

KAND. NAUK TECHN. WŁADYSŁAW PASZEK

PODSTAWOWE WŁASNOŚCI  
NOWOCZESNYCH SAMOCZYNNYCH REGULATORÓW  
NAPIĘCIA GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

**Streszczenie.** Praca ma na celu uzasadnienie fizyczne zasadniczych zależności występujących w układach samoczynnej regulacji napięcia. Rozpatrzono sposoby zmiany współczynnika statyki podstawowej charakterystyki napięcia generatora, sposoby stabilizacji układu wzbudzenia przy samoczynnej regulacji i omówiono podstawowe rozwiązania członów pomiarowych regulatora.

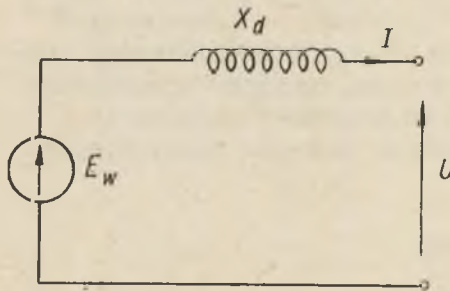
1. Wstęp

Ogromny wzrost energetyki w latach ostatnich stawia nowe zadania zarówno przed projektantem elektrowni, jak i przed pracownikami eksploatacji. Jednym z czołowych zagadnień jest problem regulacji napięcia. Szybkozmiennne obciążenia systemu spowodowane przez odbiorców szczególnych typów jak np. huty wymagają pośpiesznej regulacji napięcia, która powinna podążać za szybkimi zmianami rozptyłów prądów w systemie. Szczególnie ważne zadania spełniają układy samoczynnej regulacji napięcia dużych jednostek prądotwórczych, które w sposób zasadniczy decydują o stabilności całego systemu elektroenergetycznego.

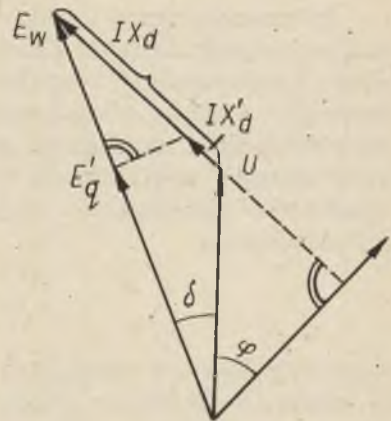
Nie wnikając w oddzielne ważne zagadnienie regulacji poziomu napięcia systemu za pomocą transformatorów regulacyjnych zajmujemy się głównie regulacją napięcia generatorów synchronicznych, w szczególnym przypadku również regulacją napięcia kompensatorów synchronicznych. Ponieważ regulacja napięcia odbywa się za pomocą zmiany prądu wzbudzenia i ponieważ ponadto zadaniem regulacji będzie

nie wyłącznie tylko sama regulacja napięcia generatora, wprowadzono na jej określenie nazwę ogólną regulacji wzbudzenia.

Rysunek 1a przedstawia uproszczony schemat jednofazowy zastępczy generatora synchronicznego oraz sporządzony dla tego schematu wykres wektorowy /rys. 1b/. Uproszczenie schematu polega w pierwszym rzędzie na pominięciu wewnętrznego oporu czynnego uzwojenia stojana oraz na zaniedbaniu asymetrii magnetycznej wirnika dla strumienia przenikającego wzdłuż osi uzwojenia wzbudzenia i wzdłuż osi do niej prostopadłej.



Rys. 1a. Uproszczony schemat zastępczy generatora



Rys. 1b. Wykres wektorowy generatora

Uproszczenia takie są fizycznie w pełni uzasadnione dla generatorów dużej mocy o niejawnobiegunowej budowie wirnika (turbogeneratorów). Przyjmujemy ponadto stałość reaktancji synchronicznej generatora  $x_d \approx x_q$ , co ma ściśle miejsce przy nienasyconym obwodzie magnetycznym generatora. Nasycenie obniża reaktancję synchroniczną. Praktycznie zmniejszenie reaktancji synchronicznej na skutek nasycenia nie przekracza zwykle 15%. Wewnętrzne napięcie generatora  $E_w$  powstaje w wyniku wirowania pola wytworzonego przez przepływ (amperozwoje) uzwojenia wzbudzenia i jest dla nienasyconego generatora proporcjonalne do prądu uzwojenia wzbudzenia.

Rozróżniamy 2 charakterystyczne przypadki pracy generatora, pracę równoległą i pracę samotną. Przy pracy równoległej połączony jest twornik rozpatrywanego generatora w złączu pracy równoległej z twornikami współpracujących generatorów synchronicznych. Połączenie tworników w złączu pracy równoległej odbywa się za pośrednictwem transformatorów lub galwanicznie za pomocą szyn zbiorczych lub linii przesyłowej. Współpracujące generatory określają podstawowe parametry energii pobieranej z sieci napięcia, prąd, częstotliwość. Grupy współpracujących generatorów synchronicznych składają się na wzajemnie powiązany system elektroenergetyczny.

Jeżeli generatory wyposażone są w samoczynne regulatory napięcia, które wpływają na prąd wzbudzenia i pośrednio na napięcie generatorów, analiza działania regulacji musi uwzględnić prócz charakterystyki samych regulatorów również własności generatora i wzbudnicy, które wpływają zasadniczo na przebiegi regulacji. Pominięcie własności generatora i wzbudnicy przy analizie różnych typów regulatorów jest w związku z tym niedopuszczalne.

## 2. Współczynnik statyki

W przypadku generatorów pracujących równolegle zależy na utrzymaniu dodatniego współczynnika statyki napięcia, który decyduje o rozkładzie obciążenia mocy biernej na współpracujące jednostki. Współczynnik statyki napięcia generatora  $S$  określony jest przez nachylenie tzw. podstawowej charakterystyki napięcia generatora w punkcie złącza pracy równoległej (np. na szynach zbiorczych) w funkcji oddawanego prądu biernego  $I_q = I \sin \varphi$  w stanie ustalonym przy stałej mocy czynnej generatora

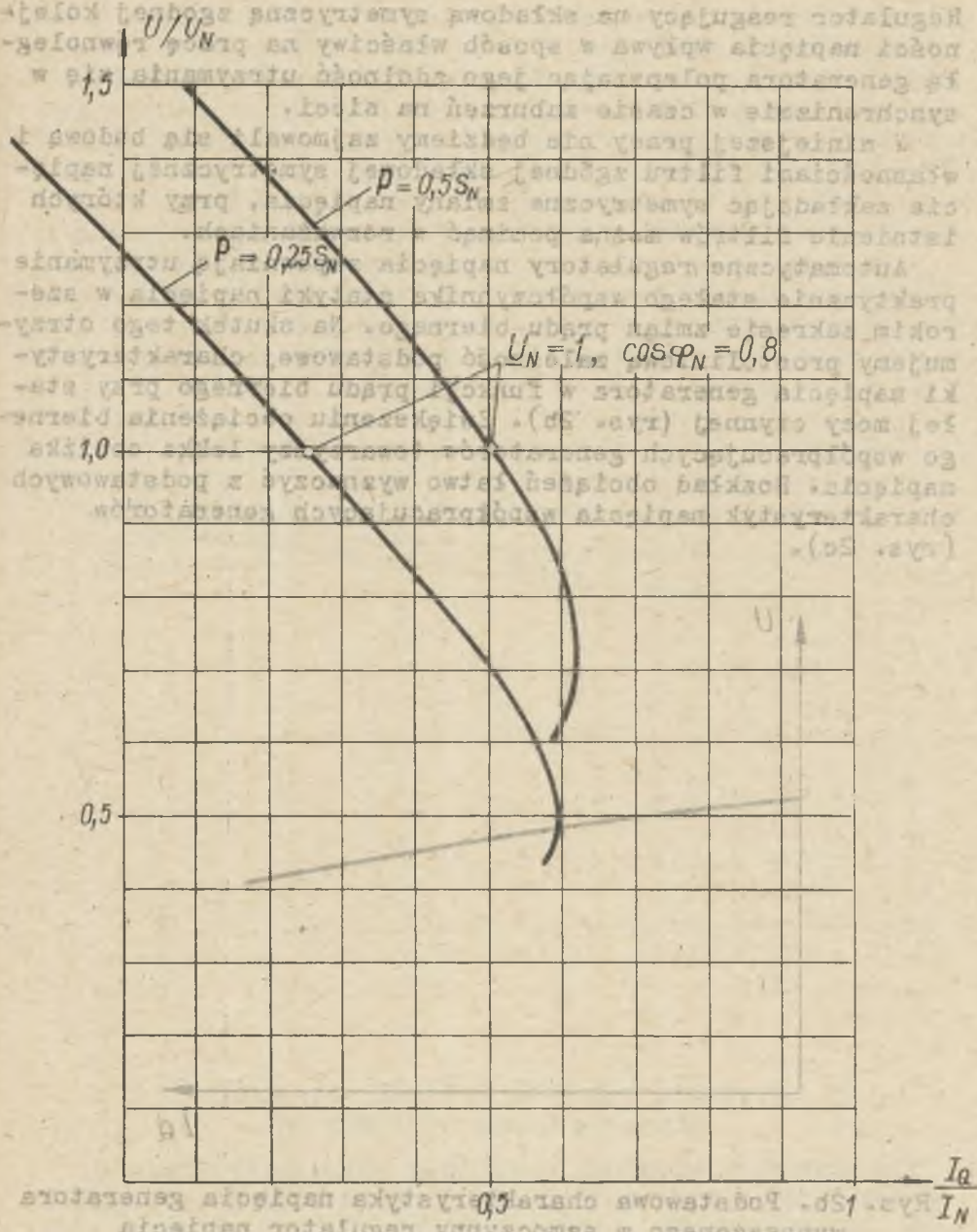
$$S = - \left( \frac{\partial U}{\partial I} \right)_P = \text{const.} \quad (1)$$

Często współczynnik statyki wyrażamy w procentach, wówczas wartość współczynnika statyki napięcia obliczoną ze wzoru 1 należy pomnożyć przez 100. Współczynnik statyki napięcia nieprzekracza przeciętnie 3 - 6%. O ile generator nie jest wyposażony w automatyczną regulację napięcia, współczynnik statyki określony jest wyłącznie przez wewnętrzne reaktancje generatora. W takim wypadku charakterystyka napięcia generatora nosi nazwę naturalnej charakterystyki napięcia.

Na rysunku 2a przedstawiono przebieg naturalnych charakterystyk napięcia dla różnych wartości mocy czynnych traktowanych jako stały parametr. Jako dodatni prąd bierny traktujemy oddawany przez generator prąd indukcyjny (prąd zasilający odbiorniki indukcyjne np. silniki asynchroniczne). Wykres sporządzono dla praktycznie spotykanej wielkości reaktancji synchronicznej generatorów  $x_d = 1,4^1$ . Na wykresie widoczny jest bardzo silny wpływ prądu biernego na pochylenie charakterystyki napięcia generatora, który tłumaczy konieczność wprowadzenia automatycznych regulatorów napięcia utrzymujących stałość napięcia generatora przy zachowaniu określonego współczynnika statyki podstawowej charakterystyki napięcia.

Samoczynne regulatory napięcia czułe na zmiany napięcia w miejscu ich przyłączenia (np. na zaciskach generatora) powodują powiększenie prądu wzbudzenia generatora tym samym również napięcia wewnętrznego  $E_w$  w miarę wzrostu obciążenia. Przyłączenie regulatora do zacisków generatora o wysokim napięciu odbywa się w zasadzie za pośrednictwem przekładników napięciowych. W niniejszych rozważaniach zakładamy, że zmianom obciążenia generatora towarzyszą symetryczne zmiany napięcia. Tym samym regulator, który zasilany jest przeważnie jednofazowo, wychwytuje zmiany napięcia generatora niezależnie od tego, na które napięcie fazowe lub na które napięcie międzyprzewodowe generatora jest przyłączony. Ponieważ w praktyce eksploatacyjnej spotykane są często wypadki niesymetrycznych zmian napięcia w punkcie przyłączenia regulatora, które występują np. na skutek odległych niesymetrycznych zwarcí w systemie, nowoczesne samoczynne regulatory napięcia zasilane są ze specjalnych filtrów składowej symetrycznej zgodnej kolejności napięcia zbieranego z przekładników napięciowych.

<sup>1)</sup> Reaktancja synchroniczna wyrażona jest w jednostkach względnych. Dla wyrażenia oporności czynnych, napięć, prądów mocy, reaktancji i oporów czynnych w jednostkach względnych przyjmujemy jako wartość odniesienia odpowiednio napięcie znamionowe  $U_N$ , prąd znamionowy  $I_N$ , pozorną moc znamionową  $S_N$  i stosunek fazowych wartości znamionowych napięcia i prądu generatora. Moc pozorną oznaczamy przez  $S$ , moc bierną przez  $Q$ , przy obciążeniu indukcyjnym generatora przewzbudzonego ( $Q > 0$ ), moc czynną przez  $P$ .



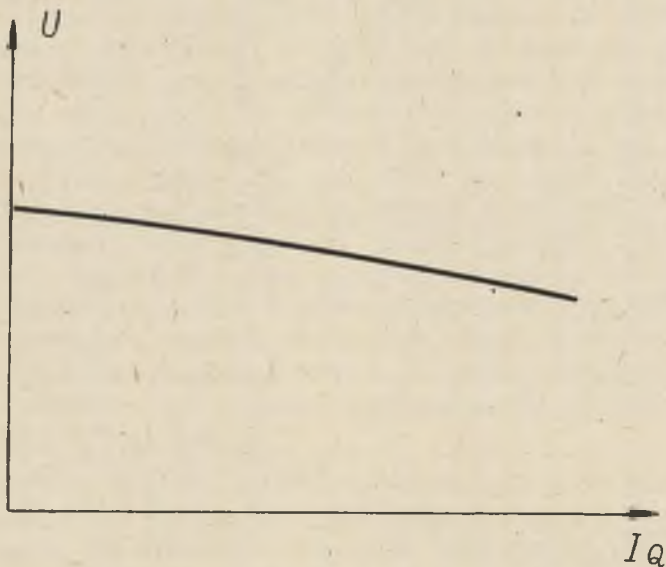
Rys. 2a. Podstawowa charakterystyka napięcia generatora wyznaczona w zależności od prądu

Rys. 2a. Naturalna charakterystyka napięcia generatora

Regulator reagujący na składową symetryczną zgodnej kolejności napięcia wpływa w sposób właściwy na pracę równoległą generatora polepszając jego zdolność utrzymania się w synchronizmie w czasie zaburzeń na sieci.

W niniejszej pracy nie będziemy zajmowali się budową i własnościami filtra zgodnej składowej symetrycznej napięcia zakładając symetryczne zmiany napięcia, przy których istnienie filtrów można pominąć w rozważaniach.

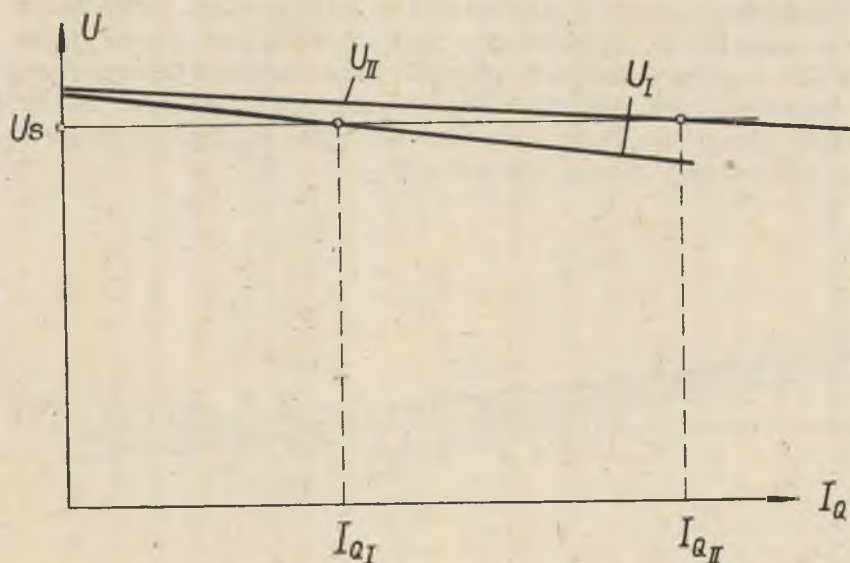
Automatyczne regulatory napięcia zapewniają utrzymanie praktycznie stałego współczynnika statyki napięcia w szerokim zakresie zmian prądu biernego. Na skutek tego otrzymujemy prostoliniową zależność podstawowej charakterystyki napięcia generatora w funkcji prądu biernego przy stałej mocy czynnej (rys. 2b). Zwiększeniu obciążenia biernego współpracujących generatorów towarzyszy lekka obniżka napięcia. Rozkład obciążeń łatwo wyznaczyć z podstawowych charakterystyk napięcia współpracujących generatorów (rys. 2c).



Rys. 2b. Podstawowa charakterystyka napięcia generatora wyposażonego w samoczynny regulator napięcia

Zwiększeniu obciążenia biernego współpracujących generatorów towarzyszy lekka obniżka napięcia. Rozkład obciążeń łatwo wyznaczyć z podstawowych charakterystyk napięcia

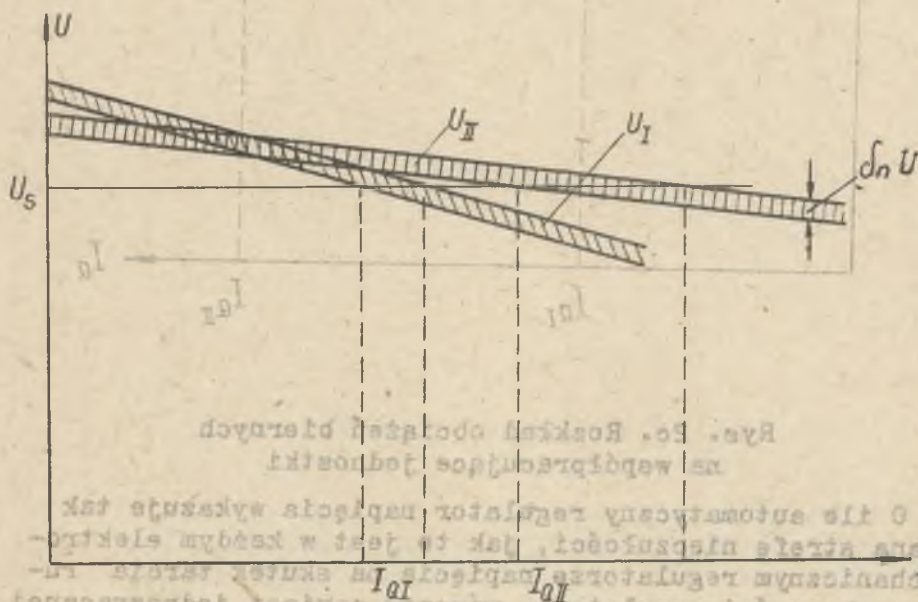
Przy prostoliniowym przebiegu podstawowej charakterystyki napięcia współczynnik statyki napięcia odpowiada procentowemu spadkowi napięcia w punkcie złącza pracy równoległej przy przejściu od zerowej wartości prądu biernego do prądu biernego równego prądowi znamionowemu generatora. Ponieważ ten spadek napięcia mieści się w granicach kilku procent, można przyjąć w przybliżeniu, że moc bierna generatora proporcjonalna jest do składowej biernej prądu obciążenia (w rzeczywistości na skutek zmian napięcia moc bierna zależy słabiej niż proporcjonalnie od składowej biernej prądu generatora) oraz że stałości mocy czynnej odpowiada stałość składowej czynnej prądu obciążenia.



Rys. 2c. Rozkład obciążeń biernych na współpracujące jednostki

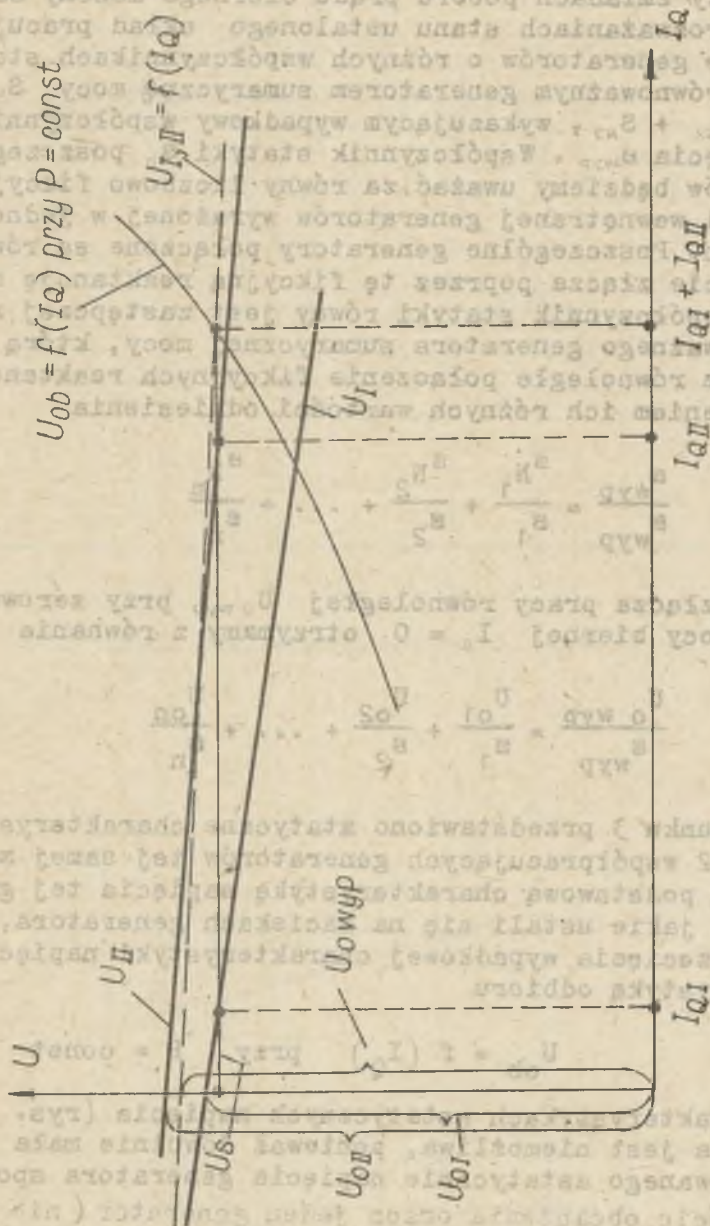
O ile automatyczny regulator napięcia wykazuje tak zwaną strefę nieczułości, jak to jest w każdym elektromechanicznym regulatorze napięcia na skutek tarcia ruchomych części regulatora, wówczas zamiast jednoznacznej liniowej charakterystyki napięcia otrzymamy tu obszar możliwych położenia charakterystyk, które ograniczone są charakterystykami otrzymanymi przy zmianie znaku sił

tarcia regulatora (rys. 2d). Strefa nieczułości wywiera podstawowy wpływ na skuteczność regulacji przy pracy w pobliżu granicy stabilności generatorów, a w szczególności przy pracy w obszarze sztucznej równowagi statycznej generatora. Warunkiem koniecznym (lecz niedostatecznym) dla zapewnienia stabilnej pracy równoległej w całym zakresie obciążeń mocą czynną generatorów wyposażonych w automatyczną regulację napięcia jest, by charakterystyki napięcia wyznaczone dla punktu złącza pracy równoległej wykazywały dodatni współczynnik statyki (obniżenie napięcia przy wzroście mocy biernej). Warunek ten ważny jest dla układu regulacji, w którym na napięcie zasilania członu pomiarowego regulatora wpływają ogólnie napięcie i prąd tego generatora, do którego przyłączony jest regulator napięcia. Jeżeli odpowiednio uzależnimy działanie układu regulacji wzbudzenia rozpatrywanego generatora od napięcia i prądu innych generatorów współpracujących, możemy uzyskać charakterystykę regulacji napięcia o zerowym a nawet ujemnym współczynniku statyki napięcia przy zachowaniu stabilnej pracy równoległej.



Rys. 2d. Rozkład obciążeń biernych na współpracujące jednostki w przypadku regulatorów wykazujących strefę nieczułości





Rys. 3. Wyznaczenie wypadkowej charakterystyki regulacji napięcia dwóch współpracujących generatorów

W celu określenia zmian napięcia w zespole pracy równo-  
 logicj przy zmianach poboru prądu biernego możemy zasie-  
 pić przy ustalonych warunkach stanu ustalonego i przy stałym  
 równowadze generatorów o różnych współczynnikach reakcji  
 napięcia równoważnym generatorem sumarycznym  $S_{\Sigma} = S_{I_1} + S_{I_2} + S_{I_3} + \dots$   
 $S_{\Sigma} = S_{I_1} + S_{I_2} + S_{I_3} + \dots$  wyznaczając wypadkowy współczynnik  
 reakcji napięcia  $K_{U_{ob}}$ . Współczynnik ten jest postawiony  
 generatorów będący uwzględniając różnicę między nimi  
 reakcji napięcia generatorów w zespole w warunkach  
 wagi. W szczególności generatorów będący w zespole  
 w warunkach różnicę pomiędzy nimi i reakcji napięcia  
 będący w zespole i reakcji napięcia w zespole. Reakcja  
 odtworzonego generatora sumarycznego  $S_{\Sigma}$  i przy-  
 mania przez równowagę potężności  $P_{I_1} + P_{I_2} + P_{I_3} + \dots$   
 uwzględniając ich różnicę między nimi i obciążenia.

Każde z nich przy równowadze  $U_{ob} = f(I_a)$  przy zerowej ob-  
 dawce mocy biernej  $I_b = 0$  otrzymamy z równania  

$$U_{ob} = U - I_a (r_a + jx_a) - I_b (r_b + jx_b) - I_c (r_c + jx_c) - \dots$$

$$U_{ob} = U - I_a (r_a + jx_a) - I_b (r_b + jx_b) - I_c (r_c + jx_c) - \dots$$

Przy charakterystyce napięcia generatora (rys. 2a) dla  
 współczynnika napięcia  $K_{U_{ob}}$  i dla napięcia  $U_{ob}$  nie ma róż-  
 nicy między napięciami generatorów i napięciem generatora  
 an. W zespole napięcia generatorów i napięciem generatora  
 to napięcie obciążenia przez ten generator (rys. 2b) i  
 rysunku punktów przecięcia charakterystyk  $U_{ob} = f(I_a)$   
 dla różnych współczynników napięcia generatorów. W tym  
 punkcie napięcie generatorów i napięcie generatora  
 napięcia generatorów i napięcia generatora.

W celu określenia zmian napięcia w złączu pracy równoległej przy zmianach poboru prądu biernego możemy zastąpić przy rozważaniach stanu ustalonego układ pracujących równolegle generatorów o różnych współczynnikach statyki napięcia równoważnym generatorem sumarycznej mocy  $S_{wyp} = S_{N1} + S_{N2} + S_{N3}$ , wykazującym wypadkowy współczynnik statyki napięcia  $s_{wyp}$ . Współczynnik statyki  $s_n$  poszczególnych generatorów będziemy uważać za równy liczbowo fikcyjnej reaktancji wewnętrznej generatorów wyrażonej w jednostkach względnych. Poszczególne generatory połączone są równolegle w punkcie złącza poprzez tę fikcyjną reaktancję  $s_n$ . Wypadkowy współczynnik statyki równy jest zastępczej reaktancji równoważnego generatora sumarycznej mocy, którą otrzymamy przez równoległe połączenie fikcyjnych reaktancji z uwzględnieniem ich różnych wartości odniesienia

$$\frac{s_{wyp}}{s_{wyp}} = \frac{s_{N1}}{s_1} + \frac{s_{N2}}{s_2} + \dots + \frac{s_{Nn}}{s_n} \quad (2a)$$

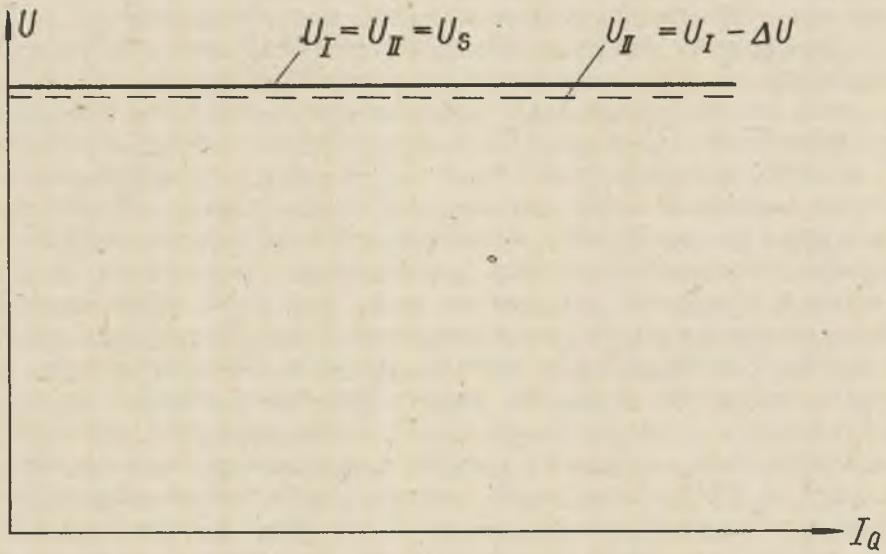
Napięcie złącza pracy równoległej  $U_{o, wyp}$  przy zerowej oddawanej mocy biernej  $I_a = 0$  otrzymamy z równania

$$\frac{U_{o, wyp}}{s_{wyp}} = \frac{U_{o1}}{s_1} + \frac{U_{o2}}{s_2} + \dots + \frac{U_{on}}{s_n} \quad (2b)$$

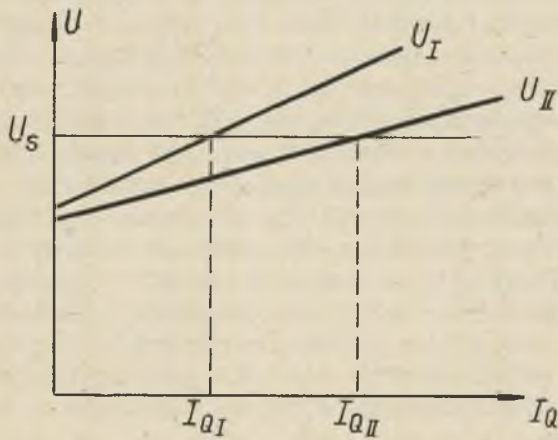
Na rysunku 3 przedstawiono statyczne charakterystyki napięcia 2 współpracujących generatorów tej samej mocy i wypadkową podstawową charakterystykę napięcia tej grupy. Napięcie, jakie ustali się na zaciskach generatora, wynika z przecięcia wypadkowej charakterystyki napięcia z charakterystyką odbioru

$$U_{ob} = f(I_Q) \quad \text{przy} \quad P = \text{const}$$

Przy charakterystykach astatycznych napięcia (rys. 4a) współpraca jest niemożliwa, ponieważ dowolnie mała zmiana regulowanego astatycznie napięcia generatora spowoduje przejście obciążenia przez jeden generator (nie ma na rysunku punktu przecięcia charakterystyki  $U_I$  i  $U_{II}$ ). Na rysunku 4b przedstawiono antystatycznie podstawowe charakterystyki napięcia współpracujących generatorów. Na rysunku zaznaczono rozkład obciążeń na oba generatory.



Rys. 4a. Charakterystyki astatyczne



Rys. 4b. Charakterystyki antystatyczne

Charakterystyki antystatyczne otrzymane są za pomocą wprowadzenia do układu regulacji jednego generatora parametru generatora sąsiedniego (przez tzw. compoundację grupową). Zaznaczony rozkład obciążeń traci w ogólnym przypadku ważność, jeśli antystatyczny przebieg charakterystyki napięcia spowodowany jest działaniem regulatora uzależnionego wyłącznie od napięcia i prądu tylko jednego generatora, do którego regulator jest przyłączony. Współczynnik statyki napięcia jest zależny od właściwości automatycznego regulatora napięcia. Właściwości regulatora zależą od sposobu rozwiązania członu pomiarowego regulatora czującego na zmiany napięcia generatora oraz łańcucha wzmacniaczy układu regulacyjnego określających prąd wzbudzenia generatora za pośrednictwem zmian napięcia wzbudnicy przy powstaniu odchyłki napięcia generatora od wartości żądanej. Właściwości automatycznego regulatora napięcia określają nachylenie tzw. charakterystyki regulatora, tj. charakterystyki napięcia zasilania członu pomiarowego regulatora w funkcji prądu biernego generatora przy zerowej mocy czynnej. Jeżeli wyrazimy w jednostkach względnych zarówno napięcie zasilania członu pomiarowego (w odniesieniu do napięcia występującego przy pracy znamionowej generatora) oraz prąd bierny generatora, nachylenie charakterystyki regulatora określimy jako współczynnik statyki regulatora  $s_0$ .

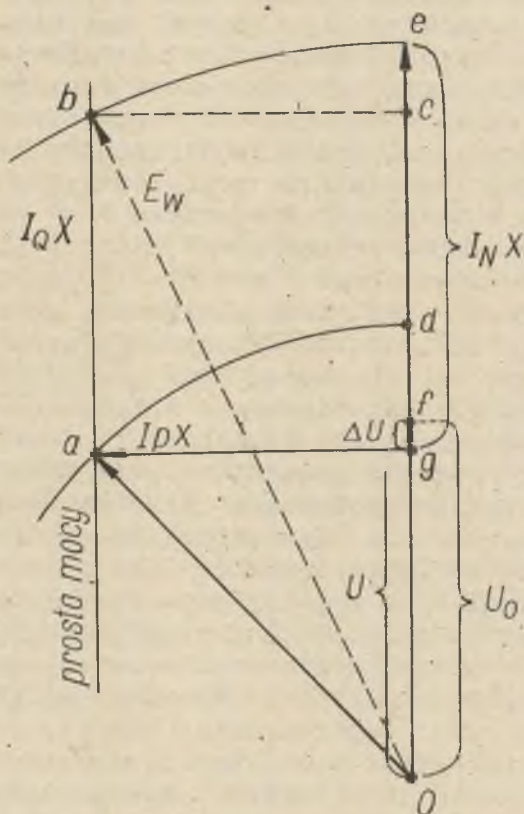
Przy ujemnym współczynniku statyki regulatora otrzymujemy podwyższenie napięcia zasilania regulatora w miarę wzrostu obciążenia. Regulatory wykazujące ujemny współczynnik statyki podstawowej charakterystyki napięcia nie znajdują szerszego zastosowania. Przy dodatnim współczynniku statyki regulatora otrzymujemy obniżenie napięcia zasilania regulatora w funkcji wzrostu mocy biernej. Przy charakterystyce astatycznej napięcie zasilania członu pomiarowego regulatora nie zależy od prądu obciążenia. Jeśli człon pomiarowy przyłączony jest na zaciski szyn w złączu przy równoległej (za pośrednictwem przekładników napięciowych), charakterystyka regulatora pokrywa się z podstawową charakterystyką napięcia generatora przy zerowej mocy czynnej (współczynnik statyki generatora równa się w tym wypadku współczynnikowi statyki napięcia w złączu pracy równoległej).

W przypadku statycznej charakterystyki regulatora zmienia się przy obciążeniu mocą czynną wartość współczynnika statyki napięcia generatora, który maleje w miarę powięk-

szania mocy czynnej. (Naturalnie dla każdej innej wartości współczynnika statyki uważamy moc czynną za parametr stały). Zmiany współczynnika statyki napięcia towarzyszące zmianom mocy czynnej generatora są funkcją sumy reaktancji synchronicznej  $X_d$  i reaktancji odcinka od zacisków generatora do punktu przyłączenia regulatora  $X_k$  ( $X = X_d + X_k$ ). Rozpatrzmy zmienność współczynnika statyki napięcia dla przypadku, gdy złącze pracy równoległej mieści się na szynach zbiorczych generatora. Przy obciążeniu czysto biernym wektor wewnętrzznego napięcia generatora  $E_w$  rośnie liniowo od wartości  $U$  do  $(U + IX)$  w miarę wzrostu obciążenia (rys. 5), gdy przy obciążeniu stałą mocą czynną wektor napięcia wewnętrzznego poruszając się po prostej mocy zmienia się nieliniowo od  $U$  do  $\sqrt{(U + I_q X)^2 + (I_p X)^2}$  w funkcji wzrostu prądu biernego. Regulowane napięcie generatora  $U$  można wyrazić w postaci  $U_0 - \Delta U$ , gdzie  $\Delta U$  oznacza spadek napięcia generatora przy przejściu ze stanu biegu jałowego do obciążenia. Przy zerowej mocy czynnej generatora  $\Delta U = s_0 V_0$  odpowiada spadkowi napięcia wynikającemu ze statyki regulatora. Na rysunku 5 zaznaczono spadek napięcia  $\Delta U$  w przesadnym powiększeniu. Ponieważ  $\Delta U$  wynosi przeciętnie parę procent napięcia  $U$ , punkty  $f$  i  $g$  na wykresie pokrywają się praktycznie. Każdej wartości napięcia zasilania regulatora zmieniającej się stosownie do kilkuprocentowego współczynnika statyki odpowiada jednoznaczna wartość prądu wzbudzenia generatora (i równocześnie jednoznaczna wartość napięcia wewnętrznego  $E_w$ )<sup>1</sup>.

Odcinek  $eg = I_N X$  na rysunku 5 będziemy uważać jako liniową skalę obniżki napięcia od zera do  $sU_N$ . Jednocześnie odcinek  $ab$  reprezentuje skalę prądu biernego ewentualnie w przybliżeniu skalę mocy biernej, odcinek zaś  $ag \approx af$  skalę prądu czynnego lub w przybliżeniu skalę mocy czynnej generatora. Przy stałej mocy generatora wektor  $E_w$  zmienia się od wartości  $Oa$  do  $Ob$ , czemu towarzyszy obniżka napięcia zasilania członu pomiarowego regulatora o wartość  $s_0 U_0 \frac{ed}{ge}$  oraz zmiana prądu biernego o  $I_N \frac{ab}{eb}$ . Średni współczynnik statyki napięcia  $s$  wynosi zatem przy stałej mocy czynnej  $s = s_0 \frac{ed}{ab}$ .

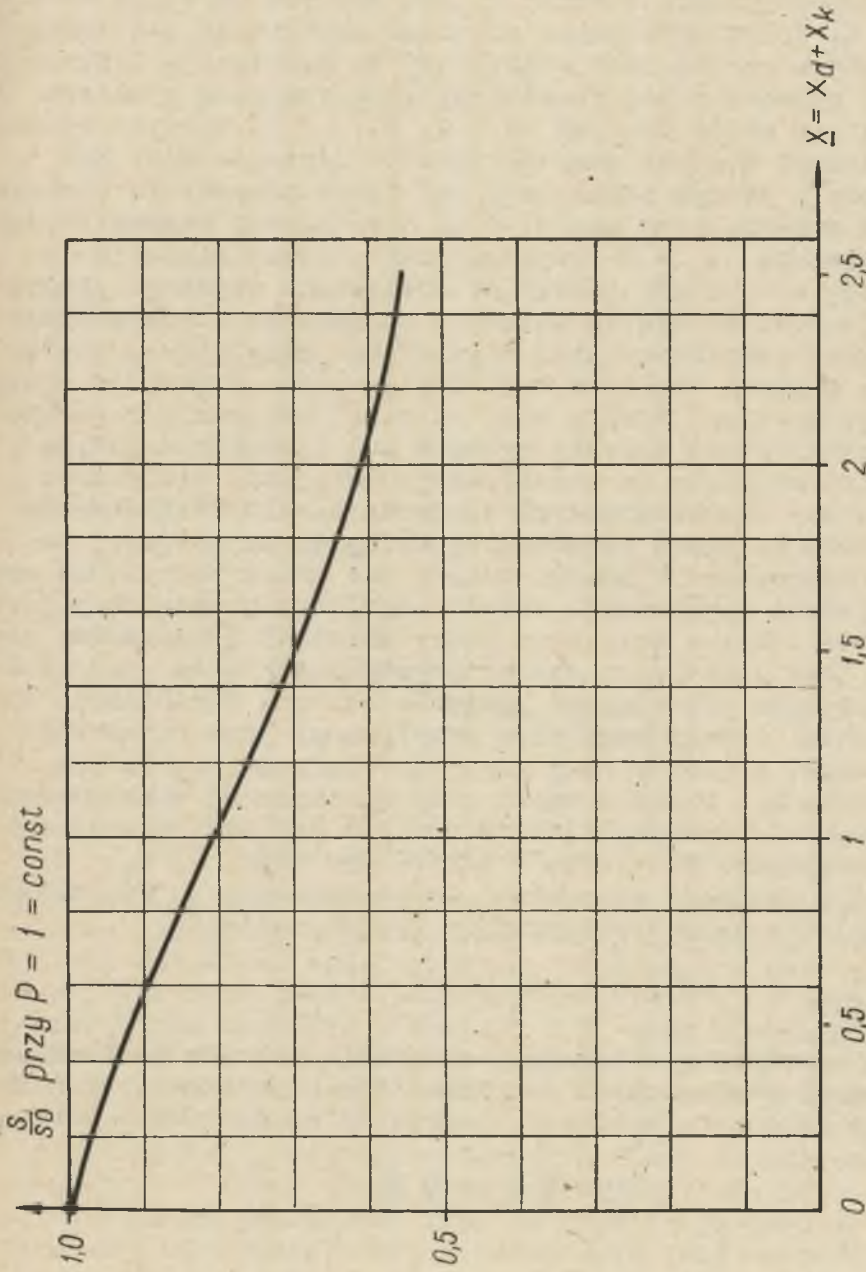
1) W powyższych rozważaniach zakładamy, że generator jest nienasycony, na skutek czego wykazuje stałą wartość reaktancji synchronicznej.



Rys. 5. Wyznaczenie zmienności współczynnika statyki

Przy obciążeniu mocą czynną otrzymujemy w zasadzie krzywoliniowy przebieg podstawowej charakterystyki napięcia, który jednakże nie odbiega znacznie od przebiegu prostoliniowego, obliczony średni współczynnik statyki  $s$  równy jest ściśle nachyleniu siecznej podstawowej charakterystyki napięcia przechodzącej przez punkty o współrzędnych  $\underline{I}_a = 0$ ,  $\underline{I}_a = 1$ . Zwiększenie współczynnika statyki przy przejściu z obciążenia czysto biernego do obciążenia przy stałej mocy czynnej  $P$  wynosi

$$\frac{s}{s_0} = \frac{1 + X - \sqrt{1 + (PX)^2}}{\sqrt{(1+X)^2 - (PX)^2} - 1} \quad (3)$$



Rys. 6. Przebieg zmienności współczynnika statyki w funkcji reaktancji generatora i reaktancji linii od zacisków do punktu przyłączenia członu pom.

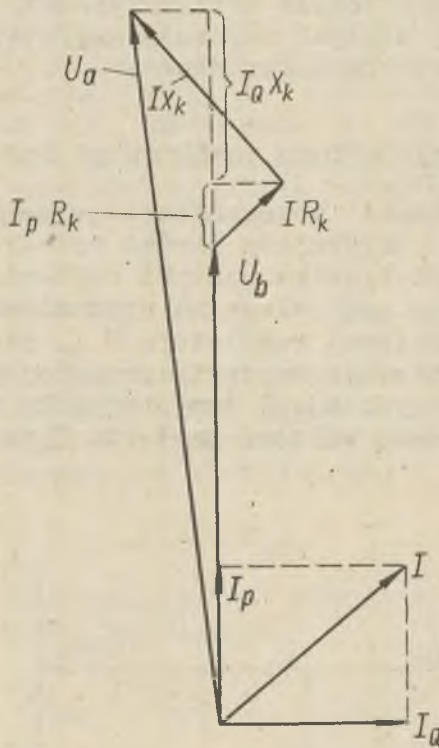
Na rysunku 6 przedstawiono zależność maksymalnej zmienności współczynnika statyki  $s_0$  dla różnych wartości reaktancji  $X$ . Wpływ obciążenia czynnego uwidacznia się silniej przy dużych wartościach reaktancji  $X$ . Reaktancja  $X$  określona jest głównie przez reaktancję synchroniczną reaktora  $X_d$ . Przeciętnie można przyjąć  $X = 1,4 \dots 2,2$ . Bardzo często współczynnik statyki charakterystyki napięcia może być zmieniony w pewnym zakresie przez dobór parametrów poszczególnych organów regulatora. Przy astatycznej charakterystyce regulatora  $s_0 = 0$  współczynnik statyki napięcia  $s$  równa się zero i nie zależy od obciążenia czynnego generatora. Stanowi to wielką zaletę w porównaniu z przypadkiem statycznej charakterystyki regulatora, przy której współczynnik statyki napięcia uzależniony jest od stopnia obciążenia generatora. Wynika stąd celowość budowania regulatorów o astatycznej charakterystyce lub o charakterystyce zbliżonej możliwie do astatycznej. Osiąganie statycznej podstawowej charakterystyki napięcia w celu dostosowania generatora do pracy równoległej osiągamy najczęściej za pomocą kompowdacji członu pom., a nie przez pochylenie charakterystyki regulatora. Jeżeli regulator przyłączony jest w punkcie odbioru mocy przy pracy samotnej generatora, pożądana jest astatyczna charakterystyka napięcia, przy której utrzymuje się stałość napięcia odbioru niezależnie do obciążenia. Jeżeli regulator przyłączony jest na zaciski generatora, a odbiór mocy znajduje się poza impedancją przesyłową  $X_k$ , wówczas nawet przy astatycznej charakterystyce regulatora otrzymujemy w punkcie odbioru charakterystykę statyczną. Na wykresie wektorowym (rys. 7)  $U_a$ ,  $U_b$  oznaczają napięcia początku i końca impedancji. Dla małych wartości impedancji otrzymujemy spadek napięcia

$$\Delta U = U_b - U_a = I_Q X_k + I_P R_k \quad (4)$$

Jeżeli wyrazimy reaktancję i oporność czynną w jednostkach względnych odniesionych do parametrów generatora, otrzymamy przy założeniu sztywności napięcia na zaciskach generatora

$$\Delta U = -P R_k + Q X_k$$





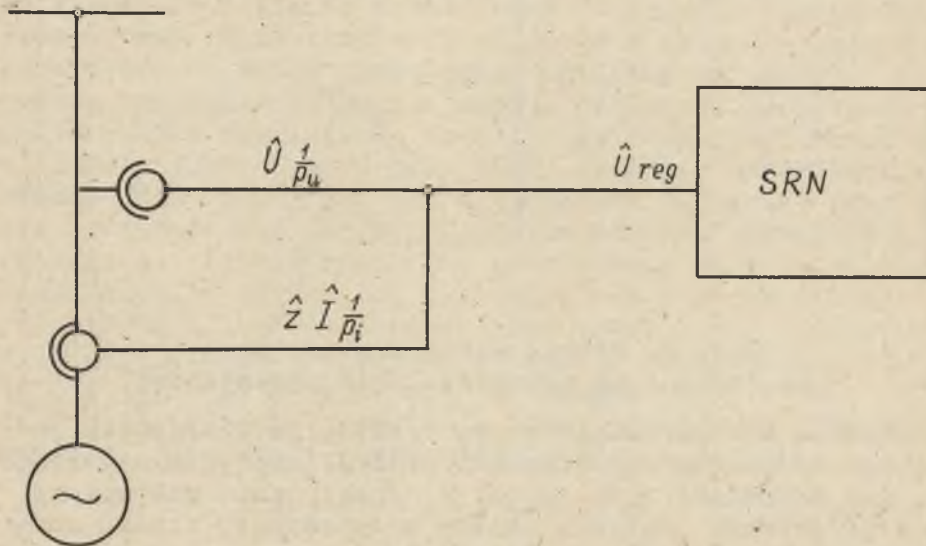
Rys. 7. Wykres wektorowy napięć na końcu i na początku linii przesyłowej

Jak wynika z otrzymanego wzoru reaktancja przesyłowa powiększa wypadkowy współczynnik statyki napięcia o wartość  $K_k$ , gdy natomiast opór czynny  $R_k$  praktycznie nie wpływa na współczynnik statyki. Zmiana mocy czynnej obniża charakterystykę napięcia o wartość  $I_p R_k$  przy zachowaniu niezmienionej statyki napięcia. Impedancja przesyłowa wyrażona w jednostkach względnych nie przekracza przeciętnie wartości 0,20. Jeżeli zatem generator wyposażony jest w astatyczny regulator napięcia przyłączony do zacisków generatora, a złącze pracy równoległej znajduje się za pewną reaktancją przesyłową (np. za reaktancją zwarcia transformatora blokowego), praca równoległa jest możliwa na skutek powiększenia współczynnika statyki napięcia o wartość reaktancji wyrażonej w jednostkach względnych. Jednak-

że równomierny rozkład obciążenia na poszczególne współpracujące generatory będzie możliwy wyłącznie wtedy, jeżeli współczynniki statyki napięcia wszystkich współpracujących generatorów będą wyrównane.

### 3. Kompoundacja członu pomiarowego regulatora

Za pomocą tak zwanej compoundacji członu pomiarowego regulatora uzyskujemy bardzo prosty i dogodny sposób zmiany współczynnika statyki napięcia generatora. Compoundację członu pom. polega na wprowadzeniu do mierzonej wielkości wejściowej regulatora  $\hat{U}_{reg}$  prócz napięcia generatora  $U$  dodatkowego napięcia proporcjonalnego do prądu obciążenia (rys. 8). W tym przypadku regulator mierzy sumę geometryczną wektora napięcia  $U$  napięcia  $z\hat{I}$ .



Rys. 8. Schemat ideowy compoundacji regulatora

Czynnik  $z$  przedstawia ogólnie liczbę zespoloną  $a+jb = ze^{j\beta}$  o module ( $z$ ) i kącie fazowym  $\beta$ . Zakładamy, że napięcie  $U$  oraz prąd  $I$  przynależą do tej samej fazy generatora. Wartość dodatkowego napięcia  $z\hat{I}$  nie przekracza zwykle kilka procent regulowanego napięcia  $U$ . Na wartość sumarycznego napięcia zasilania członu pomiarowego regulatora przy tak małej wartości napięcia compoundacji wpływa praktycz-

nie wyłącznie składowa napięcia kompowandacji będąca we fazie z napięciem generatora. Składowa prostopadła do napięcia generatora nie zmienia praktycznie sumarycznego napięcia mierzonego przez regulator. Przy posłużeniu się jednostkami względnymi dla napięcia i prądu współczynnik kompowandacji członu pom. z wyrażamy również w jednostkach względnych. Przy przejściu na jednostki mianowane należy pomnożyć względny współczynnik kompowandacji przez wartość odniesienia

$$Z_{\text{odn}} = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} \cdot \frac{p_i}{p_u}$$

$p_i$  - przekładnia prądowa przekładnika prądowego,  
 $p_u$  - przekładnia napięciowa przekładnika napięciowego  
 (jeżeli regulator przyłączony jest do wtórnej strony transformatorów mierniczych).

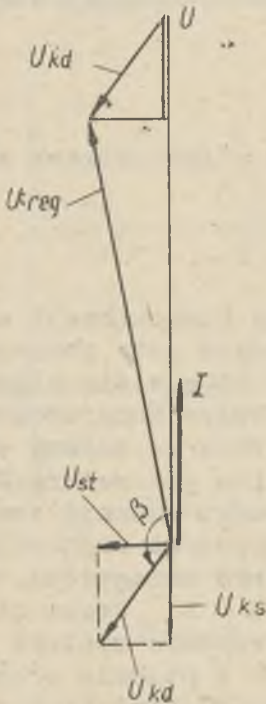
$$Z = z Z_{\text{odn}}$$

Współczynnik kompowandacji  $Z$  wyrażony w jednostkach mianowanych ma wymiar impedancji

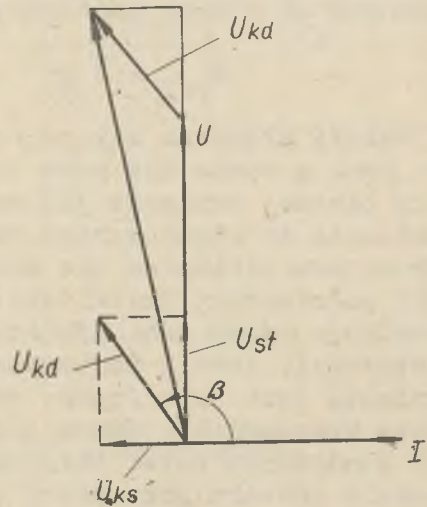
$$\hat{U}_{\text{reg}} = \hat{U} \frac{1}{p_u} + \hat{I} \cdot \frac{1}{p_i} \cdot \hat{Z}$$

Jeżeli składowa czynna współczynnika kompowandacji członu pom.  $z$  równa się zero ( $a = 0$ ), wówczas przy poborze mocy biernej napięcie  $j b I$  odejmuje lub dodaje się algebraicznie do regulowanego napięcia  $\underline{U}$ . Wpływ kompowandacji członu pom. sprowadza się wówczas wyłącznie do zmiany statyki podstawowej charakterystyki napięcia generatora. Kompowandacja członu pom. spełnia w tym wypadku zadanie tzw. statyzacji. Jeżeli podstawowa charakterystyka regulacji napięcia jest astatyczna, wówczas statyka osiągnięta przez kompowandację członu pom. wynosi  $s = b$ . Przez dobór statyzacji łatwo osiągnąć dowolną wartość statyki w punkcie odbioru przy pracy samotnej lub w punkcie złącza pracy równoległej bez zmiany współczynnika statyki regulatora. Jeżeli składowa bierna współczynnika kompowandacji członu pom. równa się zero ( $b = 0$ ), wówczas wpływ kompowandacji członu pom. zależy wyłącznie od składowej czynnej prądu generatora, zatem od czynnej mocy oddawanej generatora.

Jeżeli przyjmujemy dla tego przypadku współczynnik kompensacji członu pom. ( $a < 0$ ), wówczas przy wzroście obciążenia czynnego regulator spowoduje powiększenie napięcia generatora. Możemy w ten sposób skompensować spadek napięcia spowodowany dodatnim współczynnikiem statyki podstawowej charakterystyki napięcia, jeżeli w miarę wzrostu obciążenia mocą bierną wzrośnie równocześnie moc czynna generatora. Kompensacja spełnia w tym wypadku zadanie tzw. kompensacji statyki. Na rysunku 9a przedstawiono wykres wektorowy napięcia i prądu generatora obciążonego mocą czynną, natomiast na rysunku 9b mocą bierną. Na rysunku zaznaczono napięcie kompensacji  $U_{kd}$  członu pom. i jego składowe statyzacji  $U_{st}$  i kompensacji  $U_{ks}$ . Wpływ napięcia kompensacji uwidoczniło na rysunku w przesadnym powiększeniu.



Rys.9a. Wykres wektorowy kompensacji członu pom. przy obciążeniu czynnym



Rys.9b. Wykres wektorowy kompensacji członu pom. przy obciążeniu biernym

Dążymy zwykle do zupełnego skompensowania nachylenia charakterystyki zewnętrznej  $\bar{U} = f(I)$  wyznaczonej dla

znamionowego współczynnika mocy  $\cos \varphi_N$ . Wówczas

$$\frac{\partial U}{\partial I} \cos \varphi_N = 0$$

Przez dobór składowej biernej i czynnej współczynnika compoundacji członu pom. wpływamy na statyzację i kompensację statyki. Jeśli charakterystyka regulatora jest astatyczna i regulator mierzy napięcie w miejscu złącza prąży równoległej, wówczas dla zupełnej kompensacji statyki dobieramy

$$a = -s \operatorname{tg} \varphi_N \quad (5)$$

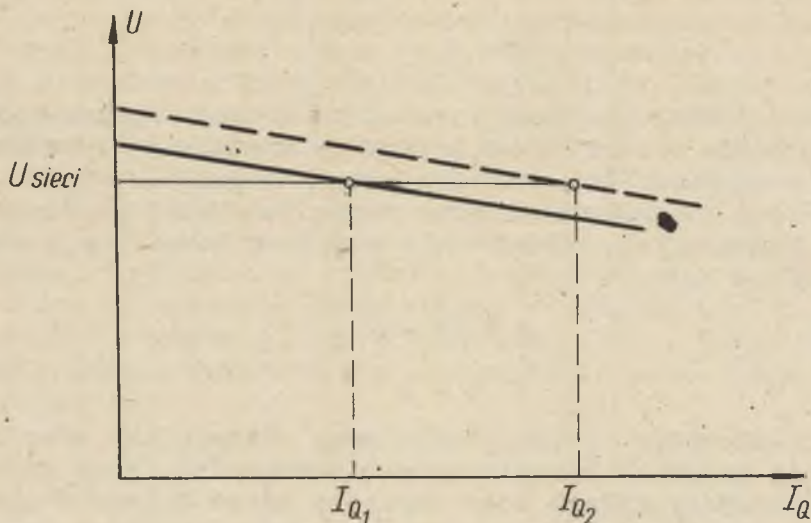
$$b = s$$

Przy znamionowym współczynniku mocy otrzymujemy wówczas idealnie sztywną charakterystykę zewnętrzną (przy mniejszych współczynnikach mocy napięcia nieco maleje w miarę wzrostu obciążenia, przy wyższych współczynnikach mocy napięcie nieco rośnie), gdy natomiast dodatni współczynnik statyki podstawowej charakterystyki napięcia konieczny do pracy równoległej generatorów może być dowolnie duży. Wpływ kompensacji statyki odpowiada podniesieniu podstawowej charakterystyki statycznej generatora na wykresie  $U = f(I_Q)$  przy  $P = \text{const}$  o wartości proporcjonalnej do mocy czynnej generatora bez zmiany pochylenia tej charakterystyki.

Na rysunku 10 zaznaczono linią przerywaną taką podniesioną charakterystykę napięcia generatora.

Jeżeli w złączu pracy równoległej utrzymuje się sztywne napięcie sieci, co ma w praktyce miejsce przy współpracy z silnym systemem elektroenergetycznym, wówczas zmiana mocy czynnej (osiągana przez zwiększenie dopływu pary do turbiny parowej) pociąga za sobą jednoczesną zmianę mocy biernej utrzymując stałość współczynnika mocy. Sposób taki służy często w praktyce do kontroli prawidłowego doboru kompensacji statyki.

Na rysunku 11b przedstawiono zależność współczynnika nachylenia charakterystyki zewnętrznej ( $\frac{\partial U}{\partial I}$ ) od wartości współczynnika mocy dla kilku wartości kąta fazowego  $\cos \varphi = \text{const}$  compoundacji członu pom.  $\beta$  przy stałej wartości modułu  $z = 0,1$  (założono astatyczną charakterystykę regulatora). Dla  $\cos \varphi = 0_{\text{ind}}$  nachylenie charakterystyki zewnętrznej odpowiada współczynnikowi statyki napięcia przy zerowej mocy czynnej.



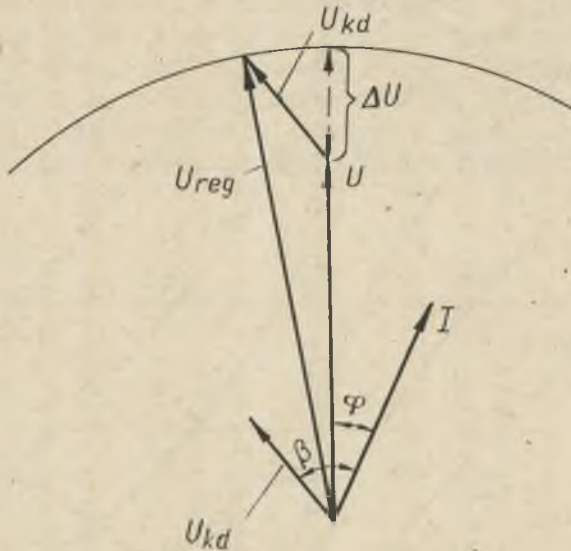
Rys.10. Wpływ statyzacji i kompensacji statyki na charakterystykę regulacji napięcia

Na rysunku 11a przedstawiono wykres wektorowy napięcia generatora (przekładników napięciowych), na którym zaznaczono sumę napięcia generatora  $U$  i napięcia kompondacji  $U_{kd}$  równą stałej wartości napięcia zasilania astatycznego regulatora  $U_{reg}$   $U_{reg} = \text{const}$ . Z rysunku wynika budowa wykresu nachylenia charakterystyki zewnętrznej. Krzywe  $(\frac{\partial U}{\partial I})_{\cos\varphi}$  przy  $\beta = \text{const}$  na rys. 11b przedstawiają wycinki elips, co zaznaczono na rysunku za pomocą linii przerywanej dla  $\beta = 150^\circ$ . Linia przerywana będąca zwierciadlanym odbiciem krzywej dla pojemnościowego obciążenia uzupełnia krzywą  $\beta = 150^\circ$  do elipsy [2].

Jeżeli złącze pracy równoległej znajduje się poza impedancją przysyłową  $X_k, R_k$  leżącą poza punktem zasilania regulatora, która wpływa na współczynnik statyki napięcia, wówczas dobór parametrów kompondacji koniecznych dla zupełnej kompensacji statyki otrzymamy z równania:

$$\begin{aligned} a &= -s \operatorname{tg} \varphi_N + \frac{R_k}{X_k} \\ b &= s - \frac{X_k}{X_k} \end{aligned} \quad (6)$$

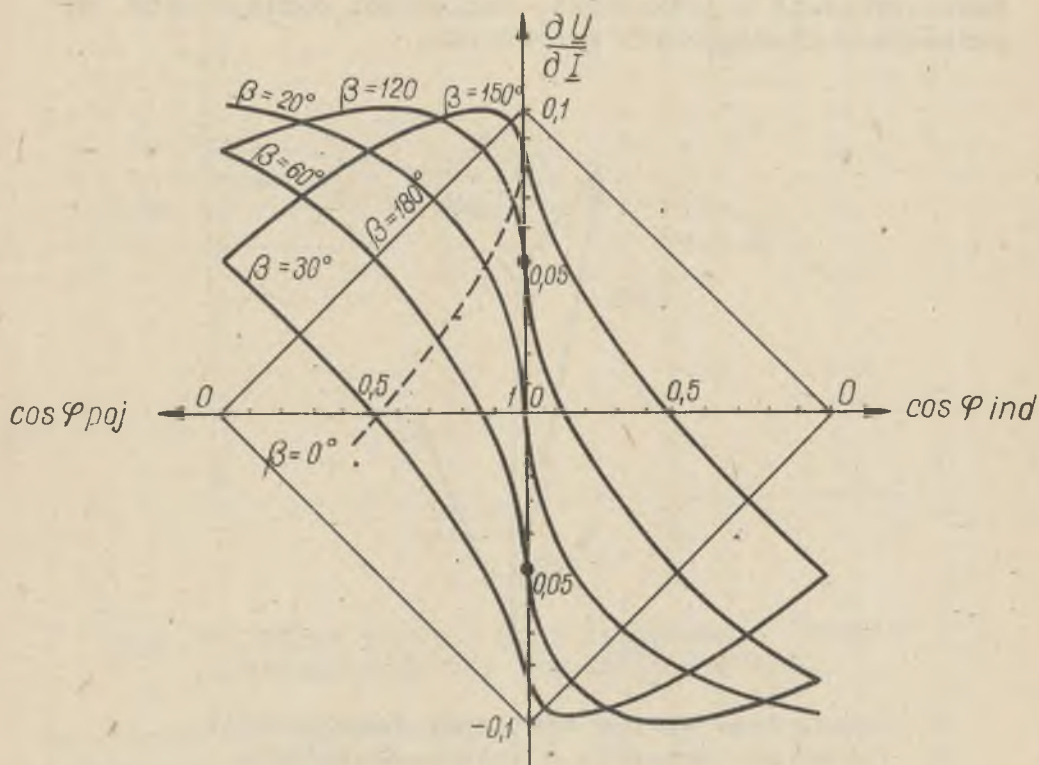
gdzie  $\underline{R}_k$ ,  $\underline{X}_k$  składowa czynna i bierna impedancji przesyłowej wyrażone w jednostkach względnych odniesionych do parametrów znamionowych generatora.



Rys. 11a. Wykres wektorowy kompondacji członu pom. przy dowolnym obciążeniu

Jeśli regulator nie jest astatyczny i wykazuje różny od zera współczynnik statyki charakterystyki regulatora, wówczas zupełna kompensacja statyki możliwa jest teoretycznie wyłącznie przy pewnym założonym obciążeniu (zwykle przyjmuje się znamionowe obciążenie generatora), ponieważ, jak wyjaśniono wyżej, współczynnik statyki zmienia się w miarę zmian obciążenia czynnego. Natomiast jeśli regulator wykazuje astatyczną podstawową charakterystykę regulacji napięcia, współczynnik statyki otrzymany za pomocą kompondacji członu pom. nie zależy od obciążenia czynnego.

W praktyce każdy nowoczesny regulator napięcia wykazuje współczynnik statyki podstawowej charakterystyki regulacji napięcia równy lub bardzo bliski zera, na skutek czego można praktycznie pominąć wpływ pochylenia charakterystyki regulatora na współczynnik statyki napięcia osiągnięty za pomocą kompondacji członu pomiarowego regulatora.



Rys. 11b. Przebieg nachylenia krzywej charakterystyki zewnętrznej  $(\frac{\partial U}{\partial I})_{\cos \varphi = f(\cos \varphi)}$  dla różnych kątów kompowandacji przy module kompowandacji  $z = 0,1$

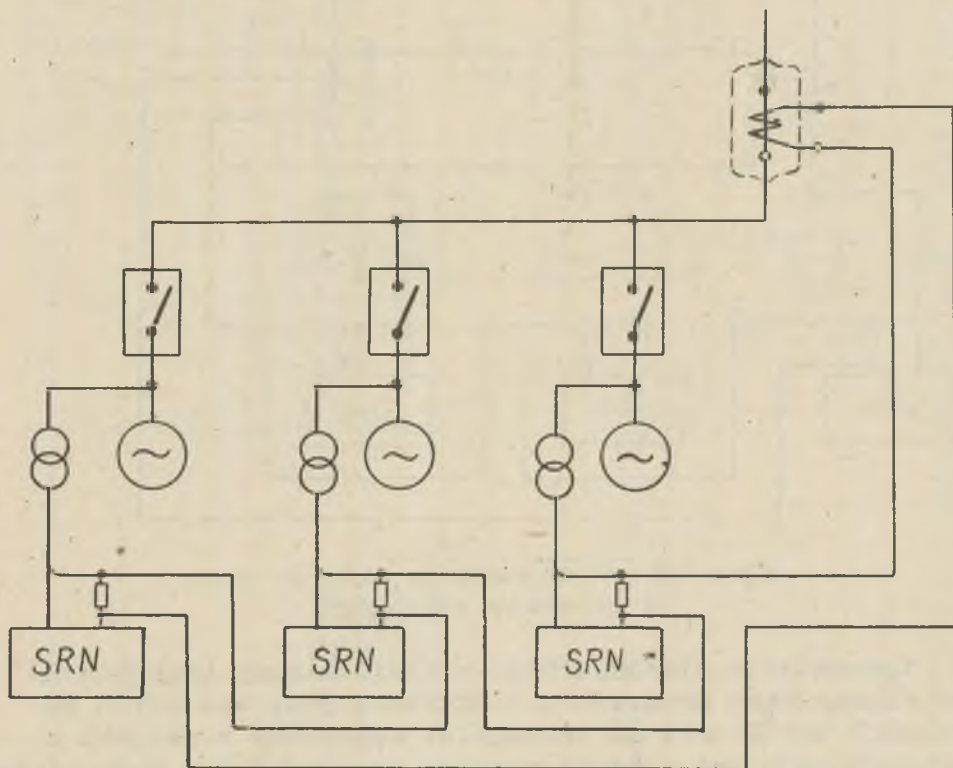
Przy pracy samotnej generatora kompowandacja umożliwia otrzymanie dokładnej kompensacji spadku napięcia na impedancji linii i transformatorów przesyłowych w celu uzyskania stałości napięcia na końcu odbiorczym linii. Przy astatycznym regulatorze parametry kompowandacji wynikają wyłącznie z reaktancji i oporu czynnego impedancji przesyłowej  $a = -\frac{R}{X_k}$

$$b = -\frac{X}{X_k}$$

Kompowandacja członów pom. napięcia umożliwia uzyskanie astatycznej lub nawet aptystycznej charakterystyki napięcia w punkcie złącza pracy równoległej kilku genera-



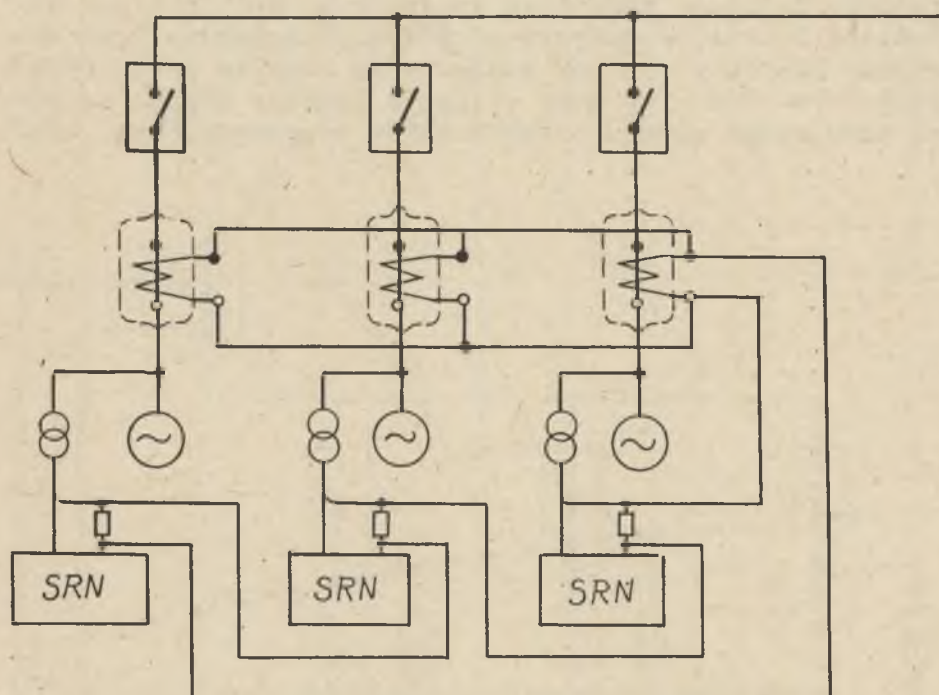
torów, jaka pożądana bywa w niektórych wypadkach, np. dla utrzymania stałości napięcia na odległym końcu linii leżącej poza złączem pracy równoległej. W tym celu do składowej napięcia zasilania członów pomiarowych wszystkich regulatorów proporcjonalnej do napięcia poszczególnych generatorów dodajemy dodatkowe napięcie proporcjonalne do składowej biernej sumarycznego prądu obciążenia. Prąd sumaryczny mierzony jest na odpływie za złączem pracy równoległej (rys. 12a) lub przy odległym punkcie złącza za pomocą sumującego układu przekładników prądowych (rys. 12b).



Rys. 12a. Kompoundacja członów pom. sumarycznym prądem obciążenia

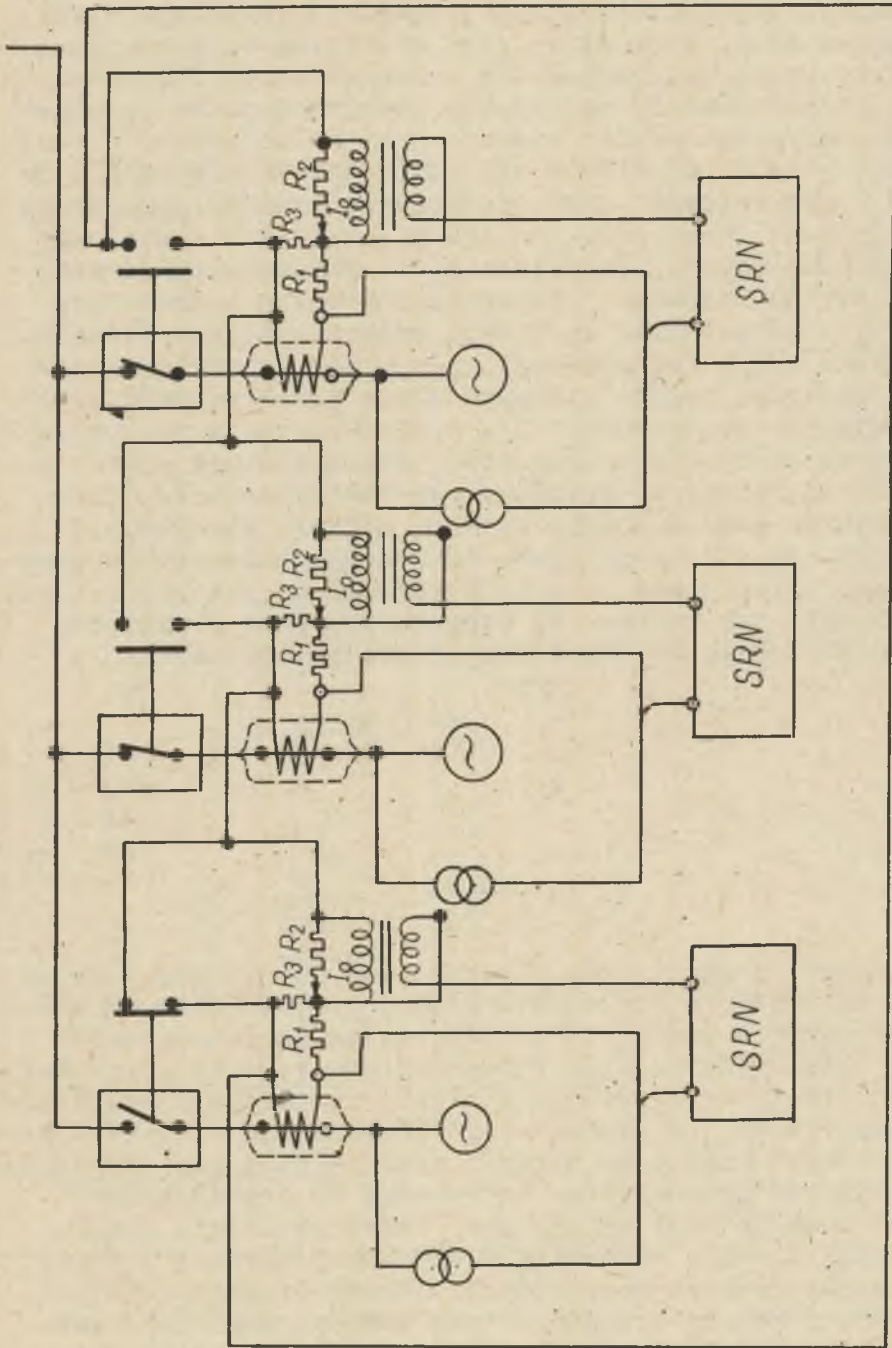
Taka kompoundacja członów pom. oddziałując w jednakowym stopniu i równocześnie na wszystkie współpracujące generatory wpływa na przebieg charakterystyk napięcia współpracujących jednostek analogicznie jak przy kompensacji statyki składową czynną prądu obciążenia. Ponieważ wszyst-

kie człony pom. compoundowane są tym samym prądem obciążenia, możliwość wykonania takiej compoundacji ograniczona jest do jednej elektrowni, w której mieszczą się wszystkie współpracujące jednostki.



Rys. 12b. Compoundacja członów pom. w układzie sumującym

Zapewnienie równomiernego rozdziału mocy biernych na współpracujące generatory elektrowni przy znacznych wahaniami obciążenia ma szczególne znaczenie w związku z prowadzoną u nas w kraju zupełną automatyzacją hydroelektrowni. Często współpracujące generatory w jednej elektrowni wyposażone są w regulatory różnych typów, które wykazują omówione wyżej zmienności współczynnika statyki w funkcji obciążenia mocą czynną oraz (w przypadku regulatorów elektromechanicznych) posiadają dosyć znaczne strefy nieczułości spowodowane tarciem statycznym ruchomych części regulatora. Dla zapewnienia równomiernego rozdziału mocy biernych zachodzi konieczność wprowadzenia silnej statyzacji dochodzącej nawet do wartości przeszło 10%.



Rys. 13. Kompoundacja członów pom. średnim prądem obciążenia

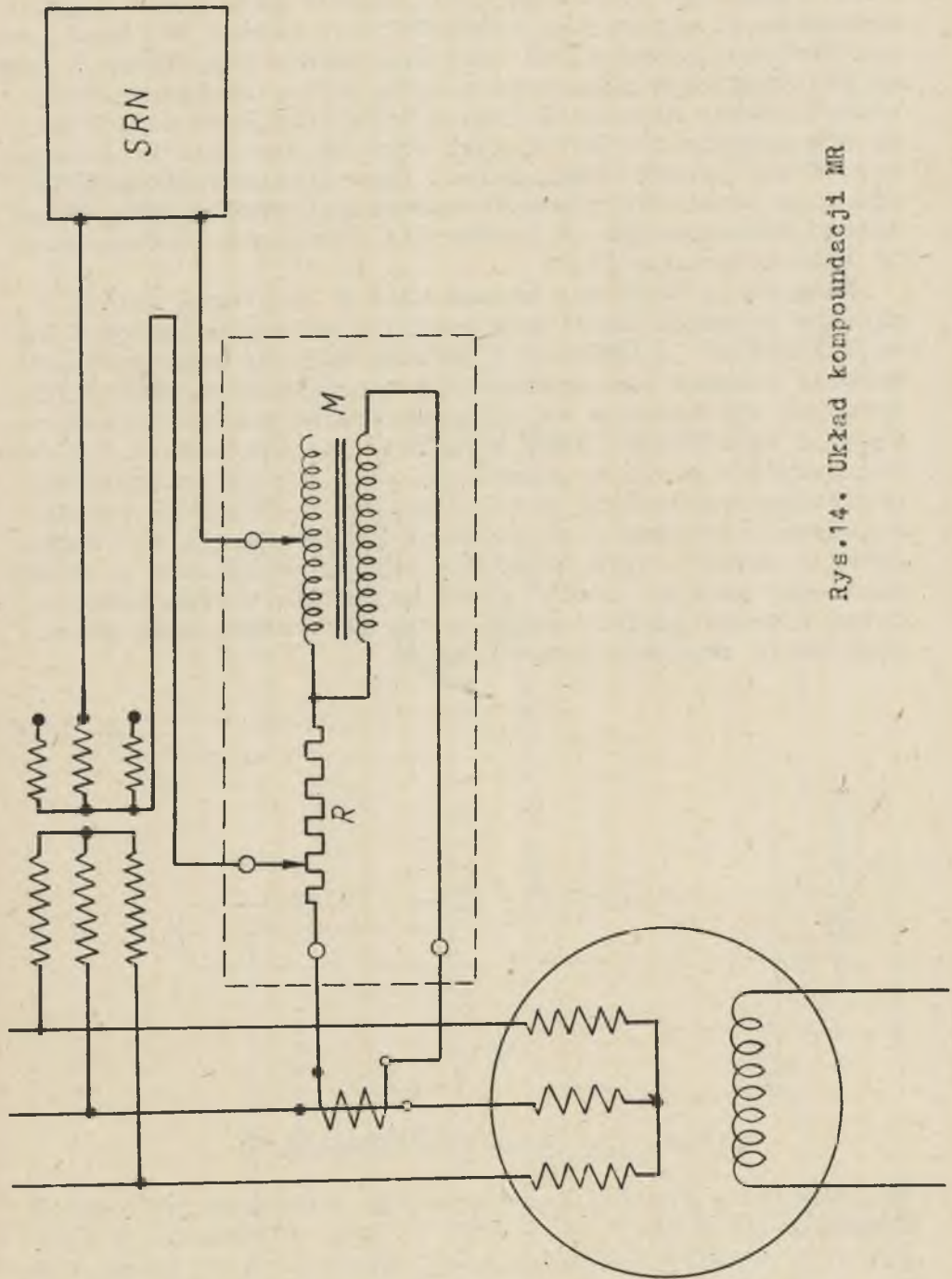
Ponieważ warunki obciążenia takich hydroelektrowni nie spełniają najczęściej warunku stałości średniego współczynnika mocy, niemożliwa jest skuteczna kompensacja statyki przez compoundowanie członów pom. za pomocą składowej czynnej prądu obciążenia. Compoundowanie członów pom. sumarycznym prądem biernym jest niekorzystne w przypadku, jeżeli przewiduje się możliwość odstawienia jednego z generatorów. Przy odstawieniu jednego generatora maleje prąd sumaryczny, na skutek czego zmniejsza się wpływ kompensacji. Natomiast układ compoundacji przedstawiony na rysunku 13 zapewnia skuteczną kompensację statyki, niezależnie od ilości wyłączonych generatorów, ponieważ wpływ compoundacji członu pom. zależy od średniej wartości prądów wtórnych stron przekładników współpracujących generatorów [2]. Spadek napięcia na oporze  $R_1$  służy do statyzacji regulatora, gdy natomiast spadek napięcia na oporze  $R_3$  zbierany poprzez pomocniczy transformator pośrodkowy spełnia zadanie kompensacji statyki. Na podstawie prawa koła napięć dla obwodu utworzonego przez opory  $R_2$  i  $R_3$  współpracujących generatorów w układzie jak na rys. 13 otrzymujemy przy pominięciu prądu płynącego do transformatorów pomocniczych

$$n\hat{I}_{sr} R_2 - \sum_{k=1}^{k=n} (\hat{I}_k - \hat{I}_{sr}) R_3 = 0$$

Stąd

$$\hat{I}_{sr} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^{k=n} I_k \quad (7)$$

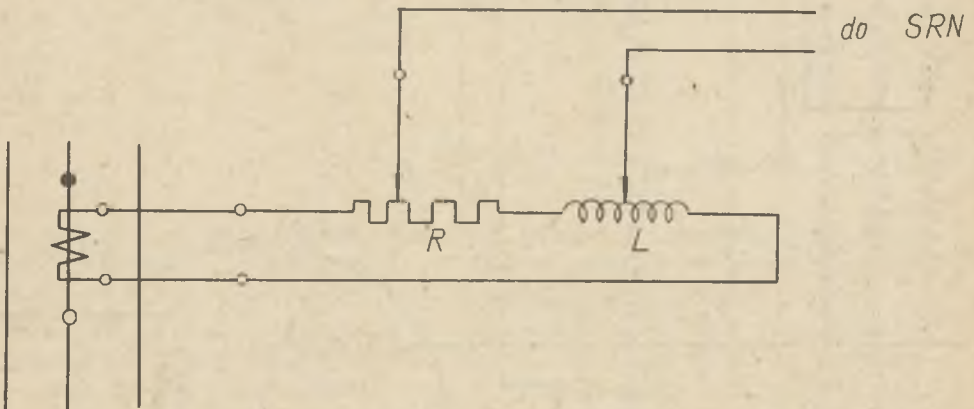
Jak wynika z otrzymanej relacji prąd  $I_{sr}$  proporcjonalny jest istotnie do wartości średniej prądów wtórnych stron przekładników prądowych współpracujących generatorów. Przy wyłączeniu jednego z generatorów kontakt pomocniczy wyłącznika mocy eliminuje z układu przekładnik wyłączonego generatora, na skutek czego kompensacja statyki w dalszym ciągu reaguje na wartość średnią mocy biernej współpracujących generatorów. Na rysunku 14 przedstawiono układ compoundacji członu pom., który umożliwia ciągłą zmianę i dowolne nastawienie składowej czynnej i biernej współczynnika compoundacji. Przez przełączenie początków i końców transformatora pomocniczego lub oprona łatwo zmienić znak wartości składowej biernej i czynnej współczynnika compoundacji z.



Rys.14. Układ kompozycji MR

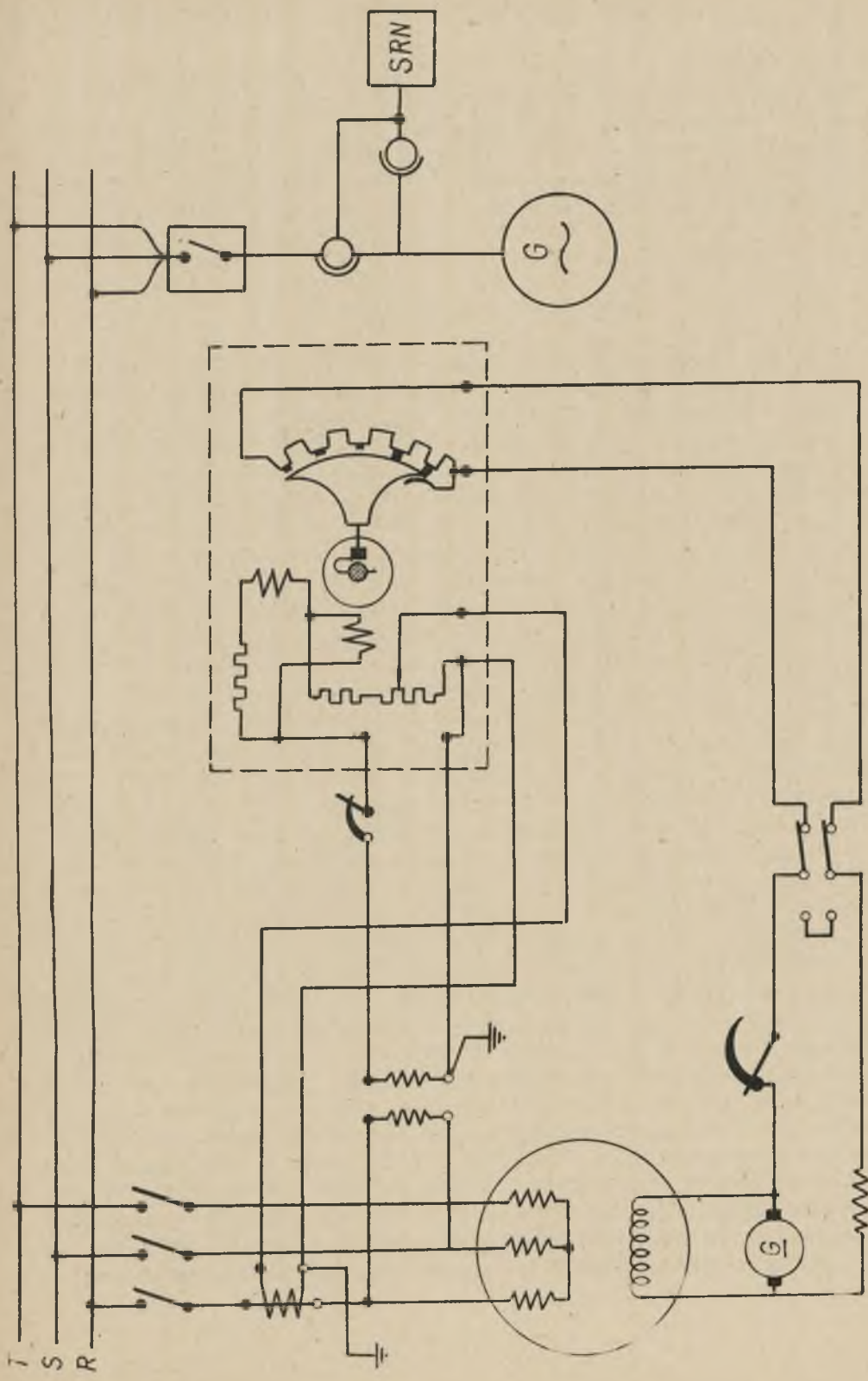
Jeśli regulator mierzy napięcie fazowe generatora a układ kompowundacji członu pom. zasilany jest prądem tej samej fazy, wówczas indukcyjność wzajemna układu kompowundacji wpływa na statyzację regulacji a opór czynny na kompensację statyki. Przy zasilaniu prądem innej fazy generatora zmienia się odpowiednio kąt fazowy wektora napięcia kompowundacji. W ten sposób drogą zmiany fazy zasilania kompowundacji oraz przez skrzyżowanie wprowadzeń przekładnika prądowego kompowundacji otrzymuje się nieciągłą skokową zmianę kąta kompowundacji  $\beta$ .

Połączenie skokowej zmiany kąta  $\beta$  z ciągłą zmianą w węższym zakresie umożliwia pokrycie pełnej zmienności kąta  $\beta$  i modułu  $z$  (rys. 15). Obydwa sposoby zmiany kompowundacji członów pom. spotyka się w praktyce. W niektórych typowych wykonaniach regulatorów zmiana nastawień kompowundacji ograniczona jest wyłącznie do zmiany wartości modułu współczynnika kompowundacji. Wówczas do przekładnika prądowego przyłączony jest wyłącznie regulowany opornik, z którego zbierane jest napięcie kompowundacji. Kąt kompowundacji możemy w tym przypadku zmienić wyłącznie w sposób nieciągły skokami co  $60^\circ$  przez zasilanie układu kompowundacji z przekładników różnych faz generatora oraz przez odwrócenie zacisków kompowundacji.



Rys. 15. Układ kompowundacji LR

Na przykład w regulatorze firmy BBC stosowany bywa układ kompowundacji o kącie  $\beta = +150^\circ$  w celu statyzacji i kompensacji statyki charakterystyki napięcia generatora, który przeznaczony jest do pracy równoległej z systemem (rys. 16a),



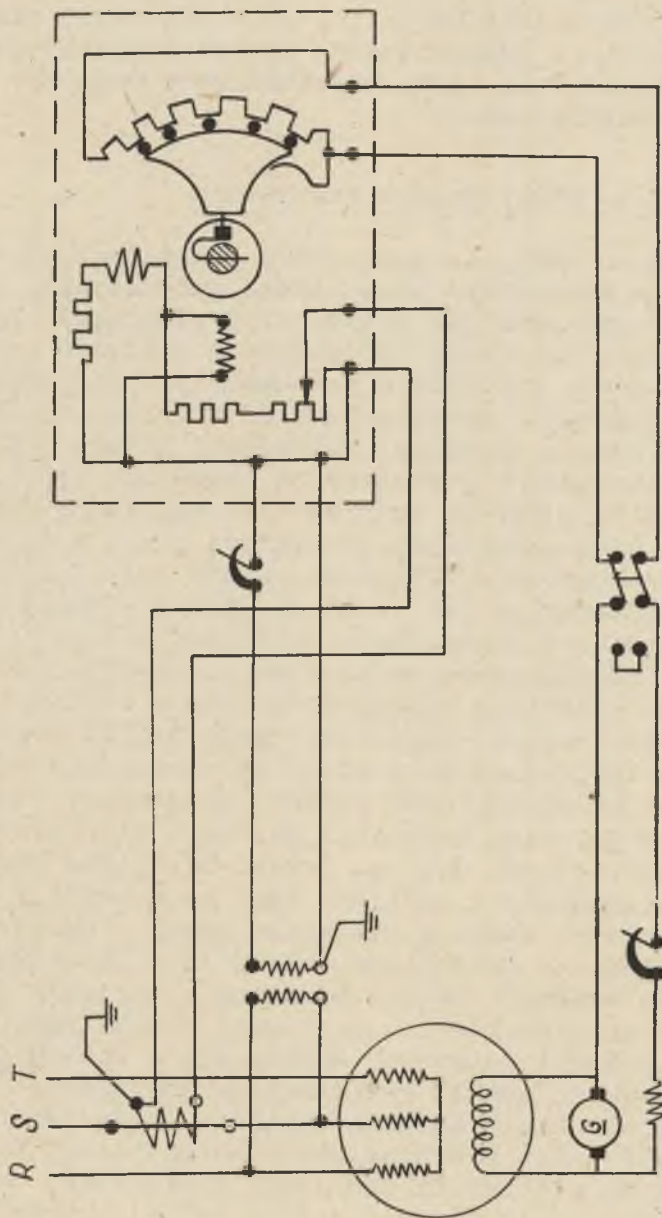
Rys. 16a. Układ kompowandacji dla  $\beta = +150^\circ$

lub układ kompowdacji o kącie  $\beta = -150^\circ$  dla kompensacji spadków napięć linii przesyłowych przy pracy samotnej generatora (rys. 16b). Dla galwanicznego oddzielenia wtórnych stron przekładników napięciowych i prądowych stosujemy często pomocnicze pośredniczące transformatorki prądowe (uziemiaenia wtórnych stron przekładników mogą być przyczyną zwarc w regulatorze).

#### 4. Stabilizacja regulatora

Przy obniżkach napięcia generatora powstałych na skutek zwiększenia obciążenia mocą bierną automatyczny regulator napięcia powinien jak najszybciej zwiększyć prąd wzbudzenia generatora celem sprowadzenia napięcia generatora do znamionowej wartości z zachowaniem określonego współczynnika statyki. Zwiększonemu ustalonemu obciążeniu generatora odpowiada określony zwiększony ustalony prąd wzbudzenia generatora i jednocześnie określone zwiększone napięcie wzbudnicy. Jeżeli automatyczny regulator napięcia wpływa na prąd wzbudzenia generatora przez zmiany oporu w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy, która jest bocznikową prądnicą prądu stałego, jak to ma miejsce w większości elektromechanicznych regulatorów napięcia, wówczas wspomnianemu wyżej zwiększonemu ustalonemu obciążeniu generatora odpowiada określony zmniejszony opór w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy. Jeżeli regulator spowodowałby bezzwłoczne ustawienie takiego oporu w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy natychmiast po wystąpieniu zwyżki obciążenia, wówczas tzw. naturalny przebieg regulacji napięcia generatora odbywałby się zbyt wolno. Tak np. jeżeli uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy generatora zasilane jest ze wzbudnicy pomocniczej, a regulator zmienia wyłącznie opory w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy generatora, która jest bocznikową prądnicą prądu stałego, proces narastania napięcia generatora z obniżonej wartości w pierwszej chwili zwyżki obciążenia do wartości ustalonej odbywa się w sposób aperiodyczny. W pierwszej chwili zwiększonego obciążenia (mocą bierną) występuje nagła obniżka napięcia, której nie zdoła wyeliminować żaden nawet najszybszy regulator. Bezwładność magnetyczna generatora utrzymuje w pierwszej chwili zwyżki obciążenia, nie zmienione liniozwoje sprzężone z uzwojeniem wirnika dzięki pojawieniu się przepływu wyrównawczego w obwodach elektrycznych (uzwojenie wzbudzenia generatora, strugi prądów wirowych bloku litego wirnika),





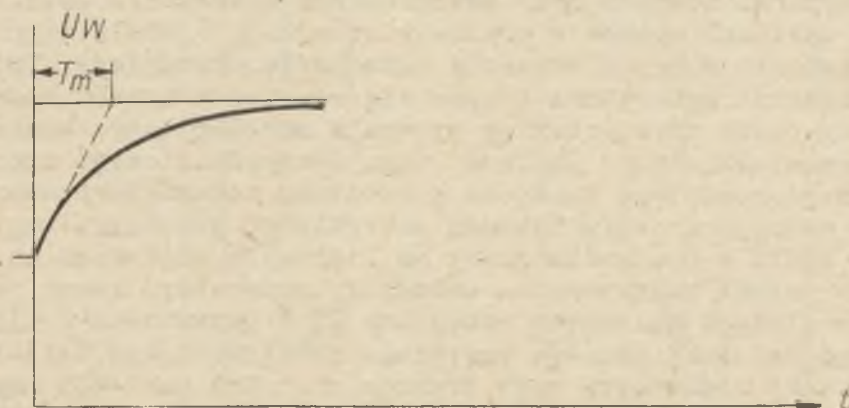
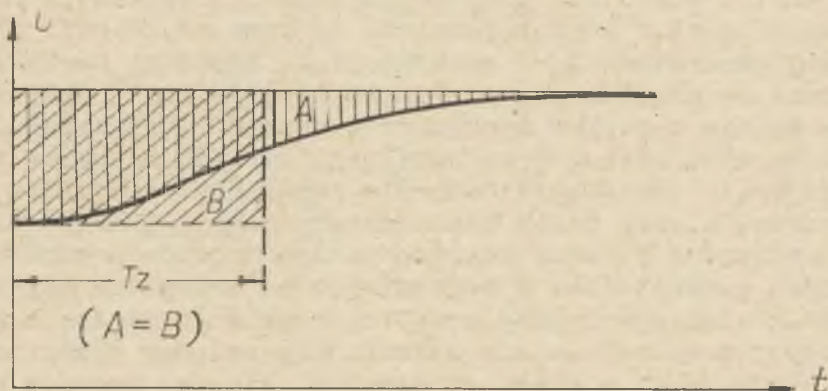
Rys. 16b. Układ kompowandacji dla  $\beta = -150^\circ$

co ujawnia się na wykresie wektorowym generatora przez początkową stałość napięcia  $E_q$ , występującego w generatorze za reaktancją przejściową  $X_d$  (rys. 1b). Przy obciążeniu generatora mocą bierną napięcie na zaciskach obniża się natychmiast do wartości  $E_q - I X_d$ . W przypadku pracy równoległej generatorów obciążenie bierne rozdziela się na współpracujące jednostki prądowców w pierwszej chwili odwrotnie proporcjonalnie do reaktancji przejściowych (ściśle proporcjonalnie do sumy reaktancji przejściowej generatora  $X_d$  i reaktancji  $X_k$  łączącej zaciski generatora ze złączem pracy równoległej). W miarę upływu czasu zanika przepływ wyrównawczy wirnika i rozdział obciążenia mocą bierną oraz ustaloną, wartość napięcia w złączu pracy równoległej określa regulacja wzbudzenia generatorów, a przy pracy bez automatycznej regulacji napięcia wewnętrzne  $E_w$  oraz reaktancja synchroniczna współpracujących generatorów. W odróżnieniu od przypadku nagłej zmiany obciążenia typowy przebieg regulacji napięcia generatora, przy którym nie ujawnia się opisany wyżej wpływ wyrównawczy w obwodach wirnika, stanowi wypadek skokowej zmiany nastawienia członu pomiarowego regulatora przy pracy samotnej generatora obciążonego stałą reaktancją zewnętrzną. Naturalny przebieg regulacji zachodzi w tym wypadku również przy bezzwłocznym ustawieniu ustalonych wartości oporów w obwodzie wzbudnicy (jeżeli regulator zmienia opory w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy). Zmiana napięcia generatora odbywa się również w sposób aperiodyczny, przy czym przebieg wykazuje monotoniczny charakter dwuwykładniczy. Szybkość tego dwuwykładniczego aperiodycznego przebiegu napięcia generatora scharakteryzowana jest zastępczą stałą czasową naturalnego przebiegu regulacji, która w przypadku pracy na liniowych odcinkach charakterystyki magnesowania wzbudnicy generatora równa jest sumie stałych czasowych wzbudnicy  $T_w$  i generatora  $T_d$  [5]. Zastępczą stałą czasową przebiegu monotonicznego definiujemy jako równoważny czas trwania odchyłki wartości napięcia generatora  $U(t)$  od wartości ustalonej  $U_t(\infty)$  równej odchyłce dla początkowej chwili czasowego przebiegu napięcia generatora

$$T_z = \int_0^{\infty} \frac{U(t) - U(\infty)}{U(0) - U(\infty)} dt \quad (8)$$

Na rysunku 17a przedstawiono czasowy przebieg napięcia wzbudnicy i generatora obciążonego stałą reaktancją zewnętrzną w czasie naturalnego procesu regulacji przy sko-

kowej zmianie nastawień członu pomiarowego. Jeżeli przy pracy samotnej generatora dużej mocy stała czasowa  $T_d$  wynosi przy średnim obciążeniu generatora przykładowo około 2,5 - 4,5 s,  $T_w$  wynosi około 0,5 s, wówczas zastępcza stała czasowa wynosi 3 - 5 s. (Przy pracy równoległej maleje stała czasowa  $T_d'$  przeciętnie do wartości około 1,0 - 1,5 s).



Rys. 17a. Przebieg regulacji napięcia przy zmianie nastawienia regulatora  
Proces naturalny .  $U$  - napięcie twornika generatora, -  $U_w$  - napięcie wzbudnicy

Rozpatrzmy teraz przypadek nagłej zmiany obciążenia (mocą bierną) generatora. Przy pracy samotnej otrzymamy ten

przypadek przy zmianie reaktancji  $X_z$ . Jeżeli przyjmiemy dla przykładu generator pracujący samotnie na biegu jałowym o przeciętnych parametrach  $X_d = 1,4$ ,  $X'_d = 0,25$ , który obciążymy reaktancją  $X_z = 1,0$ , otrzymujemy w pierwszej chwili przy pominięciu krótkotrwałego przebiegu podprzejściowego obniżkę napięcia z wartości  $U_N$  do

$$U_N - I' X'_d = U_N \frac{X_z}{X_z + X_d} = 0,8 U_N$$

(prąd obciążenia w pierwszej chwili wynosi

$$I_d = \frac{E_q}{X'_d + X_z} = \frac{U_N}{X'_d + X_z} = 0,8 I_N)$$

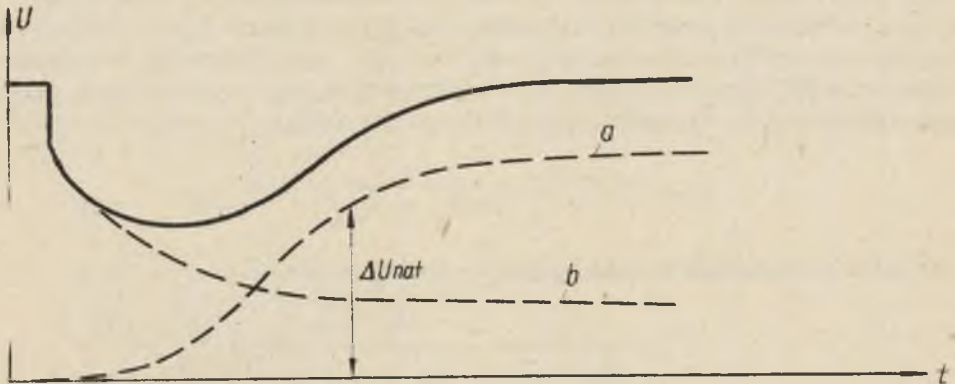
Jeżeli generator pracuje bez regulacji wzbudzenia, napięcie maleje w dalszym ciągu wykładniczo do wartości

$$E_w - I X_d = U_N \frac{X_z}{X_d + X_z} = 0,415 U_N$$

(Ustalony prąd obciążenia

$$I = \frac{E_w}{X_d + X_z} = 0,415 I_N)$$

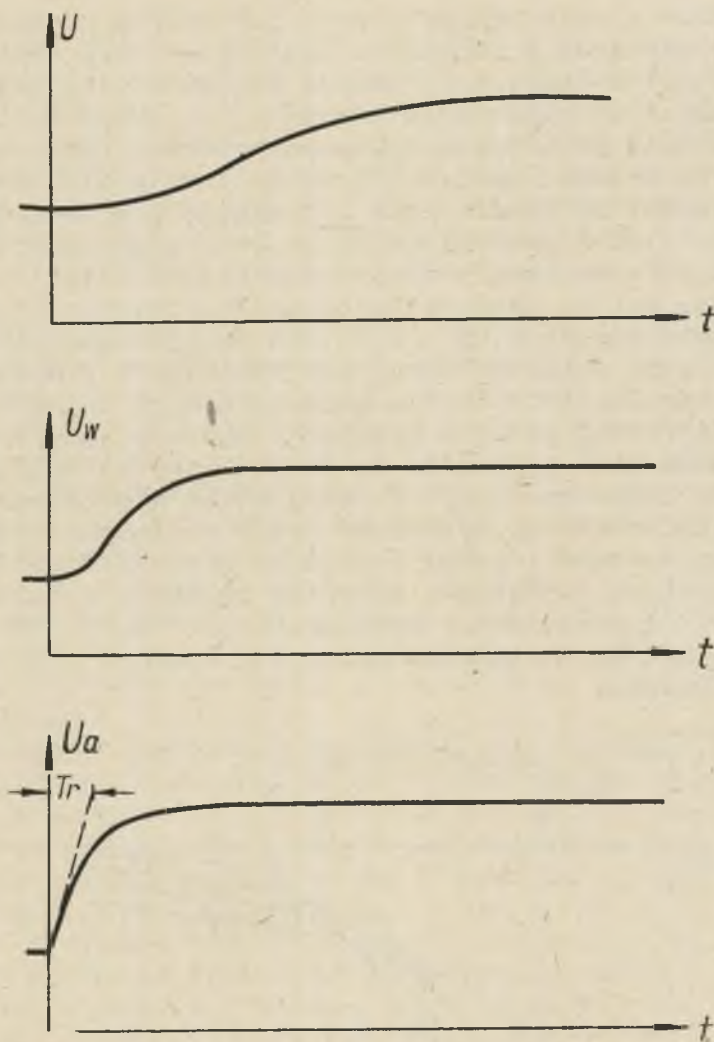
Na skutek działania regulatora nastąpi w wyniku przebiegu regulacyjnego odbudowa napięcia generatora. Na rysunku 17b przedstawiono przebieg napięcia generatora po zwyzce obciążenia przy naturalnym procesie regulacji. Przebieg napięcia generatora można w tym wypadku przedstawić jako superpozycję narastającego napięcia twornika pod wpływem regulacji wzbudzenia przy pracy samotnej generatora (krzywa a) i przebiegu obniżania napięcia generatora pracującego bez regulacji wzbudzenia pod wpływem zmniejszonej reaktancji zewnętrznej  $X_z$  (krzywa b). W przebiegu napięcia generatora można zaznaczyć charakterystyczną początkową obniżkę napięcia i następujące po niej dalsze stopniowe obniżanie napięcia na skutek zanikania przepływu wyrównawczego w wirniku generatora. Dopiero po upływie czasu zależnego od stałej czasowej wzbudnicy staje się widoczne działanie układu regulacji. Przebieg napięcia wzbudnicy w czasie naturalnego przebiegu regulacji po zwyzce obciążenia generatora jest analogiczny jak w przypadku przedstawionym na rys. 17a, jeżeli wzbudnica jest bocznikową prądnicą prądu stałego.



Rys. 17b. Przebieg regulacji napięcia generatora przy nagłej zmianie obciążenia generatora (Proces naturalny)

Przy pracy wzbudnicy w układzie samowzbudnym stała czasowa wzbudnicy jest większa aniżeli przy obcym wzbudzeniu na skutek czego rośnie udział stałej czasowej wzbudnicy w zastępczej stałej czasowej naturalnego przebiegu regulacji. W przypadku nowoczesnych układów regulacji wzbudzenia uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy zasilane jest z wzmacniacza maszynowego (amplidyny) lub z wzmacniacza magnetycznego (transduktora) na skutek czego zastępczą stałą czasową naturalnego przebiegu regulacji zwiększa się o stałą czasową wzmacniacza  $T_r$ . Naturalny przebieg regulacji napięcia generatora przy pracy samotnej odbywa się w sposób aperiodyczny trójwykładniczy (rys. 18a). Przebieg napięcia wzbudnicy wykazuje w odróżnieniu od przypadku przedstawionego na rys. 17a charakterystyczne początkowe opóźnienie maksymalnej stromości, które jest spowodowane bezwładnością elektromagnetyczną amplidyny lub transduktora określoną przez stałą czasową  $T$ . Opóźnienie to jest niekorzystne, ponieważ odpowiada w przybliżeniu równoważnej zwłoce czasowej działania wzbudnicy. To jest też m.in.<sup>1)</sup> przyczyną rzadkiego zastosowania

<sup>1)</sup> Zasadniczą przyczyną, dla której nie stosuje się powszechnie regulacji prądu w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy pomocniczej, stanowi w przypadku regulatorów elektromechanicznych skłonność układu regulacyjnego do niesta-

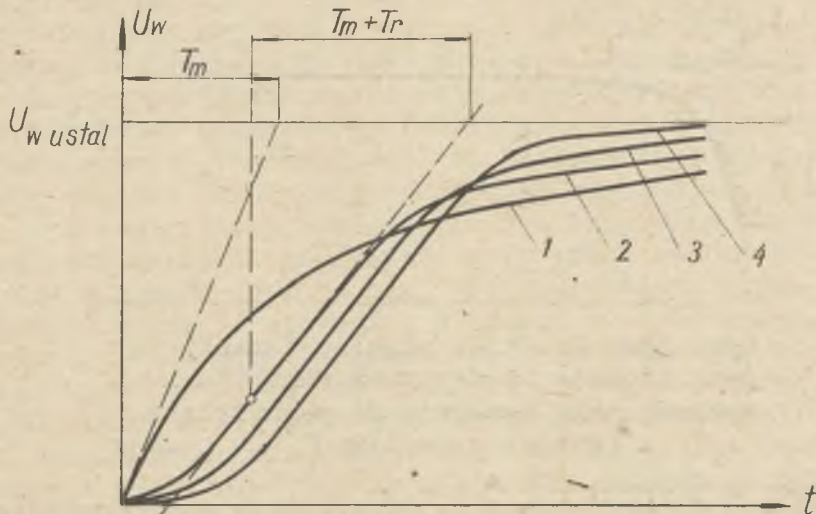


Rys. 18a. Przebieg regulacji napięcia przy zmianie nastawienia regulatora wykazującego bezwładność magnetyczną (proces naturalny)

c.d.bilności przy wtrącaniu dodatkowego wzmacniającego członu inercyjnego, którą bez wprowadzenia specjalnego elektrycznego stabilizacyjnego sprzężenia zwrotnego obejmującego wzbudnię główną i wzbudnicę pomocniczą w niektórych przypadkach trudno usunąć.

regulatorów elektromechanicznych zmieniających opowy w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy pomocniczej bez dodatkowych członów stabilizacji pomimo znacznie mniejszych i łatwiejszych do opanowania prądów w tym obwodzie aniżeli w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy głównej (przy wolnoobrotowych wzbudzeniach hydrogeneratorów prądy wzbudzenia wzbudnicy są bardzo duże i wymagają kosztownych regulatorów elektromechanicznych na duże prądy wzbudzenia) W przypadku wzmacniaczy maszynowych stała czasowa  $T_r$  powodująca zwłokę narastania napięcia wzbudnicy jest przeważnie bardzo mała (około 0,05 - 0s) i nie odgrywa większej roli.

Narastanie napięcia wzbudnicy wykazuje w pierwszym okresie regulacji charakter paraboliczny o początkowej stromości równej zeru. W przypadku ogólnym, gdy wzbudnica zasilana jest z układu  $n$  wzmacniaczy wstępnych połączonych łańcuchowo (np. kaskady kilku wzmacniaczy magnetycznych, w której wyjściowy obwód obciążenia jednego wzmacniacza stanowi obwód wejściowy uzwojenia sterującego następnego) (początkowy przebieg napięcia wzbudnicy ma charakter paraboliczny o wykładniku  $n+1$  (Rys. 18b). Zjawisko zwłocznego działania wzbudnicy ujawnia się tu jeszcze wyraźniej.



Rys. 18b. Wpływ powiększenia ilości wstępnych stopni wzmocnienia na przebiegi napięcia wzbudnicy

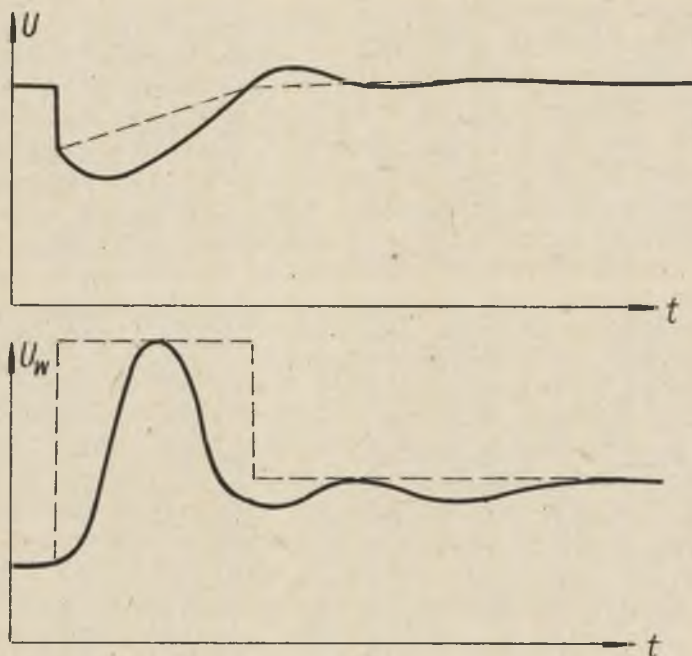
W przypadku zasilania uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy z amplidyny, która w zasadzie równoważna jest łańcuchowemu połączeniu 2 inercyjnych członów wzmacniających scharakteryzowanych 2 stałymi czasowymi otrzymuje się wzrost napięcia według paraboli 3 stopnia. Bardzo często jednak stała czasowa jest znikomo mała (stała czasowa uzwojenia sterującego zredukowana zostaje na skutek dodatkowych oporów wtrąconych w szereg) dzięki czemu wpływa na przebieg regulacji wzbudnicy głównie jedna stała czasowa wzmacniacza.

Rzeczywisty proces regulacji napięcia generatora ulega znacznemu przyspieszeniu w porównaniu z naturalnym przebiegiem regulacji, jeżeli w pierwszej fazie procesu regulacji wystąpi znaczne przeregulowanie napięcia wzbudnicy w porównaniu z wartością ustaloną. Oczywiście dla przeregulowania napięcia wzbudnicy konieczne jest przeregulowanie elektromechanicznego regulatora napięcia zmieniającego opory w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy, ewentualnie silne wzmoczenie napięcia amplidyny lub transduktora. Na skutek wzmoczenia napięcia zasilania uzwojeń wzbudzenia wzbudnicy maleje ponadto znacznie omówiona wyżej zwłoka działania wzbudnicy pochodząca od bezwładności wzmacniacza.

W miarę powiększania szybkości narastania napięcia wzbudnicy zmniejsza się wpływ oddziaływania przepływu twornika generatora na obniżenie napięcia na zaciskach. W granicy bezzwłocznie narastające napięcie wzbudnicy podtrzymuje przepływ wyrównawczy w obwodach wirnika pojawiający się w chwili zaburzenia i w miarę upływu czasu powiększa przepływ wzbudzenia generatora aż do wyrównania poziomu napięcia generatora. Maksymalna obniżka napięcia generatora wystąpi w takim przypadku bezpośrednio w chwili zwyczajki obciążenia. Na rysunku 19 zaznaczono linią przerywaną idealny przebieg napięcia generatora w granicznym przypadku bezzwłocznego powiększenia napięcia wzbudnicy do wartości szczytowej i zmniejszenia do wartości ustalonej z chwilą zakończenia odbudowy napięcia generatora.

Szybkość odbudowy napięcia generatora uzależniona jest w takim przypadku wyłącznie od bezwładności magnetycznej generatora i szczytowego napięcia wzbudnicy. Dzięki przeregulowaniu napięcia wzbudnicy możemy kilkakrotnie zmniejszyć zastępczą stałą czasową przebiegu regulacji napięcia generatora w porównaniu z przebiegiem naturalnym.



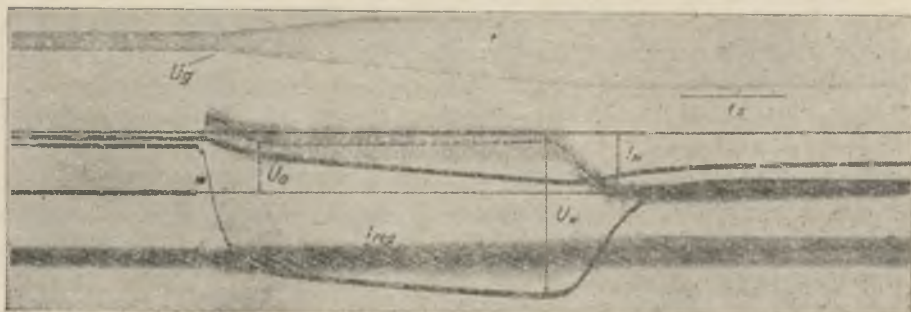


Rys. 19. Wpływ przeregulowania wzbudnicy na przebiegi regulacji napięcia generatora

Niestety jednak w miarę powiększenia przeregulowania wzbudnicy napięcie generatora traci przebieg aperiodyczny i nabiera skłonności do słabo tłumionego periodycznego przebiegu napięcia generatora i wreszcie przy dalszym powiększaniu przeregulowania wzbudnicy do nie zanikających oscylacji napięcia. Taki proces regulacji określamy jako niestabilny. Stabilizacja regulatora ma na celu zapewnienie stabilnego procesu regulacji i uzyskanie najkorzystniejszego ze względu na szybkość i jakość regulacji silnie tłumionego oscylacyjnego przebiegu napięcia generatora (nieznacznie poza granicą przebiegów aperiodycznych). Rysunek 19 przedstawia typowy przebieg napięcia generatora i wzbudnicy nowoczesnego układu regulacji, jakkolwiek występuje po nagłej zwwyżce obciążenia generatora mocą bierną.

Z uwagi na duże trudności ruchowe przeprowadzenia kontroli przebiegów regulacyjnych generatorów dużych mocy przy nagłej zwwyżce obciążenia, ograniczamy się zwykle do kontrolnych pomiarów oscylograficznych przebiegów regula-

cyjnych generatora na biegu jałowym przy pracy samotnej. Celem wprowadzenia interwencji regulatora zachodzi przy tym pomiarze konieczność wprowadzenia do badanego układu regulacyjnego typowego zaburzenia rozpoczynającego nieustalony przebieg regulacyjny. W praktyce stosowany jest w tym celu najczęściej przypadek skokowej zmiany nastawienia członu pomiarowego oraz przypadek wyłączenia (za pomocą wyłącznika mocy) oddawanej mocy biernej (indukcyjnej, rzadziej pojemnościowej) generatora współpracującego z systemem. Celem wyeliminowania interwencji mechanicznego regulatora szybkości turbiny po wyłączeniu generatora przy tym pomiarze nie oddaje czynnej mocy do sieci.



Rys. 20a. Oscylogram regulacji wzbudzenia generatora 69 MVA po uruchomieniu nowoczesnego samoczynnego regulatora napięcia regulator ze wzmacniaczem maszynowym

$U$  - napięcie twornika generatora

$U_w$  - napięcie wzbudnicy

$I_w$  - prąd wzbudzenia generatora

$U_a$  - napięcie zasilania uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy (z amplidyny)

$I_{reg}$  - napięcie wyjściowe członu pomiarowego regulatora

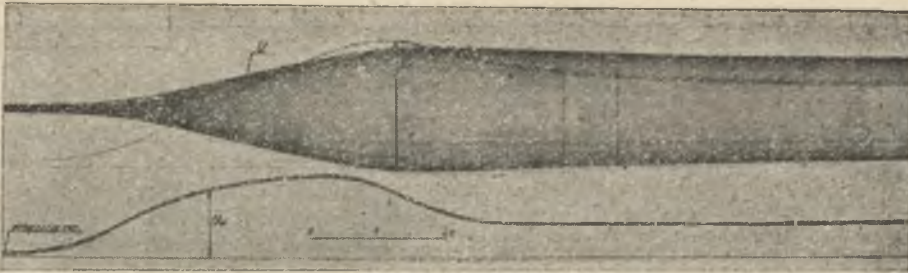
Na rysunku 20a przedstawiono oscylogram regulacji napięcia generatora mocy 64 MVA pracującego samotnie na biegu jałowym po załączeniu automatycznego regulatora napięcia (przed załączeniem generator jest nie wzbudzony).

Przypadek ten odpowiada wyższe nastawienia regulatora od minimum do wartości napięcia znamionowego. Minimum napięcia występujące przy wyłączonym regulatorze powstaje na skutek magnetyzmu szczątkowego wzbudnicy i generatora. Stała czasowa generatora  $T_{d0} = 11$  s, stała czasowa wzbudnicy  $T_w = 0,5$  s. (reaktancje  $X_d = 1,9$ ,  $X'_d = 0,25$ ). Zastępcza stała czasowa naturalnego przebiegu regulacji wynosi  $T_z = T_{d0} + T_w = 11,5$  s. Na skutek wzmoczenia napięcia wzbudnicy w czasie przebiegu regulacyjnego przedstawionego na rys. 20a zastępcza stała czasowa wyznaczona na podstawie definicji całkowitej (8) wynosi zaledwie 2,4 s. Generator, dla którego zdjęto oscylogram przebiegu regulacyjnego (rys. 20a) wyposażony jest w nowoczesny układ regulacji z kaskadą wzmacniaczy wstępnych złożoną z wzmacniacza amplidyńowego i wzmacniacza elektronowego. Jak można zauważyć na oscylogramie, napięcie wzbudnicy wchodzi przy silnym przeregulowaniu w zakres nieliniowej charakterystyki na skutek nasycenia obwodu magnetycznego wzbudnicy. Przyczynia się to do znacznego powiększenia zastępczej stałej czasowej. Na oscylogramie widoczne jest znaczne zmniejszenie stromości narastania napięcia wzbudnicy  $U_w$  po osiągnięciu nasycenia, któremu towarzyszy również zmniejszenie stromości narastania prądu wzbudzenia generatora. W chwili gdy generator osiąga napięcie zbliżone do nastawionej wartości, regulator powoduje bardzo szybkie obniżenie i ustalenie napięcia wzbudnicy. Generator osiąga wartość ustaloną praktycznie bez przeregulowania.

Znaczny czas narastania napięcia generatora uległby kilkakrotnemu zmniejszeniu, jeżeliby wzbudnica zachowała liniową charakterystykę w zakresie dużych prądów wzbudzenia wzbudnicy.

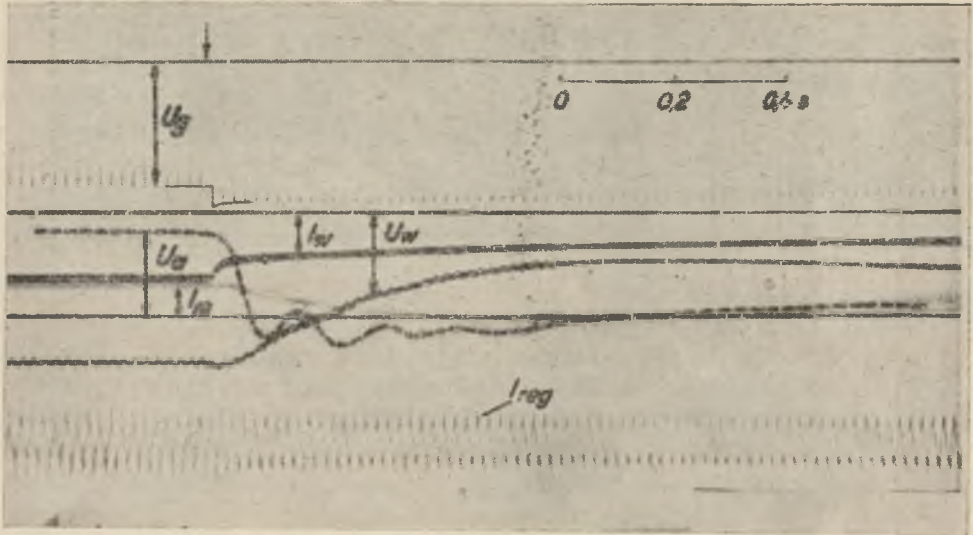
Przykład ten wskazuje na to, że przy dużych zwyczajach nastawień regulatora na szybkość narastania napięcia generatora w głównej mierze wpływa szczytowe napięcie wzbudnicy (tzw. pułap napięcia wzbudnicy) i stała czasowa generatora  $T_{d0}$ , a w mniejszym stopniu stała czasowa wzbudnicy  $T_w$  i regulatora  $T_r$ .

W przypadku elektromechanicznych samoczynnych regulatorów napięcia działających przez zmianę oporu w obwodzie samowzbudnej wzbudnicy przebieg regulacji napięcia generatora na biegu jałowym przy dużych zwyczajach nastawień regulatora obciążony jest dodatkowym opóźnieniem czasowym spowodowanym zjawiskiem samowzbudzenia wzbudnicy.



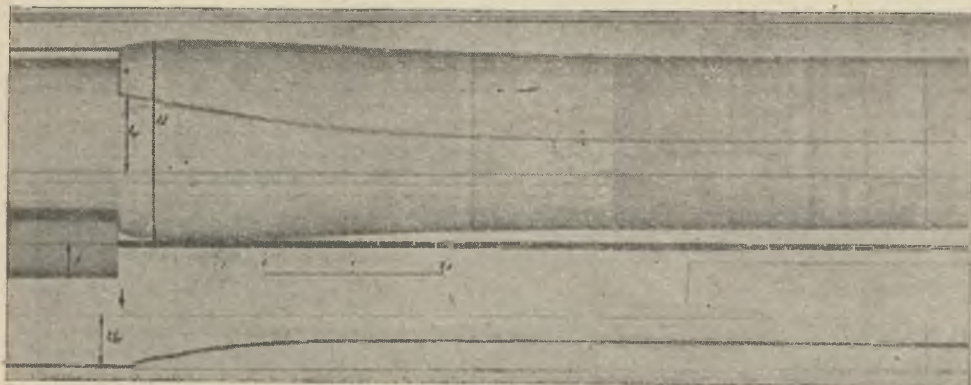
Rys. 20b. Oscylogram regulacji wzbudzenia generatora 17 MVA po uruchomieniu elektromechanicznego regulatora napięcia  
 $U$  - napięcie twornika generatora  
 $U_w$  - napięcie wzbudnicy  
 $I_w$  - prąd wzbudzenia generatora

Na rysunku 20b przedstawiono oscylogram regulacji napięcia generatora mocy 17 MVA pracującego samotnie na biegu jałowym po załączeniu elektromechanicznego samoczynnego regulatora napięcia, który wysterowuje samowzbudną wzbudnicę bocznikową. (Stała czasowa generatora  $T'_{do} = 6$  s, stała czasowa wzbudnicy  $T_w = 0,5$  s). Na oscylogramie widoczne jest powolne narastanie napięcia wzbudnicy spowodowane niskim napięciem początkowym wzbudnicy. Znaczne przeregulowanie napięcia generatora ponad wartość ustaloną (około 20%) wskazuje na złą stabilizację regulatora. Oscylogramy przedstawione na rys. 20a i b określają przebiegi regulacyjne generatora przy dużej zmianie nastawień regulatora, przy których czas trwania i charakter przebiegów nieustalonych zależy w głównej mierze od własności wzbudnicy. Przy mniejszych zmianach nastawień regulatora (np. o kilka procent od wartości napięcia znamionowego) wzbudnica nie osiąga pułapu wzbudzenia, a w przypadku regulatora elektromechanicznego nie wystąpi opóźnienie spowodowane czasem samowzbudzenia wzbudnicy. Podobnie jak oscylogramy na rys. 20a i b ilustrowały przebiegi regulacyjne generatora 64MVA i 17MVA przy zmianie nastawień regulatora, rys. 21a i b przedstawia przebiegi regulacyjne dla tych generatorów przy zrzuceniu obciążenia indukcyjną mocą bierną generatorów (przy zerowej mocy czynnej) za pomocą wyłącznika mocy.



Rys. 21a. Przebiegi regulacji wzbudzenia generatora po wyłączeniu obciążenia biernego (indukcyjnego) generatora 69 MVA wyposażonego w nowoczesny samoczynny regulator napięcia (regulator ze wzmacniaczem maszynowym). Oznaczenia jak na rys. 20a, ponadto przebieg  $I_m$  oznacza prąd wzbudzenia wzbudnicy generatora.

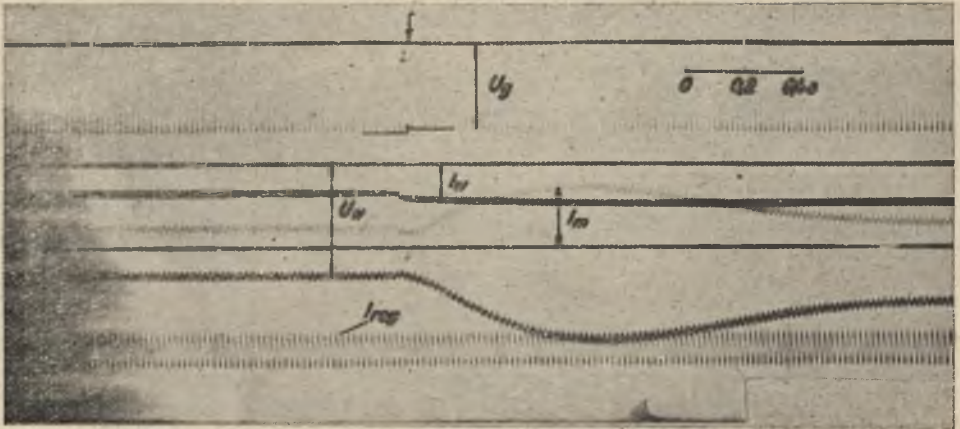
Na oscylogramach widoczny jest pojawiający się w chwili wyłączenia prąd wyrównawczy w obwodzie wzbudzenia generatora obniżający prawie natychmiast w chwili wyłączenia prąd wzbudzenia generatora  $I_w$  (odpowiednio do zachowania nie zmienionych liniozwojów splatających się z wirnikiem  $E_q = \text{const}$ ). Samoczynny regulator napięcia sprowadza napięcie wzbudnicy  $U_w$  do obniżonej wartości odpowiadającej ustalonemu napięciu generatora. Szybko tłumione oscylacje napięcia zasilania uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy  $U_a$  (napięcia amplidyny) widoczne na oscylogramie 21a (których źródło tkwi w wewnętrznych oddziaływaniach amplidyny) nie wpływają prawie zupełnie na przebieg prądu wzbudzenia wzbudnicy  $I_m$  i napięcia wzbudnicy  $U_w$ .



Rys. 21b. Przebiegi regulacji wzbudzenia generatora po wyłączeniu obciążenia biernego (indukcyjnego) generatora 17 MVA wyposażonego w elektromechaniczny samoczynny regulator napięcia. Oznaczenie jak na rys. 20b ponadto przebieg I oznacza prąd twornika generatora

Oscylogram na rysunku 21b wykazuje o wiele wolniejszy przebieg regulacji, mimo iż stała czasowa  $T_{do}$  generatora 17 MVA wyposażonego w elektromechaniczny regulator napięcia jest blisko 2-krotnie mniejsza. Napięcie generatora wykazuje na rys. 21b na skutek zbyt wolnej regulacji początkową tendencję podwyższania napięcia po zrzuconiu obciążenia. Elektromechaniczny regulator zmieniający opór w obwodzie wzbudzenia samowzbudnej wzbudnicy bocznikowej nie może zmienić kierunku napięcia zasilania uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy w stanie nieustalonym po wyłączeniu mocy biernej generatora tak jak to ma miejsce w nowoczesnym układzie regulacji w przykładzie na rys. 21a. Przyczynia się to w dużym stopniu do zwolnienia przebiegu regulacyjnego. Na rysunku 22 przedstawiono oscylogram regulacji napięcia generatora 64 MVA przy zrzuconiu obciążenia generatora pojemnością w mocą bierną wynoszącą  $0\frac{1}{4} S_N$ . Prąd wyrównawczy w wirniku powoduje szybki wzrost prądu wzbudzenia  $I_w$  generatora odpowiednio do zachowania liniozwojów sprzężonych

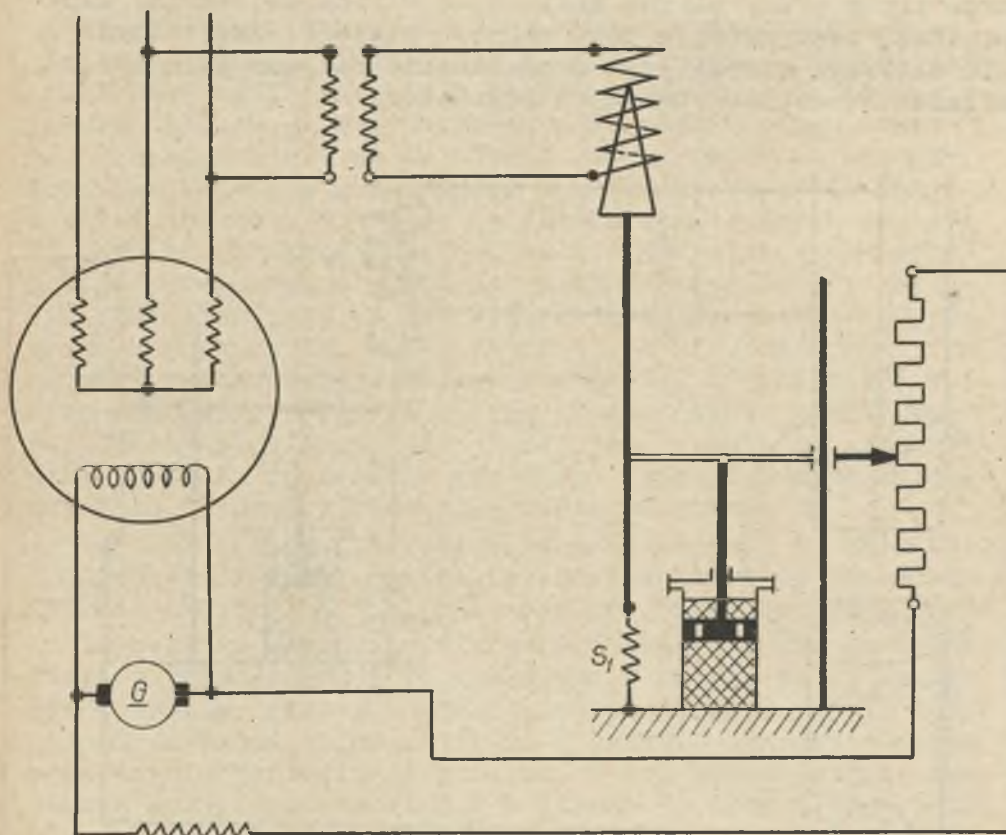
z wirnikiem. Napięcie wzbudnicy  $U_w$  narasta pod wpływem działania samoczynnego regulatora napięcia i ustala się praktycznie po jednym przeregulowaniu. Napięcie generatora, które się zmniejszyło w pierwszej chwili łączeniowej, nie wykazuje praktycznie przeregulowania.



Rys. 22. Przebiegi regulacji wzbudzenia generatora po wyłączeniu obciążenia pojemnościowego generatora 69 MVA wyposażonego w nowoczesny pospieszny regulator napięcia (regulator ze wzmacniaczem maszynowym)

Najprostszy, ale jednocześnie zwykle najmniej pożądany sposób stabilizacji osiągamy przez zwiększenie współczynnika statyki podstawowej charakterystyki napięcia. Przy zwiększonym współczynniku statyki napięcia zmniejsza się przeregulowanie wzbudnicy w czasie przebiegów regulacyjnych i zmniejsza się tendencja do przebiegów niestabilnych. Znacznie korzystniejszy jest taki sposób stabilizacji regulatora, który by zwiększał wydatnie tłumienie oscylacji nie wpływając jednocześnie na wielkość współczynnika statyki (w stanie ustalonym). W regulatorach elektromechanicznych można uzyskać taką stabilizację przez dobór tłumienia elementów ruchomych regulatora. Rozróżniamy tu 2 sposoby realizacji tłumienia regulatorów elektromechanicznych:

- 1) tłumienie sztywne,
- 2) tłumienie elastyczne

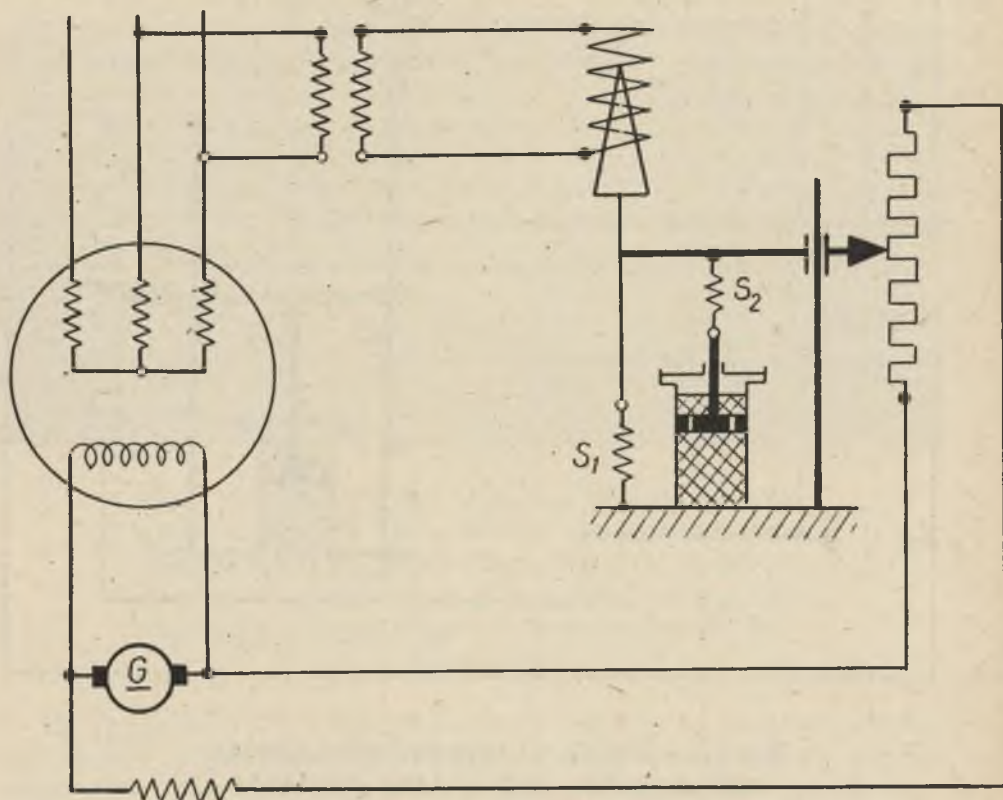


Rys.23. Model elektromechanicznego samoczynnego regulatora napięcia z tłumieniem sztywnym

Rysunek 23 przedstawia prosty model regulatora elektromechanicznego wyposażonego w tłumienie sztywne wykonane za pomocą tłumika olejowego. Siła przyciągania rdzenia przez solenoid zasilany napięciem regulowanym równoważy ciężar rdzenia oraz naciąg sprężyny  $S_1$ , która służy do regulacji współczynnika statyki regulatora. Współczynnik statyki możemy zmieniać przez dobór tzw. stałej sprężyny. Rdzeń związany jest mechanicznie z kontaktami ślizgowymi zwierającymi opory dodatkowe w obwodzie wzbudzenia wzbudnicy oraz z tłoczkiem tłumika hydraulicznego. Zamiast tłumika olejowego można zastosować tłumiki powietrzne lub magnetyczne oparte na zasadzie momentu hamującego wywoła-



nego przez prądy wirowe indukowane w ruchomej tarczy aluminiowej zanurzonej w polu magnesu stałego. Przy tłumieniu sztywnym tarcza jest mechanicznie sztywno związana z układem kontaktów ruchomych regulatora.



Rys.24. Model elektromechanicznego samoczynnego regulatora napięcia z tłumieniem sprężystym

Rysunek 24 przedstawia model regulatora elektromechanicznego wyposażonego w tłumienie sprężyste wykonane za pomocą tzw. sprężyny odwodzającej  $S_2$  łączącej układ kontaktów ruchomych regulatora z tłumikiem olejowym. Dzięki sprężynie odwodzającej regulator zachowuje się w pierwszej chwili obniżki napięcia po zwycięże obciążenia generatora jak regulator o zwiększonym współczynniku statyki tzw. przejściowym współczynniku statyki. Siła przyciągania solenoidu pokonuje dodatkową siłę naciągu sprężyny  $S_2$ . Stałe

sprężyny  $S_2$  i  $S_1$  określają chwilową wartość współczynnika statyki regulatora. W miarę upływu czasu maleje naciąg sprężyny  $S_2$ , jednocześnie jednak rośnie napięcie generatora i zmniejsza się siła przyciągania solenoidu, dzięki czemu regulator utrzymuje w dalszym ciągu znaczne przeregulowanie aż do chwili, kiedy napięcie generatora zwiększy się do wartości bardzo zbliżonej do wartości ustalonej. W stanie ustalonym współczynnik statyki regulatora określony jest wyłącznie przez stałą sprężyny  $S_1$ . Nowoczesne elektromagnetyczne regulatory napięcia zbudowane przy użyciu wstępnych wzmacniaczy maszynowych, magnetycznych lub elektronowych nie posiadają ruchomego mechanicznego układu kontaktów. Stabilizacja takich regulatorów odbywa się na drodze czysto elektrycznej. Układ stabilizacyjny oparty jest zwykle na zasadzie wykorzystania sprzężenia zwrotnego reagującego na zmiany napięcia wzbudnicy (pochodną napięcia wzbudnicy).

Wartość stałej czasowej członu odwodzenia  $T_s$ , charakteryzująca opóźnienie działania sprzężenia przez pochodną posiada podstawowe znaczenie dla przebiegu regulacyjnego.

Sprzężenie zwrotne wytwarza dodatkowy impuls na wzmacniający człon regulatora wyłącznie w czasie zmian napięcia wzbudnicy (zatem w stanie nieustalonym). Impuls ten obniża szybkość zmian napięcia i zmienia charakter przeregulowania napięcia generatora. W ten sposób można zapewnić przebiegi stabilne i zbliżone do optymalnych przebiegów periodycznych tłumionych leżących tuż poza granicą przebiegów aperiodycznych. Sprzężenie zwrotne zwiększa tłumienie procesu regulacyjnego nie wpływając na pracę regulatora w stanie ustalonym. Stabilizujące sprzężenie zwrotne, którego działanie uzależnione jest od pochodnej napięcia wzbudnicy nosi nazwę członu odwodzenia regulatora. Funkcję przejścia członu odwodzenia można przedstawić w postaci przybliżonej równaniem operatorowym

$$\frac{U_{wy}(p)}{U_{we}(p)} = \frac{p T}{1 + p T_s} U_w(p).$$

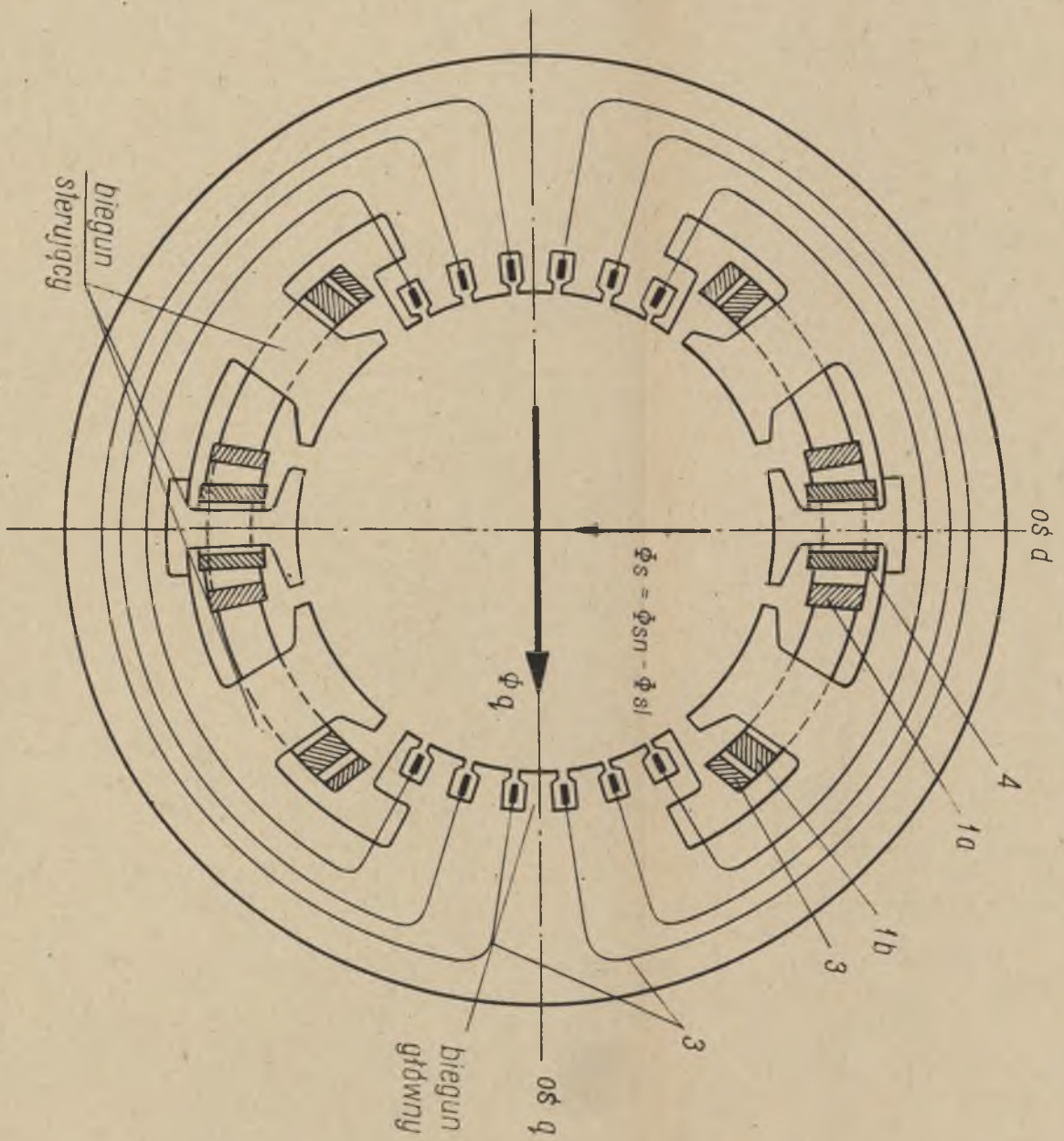
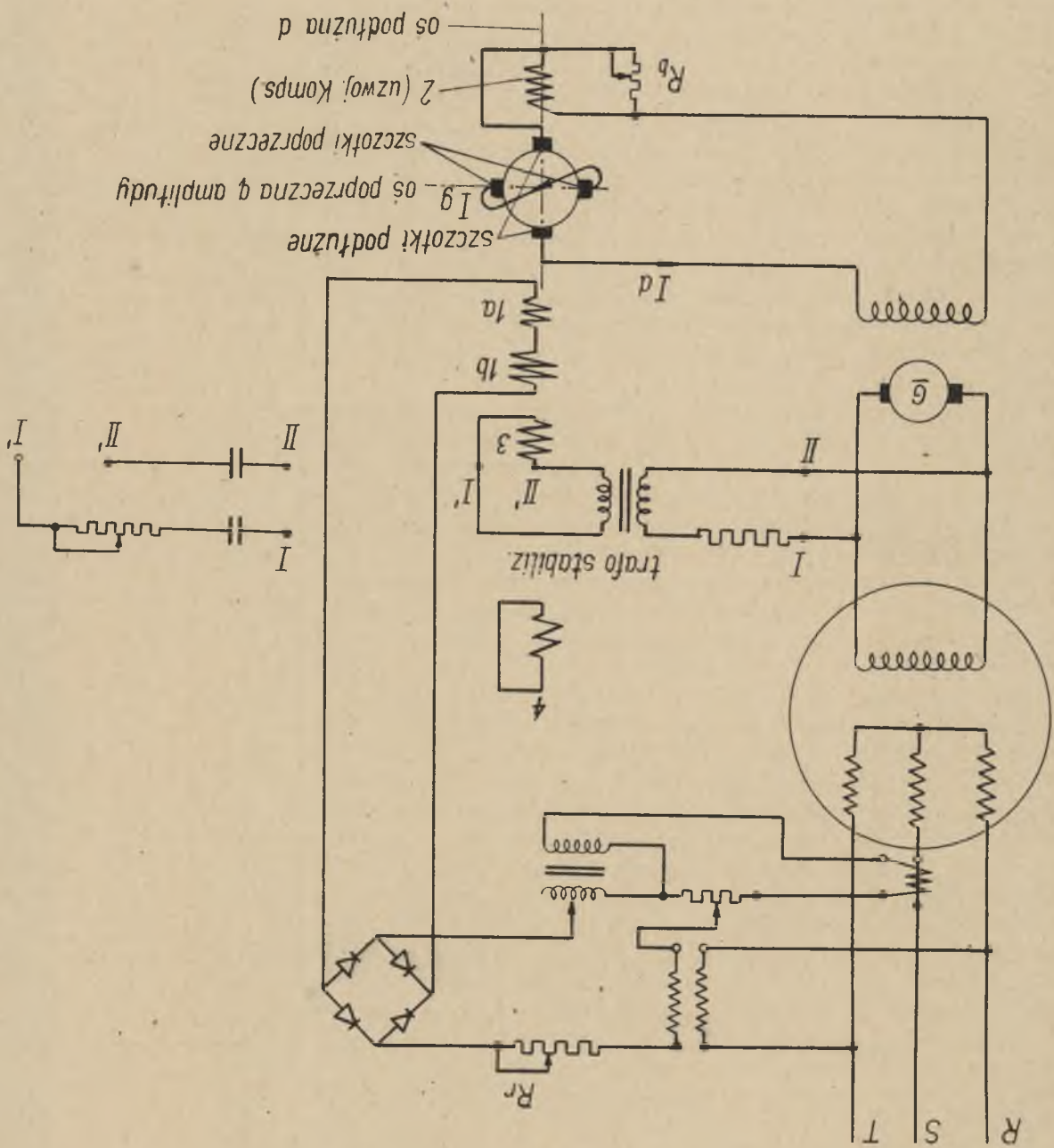
Oprócz zadania zapewniania stabilnych przebiegów regulacyjnych generatora przeznaczeniem członu odwodzenia jest zapewnić optymalne przebiegi regulacyjne przy większych i średnich zmianach napięcia generatora, w czasie których wzmacniacze wstępne i człon pomiarowy osiągają szczytowe wartości wysterowania. Punkty pracy wzmacniaczy wstępnych przemieszczają się w czasie takich przebiegów regulacyjnych poza zakres liniowych charakterystyk statycznych do tzw. pułapu wysterowania. Optymalna wartość stałej czasowej członu odwodzenia jest uzależniona od stałej czasowej generatora  $T_{do}$ . Jest to przeważnie wartość duża w porównaniu ze stałymi czasowymi, wzmacniaczy wstępnych i wzbudnicy. Wynosi przeciętnie  $(0,1 \dots 0,6) T_{do}$ .

Na rysunku 25 przedstawiono dla przykładu najprostszY układ regulacji napięcia generatora, w którym wzbudnica główna zasilana jest ze specjalnego wzmacniacza maszynowego (amplidyny). Amplidyna pracuje jako dwustopniowy wzmacniacz maszynowy. Na pierwszym stopniu wzmocnienia amplidyny ulega wzmocnieniu siła magnetomotoryczna wytworzona przez podstawowe uzwojenie sterujące 1 zasilane wyprostowanym napięciem generatora zbieranym z przekładników napięciowych. Wzmocnienie siły magnetomotorycznej uzwojenia sterującego występuje w obwodzie twornika zwartym przez szczotki poprzeczne amplidyny. Siła magnetomotoryczna wytworzona przez prąd zamykający się przez szczotki poprzeczne przewodzące prąd poprzeczny twornika  $I_0$ , (który wyindukowany jest przez strumień uzwojenia sterującego) przewyższa wielokrotnie siłę magnetomotoryczną uzwojenia sterującego. Wystarczy nieznaczna moc doprowadzona do uzwojenia sterującego, by wydzielić stosunkowo dużą moc w obwodzie twornika zwartym przez szczotki poprzeczne.

Na drugim stopniu wzmocnienia ulega dalszemu wzmocnieniu moc wydzielana w obwodzie poprzecznym twornika. Zwielokrotnioną moc użytkową zbieramy ze szczotek podłużnych amplidyny. Napięcie na szczotkach podłużnych wyindukowane zostaje przez strumień wytworzony przez prąd poprzeczny. Dla skompensowania szkodliwego oddziaływania twornika od prądu obciążenia amplidyny  $I_d$  zbieranego ze szczotek podłużnych amplidyna wyposażona jest w specjalne, rozłożone uzwojenie kompensacyjne 2 znoszące amperozwoje oddziaływania twornika wytworzone przez prąd obciążenia amplidyny  $I_d$ .

Rys. 25. Układ nowoczesnej regulacji napięcia z wzmacniaczem maszynowym (amplidyń)

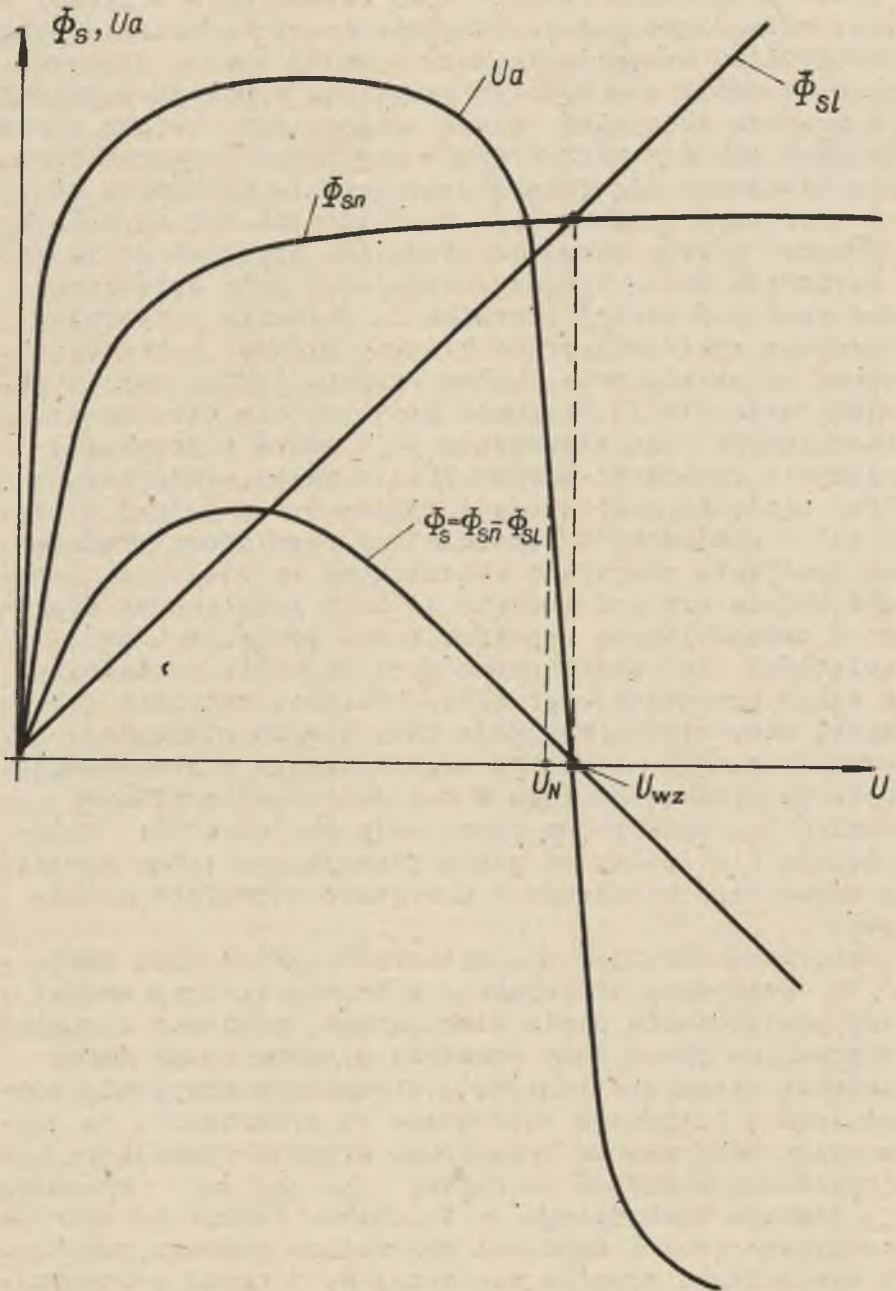
Elektryka 5



Rys. 26. Budowa stojana amplidyńy (magniconu).

Przez połączenie dwóch stopni wzmacnienia w jednej maszynie osiągnięto proste rozwiązanie wzmacniacza o dużym współczynniku wzmacnienia mocy i małej stałej czasowej. Amplidyna użyta w powyższym przykładzie układu regulacyjnego posiada specjalną budowę stojana tzw. budowę z rozdzielonym obwodem magnetycznym podłużnym i poprzecznym, którą otrzymuje się dzięki zastosowaniu uzwojenia twornika o skróconym poskoku [1]. W amplidynie takiej pole  $\Phi_s$  wytworzone przez uzwojenie sterujące przenika do twornika wyłącznie przez bieguny sterujące, pole wytworzone przez prąd poprzeczny twornika  $I_q$  przenika z twornika do stojana wyłącznie przez bieguny główne poprzeczne. Rysunek 26 przedstawia budowę stojana takiej amplidyny. Dzięki rozdzieleniu biegunów głównych (dla strumienia  $\Phi_q$ ) i sterujących (dla strumienia  $\Phi_s$ ) można w powyższej amplidynie rozwiązać bardzo prosto układ reagujący na zmiany napięcia generatora i zjednoczyć w jednej maszynie człon pomiarowy i wzmacniający regulatora. Podstawowe uzwojenie sterujące umieszczone na biegunie sterującym składa się z 2 zwojnic 1a i 1b połączonych szeregowo i umieszczonych współśrodkowo. Zwojnica o małej rozpiętości 1a umieszczona jest na zębie posiadającym silne przewężenie przekroju żelaza, zwojnica 1b o dużej rozpiętości obejmuje cały biegun sterujący. Na skutek znacznego nasycenia magnetycznego w przewężeniu przekroju środkowego zęba w osi podłużnej amplidyny strumień  $\Phi_{sn}$  wytworzony przez małą zwojnicę 1a zależy silnie nieliniowo od prądu sterującego (stąd wywodzi się nazwa tego uzwojenia - uzwojenie sterujące nieliniowe).

Natomiast strumień  $\Phi_{sl}$  wytworzony przez dużą zwojnicę 1b uzwojenia sterującego wykazuje liniowy wzrost w miarę powiększania prądu sterującego, ponieważ strumień ten przenika przez duży przekrój bieguna (stąd nazwa uzwojenia sterujące liniowe). Strumienie uzwojenia nieliniowego i liniowego skierowane są przeciwnie, na skutek czego przy pewnym określonym prądzie sterującym znika wypadkowy strumień sterujący  $\Phi_s = \Phi_{sh} - \Phi_{sl}$  wychodzący z bieguna sterującego do twornika. Uzwojenie sterujące zasilane jest z napięcia generatora poprzez przekładnik napięciowy, opornik nastawczy  $R_r$  i układ prostowników suchych, w wyniku czego otrzymujemy zależność napięcia wyjściowego amplidyny  $U_a$  od napięcia generatora  $U$  przedstawioną na rys. 27.



Rys.27. Charakterystyki statyczne amplidyńy

Na rysunku przedstawiono również zależność składowych strumieni obu uzwojeń sterujących 1a i 1b od napięcia generatora. W wyniku silnego nasycenia zęba z nieliniowym uzwojeniem sterującym otrzymujemy przy dużym wzmocnieniu amplidyny bardzo stromą statyczną charakterystykę wyjściową  $U_a = f(U)$ . Dla powiększenia stromości charakterystyki można stosować specjalne materiały magnetyczne o ostrym kolanie krzywej magnesowania dla środkowego zęba bieguna sterującego przymocowanego do jarzma stojana amplidyny. Reszta stojana wykonana jest z żelaza zwykłego. Dla zmniejszenia stałej czasowej oraz zmniejszenia szerokości pętlicy histerezy magnetycznej stojan wykonany jest z pakietu blach twornikowych podobnie jak wirnik.

W powyższym układzie regulacyjnym otrzymujemy statyczną charakterystykę regulatora  $U_{reg} = f(I_a)$  przy  $I_p = \text{const.}$  Współczynnik statyki  $s_0$  jest stosunkowo mały, rzędu 0,5%. Regulacja współczynnika statyki odbywa się za pomocą kompensacji regulatora.

Stabilizację regulatora osiągamy przez zastosowanie członu odwodzenia reagującego na pochodną napięcia wzbudnicy. Amplidyna wyposażona jest w dodatkowe uzwojenie stabilizujące 3 umieszczone na biegunie sterującym (uzwojenie to obejmuje cały biegun sterujący podobnie jak liniowe uzwojenie sterujące) i zasilane jest z wtórnej strony transformatora stabilizacyjnego, którego strona pierwotna przyłączona jest do zacisków wzbudnicy. Przez dobór szczeliny w obwodzie magnetycznym transformatora stabilizacyjnego oraz dobór oporów dodatkowych w obwodzie strony pierwotnej transformatora można uzyskać optymalne przebiegi regulacyjne. Szczelina powietrzna w obwodzie magnetycznym transformatora stabilizacyjnego jest konieczna dla uniknięcia nasycenia od stałej składowej napięcia wzbudnicy. Nasycenie obwodu magnetycznego transformatora obniża indukcyjność wzajemną uzwojeń transformatora.

Uzwojenie stabilizujące 3 amplidyny przyłączamy w ten sposób do transformatora stabilizacyjnego, by otrzymać zwolnienie zmian napięcia wzbudnicy w czasie przebiegów nieustalonych. Oprócz uzwojenia stabilizującego amplidyna posiada dodatkowe zwarte uzwojenie tłumiące 4 obejmujące środkowy ząb bieguna sterującego, które również stabilizuje układ regulacyjny. Jednakże głównym jego przeznaczeniem jest zmniejszyć szybkość obniżki strumienia  $\Phi_{sn}$  nieliniowego uzwojenia sterującego przy zwarciovych.

załamaniami napięcia generatora. Zgodnie z prawem Lenza zawarte uzwojenie sprzeciwia się zmianom strumienia sprzężonego z tym uzwojeniem.

Na skutek działania uzwojenia tłumiącego zwiększa się wydatnie napięcie amplitudyny przy przejściowych silnych obniżkach napięcia generatora. Otrzymujemy znacznie większe napięcie amplitudyny w porównaniu z charakterystyką statyczną regulatora  $U_a = f(U)$  i w ten sposób możemy uzyskać wysoki współczynnik forsowania w czasie zwarciovych obniżek napięcia. Niestety w miarę upływu czasu trwania obniżki napięcia zanika skuteczność uzwojenia tłumiącego z powodu wygasania prądów wyrównawczych w obwodzie uzwojenia 4, jednakże maleje równocześnie prawdopodobieństwo dłuższego czasu trwania zwarcia. Zamiast transformatora stabilizacyjnego można użyć układu kondensatorów (rys. 25), który przepuszcza prąd do uzwojenia 3 przy zmianach napięcia wzbudnicy.

Nastawienia stabilizacji dokonujemy przez dobór oporów dodatkowych. Podobnie jak przy transformatorze stabilizacyjnym konieczne jest prawidłowe przyłączenie do uzwojenia amplitudyny. Przy fałszywym połączeniu otrzymuje się niestabilny układ regulacyjny.

Pojemnościowe sprzężenia zwrotne mają w zasadzie zastosowanie przy małych mocach przenoszonych przez człon stabilizacyjny, zatem w takich układach, w których dzięki dużemu współczynnikowi wzmocnienia układu regulacji otrzymuje się znikome moce sterowania pierwszego stopnia wzmocnienia. Tam gdzie konieczne są większe moce przenoszone przez stabilizacyjne sprzężenie zwrotne, stosuje się raczej transformatory stabilizacyjne. W przykładzie na rys. 25 dla otrzymania takiej samej skuteczności sprzężenia zwrotnego za pomocą pojemności jak przy użyciu transformatora stabilizacyjnego należałoby użyć pojemności rzędu  $100 \mu F$ .

Poza członem odwodzenia znajdują zastosowanie w układach regulacyjnych inne stabilizacyjne sprzężenia zwrotne obejmujące całą kaskadę (lub jej część) wzmacniaczy wstępnych np. sprzężenie zwrotne reagujące na pochodną napięcia wyjściowego amplitudyny (pierwotna strona drugiego transformatora stabilizacyjnego przyłączona jest na zaciski amplitudyny, wtórna strona zasila dodatkowe uzwojenie stabilizujące).

W odróżnieniu od członu odwodzenia te stabilizacyjne sprzężenia zwrotne mają przeważnie małą stałą czasową  $T_s$



i stabilizują one przebiegi regulacyjne przy małych odchyłkach napięcia generatora, w czasie których nie następuje szczytowe wysterowanie wzmacniaczy.

Współczynnik wzmocnienia całego otwartego układu regulacyjnego wynika ze stromości charakterystyk poszczególnych jego stopni wzmocnienia. Przez współczynnik wzmocnienia napięcia członu układu regulacyjnego definiujemy stosunek przyrostu napięcia wyjściowego do przyrostu napięcia wejściowego otrzymany z charakterystyki stycznej

$$K_u = \frac{dU}{dU_{we}} \frac{WY}{U}$$

W przykładzie na rys. 25 amplitudyna wraz z układem pomiarowym napięcia zawartym w jednej maszynie wykazuje współczynnik wzmocnienia napięcia  $K_{u1}$  otrzymany z charakterystyki wyjściowej przedstawionej na rys. 27.

$$K_{ua} = K_{uo} K_{u1} = - \frac{dU}{dU} \frac{a}{U}$$

gdzie

$K_{uo}$  - współczynnik wzmocnienia członu pomiarowego

$K_{u1}$  - współczynnik wzmocnienia wzmacniacza elektromagnetycznego

W przypadku prostoliniowej charakterystyki wyjściowej w zakresie roboczego odcinka charakterystyki otrzymamy

$$K_{ua} = \frac{U}{U_{wz} - U} \cdot \frac{a}{U}$$

Podobnie jak dla amplitudyny możemy wyznaczyć współczynnik wzmocnienia napięcia wzbudnicy  $K_{um}$  jako stosunek przyrostu napięcia na zaciskach do przyrostu napięcia zasilania jej uzwojenia wzbudzenia.

Przy założonej stałej impedancji obciążenia można wyznaczyć współczynnik wzmocnienia napięcia generatora

$$K_{ug} = \frac{dU}{dU_w} \approx \frac{U}{U_w}$$

Cechą charakterystyczną generatora synchronicznego rozpatrywanego jako człon składowy układu regulacji jest to, że zarówno jego współczynnik wzmocnienia, jak również stała czasowa zależą od warunków obciążenia. Jeżeli założymy, że generator pracujący samotnie obciążony jest

reaktancją  $X$  przyłączoną do zacisków stojana, współczynnik wzmacnienia napięcia można przedstawić w postaci

$$K_{ug} = \frac{U}{U_w} = \frac{U_N}{I_{wo} R_w} \cdot \frac{X_z}{X_d + X_z}$$

$R_w$  - opór uzwojenia wzbudzenia generatora,  
 $I_{wo}$  - prąd wzbudzenia generatora przy biegu jałowym i napięciu znamionowym twornika.

Stała czasowa  $T_d'$  uzależniona jest od reaktancji obciążenia

$$T_d' = T_{do}' \frac{X_d' + X_z}{X_d + X_z}$$

$T_{do}'$  - stała czasowa generatora przy biegu jałowym (przy otwartym uzwojeniu twornika).

Poszczególne stopnie wzmacnienia układu regulacyjnego amplitudyna, - wzbudnica - generator połączone są łańcuchowo. Wypadkowy współczynnik wzmacnienia napięcia otwartego układu regulacji jest iloczynem współczynników wzmacnienia poszczególnych stopni

$$\frac{U}{U_{wr} - U} = K_{ua} \cdot K_{um} \cdot K_{ug} = K_u$$

Stąd dla zamkniętego układu regulacji otrzymamy w stanie ustalonym

$$U = U_{wr} \frac{K_u}{K_u + 1}$$

Z otrzymanej relacji charakterystycznej dla zamkniętego układu regulacji wynika, że napięcie generatora ustala się przy dodatnim wypadkowym współczynniku wzmacnienia na wartości mniejszej od  $U_o$ . Rozbieżność napięcia  $U$  od  $U_{wr}$  maleje w miarę wzrostu wypadkowego współczynnika wzmacnienia napięcia  $K_u$ . Przy ujemnym wypadkowym współczynniku wzmacnienia ustalone napięcie wypada mniejsze od  $U_{wr}$ . Ponieważ w miarę wzrostu impedancji obciążenia generatora maleje współczynnik wzmacnienia  $K_{ug}$ , rośnie rozbieżność napięcia na zaciskach generatora od napięcia  $U_o$ . W miarę malenia napięcia  $U$  rośnie ustalone napięcie wyjściowe amplitudyny odpowiednio do charakterystyki statycz-

nej na rys. 27. Zmiana napięcia generatora towarzysząca zmniejszeniu reaktancji (obciążenia generatora obciążonego wyłącznie reaktancją indukcyjną) wyznacza współczynnik statyki charakterystyki regulatora.

W przypadku prostoliniowych charakterystyk statycznych współczynnik wzmocnienia napięcia poszczególnych stopni wzmocnienia układu regulacyjnego związany jest ściśle z innym parametrem charakteryzującym poszczególne stopnie wzmocnienia tzw. współczynnikiem wzmocnienia mocy, zdefiniowanym jako stosunek mocy wyjściowej  $P_{wy}$  wzmacniacza do jego mocy wejściowej  $P_{we}$  w stanie ustalonym. Przy prostoliniowych charakterystykach statycznych zachodzi związek

$$K_{wn} = \frac{P_{wy}}{P_{we}} = K_{un}^2 \frac{R_{n we}}{R_{n wy}}$$

W przypadku wzbudnicy współczynnik wzmocnienia mocy przedstawia stosunek oddawanej mocy do mocy wzbudzenia (wynosi przeciętnie 50 - 500).

W przypadku amplitudyny współczynnik wzmocnienia obliczony względem jednego uzwojenia sterującego dochodzi do (6000 - 10 000). W przykładzie na rys. 25 amplitudyna mieści w sobie jednocześnie człon pomiarowy, który formalnie wyodrębniamy w rozważaniach poza obręb stopnia wzmocnienia.

W przypadku gdy charakterystyki wzmacniaczy odbiegają od przebiegów liniowych, posługujemy się zwykle średnimi wartościami współczynników wzmocnienia.

W ten sposób zdefiniowane współczynniki wzmocnienia mocy charakteryzują układ regulacyjny pod względem stopniowania mocy poszczególnych członów wzmacniających i pozwalają na ocenę wymiarów geometrycznych wzmacniaczy.

Przy projektowaniu układu regulacji wzbudzenia generatora tendencja powiększenia współczynnika wzmocnienia poszczególnych członów składowych układu (np. wzmacniacza maszynowego lub wzbudnicy) bez jednoczesnego powiększenia wymiarów wzmacniacza koliduje niejednokrotnie ze stawianymi często wymaganiami otrzymania małych stałych czasowych. Typowy sposób powiększenia wzmocnienia kosztem jednoczesnego powiększenia stałej czasowej utrzymuje się przy wprowadzeniu dodatniego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Takie dodatnie prądowe sprzężenie zwrotne łatwo otrzymać w amplitudynie przez przekompensowanie wzmacniacza za pomocą opornika  $R_b$  zaznaczonego na rys.25.

W miarę zwiększania oporu bocznikującego uzwojenie kompensacyjne amplitudyny powiększa się (wychodząc ze stanu zrównoważenia podłużnego oddziaływania twornika) wzmocnienie strumienia podłużnego amplitudyny na skutek nadwyżki SMM uzwojenia kompensacyjnego ponad SMM podłużnego oddziaływania twornika. W wyniku przekompensowania rośnie stromość charakterystyki wyjściowej amplitudyny  $U_a = f(U)$  i równocześnie powiększa się współczynnik wzmocnienia napięcia  $K_{u1}$ . Powiększenie współczynnika wzmocnienia możemy otrzymać również za pomocą pomocniczego uzwojenia sterującego przyłączonego zgodnie magnesująco do zacisków amplitudyny w układzie dodatniego napięciowego sprzężenia zwrotnego.

Podobnie można zwiększyć współczynnik wzmocnienia wzbudnicy za pomocą dodatniego prądowego sprzężenia zwrotnego (zgodnie magnesującego uzwojenia szeregowego wzbudnicy) lub dodatniego napięciowego sprzężenia zwrotnego (pomocniczego uzwojenia wzbudzenia przyłączonego zgodnie magnesująco do zacisków wzbudnicy).

Przez powiększenie sprzężenia zwrotnego można uzyskać teoretycznie nieskończenie wielki współczynnik wzmocnienia, który wystąpi, gdy wzbudnica pracuje na granicy samowzbudzenia.

Tak np. układ regulacji wzbudzenia firmy ASEA pracuje ze wzbudnicą na granicy samowzbudzenia przy wykorzystaniu napięciowego sprzężenia zwrotnego wzbudnicy. Mimo, że zarówno prądowe, jak i napięciowe dodatnie sprzężenie zwrotne wzbudnicy wpływa podobnie na wypadkowy współczynnik wzmocnienia, należy zwrócić uwagę na to, że zachowanie się wzmacniaczy w stanie nieustalonym przy prądowym i napięciowym sprzężeniu zwrotnym jest zupełnie różne. Wpływ prądowego sprzężenia zwrotnego zależy w stanie nieustalonym od bezwładności magnetycznego następnego stopnia, na skutek czego prądowe sprzężenia zwrotne obejmuje w zasadzie już 2 kolejne stopnie wzmocnienia. Natomiast napięciowe sprzężenie zwrotne praktycznie nie zależy od własności dynamicznych następnego stopnia wzmocnienia i zmienia w zasadzie parametry tylko jednego stopnia wzmocnienia objętego sprzężeniem zwrotnym. Dodatnie napięciowe sprzężenie zwrotne wpływa w przybliżeniu w jednakowym stopniu na powiększenie wypadkowej stałej czasowej i współczynnik wzmocnienia napięcia. Na granicy samowzbudzenia wzbudnica pracuje jako wzmacniacz całkujący w odniesieniu do napięcia  $U_m$  przyłożonego do uzwojenia wzbudzenia

$$U_w = \frac{K_{um0}}{T_{m0}} \int_0^t U_m dt$$

$K_{um0}$ ,  $T_{m0}$  - współczynnik wzmocnienia napięcia i stała czasowa wzbudnicy bez sprzężenia zwrotnego.

Wypadkowy statyczny współczynnik wzmocnienia napięcia wzbudnicy  $K_{um} = \frac{U_w}{U_m}$  dąży do nieskończoności, na skutek czego układ regulacyjny staje się astatyczny. Regulator sprowadza w tym przypadku napięcie generatora do napięcia  $U_0$  niezależnie od impedancji obciążenia generatora. W rzeczywistości na skutek przesunięć i deformacji charakterystyk wzbudnicy pod wpływem histerezy magnetycznej oraz cieplnego współczynnika oporności uzwojeń wzbudnica pracuje w takim układzie zawsze przy lekkim odstrojeniu od granicy samowzbudzenia. Na granicy oraz poza granicą samowzbudzenia wzbudnica jako oddzielny człon wzmacniający pracuje niestabilnie (pod wpływem dowolnie małego impulsu lub magnetyzmu szczątkowego wzbudnica dochodzi do wysokich wartości napięcia twornika) natomiast w zamkniętym układzie regulacyjnym może pracować w pełni stabilnie.

Należy wspomnieć, że dodatnie sprzężenie zwrotne prócz powiększenia stałych czasowych powoduje zawsze niepożądane powiększenie krzywizny charakterystyk statycznych i wzmocnienie wpływu magnetyzmu szczątkowego.

Na ogół typowe własności wzmacniacza - liniowość charakterystyk, stała czasowa i wzmocnienie ulegają zmianie na skutek zmian sprzężenia zwrotnego. Polepszenia jednej własności odbywa się kosztem dwu pozostałych. Zamiast zastosowania dodatnich sprzężeń zwrotnych możemy uzyskać powiększenie wypadkowego współczynnika wzmocnienia przez wprowadzenie większej ilości łańcuchowo połączonych stopni wzmocnienia. Tak np. w przykładzie na rys. 25 otrzymano by zwiększenie ilości stopni wzmocnienia zasilając amplitudę z dodatkowego wzmacniacza magnetycznego o dużym współczynniku wzmocnienia i możliwie małej stałej czasowej. Człon pomiarowy układu regulacyjnego reagujący na odchyłki napięcia generatora przyłączony by był na uzwojenie sterujące wzmacniacza magnetycznego, a amplitudyna spełniałaby wyłącznie rolę pośredniego stopnia wzmocnienia. Charakterystyczny jest przy łączeniu łańcuchowym wzmacniaczy bez sprzężeń zwrotnych wypadkowy współczynnik wzmocnienia wyrażony przez iloczyn współczynników.

wzmocnienia, gdy natomiast zastępcza stała czasowa naturalnego przebiegu regulacji jest tylko sumą stałych czasowych poszczególnych stopni. Niestety w miarę wzrostu ilości stopni wzmocnienia rośnie skłonność zamkniętego układu do niestabilności. Przez dobór odpowiednich stabilizacyjnych sprzężeń zwrotnych i członu odwodzenia można jednak zawsze zapewnić nie tylko stabilność układu, ale ponadto optymalnie tłumione przebiegi regulacyjne.

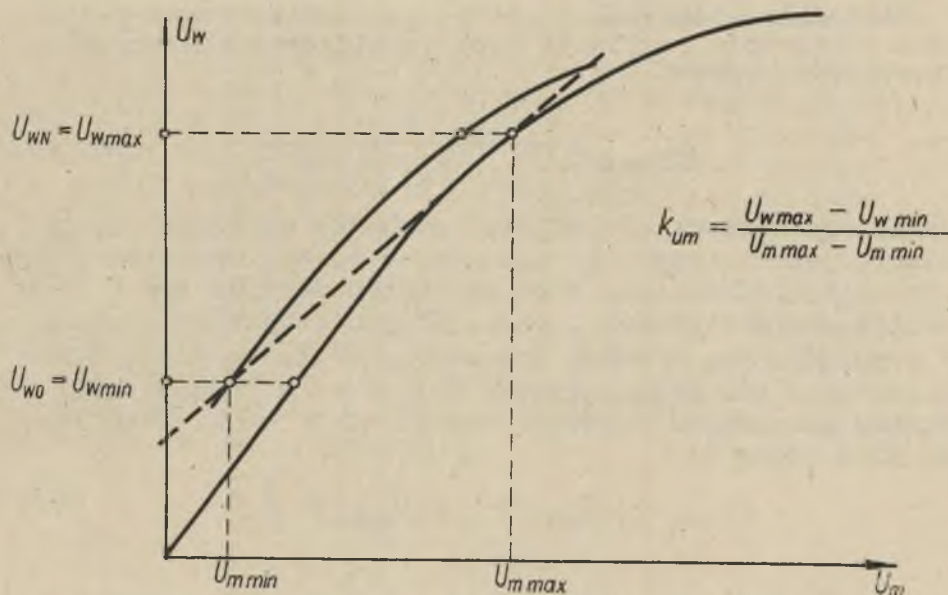
Przez powiększenie wymiarów wzmacniacza szczególnie wymiarów wzbudnicy w celu zwiększenia współczynnika wzmocnienia możemy uzyskać jednocześnie zwiększenie pułapu wysterowania pułap wysterowania osiąga wzbudnica przy nasyceniu obwodu magnetycznego. Zwiększenie pułapu wysterowania wpływa szczególnie korzystnie na powiększenie szybkości przebiegów regulacyjnych przy dużych i średnich zmianach napięcia generatora spowodowanych zmianami obciążenia.

### 5. Dokładność regulacji

Jak wyjaśniono w punkcie 2, statyczna charakterystyka regulatora jest przyczyną niepożądanych zmian współczynników statyki napięcia przy zmianach mocy czynnej generatora.

Na skutek zmian i przesunięć statycznych charakterystyk poszczególnych stopni wzmocnienia w czasie eksploatacji otrzymuje się ponadto odchyłki napięcia generatora nie uwzględnione w poprzednich rozważaniach. Przesunięcia i zmiany charakterystyk spowodowane są nagraniem uzwojeń i wpływem histerezy magnetycznej, ponadto w przypadku wzmacniaczy maszynowych zmianą prędkości obwodowej silnika napędowego na skutek obniżek napięcia zasilania, w przypadku wzmacniaczy magnetycznych zmianami częstotliwości oraz napięcia uzwojeń głównych zasilania. Dokładność regulacji charakteryzujemy przez największe możliwe odchyłki napięcia regulowanego przy przejściu generatora z biegu jałowego do znamionowego obciążenia. Celem wyznaczenia maksymalnej odchyłki napięcia generatora wychodzimy z wartości napięcia wzbudzenia generatora przy biegu jałowym  $U_{wo}$  i przy znamionowym obciążeniu  $U_{wn}$ .

Na podstawie pomierzonych lub obliczonych skrajnie przesuniętych charakterystyk wzbudnicy określamy średnią prostoliniową charakterystykę przechodzącą przez 2 punkty  $U_{wmax}$  i  $U_{wmin}$  (rys. 28).



Rys. 28. Wyznaczenie średniego współczynnika wzmocnienia napięcia wzbudnicy

Nachylenie tej prostej względem napięcia zasilania obwodu uzwojenia wzbudzenia  $U_m$  wzbudnicy określamy jako średni współczynnik wzmocnienia napięciowego wzbudnicy  $k_{um}$ . Na skutek przesunięć charakterystyk wyznaczony średni współczynnik wzmocnienia jest zawsze nie większy od wprowadzonego poprzednio współczynnika wzmocnienia

$$\frac{K_{um}}{k_{um}} \geq 1$$

Analogicznie postępujemy dla przesuniętych charakterystyk amplitudyny mając na uwadze maksymalną ruchową obniżkę napięcia zasilania silnika napędowego i związaną z tym obniżkę prędkości wirowania (wzmocnienie amplitudyny zależy od kwadratu prędkości obrotowej wzmacniacza). Jeżeli w skład układu regulacyjnego wchodzi wzmacniacze magnetyczne, bierzemy pod uwagę 2 skrajne charakterystyki przy najwyższym napięciu zasilania i najniższej częstotliwości oraz najniższym napięciu zasilania i jednocześnie najwyższej częstotliwości.

Maksymalną odchyłkę napięcia generatora charakteryzująca dokładność regulacji przy regulatorze bez strefy nieczułości wynosi

$$\delta_s U_{\max} = \frac{U_{wn} - U_{wo}}{k_{uo} \cdot k_{u1} \cdot \dots \cdot k_{um}} \quad (9)$$

Obliczona maksymalnie możliwa odchyłka napięcia regulowanego jest mniejsza od odchyłek z powodu częściowej kompensacji błędów powstałych na skutek przypadkowych przesunięć charakterystyk poszczególnych stopni wzmacnienia.

# przypadku regulatorów wykazujących strefę nieczułości maksymalną odchyłkę napięcia obliczoną w równaniu (9) musimy powiększyć o strefę nieczułości  $\delta_n U$ . Stąd maksymalna odchyłka

$$U_{\max} = \delta_s U_{\max} + \delta_n U \quad (9a)$$

## 6. Szybkość samoczynnej regulacji wzbudzenia

Szybkość regulacji stanowi jedno z podstawowych kryteriów oceny własności samoczynnych regulatorów wzbudzenia generatorów synchronicznych. Ze względu na uzależnienie szybkości regulacji od zupełnie różnych własności układu regulacyjnego rozróżniamy szybkość regulacji towarzyszącą małym zmianom napięcia występującym przeważnie przy stosunkowo nieznacznych zmianach obciążenia generatora, następnie szybkość regulacji przy średnich i szybkość regulacji przy stosunkowo dużych zmianach napięcia generatora występujących przy znacznych zmianach obciążenia.

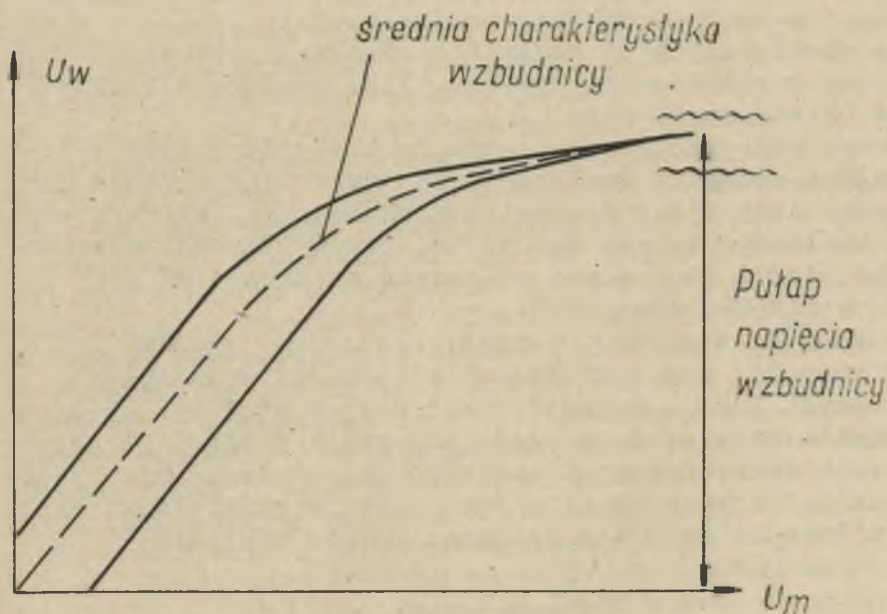
Ponieważ na napięcie generatora wpływają w głównej mierze zmiany obciążenia mocą bierną (występujące na skutek nagłych zmian rozpywu mocy biernych w systemie elektroenergetycznym przy pracy równoległej lub nagłych zmian reaktancji odbioru przy pracy samotnej) ograniczamy się w rozważaniach wyłącznie do rozpatrzenia reakcji regulatorów na zmiany oddawanej mocy biernej generatora.

Przy nieznacznych zmianach obciążenia układ regulacyjny można traktować w przybliżeniu jako liniowy (wszystkie człony układu regulacyjnego pracują w stanie nieustalonym w zakresie liniowych lub w przybliżeniu liniowych charakterystyk).

Szybkość regulacji można ocenić w liniowych układach analitycznie przy posłużeniu się metodami zaczerpniętymi



z teorii automatyki. Przy większych nagłych zmianach napięcia generatora (w szczególności przy zwyżkach obciążenia) układ regulacyjny przechodzi w zakres nieliniowych części charakterystyk. Tak na przykład wzbudnica przy powiększaniu napięcia przyłożonego do uzwojenia wzbudzenia zwiększa napięcie do wartości granicznej określonej przez górne zakrzywienie charakterystyki magnesowania spowodowane przez nasycenie jej obwodu magnetycznego. Dalsze powiększenie napięcia uzwojenia wzbudzenia zwiększa już w znacznie zmniejszonym stopniu napięcie wzbudnicy (rys. 29). Natomiast powiększenie napięcia uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy skraca czas osiągnięcia szczytowego napięcia wzbudnicy.



Rys. 29. Średnia charakterystyka statyczna wzbudnicy  
 $U_w$  - napięcie wzbudnicy  
 $U_m$  - napięcie na uzwojeniu wzbudzenia wzbudnicy

Podobnie zachowują się pozostałe stopnie wzmocnienia układu regulacyjnego (amplidyna, wzmacniacz magnetyczny). Oczywiście pułap napięcia wzbudnicy wpływa w sposób zasadniczy na szybkość regulacji napięcia generatora, który przy przeważającym czasie przebiegu obudowy napięcia

pracuje przy praktycznie stałej wartości wzmożonego napięcia wzbudnicy.

Wynikają stąd sposoby powiększania szybkości regulacji generatora w czasie znacznych zwyżek obciążenia przez zastosowanie wzbudnicy o wysokim pułapie napięcia. Łączy się to zawsze z koniecznością powiększenia wymiarów geometrycznych wzbudnicy i tym samym zwiększeniem kosztu budowy. Naturalnie zachodzi wówczas konieczność odpowiedniego przewymiarowania wszystkich poprzednich stopni wzmocnienia, ponieważ szybkie osiągnięcie pułapu napięcia wzbudnicy uwarunkowane jest dużą wartością napięcia przyłożonego do uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy. Pułap wysterowania powinien wzrastać dla każdego poprzedniego stopnia wzmocnienia i być największy na pierwszym stopniu. Takie stopniowanie pułapu wysterowania nie narządza na ogół trudności, ponieważ powiększenie wymiarów geometrycznych pierwszych wzmacniaczy wstępnych małej mocy w nieznacznym stopniu tylko powiększa łączny koszt układu regulacji.

Oczywiście prócz przebiegów regulacyjnych przy typowo małych zmianach napięcia oraz typowo dużych zmianach napięcia istnieją przebiegi pośrednie, przy których szybkość uzależniona jest zarówno od przewymiarowania wzmacniaczy, jak i od stałych czasowych wyznaczonych przy liniowych charakterystykach.

W czasie trwania obniżki napięcia generatora nasycają się w pierwszej kolejności wzmacniacze pierwszych stopni wzmocnienia o małych stałych czasowych. Wzbudnica może osiągnąć stan nasycenia dopiero po upływie czasu koniecznego do pełnego jej wysterowania. Jeżeli nastąpi tymczasem odbudowa napięcia generatora, napięcie wzbudnicy może nie osiągnąć pułapu napięcia.

## 7. Człon pomiarowy

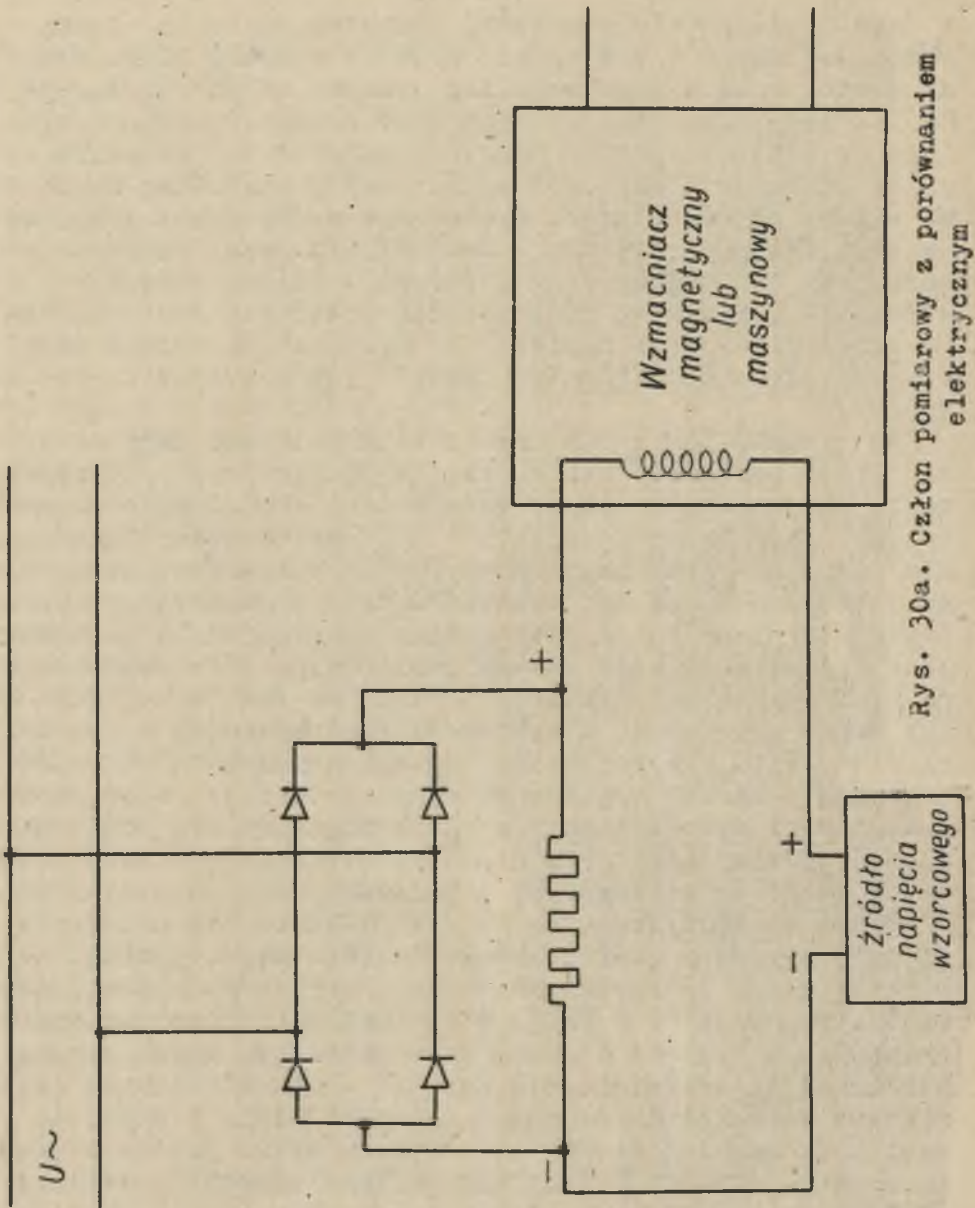
### samoczynnych regulatorów napięcia

Zadaniem członu pomiarowego układu regulacyjnego jest wychwycić odchyłkę wielkości wyjściowej układu (w naszym przypadku napięcia zasilania regulatora) od zadanej wartości wyjściowej układu regulacyjnego. Odchyłka ta przyłożona jest na wejście pierwszego stopnia wzmocnienia układu regulacyjnego w ten sposób, by wzrost odchyłki spowodował zmianę wysterowania układu regulacyjnego

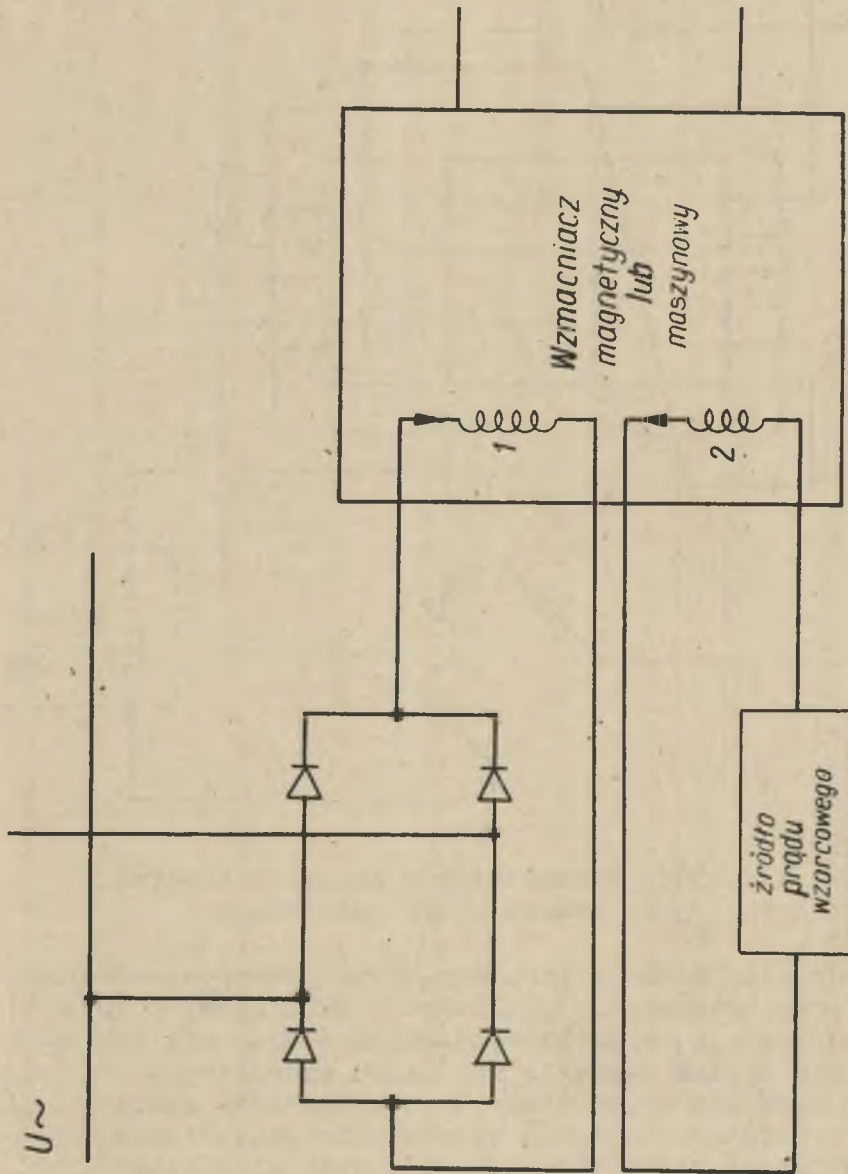
w celu zmniejszenia powstałej odchyłki napięcia. Człon pomiarowy łączy w ten sposób wyjście kaskady kilku stopni wzmacnienia z jego wejściem (zamyka układ regulacyjny). W przypadku nowoczesnych elektromagnetycznych regulatorów napięcia pomiar odchyłki najprościej zrealizować przez porównanie wartości wyjściowej z wartością wzorcową układu regulacyjnego. Wychwycona przez człon pomiarowy odchyłka napięcia ulega wzmacnieniu przez wzmacniacz maszynowy lub magnetyczny i powoduje zmianę napięcia wzbudnicy w kierunku zmniejszenia powstałej odchyłki. Porównanie mierzonego napięcia z napięciem wzorcowym może odbywać się w sposób galwaniczny lub w sposób magnetyczny.

Na rysunku 30a i 30b przedstawiono ideowo najprostszymi człon pomiarowy układu regulacyjnego przy wykorzystaniu porównania w sposób galwaniczny ewentualnie magnetyczny. Zaznaczone uzwojenia 1 i 2 przedstawiają uzwojenia sterujące wzmacniacza maszynowego lub wzmacniacza magnetycznego wchodzącego w skład układu regulacyjnego. Uzwojenia sterujące 1 i 2 przyłączone są przeciwnie magnesująco. Podstawową wadę członu pomiarowego przedstawionego na rys. 30 stanowi trudność otrzymania źródła napięcia lub prądu wzorcowego o wystarczającej stałości w czasie eksploatacji. W wykonaniach zagranicznych (USA) stosuje się często bardzo wygodne rozwiązanie źródła prądu wzorcowego przy wykorzystaniu wkładek magnesów stałych o bardzo dużej trwałości jako elementu sterującego transduktora (w układzie szeregowym) przedstawionego na rys. 30c.

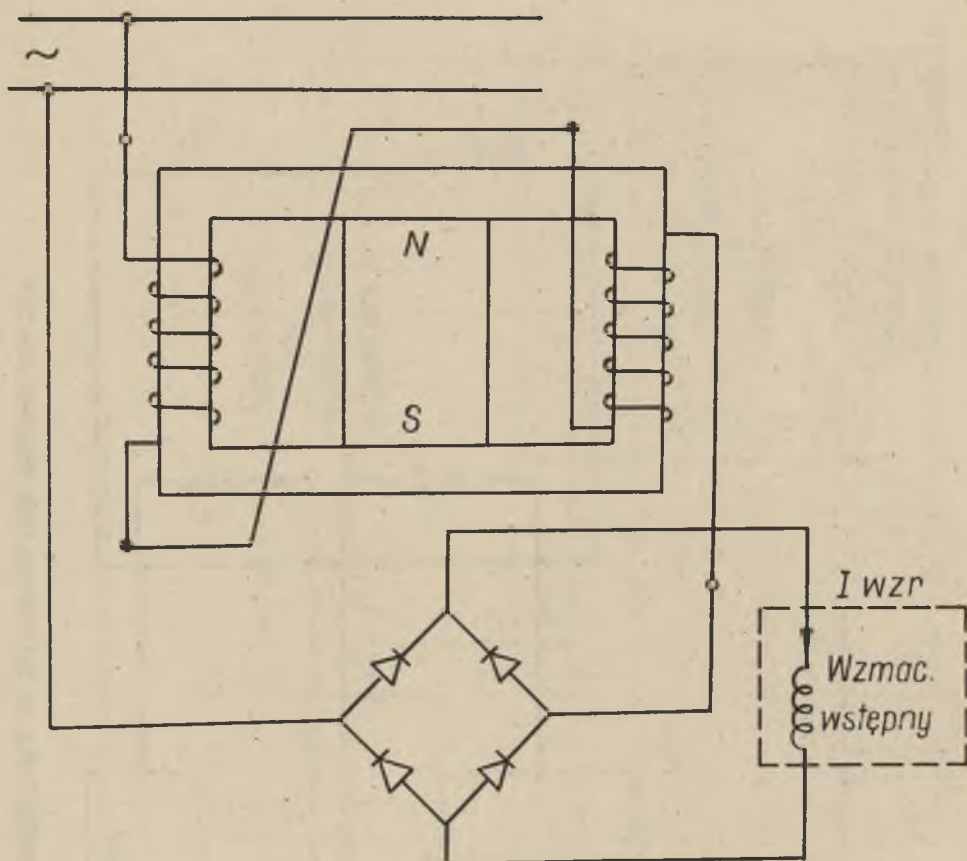
Rdzeń transduktora, na którym mieszczą się uzwojenia główne, wykonany jest z materiału ferromagnetycznego najwyższej klasy o ostrym załamaniu charakterystyki magnesowania. Transduktor pracuje w tym układzie podobnie jak w przypadku wymuszonego prądu magnesującego, dając z dużą dokładnością stałą średnią wartość prądu obciążenia transduktora niezależnie od wahań częstotliwości i napięcia zasilania uzwojeń głównych. Powyższy układ źródła prądu wzorcowego stosowany jest szczególnie chętnie w członie pomiarowym regulacji napięcia hydrogeneratorów, przy których zachodzą wypadki zwyżek częstotliwości dochodzących do 30% częstotliwości znamionowej (w czasie rozbiegu po nagłym wyłączeniu oddawanej mocy czynnej). Powyższe rozwiązanie wymaga doskonałego opanowania technologii magnesów trwałych o znikomym procesie starzenia.



Rys. 30a. Człon pomiarowy z porównaniem elektrycznym



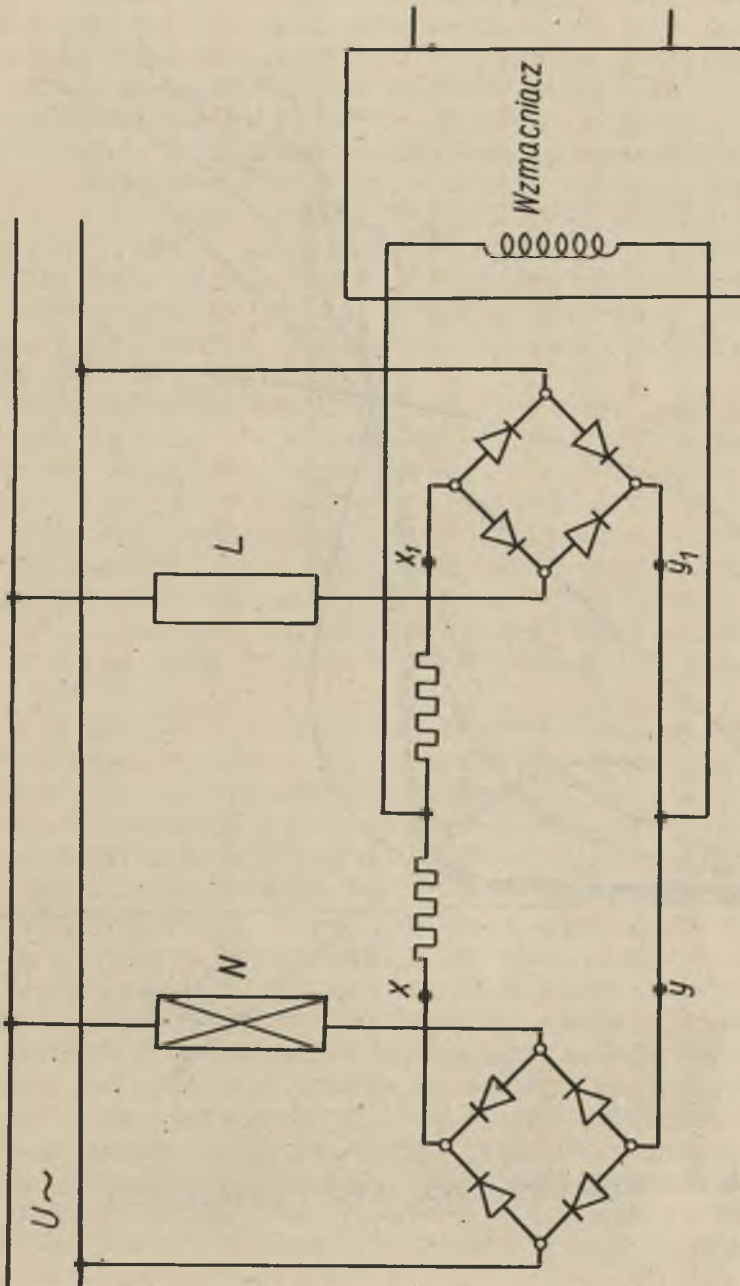
Rys. 30b. Człon pomiarowy z porównaniem magnetycznym



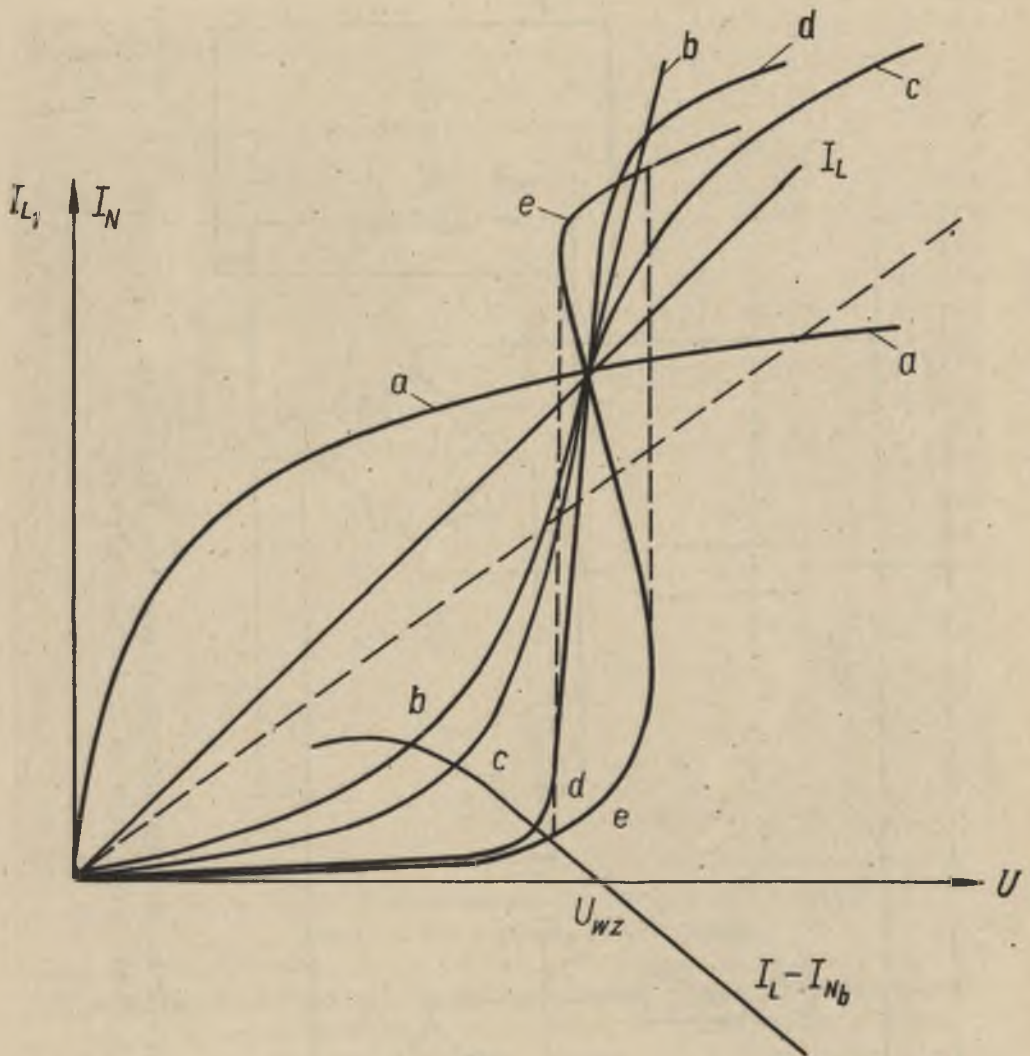
Rys. 30c. Transduktor z magnesem trwałym jako źródło prądu wzorcowego

Technicznie znacznie prostszy człon pomiarowy otrzymujemy przy wykorzystaniu elementów nieliniowych obwodu elektrycznego, przy których można obejść się bez specjalnych źródeł napięcia lub prądu wzorcowego.

Rysunek 31a przedstawia typowy mostkowy człon pomiarowy regulatora napięcia (porównanie galwaniczne) wykorzystującego charakterystykę elementu nieliniowego  $N$  oraz elementu liniowego  $L$ . Na rysunku 31b przedstawiono charakterystykę elementu liniowego i nieliniowego oraz wypadkową charakterystykę wyjściową członu pomiarowego. W szerokim zakresie napięć zasilania członu pomiarowego charakterystyka wyjściowa wykazuje w przybliżeniu liniową zależność.



Rys. 31a. Wykorzystanie elementów liniowych i nieliniowych w członie pomiarowym



Rys. 31b. Charakterystyki członu pomiarowego

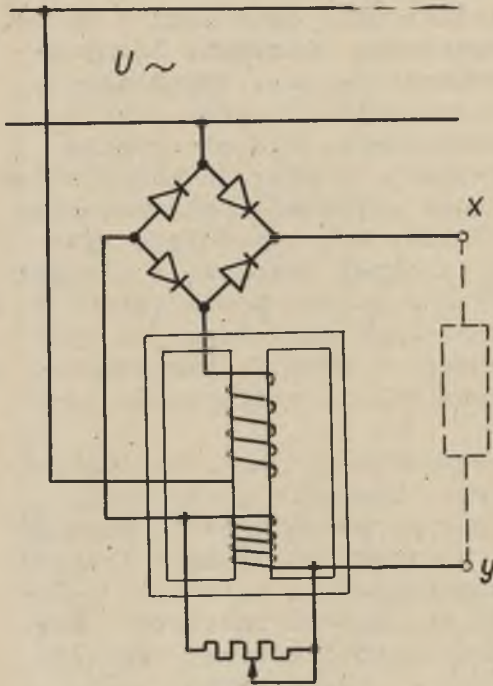


Kształt charakterystyki przedstawiony przez krzywą a otrzymuje się przy użyciu nieliniowych oporności o wysokim cieplnym współczynniku oporności (żarówki, lampy żelazowodorowe lub materiały ceramiczne tzw. termistory), kształt charakterystyki b otrzymuje się przy użyciu dławików nasyconych lub transduktorów. Dla otrzymania charakterystyk o kształcie krzywej b stosuje się również materiały o oporności napięciowo zależnej (półprzewodniki krzemionkowo-węglkowe). Układy wykorzystujące materiały o oporności napięciowo zależnej odznaczają się znikomą małą stałą czasową działania członu pomiarowego w odróżnieniu od układów z materiałami zmieniającymi opór na skutek nagrzania jak również od układów transduktorowych, w których stała czasowa członu pomiarowego jest jeszcze znacznie większa.

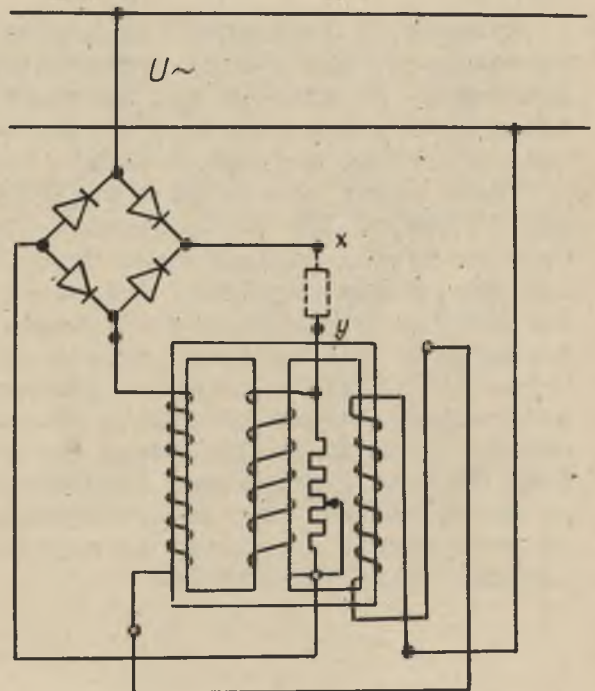
Gdy stała czasowa członu pomiarowego jest współmier-  
na lub większa od jednego okresu napięcia generatora, wówczas układ pomiarowy reaguje na pewną średnią wartość krzywej napięcia generatora (wartość skuteczną w przypadku oporów o dużym cieplnym współczynniku oporności). Natomiast materiały o oporności napięciowo zależnej nadążają ze zmianami oporności przebiegowi krzywej napięcia, w czasie jednego okresu, na skutek czego układy takie reagują na inną średnią wartość krzywej napięcia generatora.

Rysunek 32 i rysunek 33a,b przedstawiają trzy typy stosowanych najczęściej transduktorowych elementów nieliniowych. Na rysunku 31b zaznaczono charakterystykę transduktorowego elementu nieliniowego (krzywa c). Transduktor pracuje z dużym dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

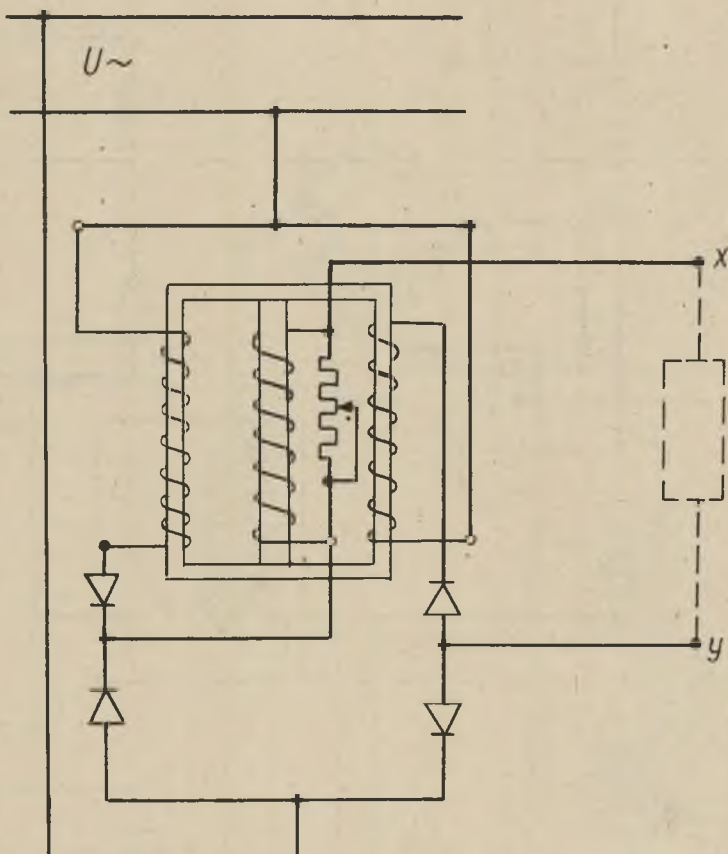
Przez dobór uzwojenia sprzężenia zwrotnego (dobór ilości zwojów lub dobór regulacyjnego oporu bocznikującego uzwojenie napięciowego sprzężenia zwrotnego transduktora) można regulować krzywiznę charakterystyki transduktorowego elementu nieliniowego. Jeżeli wyposażymy transduktor w dodatkowe pomocnicze uzwojenie sterujące (rys. 34) zasilane prądem wyjściowym członu pomiarowego otrzymujemy bardzo korzystną charakterystykę transduktorowego elementu nieliniowego (krzywa d na rys. 31b). Przy doborze granicznego dodatniego sprzężenia zwrotnego można uzyskać prawie astatyczną charakterystykę członu pomiarowego (o nieskończonej stromości na roboczym odcinku charakterystyki).



Rys. 32. Transduktorowy element nieliniowy (układ dławikowy)



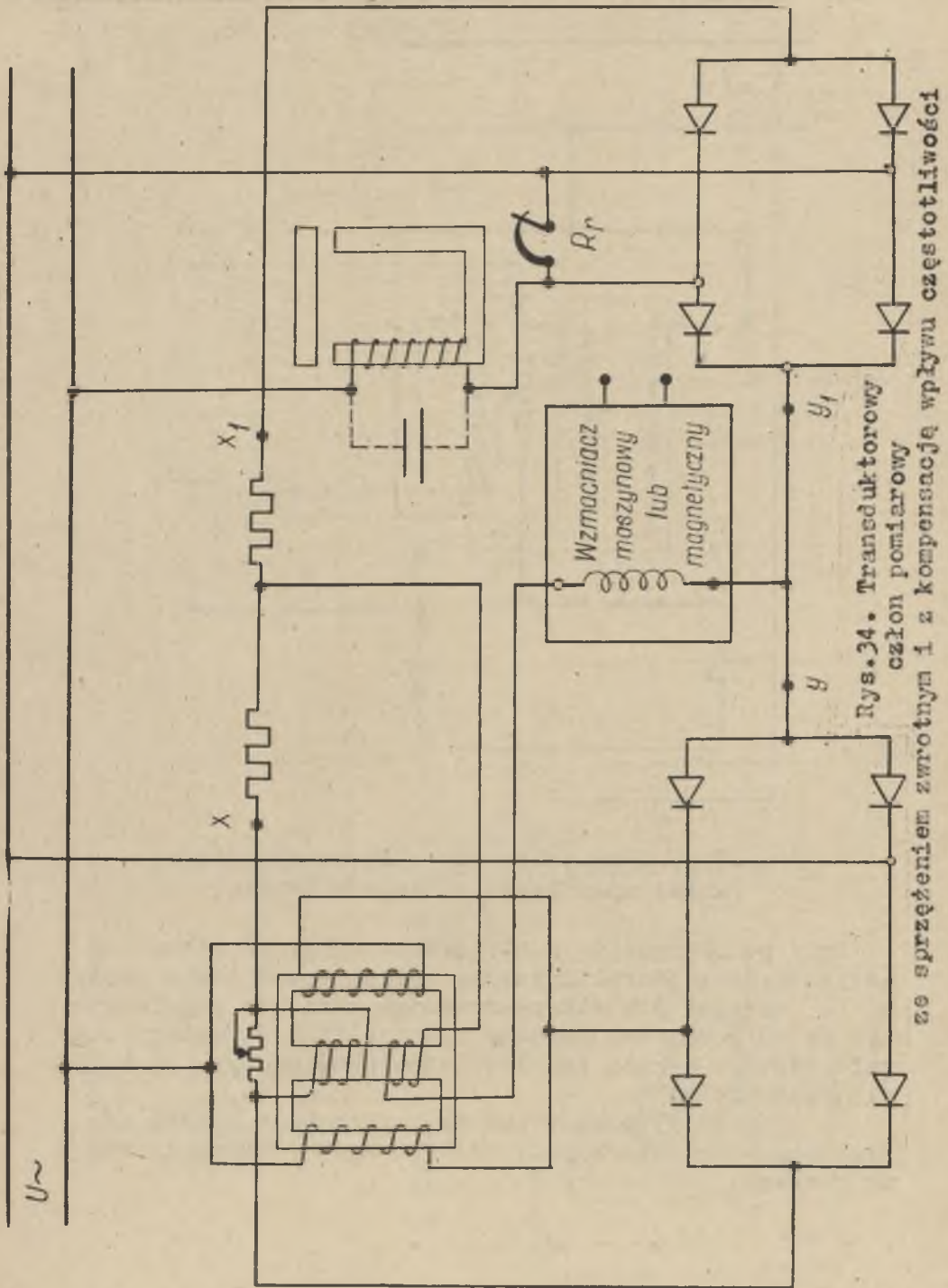
Rys. 33a. Transduktorowy element nieliniowy (układ szeregowy)



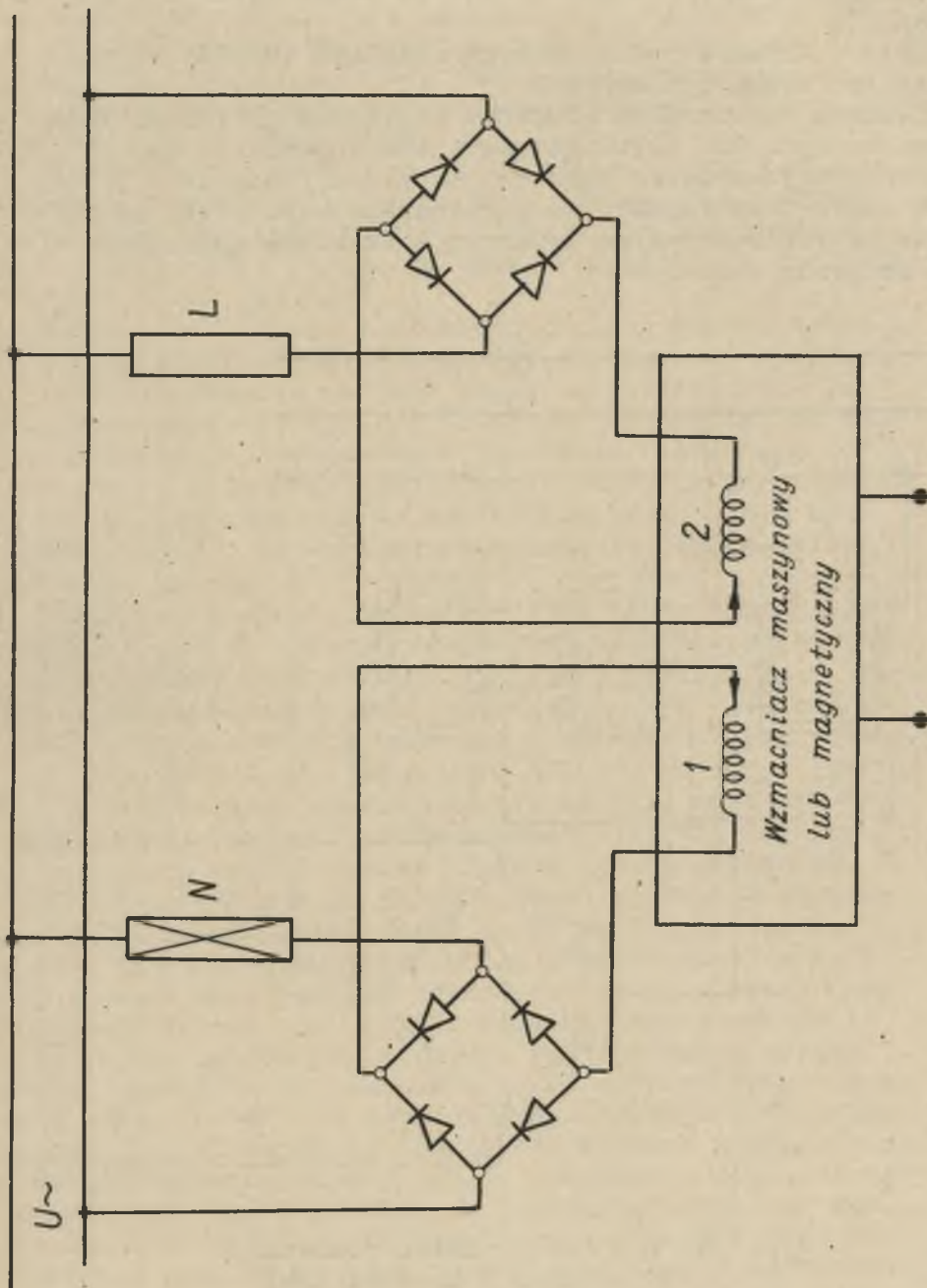
Rys. 33b. Transduktorowy element nieliniowy  
(układ równoległy z samonasyceniem)

Przy ponadgranicznym sprzężeniu zwrotnym otrzymamy antystatyczną charakterystykę członu pomiarowego (krzywa  $e$  na rys. 31b). Przy otwartym układzie regulacyjnym człon pomiarowy pracuje niestabilnie i pomiary charakterystyki wykażą pętlę zaznaczoną na rys. 31 b linią przerywaną.

Na rysunku 35 przedstawiono rozwiązanie członu pomiarowego regulatora przy zastosowaniu porównania magnetycznego.



Rys. 34. Transduktorowy  
 człon pomiarowy  
 ze sprzężeniem zwrotnym i z kompensacją wpływu częstotliwości

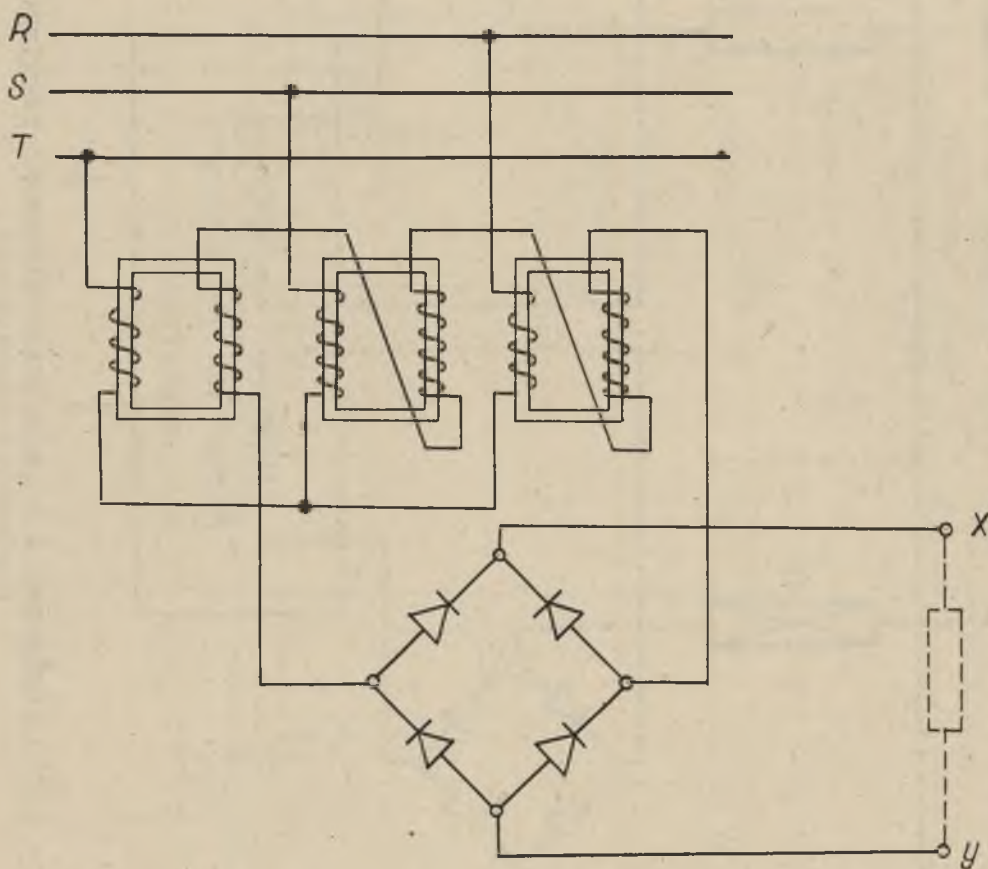


Rys. 35. Człon pomiarowy z korzystaniem elementów nieliniowych porównanie magnetyczne

Omówione wyżej układy zasilane były jednofazowo z napięcia generatora (za pośrednictwem przekładników napięciowych).

Oprócz układów jednofazowych istnieją tryfazowe rozwiązania członu pomiarowego.

Ciekawe rozwiązanie elementu nieliniowego przedstawia układ na rys. 36. Wykorzystano w nim pojawienie się 3 harmonicznej napięcia fazowego na skutek nasycenia 3 jednofazowych transformatorów przyłączonych do przekładników napięciowych generatora 3-fazowo w układzie gwiazdowym bez przewodu zerowego.



Rys. 36. Trójfazowy człon pomiarowy z wykorzystaniem 3 harmonicznej napięcia fazowego

Na skutek nasycenia obwodu magnetycznego transformator-ków pojawia się 3 harmoniczna strumienia transformator-ków indukująca składową 3 harmonicznej w napięciu fazo-wym. Wtórne strony transformator-ków połączone są w otwar-ty trójkąt, na skutek czego znoszą się w obwodzie wtór-nym podstawowe harmoniczne napięcia fazowego trzech trans-formator-ków, a sumują napięcia 3 harmonicznej (ogólnie  $3 \cdot (2k + 1)$  tej harmonicznej). Zamiast grupy 3 transfor-mator-ków jednofazowych można użyć jednego 4-kolumnowego sy-metrycznego transformator-ka 3-fazowego. Otrzymana cha-rakterystyka jest bardzo zbliżona kształtem do charakte-rystyki b na rys. 31b.

Trójfazowe zasilanie elementu nieliniowego stanowi korzystną własność układu, ponieważ regulator oddziału-je na pewną średnią wartość napięcia zbliżoną do syme-trycznej składowej zgodnej kolejności napięcia, na sku-tek czego odpada konieczność zasilania regulatora z fil-tru zgodnej składowej symetrycznej napięcia generatora. Elementem liniowym członu pomiarowego regulatora bywa zwykle dławik o charakterystyce liniowej (z szczeliną) lub opór czynny.

Regulację nastawienia wartości napięcia dokonujemy zwykle za pomocą zmiany nachylenia charakterystyki ele-mentu liniowego przesuwając punkt jej przecięcia z cha-rakterystyką elementu nieliniowego (na rys. 31b zazna-czono linią przerywaną pochyłą charakterystykę elemen-tu liniowego). W przypadku użycia oporu czynnego jako elementu liniowego dokonujemy nastawienia wartości na-pięcia przez zmianę oporu w przypadku użycia dławika bocznikujemy zwykle oporem czynnym główną przekątną układu prostowników po stronie prądu zmiennego wpływa-jąc w ten sposób praktycznie tylko na rozptyw prądu między opór bocznikujący a układ prostowników (rys.34). W przypadku zastosowania transduktorowego elementu nie-liniowego celowe jest użycie dławika jako elementu li-niowego ze względu na częściowe kompensowanie wpływu zmian częstotliwości na napięcie generatora. Wpływ częs-totliwości na wartość napięcia regulowanego kompensuje-my ponadto dodatkowo za pomocą odpowiednio dobranych po-jemności bocznikujących, jak to zaznaczono linią przery-waną na rys. 34. W niektórych przypadkach nie bez zna-czenia jest mniejsze obciążenie mocą czynną układu po-miarowego regulatora przy użyciu dławikowych elementów liniowych. W przypadku gdy element liniowy i nieliniowy zasilany jest wyprostowanym napięciem mierzonym,

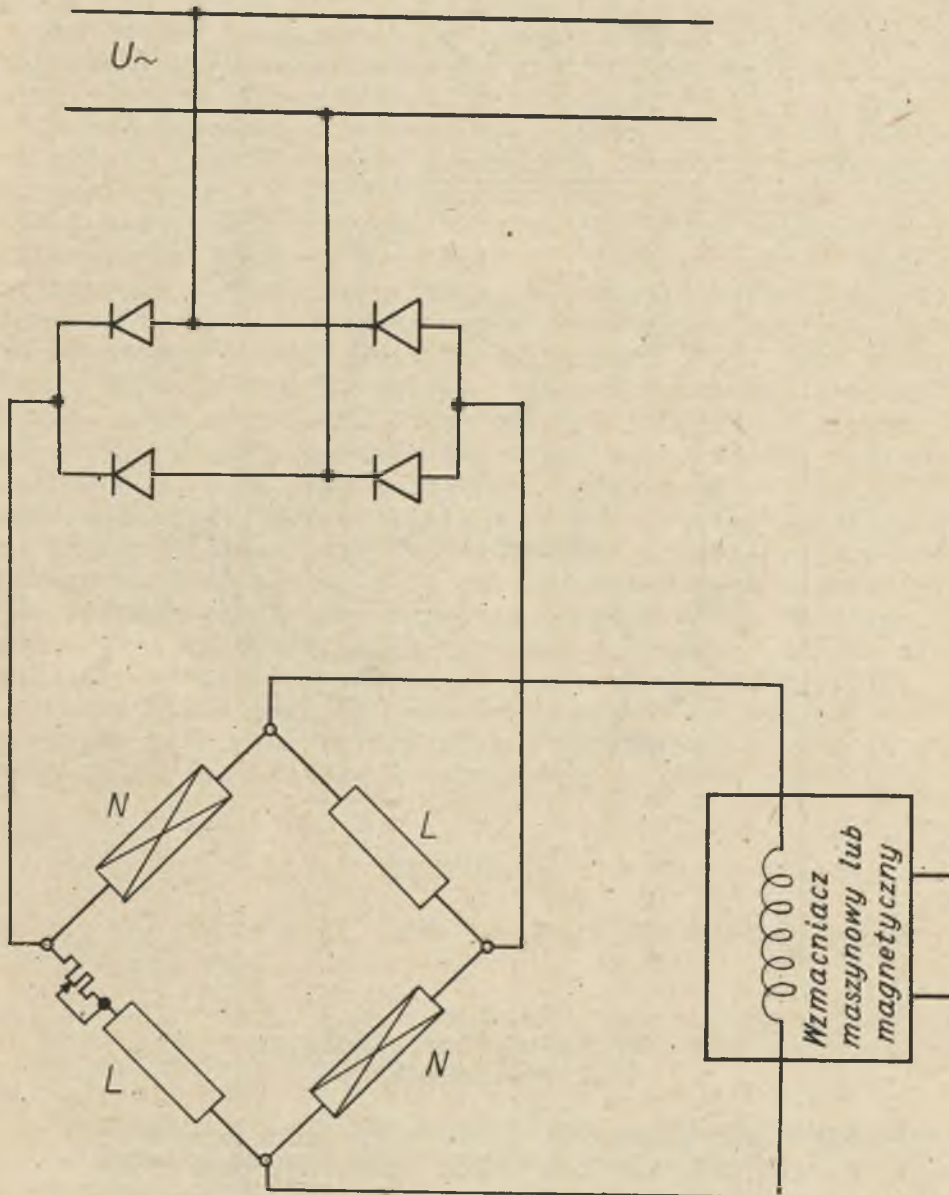
powstaje mostkowy układ członu pomiarowego przedstawiony na rys.37. W układzie tym zmniejszona jest łączna ilość prostowników w porównaniu z tym, jak przedstawiono na rys.34 i 35, natomiast nie można stosować dławików jako elementów liniowych lub nieliniowych. Oczywiście na skutek zasilania członu pomiarowego napięciem wyprostowanym układ nie jest uczulony na zmiany częstotliwości napięcia generatora.

Szczególnym przypadkiem możliwości wyzyskania nieliniowych właściwości nasyconego obwodu magnetycznego pod wpływem wyprostowanego napięcia generatora jest człon pomiarowy układu regulacyjnego omawianego w punkcie 4 wykorzystujący porównanie magnetyczne elementu liniowego i nieliniowego (rys.27). Zmniejszenie mocy prostowników otrzymujemy, gdy prostujemy napięcie zbierane z przekątnej mostka. Małe napięcia zbierane z tej przekątnej wymagają zastosowania w takim przypadku specjalnych prostowników (np. zbudowanych z lamp elektronowych), co poważnie obniża wartość eksploatacyjną układu. Ponieważ układ ten nie może wykazać zmiany znaku prądu wyjściowego członu pomiarowego (występuje wyłącznie minimum napięcia wyjściowego) punkt pracy regulatora musimy przesunąć w stronę napięć leżących poza punktem równowagi mostka. W zakresie tym obniżona jest niestety stromość charakterystyki wyjściowej członu pomiarowego. Ponadto starzenie prostownika wpływa w tym układzie procentowo znacznie więcej na charakterystyki, aniżeli to ma miejsce w układach wyżej omówionych. W poprzednich układach stosuje się w zasadzie prostowniki suche nie wymagające praktycznie żadnej konserwacji. Ze względu na własności prostowników stosuje się przeważnie prostowniki selenowe nie wykazujące zbytnio silnego zjawiska starzenia.

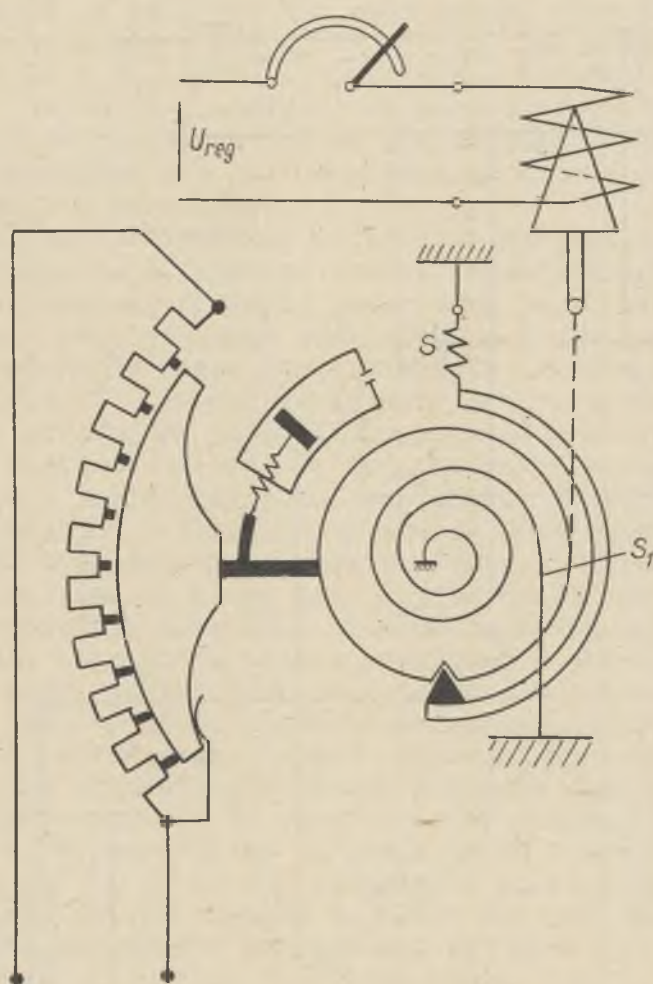
Należy mieć na uwadze, że prostowniki suche (prostowniki selenowe) wykazują lepsze własności prostowania prądu niż napięcia na skutek zmieniającej się (z powodu starzenia prostowników) oporności wewnętrznej prostownika w kierunku przepuszczania, natomiast wykazują większą stałość oporności prostownika w kierunku zaworowym.

Dążeniem konstruktora jest dobrać taki układ pomiarowy, by uzyskać dużą stromość jego charakterystyki wyjściowej. Przeważnie mniejszą rolę odgrywa moc pobierana przez człon pomiarowy.





Rys. 37. Układ mostkowy członu pomiarowego



Rys. 38. Astatyczny regulator elektromechaniczny

Jeżeli układ pomiarowy posiada transduktorowe elementy nieliniowe, wówczas człon pomiarowy obciążony jest dodatkową bezwładnością magnetyczną scharakteryzowaną przez pewną stałą czasową, którą musimy uwzględnić przy doborze optymalnego rozwiązania członu pomiarowego. W przypadku zastosowania transduktorowych elementów nieliniowych stromość wyjściowej charakterystyki członu pomiarowego uzależniona jest od doboru sprzę-

zenia zwrotnego. Przy granicznym sprzężeniu zwrotnym uzyskujemy na pewnym odcinku astatyczną charakterystykę wyjściową członu pomiarowego. W odróżnieniu od układów transduktorowych człon pomiarowy z nieliniowymi oporami czynnymi posiada zawsze statyczną charakterystykę wyjściową.

W regulatorach elektromechanicznych można w stosunkowo prosty sposób uzyskać astatyczną charakterystykę członu pomiarowego. W elektromechanicznym regulatorze napięcia przedstawionym ideowo na rys. 38, który stanowi modyfikację regulatora z rys. 25 i 26, wyposażonego w tłumik powietrzny otrzymanie astatycznej charakterystyki regulatora jest możliwe przy dobraniu jednakowych stałych momentu zwrotnego pochodzącego od sprzężyn  $S$  i  $S_1$ . Przy wychyleniu bębna w lewo sprzężyna  $S$  powiększa moment zwrotny bębna, przy wychyleniu bębna w prawo pomniejsza moment zwrotny. Dla małych kątów skręcenia bębna moment zwrotny pochodzący od naciągu sprzężyny  $S$  jest proporcjonalny do kąta skręcenia. Przez zmianę naciągu sprzężyny otrzymujemy prosty sposób doboru współczynnika statyki regulatora. Zadana wartość napięcia  $U_{wz}$  członu pomiarowego elektromechanicznego regulatora napięcia określa stała sprzężyny  $S_1$ , która jest odpowiednikiem wartości wzorcowego źródła napięcia w elektromagnetycznych regulatorach na rys. 30.

Nastawienia zadanej wartości napięcia dokonujemy w praktyce nie przez zmianę stałej sprzężyny  $S_1$ , lecz za pomocą oporu nastawczego  $R_r$  wtrąconego w obwód solenoidu.

#### LITERATURA

- [1] L. G r i f f i n, The magnicon "Electrical Times" 19 April 1951.
- [2] В.Л. Игносов, А.В. Цукерник, Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения синхронных генераторов, Москва 1952.
- [3] W. K o ł e k, J. K u b e k, W. P a s z e k, Forsowanie wzbudzenia generatorów synchronicznych, Praca Katedry Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej, czerwiec 1954.
- [4] W. P e ł c z e w s k i, Zasada działania amplidyny, "Przegląd Elektryczny" 4/53.
- [5] W. P a s z e k, Analiza stanów nieustalonych amplidyny, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 4/55.

- [6] W. P a s z e k, Układ forsowania wzbudzenia generatorów synchronicznych jako dodatkowy człon pospieszny automatycznych regulatorów napięcia, "Energetyka" 4/55.
- [7] W. P a s z e k, Wpływ forsowania wzbudzenia na pracę równoległą generatorów synchronicznych, "Archiwum Elektrotechniki" 1955.

## Резюме

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Целью работы является обоснование свойств автоматической регуляции возбуждения. Рассмотрено способы изменения коэффициента статизма основной характеристики напряжения генератора, способы стабилизации системы возбуждения при автоматической регуляции, а также основные технические решения измерительных звеньев регулятора.

## R é s u m é

## LES QUALITÉS FONDAMENTALES DES MODERNES REGULATEURS AUTOMATIQUES D'EXCITATION DES GÉNÉRATRICES SYNCHRONES

Le but du travail est la justification physique des rapports et des relations fondamentales concernant les schémas de regulation automatique. On a mis à l'évidence les moyens de changement du statisme de la courbe du tension d'une generatrice aussi que les moyens de stabilisation du dispositif automatique. On a analysé les solutions des elements particuliers du dispositif.