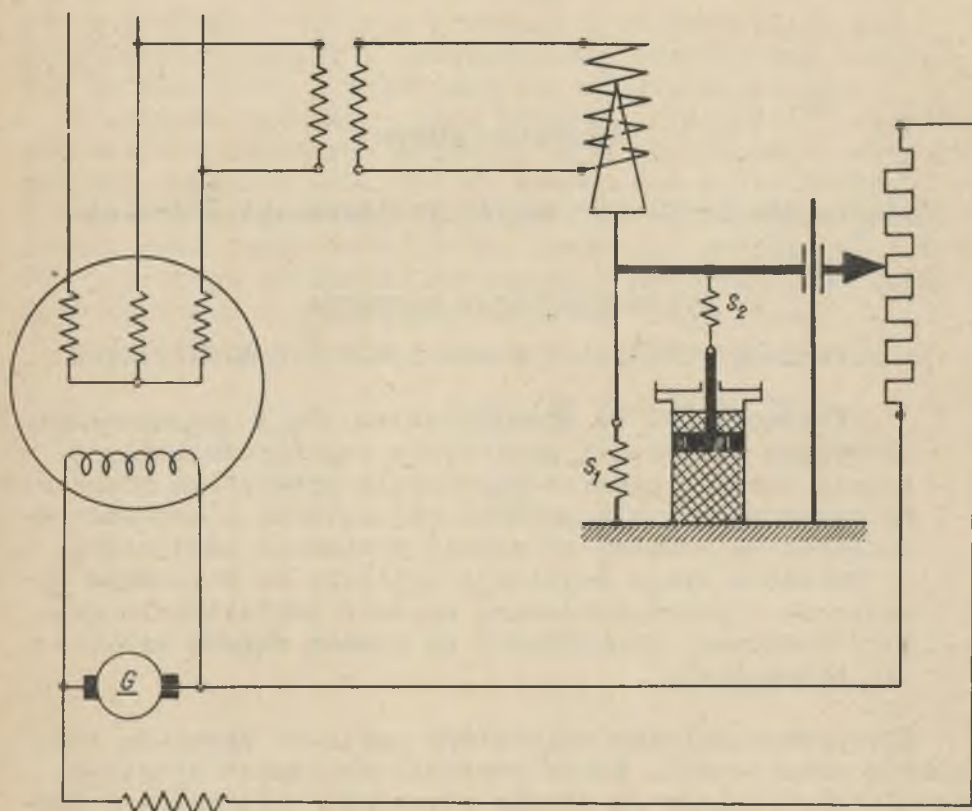
Streszczenie. Po zaznajomieniu się z zagadnieniem równowagi statycznej generatora współpracującego z siecią sztywną poprzez reaktancję przesyłową rozpatrzono wpływ strefy nieczułości regulatorów elektromechanicznych na granicę sztucznej równowagi statycznej.

Omówiono wpływ regulacji napięcia na równowagę dynamiczną i przedyskutowano sposoby powiększenia granicy równowagi dynamicznej za pomocą układu wzbudzenia generatora.

Elektromechaniczne regulatory napięcia wykazują tzw. strefę nieczułości, która powstaje na skutek zjawiska tarcia statycznego /w stanie spoczynku/ elementów ruchomych regulatora. Np. elektromechaniczny regulator przedstawiony ideowo na rys.1 wymaga dla poruszenia styków ślizgowych pokonania tarcia statycznego, a następnie mniejszego już tarcia ruchu. Przy zmianie kierunku ruchu styków siły tarcia zmieniają również znak. Ruch styków wystąpi dopiero, gdy napięcie zmienia się co najmniej o pewną wielkość  $\partial_n U$ , którą określamy jako próg nieczułości regulatora. <sup>2</sup>

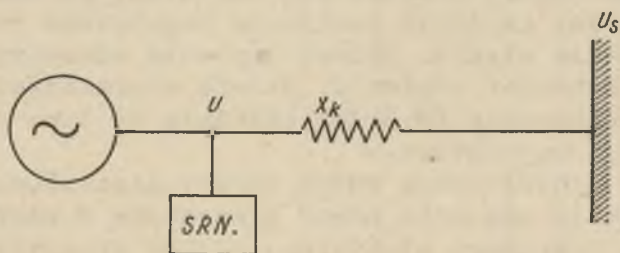
Wartość strefy nieczułości określamy wartością minimalnej zmiany napięcia zasilania regulatora potrzebnej do poruszenia styków. Zmianę napięcia odnosimy do znamionowej wartości napięcia. Strefa nieczułości  $\partial_n U$  % wynosi przeciętnie /0,3-1%/ zależnie od typu i stanu konserwacji regulatora.

Bardzo niekorzystny wpływ strefy nieczułości regulatorów ujawnia się przy pracy generatora w zakresie tzw. sztucznej równowagi statycznej układu przesyłowego.



Rys.1. Schemat ideowy elektromechanicznego regulatora napięcia

Na rys.2 przedstawiono ideowo generator pracujący równolegle ze siecią sztywną o napięciu  $U_S$ , z którą generator połączony jest poprzez reaktancję przesyłową  $X_k$ .



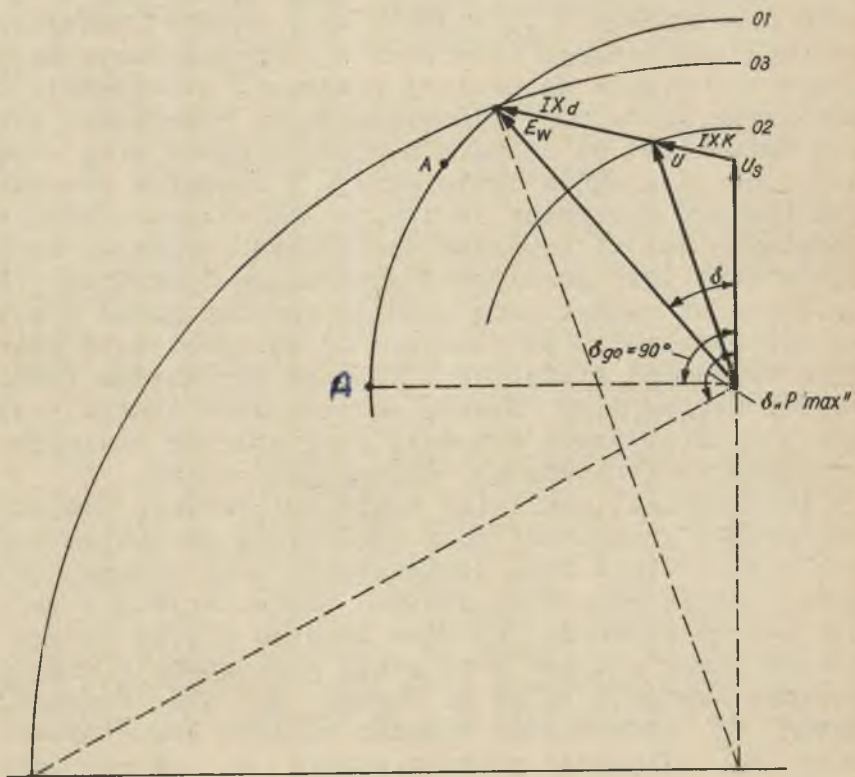
Rys.2. Układ przesyłowy generator - sieć sztywna

Regulator przyłączony jest na zaciski generatora, zatem przed reaktancją przesyłową. Rozpatrzmy przypadek generatora o nieregulowanym napięciu.

Moc oddawaną generatora można przedstawić równaniem

$$P = \frac{E_w U}{X_d + X_k} \sin \delta \quad //1/$$

Maksymalną moc generatora oddawaną do sieci przy nieregulowanym napięciu otrzymamy przy kącie mocy  $\delta = 90^\circ$ . Przy stałej wartości prądu wzbudzenia, wektor  $E_w$  zatacza okrąg  $O_1$  /rys.3/. W punkcie A generator dostarcza do sieci wyłącznie prąd czynny. W miarę powiększania mocy czynnej generator zaczyna pobierać ze sieci moc



Rys.3. Wykres wektorowy generatora wyposażonego w samo-czynny regulator napięcia

bierną i przy granicznym kącie mocy  $\delta_{go} = 90^\circ$  zawartym między wektorem sztywnego napięcia sieci  $U_s$  i wektorem  $E_w$  generator rozwija maksymalną moc czynną i pobiera ze sieci sztywnej moc bierną  $\frac{U_s^2}{x_d + x_k}$ .

Przy dalszym zwiększeniu kąta  $\delta$  maleje oddawana moc czynna generatora. Przy dowolnie małym /teoretycznie nieskończenie małym/ wzroście mocy turbiny /np. na skutek nieznacznego zwiększenia dopływu pary do turbiny/ wirnik przyspieszy pod wpływem nadmiaru mocy turbiny ponad elektryczną moc oddawaną, w wyniku czego zwiększy się kąt mocy  $\delta$ . Na skutek towarzyszącego temu zmniejszenia się mocy oddawanej do sieci, powiększy się jeszcze nadmiar momentu turbiny, który spowoduje w dalszym ciągu przyspieszenie wirnika aż do wypadnięcia z synchronizmu. Z powyższych rozważań wynika warunek stabilności statycznej układu przesyłowego, który sprowadza się do konieczności pracy generatora przy kącie mocy niższym od kąta granicznego  $\delta_{go} = 90^\circ$ <sup>1)</sup>. Przy kątach  $\delta$  mniejszych od kąta granicznego generator o nieregulowanym napięciu pracuje w stanie naturalnej równowagi statycznej. Obszar możliwych kątów mocy odpowiadających równowadze statycznej odróżniamy od obszaru możliwych kątów mocy odpowiadających równowadze dynamicznej. W obszarze równowagi dynamicznej generator utrzymuje się w synchronizmie przy udarowych dużych zwyzkach obciążenia czynnego. Wartości kątów mocy przy granicznej równowadze dynamicznej zależą od wartości zwyzek mocy czynnej turbiny ponad elektryczną moc oddawaną i są mniejsze od wartości kąta granicznego równowagi statycznej. Typowym przykładem takich udarowych zwyzek mocy czynnej są zwarciove obniżki napięcia sieci hipotetycznie sztywnej przy których zmniejsza się oddawana elektryczna moc czynna generatora.

Automatyczny regulator napięcia powoduje powiększenie statycznej granicznej mocy generatora na skutek wzrostu prądu wzbudzenia przy powiększaniu mocy czynnej generatora. Jeżeli regulator posiada charakterystykę astatyczną, wektor napięcia  $E_w$  nie porusza się po okręgu  $O_1$ , jak to miało miejsce przy pracy generatora o nieregulowanym napięciu tylko po okręgu  $O_2$  dla  $U = \text{const}$ . Okrąg  $O_3$  przedstawia wówczas miejsce geometryczne wektora  $E_w$ . Odległość punktów okręgu  $O_3$  od osi sztywnego napięcia sieci reprezentuje czynną moc oddawaną genera-

<sup>1/</sup> W generatorach jawnobiegunowych graniczny kąt mocy jest mniejszy i wynosi zwykle około 75-80°.

tora. Przy kącie  $\delta = 90^\circ$  elektryczna oddawana moc czynna generatora nie jest już maksymalną możliwą mocą oddawaną generatora, ponieważ w miarę dalszego powiększania kąta mocy rośnie w dalszym ciągu moc oddawana generatora. Ponieważ jednak powiększenie mocy odbywa się dzięki działaniu regulatora napięcia, możliwość pracy przy kątach większych od  $90^\circ$  uzależniona jest od względnej szybkości działania układu regulacyjnego w odniesieniu do szybkości zwiększania kąta mocy generatora przy zwykłym obciążeniu. Praca generatora przy kątach mocy większych od  $90^\circ$  odbywa się w tak zwanym obszarze sztucznej równowagi statycznej generatora. Graniczny kąt sztucznej równowagi statycznej zależy w głównej mierze od wartości reaktancji  $X_k$ ,  $X_d$ ,  $X_d'$  napięcia sieci sztywnej  $U_S$ , wartości napięcia generatora  $U$ , strefy nieczułości regulatora  $\delta n U$  i następnie od wartości stałych czasowych wzbudnicy  $T_M$  generatora  $T_d'$ , automatycznego regulatora napięcia  $T_R$  i wreszcie od wartości mechanicznej stałej czasowej turbozespołu  $T_m$ .

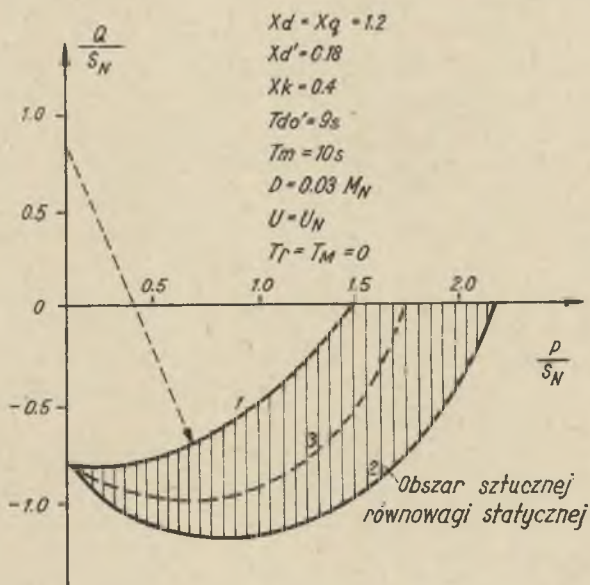
Ponadto istnieje zależność granicznego kąta równowagi od pochylenia charakterystyki momentu tłumiącego mas wirujących  $D$  względem prędkości wirowania<sup>1)</sup>.

Na skutek inercyjności poszczególnych członów układu regulacyjnego graniczny kąt sztucznej równowagi statycznej jest w ogólnym przypadku mniejszy od kąta odpowiadającego maksymalnej mocy czynnej  $\delta_{pmax}$  na rys.3.

Dla oceny wpływu regulacji na powiększenie obszaru pracy stabilnej generatora przy sztucznej równowadze statycznej przedstawiono na rys.4 krzywą granicy równowagi statycznej /krzywa 1/ generatora pracującego bez regulacji napięcia, czyli krzywą granicy naturalnej równowagi statycznej oraz krzywą granicy sztucznej równowagi statycznej /krzywa 2/ generatora wyposażonego w automatyczny regulator o statycznej charakterystyce napięcia. Wykres sporządzono we współrzędnych  $P, Q$  mocy czynnej i biernej generatora. Generator pracuje w układzie przedstawionym na rys.2. Założono, że generator na granicy równowagi statycznej pracuje przy znamionowym napięciu na zaciskach. Sieć sztywna ma w każdym punkcie krzywej

1/ Tłumienie to ujmuje wpływ momentu oporu łopatek turbiny oraz momentu strat wentylacyjnych generatora przy zmianach prędkości wirowania;  $D$  wyrażamy jako moment w jednostkach względnych przypadających na 1 proc. poślizgu wirnika.

napięcie każdorazowo inne, lecz stałe w czasie badanego procesu regulacji [2] [3] [6]. Przypadek taki w praktyce byłby do pomyślenia przy zastosowaniu regulacyjnego transformatora łączącego generator z linią, dzięki któremu generator niezależnie od wartości mocy przesyłanej



Rys.4. Krzywe granicy równowagi statycznej generatora pracującego z samoczynną regulacją napięcia i bez regulacji napięcia

mógłby pracować przy znamionowym napięciu na zaciskach. Napięcie sieci sztywnej sprowadzone na stronę generatora moglibyśmy zmieniać przy pomocy zaczepów transformatora. W celu uproszczenia analizy przyjęto w rozważaniach statyczną charakterystykę napięcia generatora bez wprowadzenia dodatkowych układów stabilizacji, które okazałyby się konieczne w przypadku charakterystyki astatycznej. Przy zbyt małym współczynniku statyki regulatora układy wykazują tendencję do niezanikających oscylacji kąta mocy przy stałej średniej wartości oddawanej mocy czynnej przez turbinę. Przy nadmiernym powiększeniu amplitud kołysania kąta mocy generator wypada ze synchronizmu. Punkty krzywej 1 granicznej równowagi przy nieregulowanym wzbudzeniu generatora odpowiadają kątowi  $\delta_{go} = 90^\circ$ .

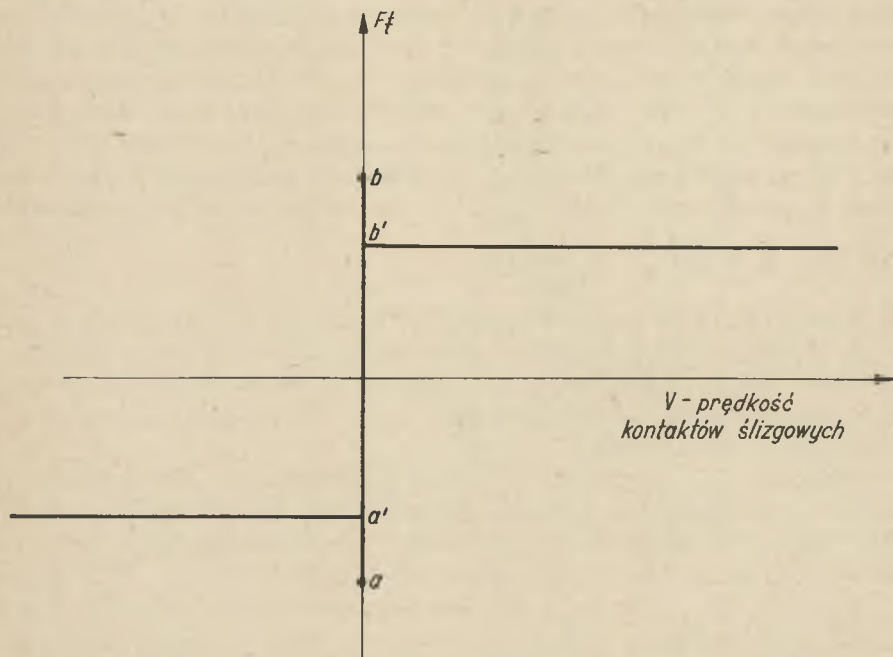
Punkt  $P=0$  otrzymujemy przy  $E_w = 0$ . W tym punkcie moc bierna oddawana generatorem wynosi  $Q = -\frac{U_g^2}{x_d}$  /Znak ujemny mocy biernej oznacza, że generator pobiera moc bierną ze sieci/. Punkt  $P=0$  jest wspólny dla pracy przy regulowanym i nieregulowanym napięciu generatora, ponieważ zmiana mocy czynnej turbiny pociągająca za sobą zmianę kąta  $\delta$  nie wpłynie przy  $E_w = 0$  na zmianę prądu generatora i tym samym nie zmieni napięcia na zaciskach generatora. Przy nieregulowanym napięciu generatora krzywa /1/ granicy naturalnej równowagi statycznej jest okręgiem o promieniu  $\frac{1}{2}(\frac{1}{x_k} + \frac{1}{x_d})$  ze środkiem o współrzędnych  $P = 0, Q = \frac{1}{2}(\frac{1}{x_k} - \frac{1}{x_d})$ .

Oczywiście w każdym punkcie krzywej na granicy równowagi statycznej napięcie wzbudnicy generatora posiada wartość inną /większą przy większej oddawanej mocy czynnej generatora/ lecz uważaną jako stałą przy analizie równowagi statycznej.

Krzywa /2/ granicy sztucznej równowagi statycznej została otrzymana na podstawie analizy stabilności statycznej układu elektromechanicznego przedstawionego na rys.2, który opisany jest jednoznacznie parametrami  $x_d, x_k, x_d', U, T_M, T_m, T'_{do}, D, T_r$ . Na skutek istnienia strefy nieczułości regulatorów napięcia otrzymujemy poważne zwężenie obszaru sztucznej równowagi statycznej generatora /krzywa 3/, uzależnione od wartości strefy nieczułości. Na przebieg krzywej granicy sztucznej równowagi dynamicznej prócz tarcia statycznego ruchomych elementów regulatora wpływa również tarcie kinetyczne regulatora, w związku z czym zachodzi konieczność odróżnienia statycznej i kinetycznej strefy nieczułości. Na rys.5 przedstawiono ideowo przebieg siły tarcia  $F_t$  regulatora w funkcji szybkości jego elementów ruchomych. Kinetyczna strefa nieczułości  $\partial_{nk} U$  jest mniejsza od statycznej strefy nieczułości  $\partial_{ns} U$ . Na podstawie rys.5 otrzymamy  $\partial_{nk} U\% = \partial_{ns} U\% \frac{a'b'}{a'b}$ .

Wpływ strefy nieczułości regulatorów napięcia ujawnia się szczególnie silnie przy stosunkowo małych stałych czasowych turbozespołu  $T'_{do}, T_m$ , co zachodzi praktycznie dla mniejszych maszyn. Dla jednostki dużej mocy scharakteryzowanej parametrami podanymi w przykładzie na rys.4 szkodliwy wpływ strefy nieczułości jest już znacznie zmniejszony. Fizyczną stroną zjawiska pracy generatora

w zakresie sztucznej równowagi statycznej najlepiej zrozumieć analizując przebiegi zachodzące w generatorze, które towarzyszą nagłemu zwiększeniu obciążenia czynnego turbiny o dowolnie małą wartość /zwiększeniu dopływu pary/.



Rys.5. Charakterystyka siły tarcia elementów ruchomych elektromechanicznego regulatora napięcia

Pod wpływem nadwyżki momentu turbiny wirnik przyspiesza i zwiększa kąt mocy  $\delta$ . Na skutek ruchu wirnika względem pola stojana indukują się w uzwojeniu wzbudzenia prądy wyrównawcze, które zgodnie z prawem Lenza sprzeciwiają się zmianie liniozwojów uzwojenia wzbudzenia. W pierwszej chwili uzwojenie wzbudzenia zachowuje się zatem jak uzwojenie wykonane z supra-przewodnika, pozbawione oporu czynnego.

Z uwagi na to, że strumień liniozwojów wirnika proporcjonalny jest do napięcia  $E'_q$  na wykresie wektorowym, możemy przedstawić charakterystykę kątową generatora w stanie przejściowym równaniem przybliżonym

$$\underline{P} = \frac{E'_q U_s}{X'_d + X_k} \sin \delta - \frac{U_s^2}{2} \frac{X_q - X'_d}{X_q X'_d} \sin 2\delta \quad /2/$$



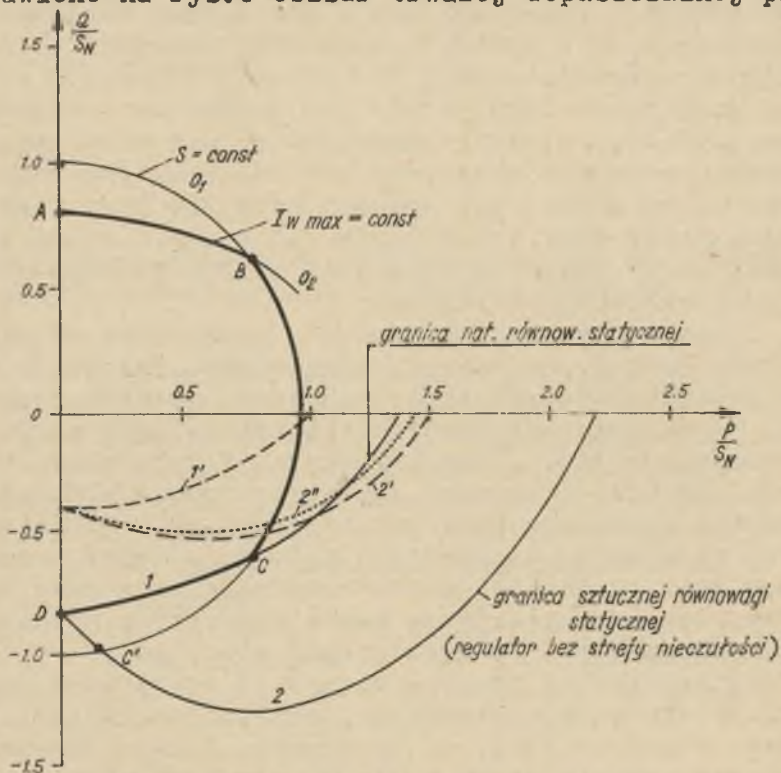
W równaniu /2/ nie uwzględniono wpływu wyrównawczych prądów wirowych w stalowym bloku wirnika, utrzymujących w pierwszej chwili zaburzenia niezmiennione liniozwoje w osi poprzecznej wirnika sprzężone z obwodami strug prądów wirowych. Wpływ tych wyrównawczych prądów wirowych w osi poprzecznej wirnika powiększa maksimum charakterystyki kątowej w stanie przejściowym. Maksimum charakterystyki kątowej w stanie przejściowym leży znacznie wyżej aniżeli przy pracy generatora w stanie ustalonym /przy  $E_w = \text{const}$ /. Również maksimum charakterystyki kątowej w stanie przejściowym przesunięte jest w stronę znacznie większych kątów od  $90^\circ$ . W miarę zanikania prądów wyrównawczych maleje napięcie  $E'_q$  w następstwie czego zmniejsza się elektryczna moc oddawana generatora  $P$  i zwiększa się w dalszym ciągu kąt mocy. Przy powiększeniu kąta mocy maleje napięcie na zaciskach generatora na skutek zwiększonego poboru mocy biernej z sieci. Regulator czuły na zmianę napięcia generatora powiększa napięcie wzbudnicy, podtrzymuje w ten sposób zwiększony prąd uzwojenia wzbudzenia i przeciwdziała w ten sposób zanikaniu prądów wyrównawczych w obwodzie uzwojenia wzbudzenia. O ile regulator wykazuje strefę nieczułości generator zachowuje się początkowo identycznie jak generator o nieregulowanym napięciu. W miarę zanikania prądów wyrównawczych w wirniku maleje elektryczna moc oddawana generatora w wyniku czego wirnik pod wpływem nadwyżki mocy turbiny powiększa kąt mocy identycznie jak to ma miejsce w pierwszej fazie zjawiska wypadania z synchronizmu generatora o nieregulowanym napięciu.

Dopiero gdy obniżka napięcia generatora przekroczy wartość statycznej strefy nieczułości regulator spowoduje powiększenie napięcia wzbudnicy, co może przyczynić się do zahamowania procesu narastania kąta mocy. W stanie ustalonym wystąpią trwałe oscylacje kąta mocy dokoła wartości średniej, których amplituda rośnie w miarę powiększania średniego kąta mocy powyżej  $90^\circ$ . Teoretycznie przy ustalonych oscylacjach kąta mocy układ pracuje niestabilnie. Jednakże jeżeli oscylacje kąta mocy są tak małe, że nie wpływają na pracę generatora można uważać pracę generatora za praktycznie stabilną.

Za praktyczną granicą równowagi statycznej można uważać przekroczenie określonej amplitudy oscylacji kąta mocy. Można przyjąć, że praktyczna granica równowagi statycznej wystąpi wtedy kiedy oscylacje napięcia wzbudnicy

spowodowane przez strefę nieczułości układu regulacyjnego można wyraźnie zauważyć na wskazaniach woltomierza tablicowego /np. jeśli amplituda oscylacji przekroczy 5% wartości średniej/.

W związku z umownym określeniem praktycznej granicy sztucznej równowagi statycznej przy elektromechanicznych regulatorach ze strefą nieczułości zaznaczony na rys.4 przebieg krzywej /3/ ma znaczenie tylko orientacyjne. Amplituda oscylacji kąta mocy rośnie w miarę oddalania się od praktycznej granicy sztucznej równowagi statycznej w stronę niedowzbudzenia, aż prowadzi do wypadnięcia generatora z synchronizmu. Z uwagi na niekorzystny wpływ strefy nieczułości regulatorów elektromechanicznych, znajdują coraz większe zastosowanie nowoczesne regulatory elektromagnetyczne nie posiadające strefy nieczułości. Wypierają one coraz bardziej z eksploatacji elektromechaniczne regulatory napięcia. Dla zilustrowania praktycznych korzyści wynikających z możliwości pracy generatora w obszarze sztucznej równowagi statycznej przedstawiono na rys.6 obszar trwałej dopuszczalnej pracy



Rys.6. Obszar dopuszczalnej pracy generatora

generatora synchronicznego. Wykres sporządzono w układzie współrzędnych  $P, Q$ . Z punktu widzenia dopuszczalnego nagrzania uzwojeń stojana generatora możliwa jest praca przy stałej wartości skutecznego prądu twornika  $I_N$ . Przy stałej wartości prądu twornika wykres dopuszczalnej mocy pozornej dostarczonej przez generator do sieci przy znamionowym napięciu na zaciskach przedstawia okrąg  $O_1$ .

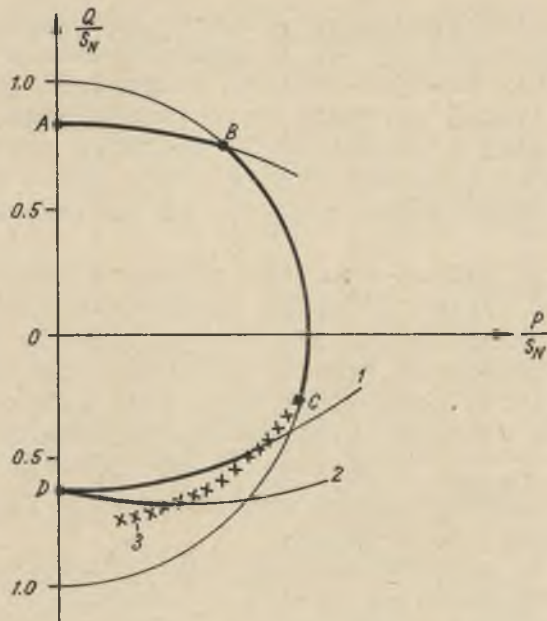
W zakresie małych obciążeń czynnych generatora dopuszczalna moc bierna oddawana generatora /obszar przewzbudzenia/ ograniczona jest ze względu na nagrzanie uzwojenia wzbudzenia generatora dopuszczalnym prądem wzbudzenia. Przy pominięciu nasycenia generatora maksymalnemu prądowi wzbudzenia odpowiada maksymalne napięcie magneśnicy  $E_{wmax}$ . Dopuszczalna moc generatora ograniczona jest na wykresie przez wycinek okręgu  $O_2$  odpowiadający warunkowi  $E_w = E_{wmax}$ .

W obszarze niedowzbudzenia dopuszczalna moc pozorna generatora ograniczona jest w przeważającym zakresie granicą równowagi statycznej w szczególności w przypadku współpracy z systemem związanym z generatorem przez stosunkowo dużą reaktancję przesyłową.

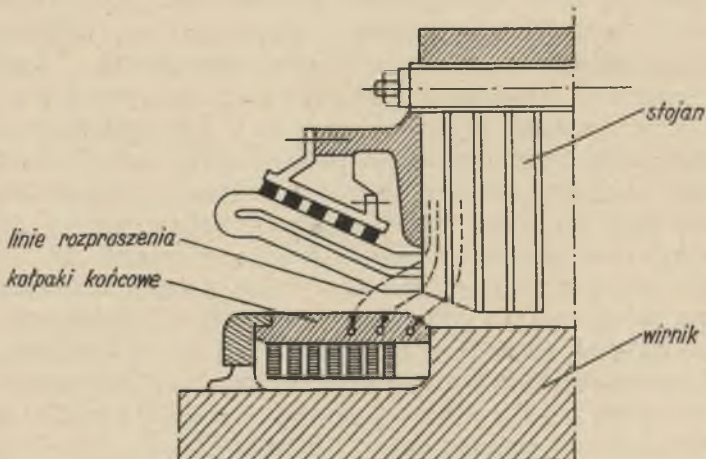
Należy wspomnieć, że w turbogeneratorach bardzo dużej mocy obszar trwałej dopuszczalnej pracy przy niedowzbudzeniu może być w niektórych wypadkach ograniczony dopuszczalnym miejscowym nagrzaniem końcowych czołowych pakietów żelaza stojana, pierścieni i innych części ferromagnetycznych mocujących czoła uzwojeń stojana.

W takich wypadkach krzywa dopuszczalnej pojemnościowej mocy biernej w zakresie niedowzbudzenia może leżeć powyżej granicy równowagi statycznej. Na rys.7 przedstawiono dla przykładu wycinek krzywej /3/ granicy dopuszczalnej mocy biernej turbogeneratora dużej mocy ograniczonej ze względu na nagrzanie czołowej powierzchni stojana. Wycinek krzywej /3/ leży powyżej granicy równowagi statycznej zarówno przy regulowanym /krzywa 2/ i nie regulowanym napięciu /krzywa 1/. Wrażliwość czołowej powierzchni stojana na przegrzanie przy niedowzbudzeniu turbogeneratora /praktycznie wchodzi tu w rachubę turbogeneratory bardzo dużej mocy/ zależy od szeregu czynników konstrukcyjnych oraz od warunków chłodzenia generatora /chłodzenie powietrzne lub wodorowe/.

Nagrzanie czołowej powierzchni stojana turbogeneratora spowodowane jest częścią strumienia rozproszenia od-



Rys.7. Obszar dopuszczalnej pracy turbogeneratorskiej dużej mocy z uwzględnieniem miejscowego nagrzania czół stojana działającego twornika, który na krańcach stojana nie przenika przez szczelinę i blok wirnika tylko zamyka się przez stalowe kołpaki /kapy/ końcowe wirnika /rys.8/.



Rys.8. Fragment czóła stojana turbogeneratorskiej

Strumień rozproszenia oddziaływania twornika jest strumieniem wirującym w synchronizmie z wirnikiem. Ponieważ linie pola rozproszenia wychodzą w przeważającej części osiowo z końcowych pakietów stojana powodują powstanie zwiększonych strat na prądy wirowe i miejscowe nagrzanie stojana.

Zmniejszenie strat dodatkowych na czołach stojana osiągamy równocześnie 2 drogami:

- 1/ Przez zmniejszenie pola rozproszenia reakcji twornika. Zmniejszenie strumienia rozproszenia osiągamy w głównej mierze przez zmniejszenie pola w szczelinie generatora na krańcach generatora. Zmniejszenie pola otrzymujemy przez stopniowe powiększenie szczeliny na obu końcach stojana.
- 2/ Przez wprowadzenie materiałów niemagnetycznych mocujących połączenia czołowe uzwojeń twornika i znajdujących się w zasięgu pola rozproszenia reakcji twornika.

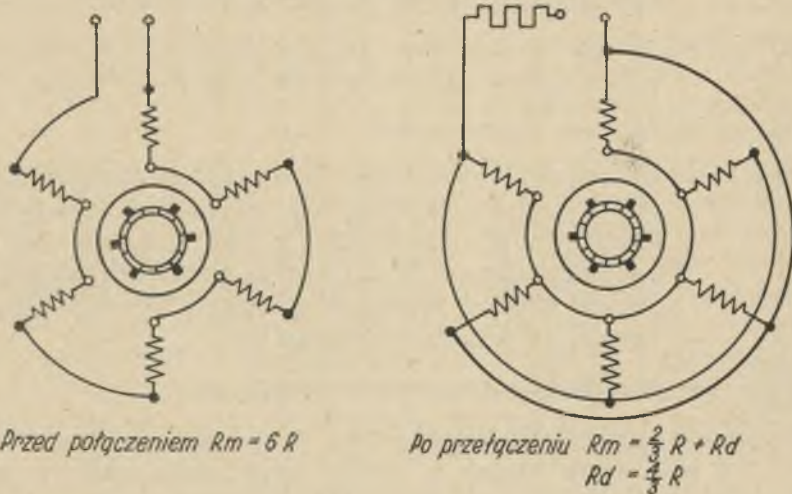
W dalszym ciągu rozważań pomijamy wpływ nagrzania czoł stojana na obszar dopuszczalnej pracy generatora w wyniku czego tylko krzywa granicy równowagi statycznej ogranicza maksymalne dopuszczalne obciążenie pojemnościowe generatora.

Przez zastosowanie automatycznych regulatorów napięcia bez strefy nieczułości osiągamy powiększenie obszaru dopuszczalnej pracy generatora w stanie niedowzbudzonym /obszar A, B, C', D w porównaniu do obszaru ABCD przy nieregulowanym prądzie wzbudzenia/. Przy przeciętnej wartości reaktancji przesyłowej  $X_k$  wpływ regulacji na powiększenie granicy sztucznej równowagi statycznej ma znaczenie praktyczne tylko przy niedowzbudzeniu generatora. Z uwagi na to naniesiono na rys.4 i 6 krzywe granicy równowagi statycznej wyłącznie dla zakresu niedowzbudzenia generatora. Dla znacznie większych reaktancji przesyłowych jakie mają miejsce przy bardzo długich liniach przesyłowych granica równowagi statycznej może wchodzić w zakres obciążeń generatora przy przewzbudzeniu /przy oddawanej przez generator mocy biernej do sieci/. Przypadek pracy generatorów przy niedowzbudzeniu zachodzi w praktyce przy zasilaniu linii przesyłowej o dużej pojemności /dla utrzymania stałości napięcia na zaciskach generatora obciążonego pojemnościową mocą bierną generator jest niedowzbudzony/. Większe znaczenie praktyczne w naszych warunkach

systemowych posiada przypadek niedowzbudzenia generatorów w celu obniżenia napięcia w węźle pracy równoległej. W czasie nocnych niedoborów obciążenia biernego otrzymujemy niepożądane wyżki napięcia w niektórych punktach systemu. Ponieważ nie mamy do dyspozycji należytej ilości transformatorów regulacyjnych /z regulacją pod obciążeniem/, pobór mocy biernej z sieci przez generatory pracujące z równoczesną samoczynną regulacją napięcia umożliwiłby w takich przypadkach utrzymanie poziomu napięcia przy niezmiennych warunkach generacji mocy czynnej. Przeważnie przyczyna wyżek poziomu napięcia przy zmniejszonym obciążeniu systemu leży w ogólnej tendencji rozbudowy systemu elektroenergetycznego. Powiększenie znamionowej mocy czynnej turbozespołów z punktu widzenia wyższych wskaźników ekonomicznych generacji mocy łączy się przeważnie z procentowym zmniejszeniem mocy biernej wytwarzanej przez generator. Dla powiększenia mocy biernej należałoby zwiększyć moc wzbudzenia generatora. Jednakże nadmierny przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia ogranicza z góry moc wzbudzenia turbogeneratora najwyższej mocy. Zwiększenie mocy wzbudzenia można osiągnąć tylko przez lepsze sposoby rozwiązania chłodzenia zachowując wymiary uzwojenia wzbudzenia, które są ograniczone ze względów konstrukcyjnych. Jeżeli moc bierna zapotrzebowana przy znamionowym obciążeniu systemu pokrywamy przy pomocy kompensatorów synchronicznych pracujących bez regulacji napięcia oraz baterii kondensatorów przyłączonych w różnych punktach systemu występuje w okresie zmniejszonego obciążenia nadmiar mocy biernej stwarzający tendencje do wyżek poziomu napięcia. Zastosowanie kompensatorów synchronicznych o regulowanym napięciu oraz zwiększenie liczby hydrogeneratorów zmniejsza wahania poziomu napięcia. W hydrogeneratorach znamionowa moc bierna nie jest na ogół ograniczona względami konstrukcyjnymi jeśli chodzi o zdymensjonowanie uzwojenia wzbudzenia w przeciwieństwie do turbogeneratorów najwyższych mocy.

Inercyjność wzbudnicy i regulatora pogarsza skuteczność wpływu regulacji na przesunięcie granicy sztucznej równowagi statycznej. Z uwagi na przeważający wpływ bezwładności elektromagnetycznej wzbudnicy stosujemy nowoczesne konstrukcje wzbudnic, w których stojany wykonane są z pakietu blach. W ten sposób eliminujemy bezwładność elektromagnetyczną wzbudnicy spowodowaną przez prądy wi-

rowe w jarzmie stojana wzbudnicy w czasie nieustalonych przebiegów regulacyjnych. Pozostaje jeszcze stała czasowa uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy którą możemy zmniejszyć za pomocą oporu dodatkowego wtrąconego do obwodu wzbudzenia wzbudnicy. Zmniejszenie stałej czasowej wzbudnicy za pomocą oporu dodatkowego osiągamy kosztem zwiększenia mocy wzbudzenia wzbudnicy. W stanie ustalonym musimy przyłożyć do obwodu wzbudzenia napięcie wzbudzenia większe o spadek napięcia na oporze dodatkowym. W przypadku modernizacji pracujących wzbudnic powiększenie napięcia zasilania wzbudzenia wzbudnicy nastęrcza trudności. W niektórych przypadkach możemy zmniejszyć stałą czasową wzbudnicy przez przełączenie równoległe uzwojeń biegunów głównych wzbudnicy, które w dawnych wykonaniach fabrycznych połączone są przeważnie szeregowo. Zmniejszony w ten sposób opór uzwojenia biegunów wyrównujemy przy pomocy oporu dodatkowego, tak że przy niezmienionym napięciu zasilania uzwojenia wzbudzenia prąd w poszczególnych gałęziach nie ulegnie zmianie /rys.9/.



Rys.9. Schemat przełączeń uzwojeń wzbudzenia wzbudnicy dla zmiany stałej czasowej i pułapu napięcia

Przy połączeniu równoległym całkowity prąd wzbudzenia jest zwiększony. Wpływ wymiarów geometrycznych wzbudnicy na bezwładność magnetyczną można najwygodniej ocenić przy pomocy współczynnika dobroci wzmocnienia mocy wzbudnicy  $Q_w$ , który przedstawia stosunek współczynnika wzmoc-

nienia mocy  $K_w$  i stałej czasowej  $T_M$ . Wzbudnica przedstawia w układzie regulacyjnym inercyjny człon wzmacniający, w którym wejściowa moc obwodu wzbudzenia zwielokrotniona zostaje do mocy zasilania uzwojenia wzbudzenia generatora.

Przy założeniu nienasyconego obwodu magnetycznego wzbudnicy ze stojanem zbudowanym z pakietu blach otrzymamy

$$Q_w = \frac{K_w}{T_M} = \chi \cdot \frac{A_s D}{B \delta_z} n \frac{0,4\pi^2}{60} \frac{1}{[s]}$$

$\chi = \frac{R_w}{R_w + R_a}$  - stosunek użytecznego oporu obciążenia wzbudnicy  $R_w$  /oporu uzwojenia wzbudzenia generatora/ do łącznego oporu obwodu wzbudzenia generatora, w którym  $R_a$  oznacza opór wewnętrzny wzbudnicy

$A_s \left[ \frac{A}{cm} \right]$  - okład prądowy twornika wzbudnicy określający wyzyskanie aktywnej miedzi twornika

$B [Gs]$  - indukcja w szczelinie wzbudnicy określająca wyzyskanie aktywnego żelaza wzbudnicy

$D [cm]$  - średnica twornika

$\delta_z [cm]$  - zastępcza szczelina powietrzna wzbudnicy. Jej długość zależy od szczeliny powietrznej między nabiegownikami a twornikiem, od oporu magnetycznego linii pola przenikających przez żłobki wirnika i oporu obwodu magnetycznego żelaza wzbudnicy

$n \left[ \frac{obr}{min} \right]$  - prędkość obrotowa wzbudnicy.

Ponieważ współczynnik dobroci wzmocnienia mocy nie zależy od wymiarów cewek i oporu uzwojenia wzbudzenia, można przy zachowaniu stałego współczynnika  $Q_w$  zmniejszyć stałą czasową wzbudnicy  $T_M$  kosztem obniżenia wzmocnienia mocy  $K_w$ .

Zmniejszenie inercyjności wzbudnicy można ponadto osiągnąć stosując duże wartości okładu prądowego twornika  $A_s$  i jednocześnie niską indukcję w szczelinie, ponadto powiększając proporcję  $D/\delta_z$  obierając małą wartość szczeliny przy dużej średnicy twornika. W przypadku wolnoobrotowych hydrogeneratorów możemy uzyskać znacznie wyższy współczynnik dobroci wzmocnienia mocy przez po-



większenie prędkości wirowania wzbudnicy zbudowanej jako oddzielny szybkobieżny agregat wzbudniczy. Należy wspomnieć, że z punktu widzenia pewności ruchu zastosowanie oddzielnego agregatu wzbudzającego może w niektórych przypadkach nasuwać zastrzeżenia.

W tych przypadkach znajduje zastosowanie układ szeregowy 2 wzbudnic. Wzbudnica główna osadzona na wspólnym wale z hydrogeneratorem pracuje przy stałym wzbudzeniu, druga wzbudnica, której twornik połączony jest w szereg z twornikiem wzbudnicy głównej pracuje jako prądnica dodawcza. Prądnica dodawcza napędzana jest szybkobieżnym silnikiem pomocniczym i sterowana z układu regulacji napięcia. Napięcie prądnicy dodawczej odejmuje się względnie sumuje z napięciem wzbudnicy głównej w zależności od wysterowania układu regulacji.

Przy ręcznej regulacji wzbudzenia prądnica główna osadzona na wspólnym wale z generatorem może dostarczać prądu wzbudzenia generatora przy nieczynnym zespole wzbudnicy dodawczej.

Rozwój nowoczesnych regulatorów wzbudzenia bez strefy nieczułości otwiera obecnie coraz wyraźniej możliwości zmniejszenia podstawowych wymiarów generatora, względnie zwiększenia mocy generatora przy zachowaniu granicznych wymiarów konstrukcyjnych. Odbywa się to jednak kosztem zwiększenia względnej reaktancji synchronicznej i przejściowej  $X_d$  i  $X'_d$  [3]. Powiększenie reaktancji synchronicznej  $X_d$  pociąga za sobą w sposób naturalny powiększenie reaktancji przejściowej  $X'_d$  o ile nie powiększymy wymiarów materiałów aktywnych generatora lub nie zmienimy proporcji wymiarów. Zwiększenie reaktancji wyrażonych w jednostkach względnych najprościej wyobrazić sobie na przykładzie generatora zbudowanego na określonej mocy znamionowej, w którym przez powiększenie prądu znamionowego powiększono moc znamionową /przy odpowiednim polepszeniu warunków chłodzenia części przewodzących prąd/. W ten sposób zmniejszamy reaktancję odniesienia generatora  $X_{odn} = \frac{U_{NF}}{I_N}$  nie zmieniając oczywiście wartości reaktancji wyrażonej w omach, a jednocześnie powiększamy reaktancję wyrażoną w jednostkach względnych. Oczywiście na skutek zwiększenia reaktancji synchronicznej i przejściowej zmniejsza się moc graniczna równowagi statycznej generatora. Np. dla przypadku turbogeneratora bez regulacji napięcia pracującego na sieć sztywną naturalną moc graniczna  $P_{go} = \frac{U_s E_w}{X_d + X_k}$  jest odwrotnie proporcjonalna do

sumy reaktancji synchronicznej i reaktancji przesyłowej. Dla porównania wpływu reaktancji generatora na naturalną granicę równowagi statycznej generatora naniesiono na rys.6 krzywą granicy równowagi statycznej w zakresie niedowzbudzenia generatora przy podwójnej reaktancji synchronicznej  $X_d$  i przejściowej  $X'_d$ , a niezminionej reaktancji przesyłowej  $X_k$  /krzywa 1/. Samoczynna regulacja napięcia /bez strefy nieczułości/ o zwiększonych reaktancjach ma wpływ na przesunięcie granicy równowagi statycznej generatora. Dla dwukrotnie większej reaktancji  $X_d$  i  $X'_d$  granicą tą jest krzywa 2' na rys.6. Na rysunku widoczne jest poszerzenie obszaru pracy stabilnej na skutek działania regulacji. Krzywa 2' granicy sztucznej równowagi statycznej generatora przy dwukrotnie większych reaktancjach  $X_d$  i  $X'_d$  zbliżona jest do krzywej 1 granicy naturalnej równowagi statycznej generatora bez regulacji napięcia. Niestety wpływ samoczynnej regulacji napięcia na granicę równowagi dynamicznej jest niewspółmiernie mniejszy aniżeli na granicę równowagi statycznej.

Przyczyna tego leży w tym, że na granicę równowagi dynamicznej wpływa w głównej mierze reaktancja przejściowa generatora  $X'_d$  /im  $X'_d$  mniejsze tym wyższa przejściowa moc graniczna/ podczas gdy na granicę równowagi statycznej wpływa przede wszystkim reaktancja synchroniczna  $X_d$ . Dla zilustrowania nieznacznego wpływu reaktancji  $X'_d$  na granicę równowagi statycznej naniesiono na rys.6 krzywą granicy sztucznej równowagi statycznej przy podwójnej reaktancji synchronicznej  $X_d$ , a niezminionej wartości  $X'_d$  /krzywa 2"/. Krzywe 2" i 2' leżą bardzo blisko siebie.

Zmiany stałej czasowej generatora  $T'_{do}$  i mechanicznej stałej czasowej turbozespołu  $T_m$  wpływają w niedużym stopniu na obszar sztucznej równowagi statycznej generatora wyposażonego w regulator bez strefy nieczułości. Natomiast stałe czasowe  $T'_{do}$  i  $T_m$  wpływają silnie na obszar praktycznej równowagi statycznej regulatorów wykazujących strefę nieczułości /zmniejszenie stałych czasowych  $T'_{do}$  i  $T_m$  powoduje zwięźnienie obszaru praktycznej równowagi statycznej/. Wpływ regulacji napięcia na przesunięcie granicy równowagi statycznej zależy ogólnie od wartości napięcia regulowanego. Wykresy przedstawione na rys.4 i 6 dotyczą przypadku znamionowego napięcia na zaciskach generatora. Przybliżony przebieg granicy sztucznej równowagi statycznej otrzymamy z tych samych wykresów

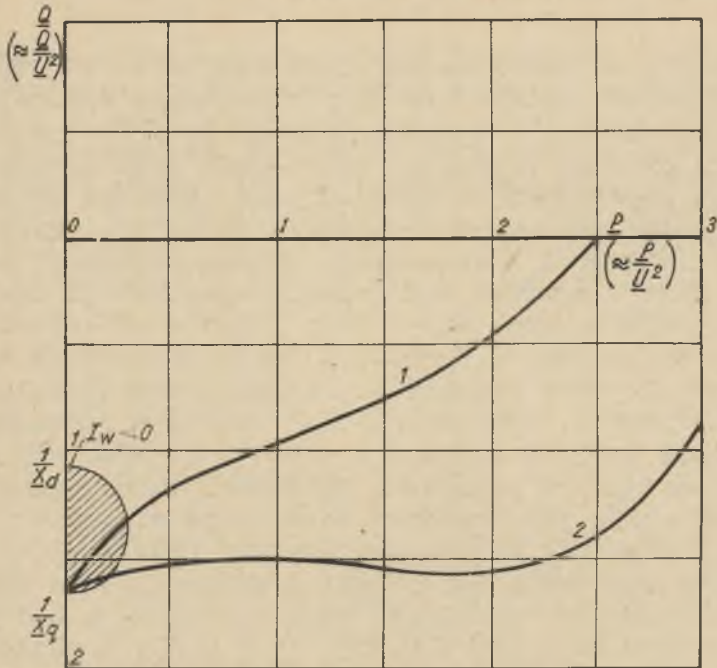
przyjmując, że współrzędne oznaczają wartości  $\frac{P}{U^2}$  oraz  $\frac{Q}{U^2}$ . W przypadku generatora synchronicznego wykazującego symetrię reaktancji synchronicznej  $X_d = X_q$  przebieg naturalnej granicy równowagi statycznej przy takich oznaczeniach współrzędnych wykresu jest zupełnie ścisły.

Możliwość powiększenia obszaru stabilnej pracy generatorów za pomocą nowoczesnego układu regulacji wzbudzenia ma duże znaczenie dla rozwoju konstrukcji turbogeneratorów największych mocy. Przy budowie największych jednostek uzyskujemy w przypadku turbogeneratorów na ogół powiększenie mocy znamionowej kosztem zmniejszenia naturalnej stabilności. Przy ulepszonym sposobie rozwiązania chłodzenia uzwojeń stojana i wirnika otrzymujemy większą moc wypadającą na jednostkę objętości turbogeneratora, jednakże rosną jednocześnie reaktancje względne.

Dla porównania wpływu samoczynnej regulacji napięcia na obszar równowagi statycznej hydrogeneratora wykazującego niesymetrię reaktancji synchronicznej w osi podłużnej i poprzecznej ( $X_d = 0,915$ ,  $X_q = 0,65$ ) przedstawiono na rys.10 przebieg granicy naturalnej i sztucznej równowagi statycznej hydrogeneratora dużej mocy pracującego przy napięciu znamionowym na sieć sztywną poprzez reaktancję przesyłową  $X_k = 0,183$ . Krzywa /1/ oznacza granicę naturalnej, krzywa /2/ granicę sztucznej równowagi statycznej [12]. Przy mocy  $P = 0$  hydrogenerator pracuje jako jawnobiegunowy kompensator synchroniczny. Granica równowagi statycznej zarówno przy regulowanym jak niergulowanym napięciu generatora występuje przy granicznym obciążeniu pojemnościowym  $Q = -\frac{U^2}{X_q}$ . Przy tym granicznym obciążeniu płynie w obwodzie uzwojenia wzbudzenia ujemny prąd wzbudzenia. Utrata stabilności powoduje obrót wirnika kompensatora o podziałkę biegunową. Prąd wzbudzenia po obrocie wirnika wytwarza przepływ skierowany zgodnie z przepływem stojana jak przy przewzbudzeniu.

Na rys.11 przedstawiono charakterystykę kątową jawnobiegunowej maszyny synchronicznej przy ujemnym prądzie wzbudzenia, której równanie można przedstawić w postaci

$$P = \frac{E_w U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta \quad /4/$$

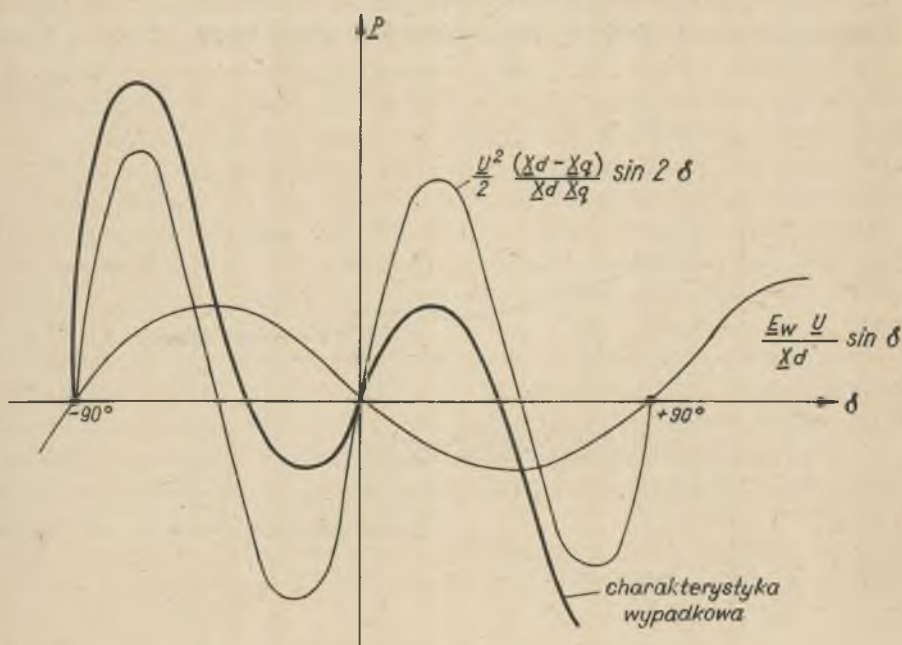


Rys. 10. Krzywe granicy naturalnej równowagi statycznej i sztucznej równowagi statycznej hydrogeneratora dużej mocy  $X_d = 0,915$ ,  $X_q = 0,65$  współpracującego z siecią sztywną poprzez reaktancję przesyłową  $X_k = 0,185$ . Krzywa /1/ oznacza granicę naturalnej równowagi statycznej. Krzywa /2/ oznacza granicę sztucznej równowagi statycznej

Utrata stabilności nastąpi w przypadku gdy  $\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$  co zachodzi przy  $E \approx U \frac{X_d - X_q}{X_q}$  jeśli zważymy że przy pracy kompensatorowej  $P \approx 0$

#### Wpływ regulacji napięcia na równowagę dynamiczną generatorów synchronicznych

Udarowa nadwyżka mocy turbiny ponad elektryczną moc oddawaną generatorem powoduje przyspieszenie wirnika generatora i powiększenie kąta mocy  $\delta$ . Powstanie udarowej nadwyżki mocy turbiny spowodowane bywa przeważnie przez zwarciove obniżki napięcia sieci, z którą współpracuje generator. Obniżka napięcia powoduje natychmiastowe obniżenie oddawanej mocy czynnej generatora. Jeżeli w miarę wzrostu kąta  $\delta$  rośnie równocześnie oddawana moc

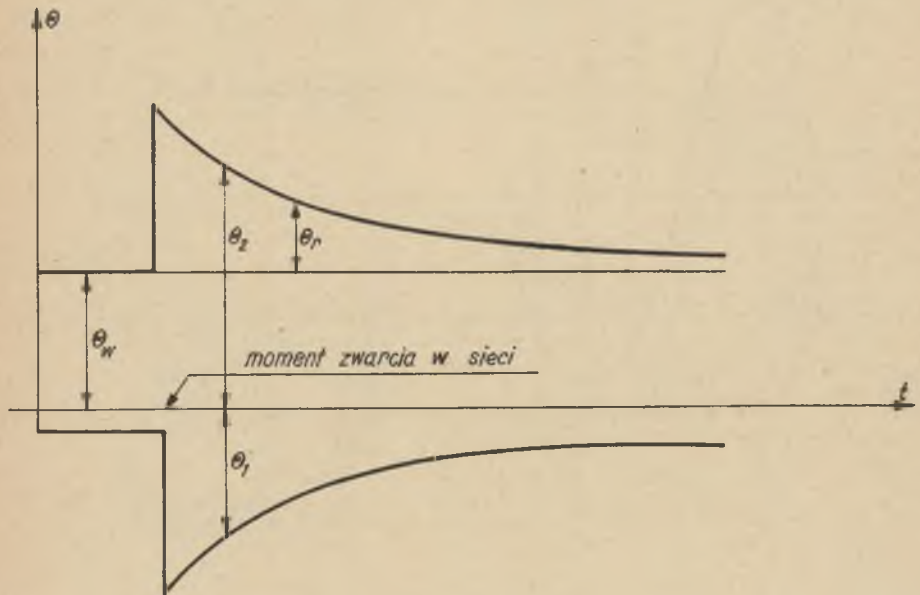


Rys.11. Charakterystyka kątowna jawnobiegunowej prądnicy synchronicznej przy ujemnym prądzie wzbudzenia

czynna, może ustalić się nowy stan równowagi. Wówczas w chwili zrównania mocy czynnej z mocą turbiny generator posiada nagromadzoną w masach wirujących nadwyżkę energii kinetycznej nabytej w czasie przyspieszenia. Jeżeli w wyniku powiększenia kąta mocy nagromadzona w masach wirujących energia kinetyczna zamieni się na energię potencjalną maszyny synchronicznej nabytą na drodze rosnącego kąta, nastąpi zatrzymanie procesu narastania kąta mocy, co warunkuje utrzymanie pracy równoległej.

Moment synchroniczny i uzależniona od niego moc synchroniczna generatora jest funkcją kąta mocy i zależy ponadto od wielkości napięcia sieci oraz prądu wzbudzenia generatora. Prąd wzbudzenia generatora występujący przy zwarciowej obniżce napięcia sieci jest większy od ustalonego prądu wzbudzenia przed zaburzeniem pracy równoległej. Przepływ wyrównawczy w obwodach wirnika powstały w chwili zwarciowej obniżki napięcia utrzymuje w pierwszej chwili niezmienny strumień wirnika generatora. Na rys.12 przedstawiono czasowy przebieg przepływu w ob-

wodach wirnika  $\theta_2$  generatora pracującego bez regulacji napięcia przy zwarciowej obniżce napięcia sieci. Wyrów-



Rys.12. Przebieg przepływów wirnika i stojana przy symetrycznej zwarciowej obniżce napięcia

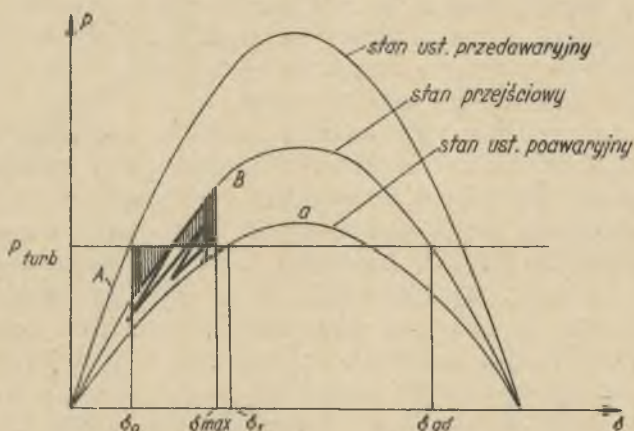
nawczy przepływ wirnika  $\theta_r$  skierowany jest przeciwko przepływowi twornika generatora i zgodnie z prawem Lenza utrzymuje w pierwszej chwili niezmienny strumień sprzężony z obwodami wirnika. Przy dyskusji stabilności dynamicznej uwzględnimy w obwodach wirnika **tylko** uzwojenie wzbudzenia oraz obwody tłumiące klatkę tłumiącą i strugi prądów wirowych bloku litego wirnika które wytwarzają przepływ prądowy w kierunku osi uzwojenia wzbudzenia generatora /w osi podłużnej/, a pominiemy stosunkowo szybko zanikające przepływy wyrównawcze w osi poprzecznej /ze względu na brak uzwojeń zasilanych ze wzbudnicy działających w osi poprzecznej wyrównawczy przepływ poprzeczny nie może zostać podtrzymany/.

Bezładność elektromagnetyczna rozpatrywanych obwodów wirnika powoduje w pierwszym okresie trwania zaburzenia utrzymanie niezmiennych liniozwojów sprzężonych z tymi obwodami w pierwszym czasie trwania zaburzenia. Z uwagi

na to, że napięcie  $E'_q$  proporcjonalne jest do tych liniozwojów, generator w początkowym czasie trwania zaburzenia pracuje przy niezminionej wartości napięcia  $E'_q$ . Stromość i maksimum przejściowej charakterystyki kątowej zależy prócz napięcia sieci od wartości reaktancji przejściowej generatora  $X'_d$ . Generatory o małej reaktancji przejściowej  $X'_d$  posiadają stromą przejściową charakterystykę kątową i wykazują dzięki temu podwyższoną granicę równowagi dynamicznej. Przebieg przejściowej charakterystyki kątowej przy stałości napięcia  $E'_q$  określony jest równaniem 2.

Powiększenie reaktancji przejściowej generatora odbija się bardzo niekorzystnie na stabilności dynamicznej. Powiększenie rzędnych  $P$  przejściowej charakterystyki kątowej możemy uzyskać przez powiększenie napięcia  $E'_q$  na skutek działania regulacji napięcia w czasie trwania zaburzenia pracy równoległej.

Na rys.13 przedstawiono charakterystykę kątową mocy czynnej generatora w stanie przedawaryjnym oraz w stanie



Rys.13. Charakterystyki kątowej mocy czynnej generatora w stanie nieustalonym

przejściowym i poawaryjnym. W wyniku nadwyżki mocy turbiny wirnik zwiększa kąt mocy od  $\delta_0$  do kąta  $\delta_{max}$ . Maksymalna amplituda kąta mocy określona jest na wykresie przez równość powierzchni  $A = B$ . Stan ustalony /kąt  $\delta_1$  / osiągnięty jest po szeregu kołysań, które zanikają dzięki nie-

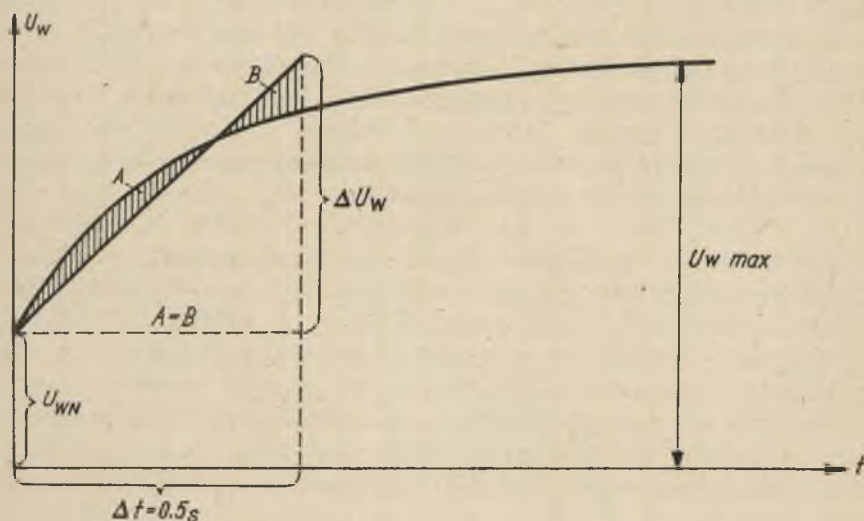
uwzględnionym w tych rozważaniach momentem tłumiącym generatora. W miarę upływu czasu przepływ wyrównawczy wirnika, w wyniku czego przemieszcza się przejściowa charakterystyka kątowna aż do statycznej poawaryjnej charakterystyki kątownej. Na rys.13 zaznaczono takie przejście generatora pracującego bez regulacji wzbudzenia ze statycznej charakterystyki przedawaryjnej poprzez charakterystykę przejściową do statycznej charakterystyki poawaryjnej, do której dochodzi generator w wyniku zanikających oscylacji kąta mocy. Utrzymanie pracy równoległej generatora zależy z jednej strony od warunków równowagi dynamicznej oraz z drugiej strony od warunków poawaryjnej równowagi statycznej. O zachowaniu równowagi dynamicznej decyduje w większości wypadków pierwszy półokres kołysania kąta mocy. Na podstawie równości powierzchni  $A = B$  można wyznaczyć maksymalny dopuszczalny kąt mocy, który musi leżeć poniżej granicznej wartości kąta  $\delta_{gd}$ . W związku z tym zachodzi konieczność zbadania warunków pracy generatora pod względem dynamicznej równowagi granicznej dla z góry założonego prawdopodobnego zaburzenia zwarciovego w systemie. Ze względu na utrzymanie równowagi dynamicznej zachodzi przeważnie konieczność obniżenia początkowego kąta mocy  $\delta_0$  znacznie poniżej granicy równowagi statycznej.

Jeżeli generator wyposażony jest w samoczynny regulator napięcia wówczas na skutek zwarciovwej obniżki napięcia regulator powoduje wzmożenie ustalonego prądu wzbudzenia. Wzmożony prąd wzbudzenia powiększa rzędne poawaryjnej charakterystyki kątownej i polepsza w ten sposób warunki równowagi statycznej. Przy utrzymującej się obniżce napięcia regulator powoduje wzmożenie prądu wzbudzenia generatora. Generator pracuje w tym przypadku przy stałym maksymalnym wzbudzeniu na skutek czego warunki równowagi statycznej odpowiadają warunkom naturalnej granicy równowagi statycznej przy zwiększonym prądzie wzbudzenia. Jeśli po krótkotrwałej zwarciovwej obniżce napięcia nastąpi odłączenie awaryjnego odcinka sieci i powrotna odbudowa napięcia, to równowaga statyczna będzie uzależniona od charakterystyk samoczynnego regulatora napięcia. Zauważmy, że wpływ samoczynnej regulacji napięcia na powiększenie dynamicznej mocy granicznej jest znacznie mniejszy aniżeli na przesunięcie granicy równowagi statycznej. Przyczyna tego leży w pierwszym rzędzie w dużej bezwładności magnetycznej generatora



sprzeciwiającej się szybkiemu zwiększeniu prądu wzbudzenia przy wzmożonym napięciu wzbudnicy oraz w bezwładności magnetycznej samej wzbudnicy. Ponieważ pierwszy półokres kołysania wirnika generatora odbywa się w przeciętnym systemie elektromagnetycznym w czasie rzędu 0,5s, skuteczność układu regulacji wzbudzenia w czasie zwarciovych obniżek napięcia określona jest przez tzw. średnią półsekundową stromość napięcia wzbudzenia. Na rys.14 przedstawiono przebieg napięcia wzbudnicy przy wystąpieniu zwarciowej obniżki napięcia sieci. Na podstawie tego przebiegu wyznaczono stromość napięcia wzbudzenia

$$S_f = \frac{\Delta U_w}{U_{WN} \Delta t} \quad /5/$$



Rys.14. Wyznaczenie stromości napięcia wzbudnicy

Dla otrzymania możliwie wysokiej stromości napięcia wzbudzenia można wyposażyć istniejące regulatory napięcia w dodatkowy człon pośpieszny tzw. stycznik forsowania wzbudzenia, który przy większych obniżkach napięcia sieci powoduje maksymalne wysterowanie napięcia wzbudnicy

niezależnie od działania samoczynnego regulatora napięcia. W elektromechanicznych regulatorach napięcia stycznik forsowania wzbudzenia uruchamiamy przez przekaźnik podnapięciowy zwierający wszystkie opory dodatkowe w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy. Uzyskujemy przez to w niektórych przypadkach wyższą stromość napięcia wzbudzenia aniżeli na skutek działania samego regulatora, który często przy skrajnym położeniu kontaktów posiada niezawierany wstępny opór dodatkowy /ze względu na przystosowanie do charakterystyki wzbudnicy/.

Przeciętnie stromość napięcia wzbudnicy wyrażona w odniesieniu do napięcia wzbudzenia w znamionowych warunkach pracy generatora wynosi 1,5...2. Stromość taka zapewnia praktycznie utrzymanie przepływu wyrównawczego wirnika w ciągu pierwszego półokresu kołysania, tak że przy osiągnięciu maksymalnego kąta mocy generator posiada praktycznie niezmienną wartość napięcia  $E'_q$ . Nieestety jednak powiększenie przepływu wirnika w celu powiększenia napięcia  $E'_q$  i uzależnionych od  $E'_q$  rzędnych przejściowej charakterystyki katowej wymaga znacznie wyższych stromości napięcia wzbudzenia. Przy stromościach rzędu 4...5 otrzymujemy powiększenie dynamicznej mocy granicznej turbogeneratora o około 30%. Mając na uwadze znaczną bezwładność elektromagnetyczną generatora określoną przez stałą czasową  $T'_d$  rzędu 2s dojdziemy do wniosku, że tak wysokie stromości napięcia wzbudzenia są konieczne dla przyspieszenia powiększenia przepływu wirnika w ciągu jednego półokresu kołysania. Wysokie stromości napięcia wzbudnicy wymagają zaprojektowania wzbudnicy o wysokim pułapie napięcia i o małej stałej czasowej. Własności te można uzyskać przez przewymiarowanie wzbudnicy. Maksymalne napięcie wzbudnicy odniesione do napięcia przy obciążeniu znamionowym wyznacza tzw. współczynnik forsowania wzbudzenia generatora

$$k_f = \frac{U_{w \max}}{U_{wN}}$$

Przeciętnie współczynnik forsowania wynosi około 1,8...2,5.

W zagranicznych wykonaniach wzbudnic stosowane bywają niejednokrotnie wyższe wartości współczynnika forsowania, ponieważ wysoki pułap napięcia wzbudnicy służy

jako jeden ze sposobów uzyskania dużej stromości napięcia wzbudnicy. Spośród innych sposobów powiększania stromości napięcia wzbudnicy na uwagę zasługuje wprowadzenie zgodnie magnesującego uzwojenia szeregowego /dozwojenia szeregowego/ wzbudnicy.

Przy zwarciovych obniżkach napięcia prąd wyrównawczy w uzwojeniu wzbudzenia generatora płynący przez uzwojenie szeregowe wzbudnicy wzmaga napięcie wzbudnicy. Dozwojenie szeregowe powiększa w ten sposób stromość napięcia wzbudnicy i wspomaga działanie regulatora napięcia, który steruje prąd uzwojenia bocznikowego wzbudnicy. W skrajnym przypadku doboru uzwojenia szeregowego odpowiadającego granicy szeregowego samowzbudzenia wzbudnicy, uzwojenie szeregowe utrzymuje stałość liniozwojów uzwojenia wzbudzenia generatora.

Działanie uzwojenia szeregowego można zastąpić w przypadku wzbudnicy o znikomej bezwładności magnetycznej równoważnym zmniejszeniem oporu czynnego obwodu uzwojenia wzbudzenia generatora. Wzbudnica, której napięcie twornika zależy liniowo od prądu obciążenia zachowuje się jak opór ujemny w obwodzie uzwojenia wzbudzenia generatora. Na granicy samowzbudzenia opór wypadkowy obwodu wzbudzenia równa się zero, na skutek czego obwód wzbudzenia upodabnia się do supraprzewodnika utrzymującego stałość liniozwojów skojarzonych z obwodem wzbudzenia generatora.

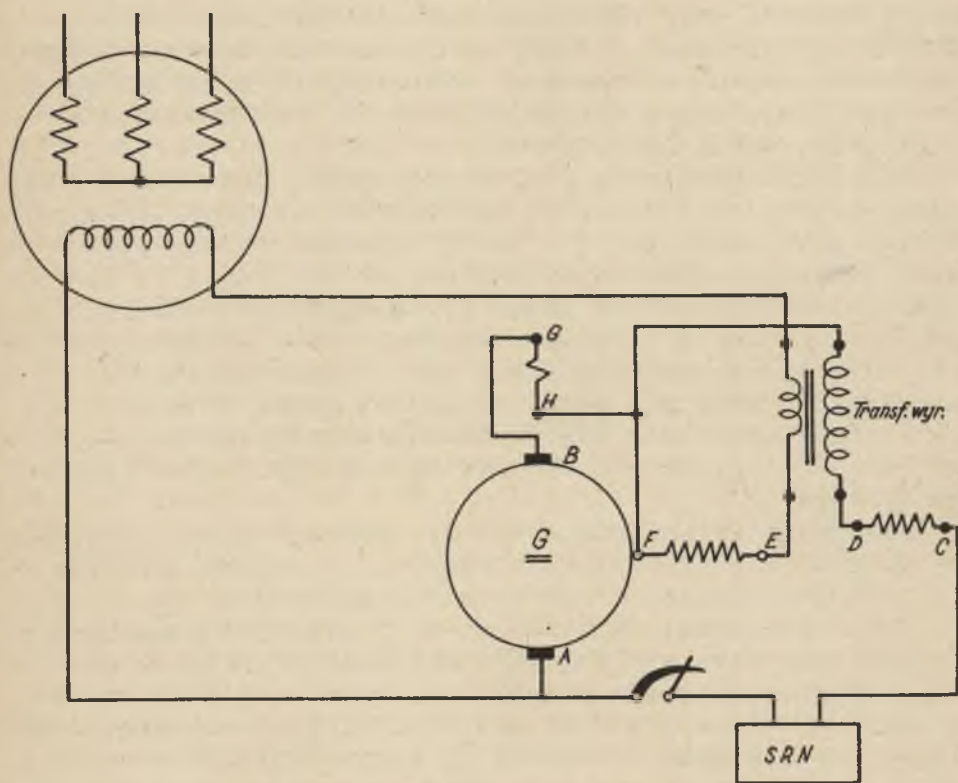
Uzwojenie bocznikowe wzbudnicy pracuje w tym przypadku tylko w stanie nieustalonym regulując tylko poziom liniozwojów uzwojenia wzbudzenia generatora.

Układ wzbudzenia generatora musi zapewnić również stabilną pracę przy wyłączonej samoczynnej regulacji napięcia. Graniczne dozwojenie szeregowe wzbudnicy utrudnia pracę generatora przy ręcznej regulacji. Aczkolwiek możliwe jest rozwiązanie układu ręcznej regulacji również przy granicznym /a nawet ponadgranicznym/ dozwojeniu wzbudnicy za pomocą ujemnych sprzężeń zwrotnych stosowane bywają najczęściej w praktyce dozwojenia szeregowe słabsze od dozwojenia granicznego.

Niekorzystną własnością dozwojonej wzbudnicy jest to, że uzwojenie bocznikowe umieszczone współosiowo z uzwojeniem szeregowym opóźnia zgodnie z prawem Lenza działanie uzwojenia szeregowego sprzeciwiając się szybkiej zmianie strumienia głównego wzbudnicy. W obwodzie uzwojenia bocznikowego pojawia się pod wpływem zmian strumienia

głównego wzbudnicy prąd indukowany, który obniża szybkość narastania strumienia. Za pomocą oporów dodatkowych w obwodzie uzwojenia bocznikowego można zmniejszyć to opóźnienie.

Opóźniający wpływ sprzężenia indukcyjnego można wyeliminować stosując specjalny transformator wyrównawczy /z nastawialną szczeliną/ przyłączony do uzwojeń wzbudnicy jak na rys.15. SEM indukowana w uzwojeniu bocznikowym przy zmianach strumienia głównego wzbudnicy kompenso-



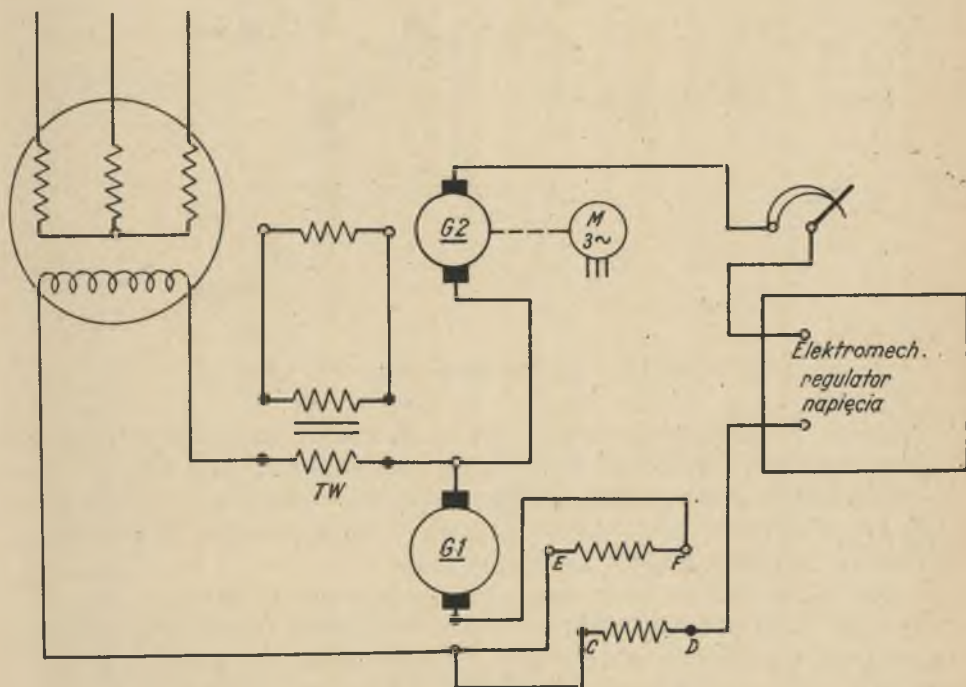
Rys.15. Układ wzbudnicy dozwojonej z transformatorem wyrównawczym

wana jest przez SEM wtórnej strony transformatora, tak że pod wpływem nagłego wzrostu prądu obciążenia wzbudnicy przy zwarciovych przebiegach prądów stojana napięcie wzbudnicy narasta szybko z bardzo małym opóźnieniem spowodowanym jedynie działaniem prądów wirowych w jarzmie stojana wzbudnicy. Dla zmniejszenia opóźniającego dzia-

łania prądów wirowych stosujemy nowoczesną konstrukcję stojanów wzbudnic z blach magnetycznych.

Dla zmniejszenia wymiarów transformatora wyrównawczego można wprowadzić do układu wzbudzenia dodatkowy jedno-stopniowy wzmacniacz maszynowy, którego twornik wtrącony jest w obwód uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy głównej, a którego uzwojenie sterujące przyłączone jest do zacisków wtórnej strony transformatora wyrównawczego. W takim układzie praktycznie unikniemy powiększenia indukcyjności w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy wprowadzonej przez wtórne uzwojenie transformatora wyrównawczego. Dodatkowy wirujący wzmacniacz maszynowy napędzony oddzielnym silnikiem asynchronicznym powoduje jednakże niepożądane skomplikowanie układu wzbudzenia.

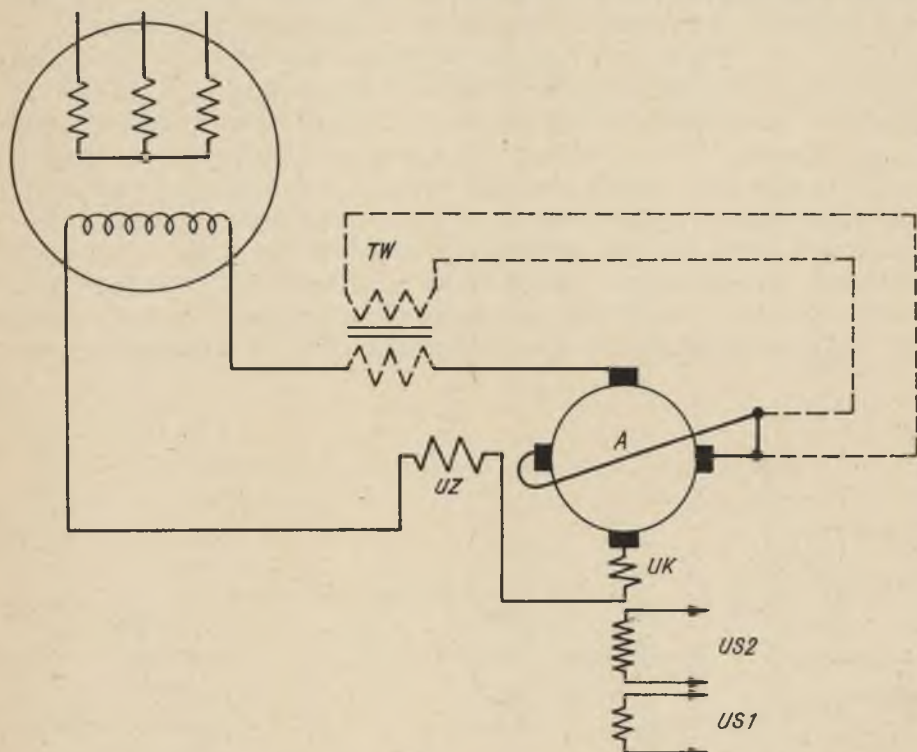
Na rys.16 przedstawiono schemat ideowy układu wzbudzenia z transformatorem wyrównawczym TW i wzmacniaczem



Rys.16. Układ wzbudzenia z transformatorem wyrównawczym i wzmacniaczem elektromaszynowym

elektromaszynowym  $G_2$ , który znalazł zastosowanie za granicą w elektrowniach wodnych.

Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym wzbudnicy z uzwojeniem szeregowym jest wzbudnica amplidynowa  $A$  przedstawiona na rys.17. Przy użyciu takiej wzbudnicy ampli-

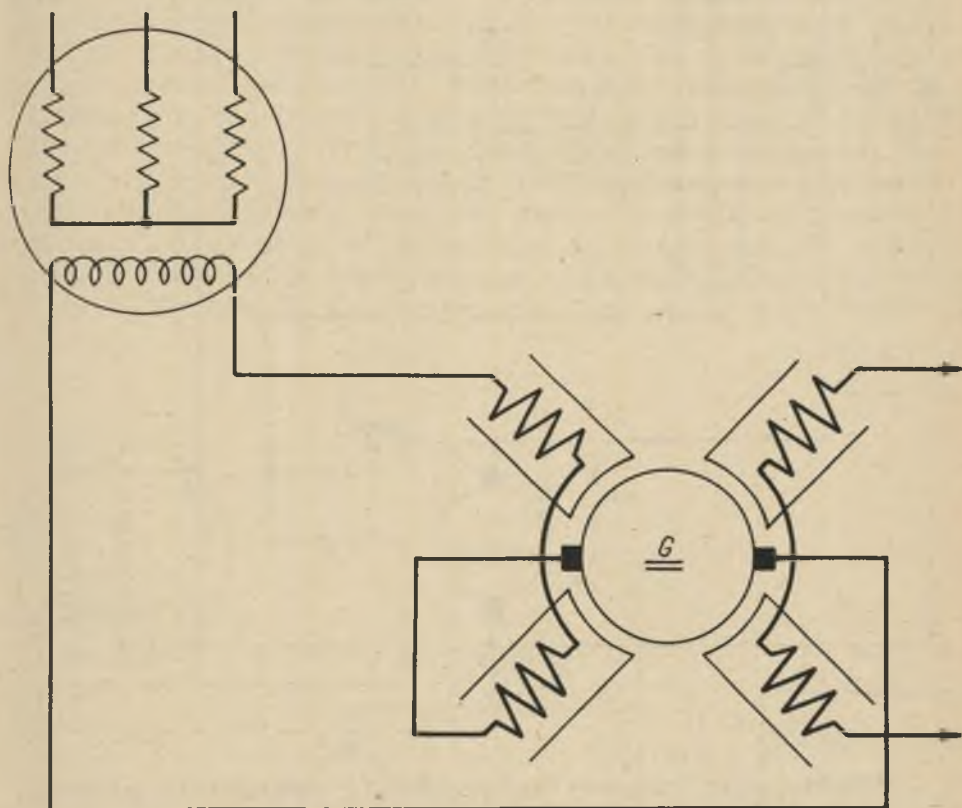


Rys.17. Wzбудnica amplidynowa

dynowej otrzymujemy małą stałą czasową wzbudnicy i magnetyczne oddzielenie regulowanego uzwojenia wzbudnicy. /Regulujące uzwojenie sterujące  $US$  zasilane przeważnie ze wzmacniacza magnetycznego nie sprzęga się magnetycznie z uzwojeniem szeregowym/.

Sprężenie magnetyczne uzwojenia szeregowego  $UZ$  ze zwartym uzwojeniem poprzecznym twornika powoduje opóźnienie narastania strumienia poprzecznego amplidyny podobnie jak w przypadku zwykłej wzbudnicy dozwojonej. Opóźniający wpływ sprzężenia magnetycznego możemy wyeliminować stosując transformator wyrównawczy  $TW$  zaznaczony na rys.17 linią przerywaną. Z uwagi na to, że amplidyna przedstawia wzmacniacz dwustopniowy otrzymamy

bardzo małą moc zasilania uzwojenia sterującego potrzebną do pełnego wysterowania amplitudowej wzbudnicy. Przy małej mocy zasilania uzwojenia sterującego amplitudyny posiadamy dużą łatwość rozwiązania układu samoczynnej regulacji wzbudzenia za pomocą wzmacniaczy magnetycznych małych mocy o znikomych stałych czasowych. Za granicą budowane są amplitudyny mocy rzędu 100-150 kW, które nadają się doskonale do pracy jako wzbudnice generatorów synchronicznych. Sprzężenie magnetyczne uzwojenia szeregowego wzbudnicy z uzwojeniami wzbudzenia można usunąć również bez pomocy transformatora wyrównawczego jak to przedstawiono na rys.18.

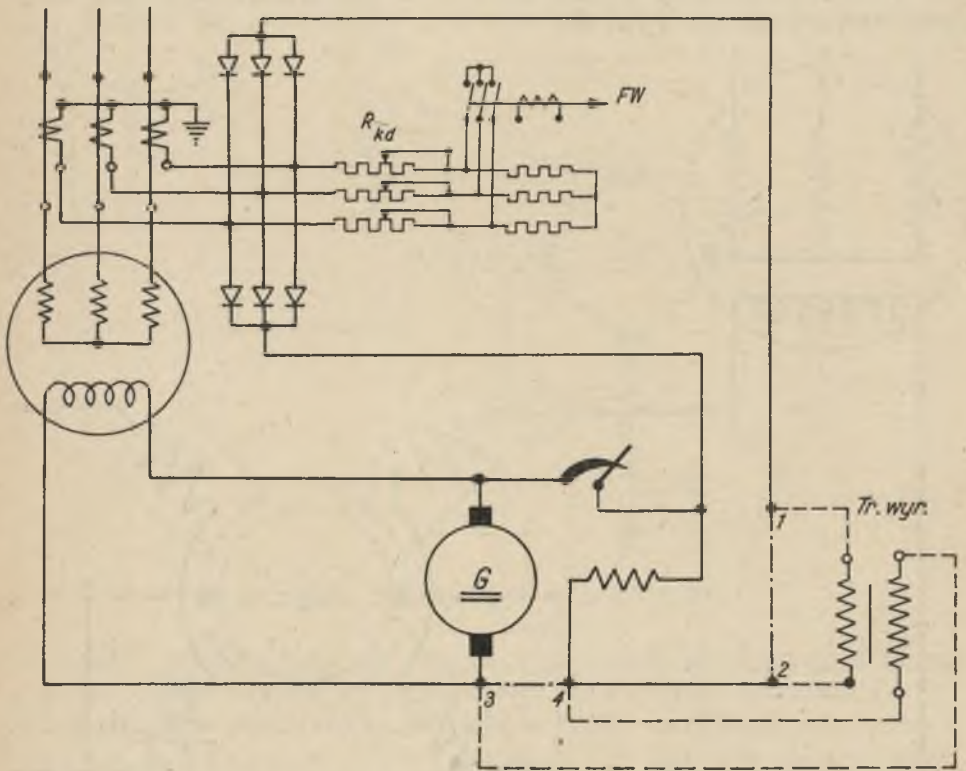


Rys.18. Wzbudnica z rozdzielonymi biegunami głównymi

Bieguny główne wzbudnicy rozdzielone są na cztery częściowe pieńki biegunowe.

Na dwóch sąsiednich pieńkach tworzących jeden biegun główny wzbudnicy rozmieszczone jest uzwojenie wzbudzenia

i uzwojenie szeregowo. Strumień wytworzony przez oba uzwojenia sumując się daje wypadkowy strumień użytkowy wzbudnicy, jednakże linie pola obu uzwojeń nie są ze sobą sprzężone. Inny sposób powiększenia stromości napięcia wzbudnicy otrzymujemy za pomocą tak zwanej niefazowej kompoundacji wzbudzenia generatora. Niefazowa kompoundacja wzbudzenia polega na zasilaniu uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy generatora wyprostowanym prądem zbieranym z transformatorów prądowych /przekładników prądowych/ stojana generatora /rys.19/. Niefazowa kompoun-

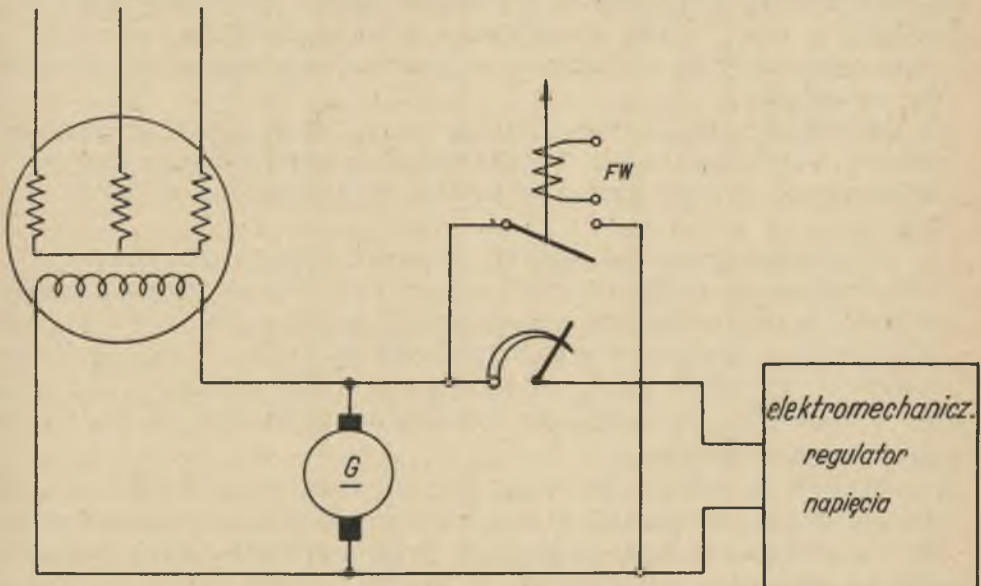


Rys.19. Schemat fazowej kompoundacji wzbudzenia generatora

dacja generatora spełnia zadanie zgrubnej stabilizacji napięcia generatora. Przy przejściu z biegu jałowego do pełnego obciążenia utrzymujemy w przybliżeniu stałość napięcia na zaciskach generatora. O ile zachodzi konieczność dokładnego utrzymania stałości napięcia z za-



chowaniem określonego współczynnika statyki podstawowej charakterystyki napięcia musimy uzupełnić układ kompowdacji wzbudzenia dodatkowym regulatorem napięcia, który nazywany jest w tym przypadku korektorem napięcia generatora. Przy zwarciovych obniżkach napięcia sieci z którą współpracuje generator, prąd przejściowy generatora zbierany z przekładników prądowych kompowdacji powiększa w sposób udarowy napięcie na uzwojeniu wzbudzenia wzbudnicy i przyspiesza w ten sposób czas narastania napięcia wzbudnicy. Dla powiększenia skuteczności kompowdacji przy zwarciovych obniżkach napięcia stycznik forsowania wzbudzenia FW "normalnie zamknięty" uruchomiony przez przekaźnik podnapięciowy /przy obniżeniu napięcia generatora poniżej 85% najniższego napięcia występującego w eksploatacji generatora/ zwiększa opór kompowdacji  $R_{kd}$  i wzmaga w ten sposób napięcie zasilania uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy. Pomiary oscylograficzne wykazały, że przy takim rozwiązaniu stycznika forsowania wzbudzenia otrzymujemy większą stromość napięcia wzbudzenia aniżeli to ma miejsce przy stycznikowym zwieraniu oporów dodatkowych w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy. /Na rys.20 przedstawiony jest układ stycznika for-



Rys.20. Układ stycznikowego forsowania wzbudzenia za pomocą zwierania oporu dodatkowego w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy

sowania wzbudzenia w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia, który stanowi uzupełnienie elektromechanicznego regulatora napięcia.

Stycznik forsowania "normalnie otwarty" uruchomiony jest przez przekaźnik podnapięciowy. Jeżeli w obwód uzwojenia wzbudzenia wtrącimy dodatkowo transformator wyrównawczy /zaznaczony na rys.19 linią przerywaną/ możemy przy właściwym doborze indukcyjności wzajemnej transformatora wyeliminować bezwładność magnetyczną wzbudnicy wniesioną przez obwód samowzbudzenia. Ponieważ prąd compoundacji dostarczony z przekładników prądowych można uważać praktycznie za prąd wytworzony przez źródło prądowe o nieograniczonym oporze wewnętrznym wypadkowa stała czasowa wzbudnicy charakteryzująca jej bezwładność magnetyczną zmniejszona jest do wartości stałej czasowej obwodu prądów wirowych jarzma stojana wzbudnicy i zwartych przez szczotki zwojów komutujących twornika wzbudnicy. Obwody te są sprzężone ze strumieniem głównym. Przy udarowych zmianach prądu przekładników prądowych pojawia się na prostownikach duże przejściowe napięcie wsteczne. Przy wprowadzeniu transformatora wyrównawczego rośnie to napięcie wsteczne prostowników, ponieważ przy zmniejszonym przepływie wyrównawczym w obwodach sprzężonych z uzwojeniem wzbudzenia rośnie bardziej stromo prąd magnesujący wzbudnicy wytwarzający strumień użytkowy wzbudnicy.

Na rys.19 zaznaczono linią przerywaną układ transformatora wyrównawczego. Transformator wyrównawczy można wyłączyć z obwodu przez zwarcie zacisków 1 i 2 oraz 3 i 4.

Dla zilustrowania wpływu różnych rozwiązań układów wzbudzenia na podwyższenie stromości napięcia wzbudzenia zdjęto w laboratorium oscylogramy przebiegów zwarcia udarowego generatora synchronicznego mocy 30 kVA o parametrach  $U_N = 400$  V,  $I_N = 43$  A,  $n = 1500$  obr/min,  $X_d = 1,7$ ,  $X'_d = 0,25$ ,  $T'_{do} = 0,95$ s ze wzbudnicą osadzoną na wspólnym wale z generatorem.

Rys.21 przedstawia przebieg zwarcia generatora /o nie-regulowanym napięciu/ z samowzbuđną prądnicą bocznikową. Na oscylogramie widoczny jest prąd wyrównawczy w uzwojeniu wzbudzenia generatora. W miarę upływu czasu zanika prąd wyrównawczy w uzwojeniu wzbudzenia generatora, a prąd stojana  $I$  maleje od wartości przejściowej do wartości ustalonej. Składowa aperiodyczna prądu zwarcia

stojana powoduje powstanie widocznej na oscylogramie zanikającej szybko składowej periodycznej prądu wzbudzenia. W pierwszej chwili zwarcia zmniejsza się napięcie wzbudnicy na skutek zwiększonego prądu wzbudzenia generatora. Obniżenie napięcia wzbudnicy spowodowane jest przez spadek napięcia na szczotkach komutatora. Napięcie na uzwojeniu wzbudzenia wzbudnicy  $U$  zmniejsza się w pierwszej chwili zwarcia na skutek pojawienia się prądu wyrównawczego w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy, który podtrzymuje liniozwoje wzbudnicy kompensując w pierwszej chwili zwarcia wpływ zwiększonej reakcji poprzecznej twornika wzbudnicy. Prąd wyrównawczy w obwodzie uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy zwiększa spadek napięcia na oporze dodatkowym połączonym w szereg z uzwojeniem wzbudzenia wzbudnicy. Ten spadek napięcia odejmuje się od napięcia na zaciskach wzbudnicy. Wynika stąd widoczna na oscylogramie obniżka a nawet zmiana znaku napięcia  $U$ .

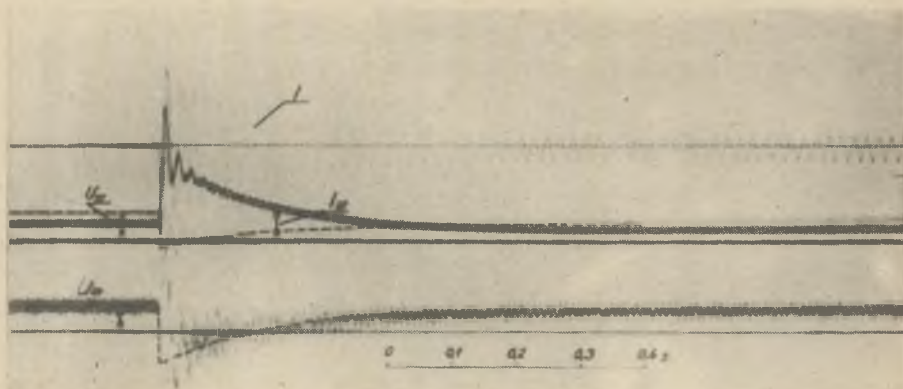
Rys.22<sup>m</sup> przedstawia oscylogram zwarcia generatora wyposażonego w stycznik forsowania wzbudzenia, który zwiera część oporów dodatkowych uzwojenia wzbudzenia. W celu wyeliminowania wpływu czasu własnego stycznika uruchamiano jednocześnie stycznik forsowania i wyłącznik zwierający zaciski generatora. Na rysunku widoczne jest charakterystyczne obniżenie przebiegu prądu wzbudzenia generatora i prądu stojana spowodowane bezwładnością magnetyczną wzbudnicy samowzbudnej. Wzbudnica wykazuje bardzo małą początkową stromość napięcia.

Rys.23 przedstawia oscylogram zwarcia generatora, którego wzbudnica wyposażona jest w uzwojenie szeregowo. Wzbudnica pracuje w układzie samowzbudnym. Napięcie wzbudnicy wykazuje widoczną na oscylogramie tendencję zwyżkową na skutek powiększonego prądu obciążenia wzbudnicy. Prąd wyrównawczy w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudnicy zmniejsza znacznie szybkość narastania strumienia użytkowego wzbudnicy. Przepływ wyrównawczy w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy zanika ze stałą czasową wzbudnicy  $T_w$ , której wartość w przypadku badanego generatora małej mocy zbliżona jest do stałej czasowej generatora  $T'_d$ . Ponieważ wartości stałej czasowej  $T_w$  i  $T'_d$  są zbliżone, skuteczność działania dozwojenia wzbudnicy jest w tym przypadku poważnie zmniejszona. W przypadku jednostek prądotwórczych dużych mocy, których stała czasowa wzbudzenia /rzędu 0,3s/ jest znacznie mniejsza od

stałej czasowej generatora wpływ uzwojenia szeregowego wzbudnicy jest wielokrotnie większy. Początkowa zwyżka napięcia  $U_m$  widoczna na oscylogramie spowodowana jest zmienionym kierunkiem prądu wyrównawczego w uzwojeniu wzbudzenia wzbudnicy. Na oscylogramie naniesiono przebieg napięcia wzbudnicy, który otrzymano przy użyciu transformatora wyrównawczego.

Rys.24 przedstawia oscylogram zwarcia generatora z bocznikową wzbudnicą samowzбудną wyposażoną w układ niefazowej kompondacji wzbudzenia generatora. Z oscylogramu widoczny jest wpływ kompondacji na stromość napięcia wzbudnicy. Pomiary przebiegów generatora wykonano dla wszystkich układów wzbudzenia przy jednakowych warunkach początkowych /przy znamionowym napięciu generatora pracującego na biegu jałowym/.

Najwyższe wartości stromości napięcia wzbudzenia otrzymano przy zastosowaniu kompondacji wzbudnicy wyposażonej w uzwojenie szeregowie z trójuzwojeniowym transformatorem wyrównawczym w obwodzie bocznikowego uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy. Jedno z dwu pierwotnych uzwojeń transformatora włączono w obwód wzbudzenia generatora a drugie w obwód kompondacji wzbudzenia.



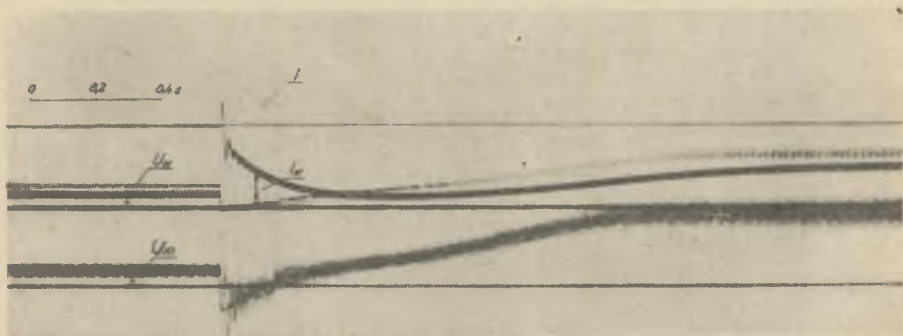
Rys.21. Oscylogram zwarcia generatora 30 kVA  
pracującego bez regulacji napięcia.

$I$  - prąd stojana generatora

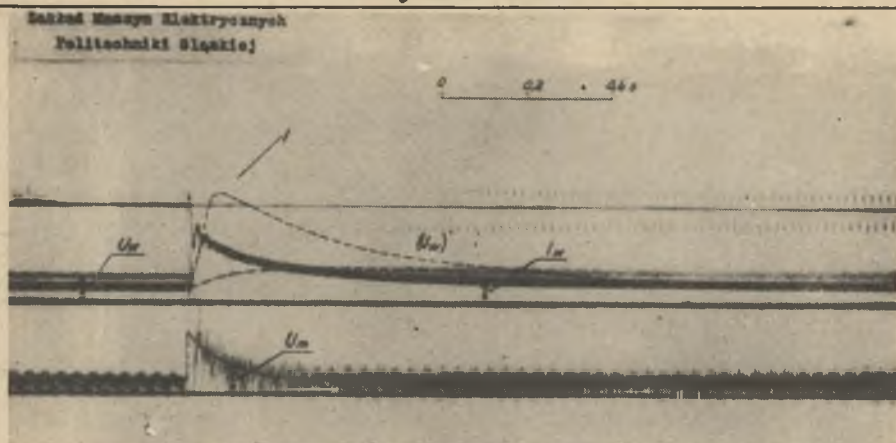
$I_w$  - prąd wzbudzenia generatora

$U_w$  - napięcie wzbudnicy

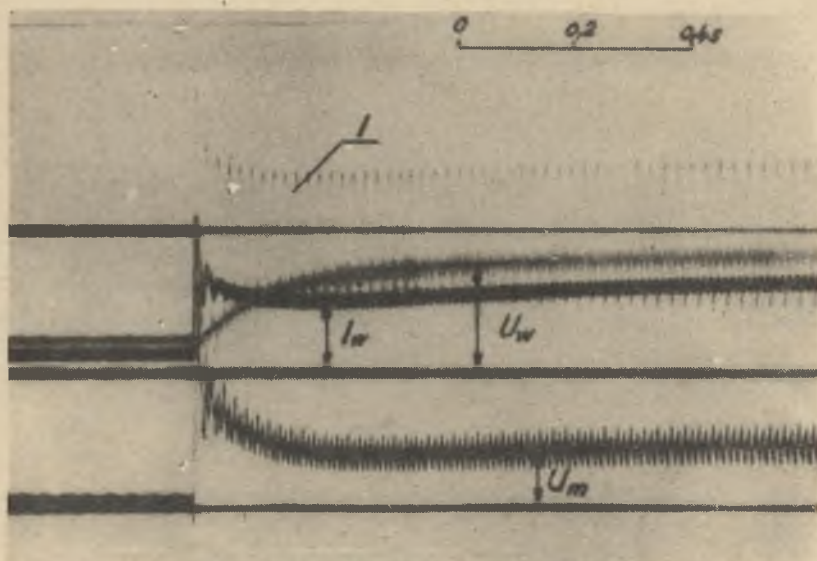
$U_m$  - napięcie na uzwojeniu wzbudzenia wzbudnicy



Rys.22. Oscylogram zwarcia generatora 30 kVA  
wyposażonego w stycznik forsowania wzbudzenia  
zwierający opory dodatkowe  
uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy.  
Oznaczenia jak na rys.21



Rys.23. Oscylogram zwarcia generatora 30 kVA bez regulacji napięcia ze wzbudnicą wyposażoną w dozwojenie szeregowę. Linią przerywaną zaznaczono przebieg napięcia wzbudnicy przy użyciu transformatora wyrównawczego. Oznaczenia przebiegów jak na rys.21



Rys.24. Oscylogram zwarcia generatora 30 kVA wyposażonego w fazową kompondację wzbudzenia. Oznaczenia jak na rys.21

LITERATURA

1. Canay. Die Möglichkeit der Erhöhung der Stabilitätsgrenze bei Synchronmaschinen. SEV Nr 21/1959
2. C.Concordia: Steady - state stability of synchronous mashines as affected by angle - regulator characteristics. AIEE Trans. 1948
3. W.G.Heffron, R.A.Phillips: Effect of a modern ampli-dyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. AIEE Trans. 1952
4. B.L.Inosow, L.W.Cukiernik: Kompaundирование moszcznych sinchronnych gieneratorów elektromagnitnym korrektorom napriazhenia. Elektrizestwo 9/49
5. W.L.Inosow: L.W.Cukiernik: Kompaundирование i elektromagnitnyj korrektor napriazhenja sinchronnych gieneratorów. Moskwa 1951
6. C.Lavanchy: Die Stabilitaet von Synchrongeneratoren BBC Mitteilungen, Juli-August 1949
7. A.Kamiński: Równowaga współpracy układów elektro-energetycznych. Warszawa 1956
8. W.Kołek: Praca turbogeneratorsa w systemie elektro-energetycznym. Warszawa 1955
9. Noser R.Erweiterung des Arbeitsgebietes von Synchronmaschinen durch künstliche Stabilisierung mittels spezieller Regelung der Erregung. VDE - Fachberichte 18/1954
10. Paszek Wł.: Układ forsowania wzbudzenia generatorów synchronicznych jako dodatkowy człon pospieszny automatycznych regulatorów napięcia. Energetyka nr 4 i 5 1955
11. Paszek Wł.: Wpływ forsowania wzbudzenia na pracę równoległą generatorów synchronicznych. Archiwum Elektrotechniki 1956 nr 3
12. F.S.Rothe. Influence des régulateurs de tension de générateurs sur la stabilité et les possibilités de charge du générateur par la ligne. CIGRE 1954 Rapport nr 321.

## Резюме

В работе даны теоретические основы статической устойчивости генератора включенного на жесткую систему. Рассмотрено влияние области нечувствительности электромеханического регулятора на предел искусственной статической устойчивости. В дальнейшем рассмотрено влияние регулировки на динамическую устойчивость и способы расширения области этой устойчивости с помощью возбуждения генератора.

## Résumé

On rappelle les principes théoriques de l'équilibre statique des générateurs couplés avec un système rigide. On discute l'influence de la zone d'insensibilité d'un régulateur électromécanique sur les limites de l'équilibre statique artificiel. On analyse l'influence du réglage sur l'équilibre dynamique et les moyens d'élargir son étendue par l'excitation du générateur.