ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1966
Seria: ELEKTRYKA z. 21 Nr kol. 161

WŁADYSŁAW PASZEK
Katedra Maszyn Elektrycznych

JAN WALICHIEWICZ
Katedra Matematyki B

SAMOWZBUDNY GENERATOR ASYNCHRONICZNY O NAPIĘCIU STABILIZOWANYM

Streszczenie. Przedstawiono warunki stabilności napięcia samowzbudnego generatora asynchronicznego przy obciążeniu impedancją pojemnościową.

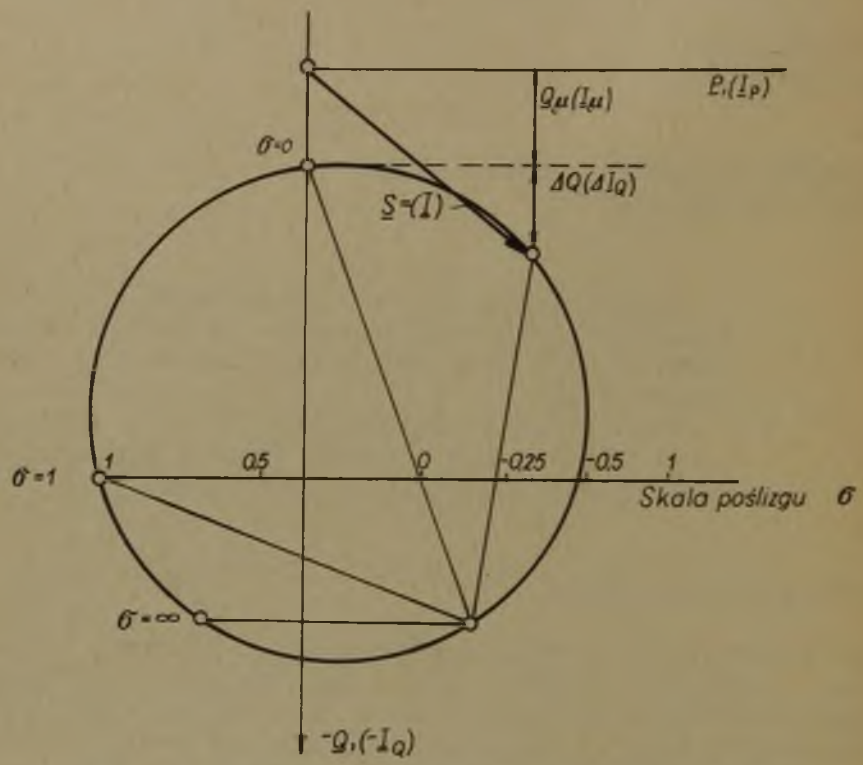
Stabilizację napięcia uzyskuje się przy pomocy dławików sterowanych, bądź niesterowanych bocznikujących pojemność zewnętrzną.

1. Praca na sieć sztywną

Maszyna asynchroniczna przyłączona do sieci sztywnej i napędzana z prędkością nadsynchroniczną generuje moc czynną oddawaną do sieci, a pobiera z sieci moc bierną, potrzebną na wytworzenie magnetycznego pola wirującego maszyny i pola rozproszenia uzwojenia stojana i wirnika.

Na rys. 1 jest przedstawiony wykres kołowy maszyny asynchronicznej z wirnikiem klatkowym przy założeniu stałości napięcia i częstotliwości zasilania. Współrzędne oznaczają składowe: czynną I_P i bierną I_Q prądu twornika i równocześnie proporcjonalne do tych składowych oddawaną moc czynną P i bierną Q maszyny asynchronicznej, traktowanej jako generator (dodatnia moc czynna oznacza moc oddawaną, ujemna moc bierna oznacza pobór indukcyjnej mocy biernej ze sieci). Moc bierną i czynną wyrażamy w jednostkach względnych przyjmując jako wartość odniesienia znamionową moc pozorną maszyny asynchronicznej S_N.

Przy biegu jałowym generator asynchroniczny pobiera moc bierną Q_μ, określoną przez prąd magnesujący. Przy obciążeniu powiększa się pobór indukcyjnej mocy biernej o dodatkową wartość ΔQ rosnącą w miarę zwiększania oddawanej mocy czynnej.



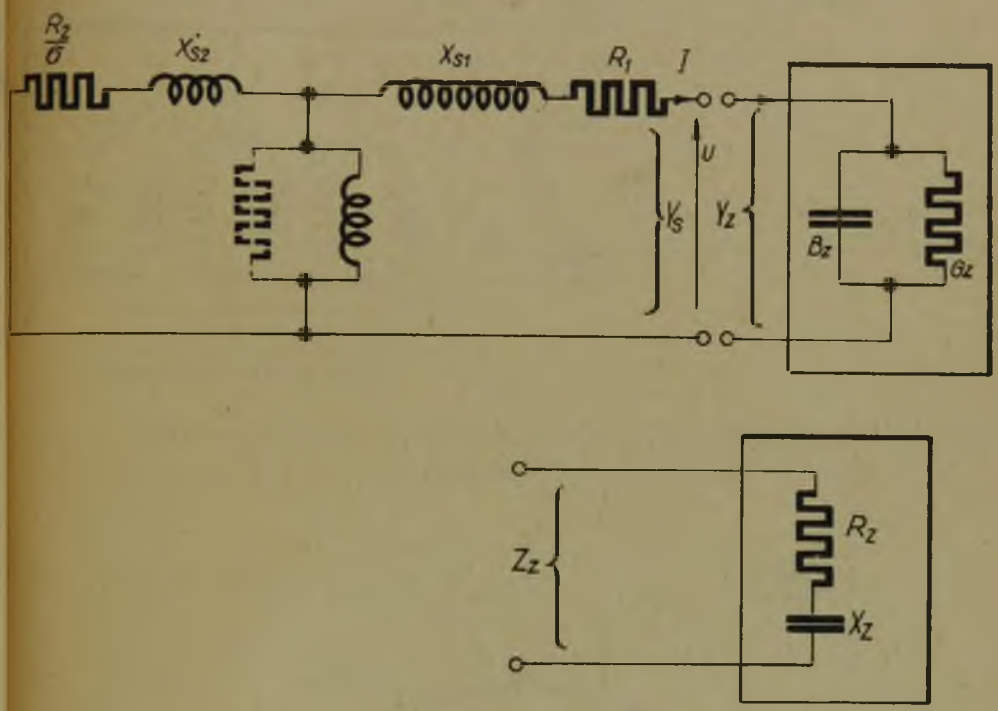
Rys. 1. Wykres kołowy maszyny asynchronicznej

Stabilna praca generatora asynchronicznego jest możliwa w zakresie poślizgów od zera do poślizgu utyku.

Sieć zasilana, odbierającą moc czynną oddawaną przez generator asynchroniczny przedstawia równoważną symetryczną impedancję, względnie admitancję o charakterze pojemnościowym. Oznaczenie kierunkowości napięcia i prądu podano na rys. 2.

$$\hat{Z}_z = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = R_z - j\,X_z \qquad \hat{Y}_z = \frac{1}{\hat{Z}_z} = G_z + j\,B_z$$

Reaktancje maszyny są obliczone przy założeniu stałej znamionowej częstotliwości. Jeżeli odłączymy generator od sieci i jednocześnie przyłączymy do zacisków równoważną impedancję Z_z, maszyna będzie pracować jako samowzbudny generator asynchroniczny w niezmienionych warunkach obciąże-

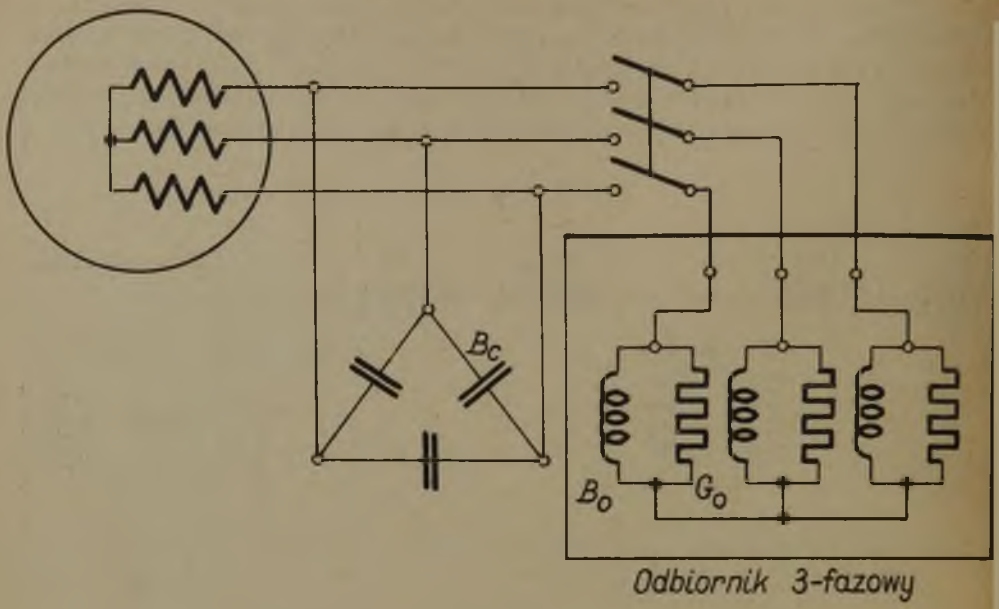


Rys. 2. Schemat zastępczy generatora asynchronicznego

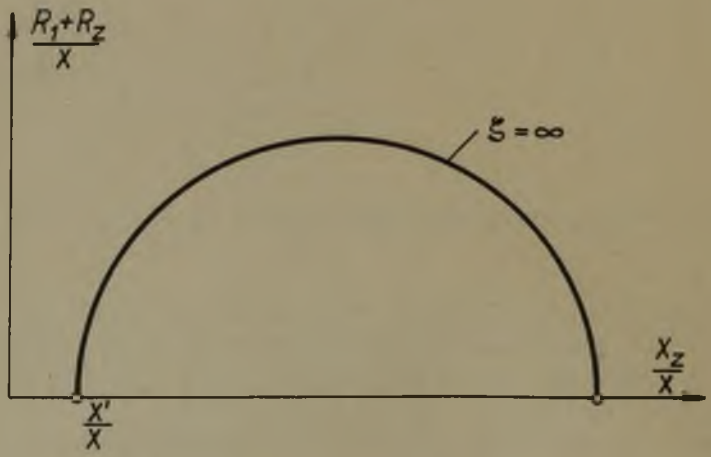
nia. Pojemnościowy charakter impedancji obciążenia można otrzymać za pomocą baterii kondensatorów (o reaktancji X_c względnie o admitancji B_c), przyłączonej do zacisków generatora (rys. 3a).

Odbiornik obciążający generator asynchroniczny jest najczęściej charakteru czynno indukcyjnego. Jego impedancja obciążenia $\hat{Z}_o = R_o + j X_o$, bądź admitancja obciążenia $\hat{Y}_o = G_o - j B_o$. Wypadkowa admitancja zewnętrzna maszyny

$$\hat{Y}_z = G_z + j B_z = G_o + j(B_c - B_o)$$



Rys. 3a. Schemat przyłączenia baterii kondensatorów i odbiornika



Rys. 3b. Okrąg granicy samowzbudzenia generatora asynchronicznego

Dla utrzymania niezmienionej wartości napięcia na zaciskach generatora należy w miarę powiększenia obciążenia generatora powiększać pojemność baterii kondensatorów odpowiednio do zwiększonej o ΔQ zapotrzebowanej mocy biernej generatora (rys. 1).

Bilans mocy generatora oraz bilans impedancji wewnętrznej i impedancji obciążenia przedstawia się następująco: Indukcyjna moc bierna pobierana przez generator jest dostarczana całkowicie z baterii kondensatorów, nadmiar mocy biernej kondensatorów jest oddawany do odbiornika, natomiast wytwarzana przez generator moc czynna jest spożywana przez odbiornik mocy czynnej przyłączony do zacisków generatora (rys. 3a).

Zgodnie z zastrzałkowaniem napięcia i prądu stojana generatora zachodzi w stanie ustalonym równość admitancji zewnętrznej $\hat{Y}_z$ i wewnętrznej maszyny $\hat{Y}_s$.

$$\hat{Y}_z = \hat{Y}_s$$

$$G_z + jB_z = G_s + jB_s$$

Wynika stąd warunek bilansu admitancji

$$G_z = G_s$$

$$B_z = B_s$$

2. Praca samotna

Po przejściu z pracy równoległej z siecią sztywną do pracy samotnej generatora występuje labilny poziom napięcia na zaciskach generatora, przy idealnie stałej reaktancji wewnętrznej maszyny asynchronicznej oraz stałej zewnętrznej impedancji obciążenia. Przy dowolnie małym zaburzeniu napięcie maleje do zera, względnie rośnie do wartości nieograniczonej.

W oparciu o teorię maszyny synchronicznej, której szczególnym przypadkiem jest maszyna asynchroniczna wykazująca symetrię obwodów wirnika w osi d i q[3] można posłużyć się indukcyjnością operatorową

$$L(p) = L\,\frac{1 + pT'}{1 + pT_o}$$

Równanie napięć stojana w operatorowym zapisie kompleksorów na płaszczyźnie liczb zespolonych uczepionej wirnika

$$\hat{\bar{U}}(p) = (p + j\omega)\hat{\bar{\psi}}(p) - \hat{\bar{I}}(p)(R_1 + R_z) - p\hat{\psi}_o$$

Oporność zewnętrzną włączono do uzwojenia stojana.

Równanie liniozwojów

$$\hat{\bar{\psi}}(p) = -\hat{\bar{I}}(p)\,L(p)$$

Prąd obciążenia jest określony przez napięcie stojana $\hat{\bar{U}}(p)$ przyłożone do symetrycznej pojemności zewnętrznej C

$$\hat{\bar{I}}(p) = \hat{U}(p)(p + j\omega) - p\,\hat{\bar{U}}_o$$

Przez $\hat{\psi}_o$, $\hat{U}_o$ oznaczono liniozwoje i napięcie początkowe.

Po wyeliminowaniu kompleksora $\hat{\bar{U}}(p)$

$$-\hat{\bar{I}}(p)\left[\frac{1}{p+j\omega} + (p + j\omega)\,L(p) + R\right] = p\left(\hat{\psi}_o + \frac{\hat{U}_o}{p+j\omega}\right)$$

Miejsce zerowe wielomianu charakterystycznego trzeciego stopnia ujętego w nawias kwadratowy określają wykładniki funkcji wykładniczych stanowiących rozwiązanie przebiegu czasowego $\hat{I}(t)$.

Dyskusja miejsc zerowych wielomianu jest prosta przy poczynieniu założenia upraszczającego polegającego na pominięciu w napięciu stojana $\hat{U}(p)$ składowej transformacji $p\hat{\psi}(p)$ a w prądzie twornika składowej $p\hat{U}(p)\,C$.

Przy takim uproszczeniu nie wystąpią w rozwiązaniu przybliżonym wyrażenia przedstawiające składowe wykładnicze wysokiej częstotliwości o małej amplitudzie zawarte w rzeczywistości w obwodach stojana i wirnika. Przy powyższym założeniu upraszczającym otrzymuje się uporządkowany wielomian charakterystyczny pierwszego stopnia

$$W(p) = 1 + p\,T_o\,\frac{(X' - X_c) - j\,(R_1 + R_z)}{(X - X_c) - j\,(R_1 + R_z)}$$

gdzie:

$$X_c = \frac{1}{\omega C},$$

$$X = \omega L,$$

$$X' = \omega L\,\frac{T'}{T_o},$$

ω - elektryczna prędkość kątowa wirowania.

Pierwiastek wielomianu $W(p)$ jest zespolony, co oznacza, że nieustalone przebiegi wykładnicze prądu $I(t)$ i odpowiednio również napięcie $\hat{U}(t)$ można przedstawić w postaci

$$\hat{U}(t) = A\,e^{-\frac{t}{T}}\,e^{-j\beta t}$$

Stała czasowa T określa prędkość zanikania bądź narastania (jeśli T jest ujemne) a β prędkość poślizgu pola wirującego względem wirnika

$$T = \xi T_o$$

$$\xi = \frac{(R_1 + R_z)^2 + (X' - X_z)^2}{(R_1 + R_z)^2 + (X - X_z)(X - X_z)}$$

$$\beta = \frac{(R_1 + R_z) \cdot (X - X')}{(X' - X_c)^2 + (R_1 + R_z)^2} \cdot \frac{1}{T_o}$$

przy czym:

$X' = X_{s1} + \frac{X_\mu \cdot X'_{s2}}{X_\mu + X'_{s2}}$ – reaktancja przejściowa,

$X = X_{s1} + X_\mu$ – reaktancja synchroniczna,

$T_o = \frac{X'_{s2} + X_\mu}{\omega_N \cdot R'_2}$ – stała czasowa maszyny asynchronicznej przy otwartym uzwojeniu stojana.

Oporności wewnętrzne maszyny asynchronicznej są uwidocznione na jednofazowym schemacie zastępczym (rys. 2). Dla uproszczenia pominięto w równaniu (2) wpływ oporności R_{Fe} reprezentującej straty w żelazie stojana maszyny asynchronicznej.

Stała czasowa T dąży do nieskończoności w punkcie pracy ustalonej generatora, to znaczy w punkcie, dla którego zeruje się mianownik wyrażenia (2), określającego współczynnik ξ.

Miejsce geometryczne $\xi = \infty$ przedstawia w układzie współrzędnych (X_z), $(R_z + R_1)$ okrąg granicy samowzbudzenia (rys. 3b) [2].

W obszarze zamkniętym okręgiem współczynnik ξ jest ujemny czemu odpowiada narastanie napięcia na zaciskach. Stała czasowa narastania napięcia wypada zawsze większa od stałej T_o o czym łatwo przekonać się na podstawie równania (1). Jeśli punkt określony współrzędnymi (X_z, R_z+R_1) leży poza okręgiem współczynnik ξ jest dodatni, czemu odpowiada wykładniczy zanik napięcia generatora.

Przy symetrycznym zwarciu generatora ($X_z = 0$, $R_z = 0$) stała czasowa zanikania pola w generatorze

$$T_{zw} = T_o \frac{R_1^2 + X'^2}{R_1^2 + X'X}. \tag{3}$$

Przy małej oporności uzwojeń stojana w porównaniu z reaktancją przejściową, stała czasowa zanikania strumienia w generatorze przy zwarciu

$$T_{zw} \approx T_o \frac{X'}{X}$$

Moc oddawana przez generator przy znamionowym napięciu na zaciskach obliczona dla punktów impedancji leżących na okręgu ($\xi = \infty$) przedstawia równanie wykresu kołowego maszyny asynchronicznej (rys. 1)

$$\underline{\hat{S}}_z = m \frac{\hat{U}_N \check{I}}{S_N} = \left(\frac{1}{\underline{R}_z + j\underline{X}_z}\right)_{\xi \to 0} = \underline{\check{Y}}_s = \underline{G}_s - j\underline{B}_s,$$

przy czym:

$$\underline{Y} = \frac{Y}{Y_{odn}},$$

$$\underline{Z} = \frac{Z}{Z_{odn}},$$

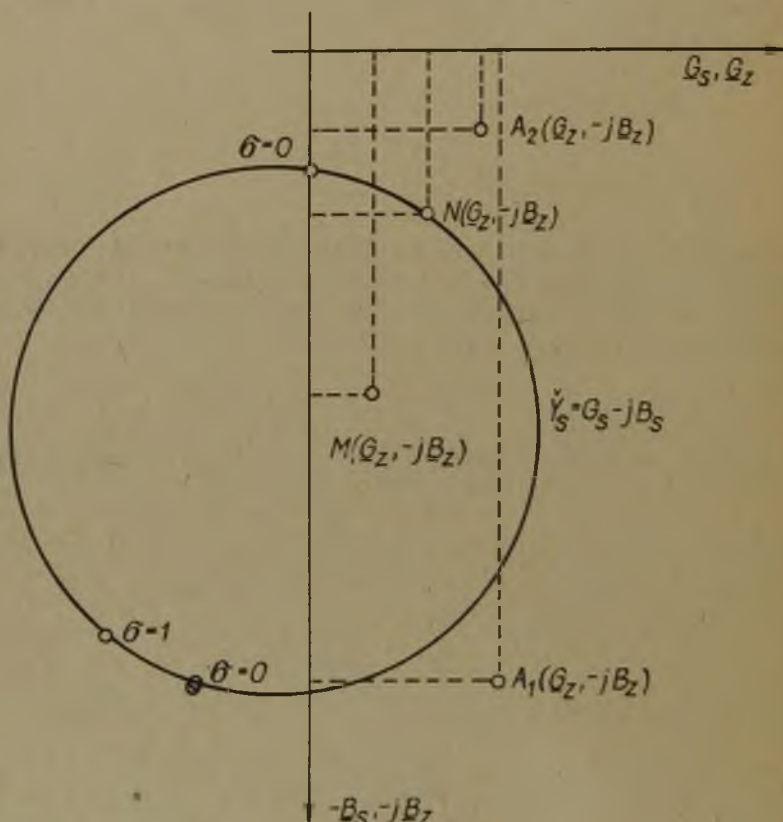
S_N – znamionowa moc pozorna maszyny asynchronicznej,

m – liczba faz twornika,

$Y_{odn} - \frac{I_N}{U_N}$ - admitancja odniesienia,

$Z_{odn} - \frac{U_N}{I_N}$ - impedancja odniesienia.

Wykres kołowy pokrywa się z charakterystyką sprzężonej wartości admitancji zespolonej generatora $\underline{\check{Y}}_s$ w funkcji po-



Rys. 4. Wykres admitancji generatora i admitancji zewnętrznej

ślizgu. Kryterium samowzbudzenia generatora asynchronicznego możemy wobec tego sformułować w oparciu o wykres ko-

łowy względnej admitancji maszyny asynchronicznej. Jeśli punkt $\underline{Y}_z$, o współrzędnych ($\underline{G}_z$, $-j\underline{B}_z$), określający sprzężoną wartość admitancji zewnętrznej leży wewnątrz wykresu kołowego (np. pkt. M na rys. 4) nastąpi samowzbudzenie generatora.

Jeżeli punkt $\check{\underline{Y}}_z = \underline{G}_z$, $-j\underline{B}_z$ leży poza okręgiem, nastąpi wykładniczy zanik napięcia (np. punkt A_1 oraz A_2 na rys. 4). Natomiast jeśli punkt $\check{\underline{Y}}_z - G_z - j\underline{B}_z$ leży na obwodzie wykresu kołowego, napięcie na zaciskach nie ulega zmianie (np. punkt N na rys. 4).

3. Stabilizacja napięcia generatora

Założyliśmy na wstępie stałość reaktancji maszyny asynchronicznej i reaktancji zewnętrznej, na skutek czego w wyniku zjawiska samowzbudzenia napięcie narasta według funkcji wykładniczej. W rzeczywistości efekt nasycenia powoduje zmniejszenie reaktancji w miarę powiększania napięcia, co przyczynia się do ustalenia napięcia na zaciskach generatora w czasie samowzbudzenia.

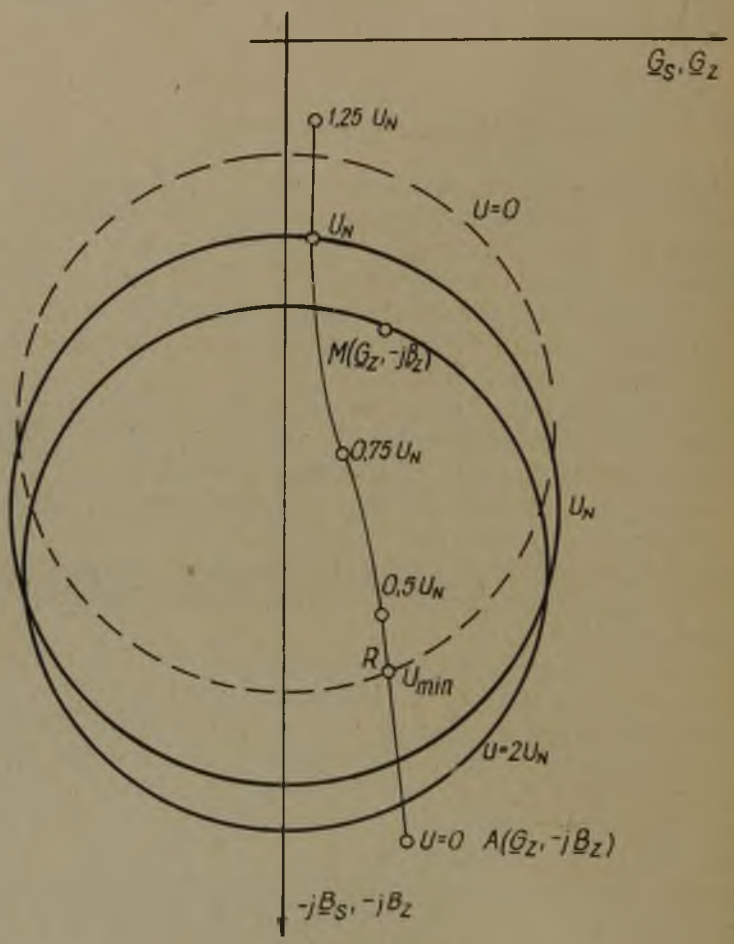
Ustalenie poziomu napięcia może być spowodowane przez nasycenie obwodu magnetycznego maszyny, które powoduje zmniejszenie reaktancji X_μ przy wzroście napięcia, bądź przez nasycenie obwodów magnetycznych przyłączonych do zacisków generatora (np. transformatorów, dławików itp.) współokreślających wypadkową impedancję zewnętrzną. Mogą również wystąpić jednocześnie obydwa efekty nasyceń obwodów magnetycznych.

Przy stałej impedancji zewnętrznej (jeśli impedancja zewnętrzna nie zawiera transformatorów, dławików itp.) nastąpi samowzbudzenie, jeśli punkt M o współrzędnych (G_z, $-jB_z$) mieści się w obszarze wykresu kołowego admitancji maszyny asynchronicznej, który jest sporządzony przy założeniu maksymalnej reaktancji magnesowania X_μ (okrąg narysowany linią przerywaną na rys. 5).

W wyniku samowzbudzenia ustala się napięcie na zaciskach generatora, przy którym punkt M znajduje się na obwodzie wykresu kołowego admitancji maszyny asynchronicznej.

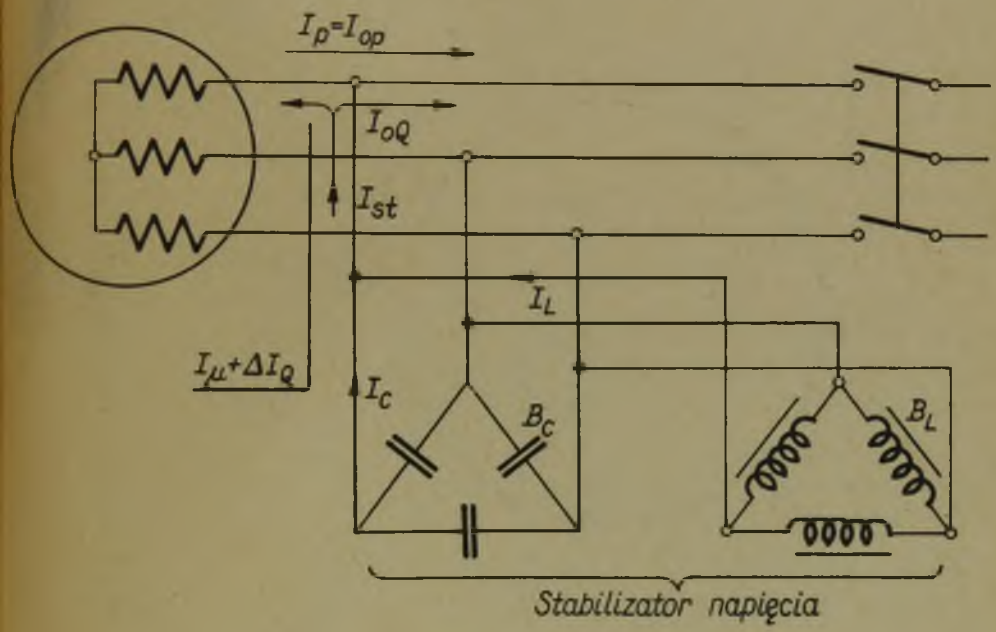
Jeśli na skutek nasycenia jednocześnie zmienia się impedancja zewnętrzna oraz reaktancja generatora, musimy rozpatrzyć cały szereg wykresów kołowych admitancji, sporzą-

dzonych dla różnych napięć zasilania oraz charakterystykę admitancji zewnętrznej $\check{Y}_z$ w układzie współrzędnych G_z, $-jB_z$. Jeśli admitancja zewnętrzna nie zależy od napięcia, wówczas jej charakterystyka $\check{Y}_z$ jest reprezentowana przez jeden punkt. Samowzbudzenie generatora nastąpi począwszy od najniższej wartości napięcia, przy której punkt $A(G_z, -jB_z)$ znajdzie się na obwodzie lub we wnętrzu okręgu.



Rys. 5. Wykres admitancji generatora i admitancji zewnętrznej przy zmiennej wartości napięcia stojana

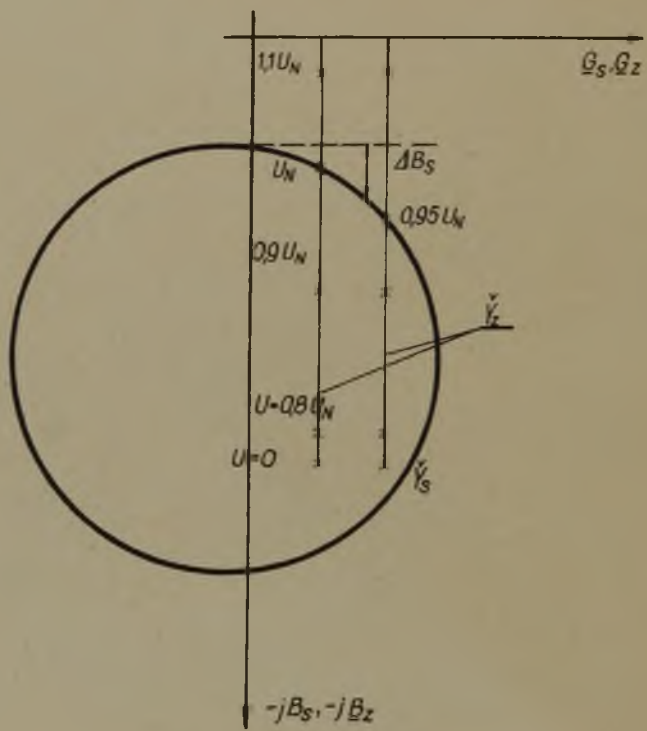
Na rys. 5 przedstawiono szereg wykresów kołowych, wykreślonych dla różnych napięć zasilania oraz charakterystykę admitancji zewnętrznej. Admitancja zewnętrzna składa się z admitancji baterii kondensatorów, czynnej przewodności obciążenia oraz admitancji transformatora, poprzez który jest przyłączona przewodność obciążenia do zacisków generatora. Zakrzywienie charakterystyki magnesowania transformatora przy nasyceniu jego obwodu magnetycznego powoduje zależność admitancji zewnętrznej od napięcia generatora.



Rys. 6. Dławikowy stabilizator napięcia

Do stabilizacji napięcia generatora można wykorzystać uzależnienie wypadkowej admitancji zewnętrznej złożonej z baterii kondensatorów i dławików nasyconych od napięcia generatora. Układ stabilizacji napięcia generatora asynchronicznego jest przedstawiony na rys. 6. Równolegle do baterii kondensatorów jest przyłączony trójfazowy układ dławików o ostrym zakrzywieniu charakterystyki magnesowa-

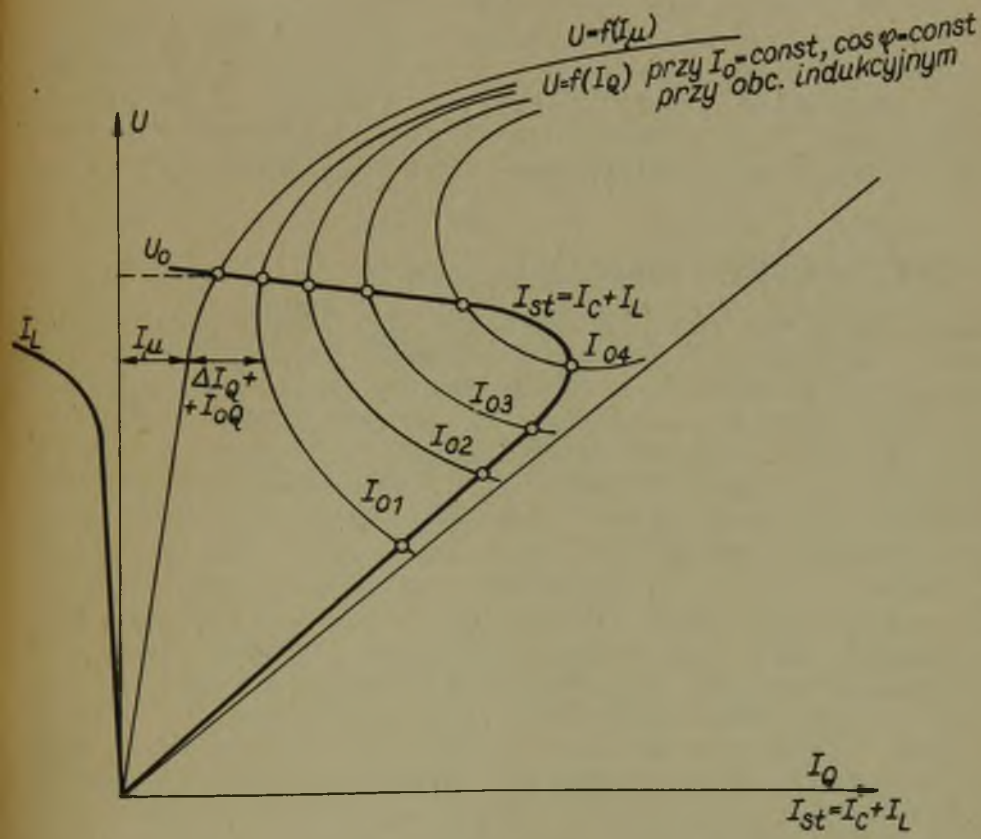
nia. Przy pominięciu strat w dławikach wypadkowa admitancja układu stabilizatora jest różnicą admitancji baterii kondensatorów B_C i admitancji dławików B_L. Przy zmianach napięcia zmienia się w szerokich granicach wypadkowa admitancja zewnętrzna. Admitancja obciążenia generatora jest przyłączona za wyłącznikiem mocy do zacisków generatora.



Rys. 7. Wykres admitancji generatora i admitancji zewnętrznej z dławikowym stabilizatorem napięcia

Na rys. 7 przedstawiono wypadkową charakterystykę admitancji zewnętrznej dla dwóch różnych stałych wartości przewodności G_Z. Ponieważ nieznaczne wahania napięcia wpływają silnie na pojemnościową składową admitancji zew-

nętrznej, zmiany mocy biernej generatora, towarzyszące zmianom obciążenia czynnego wpływają w zmniejszonym stopniu na napięcie generatora. Dla uzyskania dobrej stabilizacji napięcia generatora dławiki powinny być wykonane z materiałów ferromagnetycznych o możliwie ostrym zakrzywieniu charakterystyki magnesowania. Przy połączeniu dławików w trójkąt eliminujemy trzecią harmoniczną prądu obciążenia, która powodowałaby zniekształcenie napięcia generatora.



Rys. 8. Konstrukcja charakterystyki zewnętrznej samowzbudnego generatora asynchronicznego

Stabilizacja napięcia przy pomocy nieliniowości charakterystyki magnesowania generatora jest mniej korzystna, ponieważ przy zmianach obciążenia występują większe wahania napięcia na zaciskach aniżeli przy stabilizacji za pomocą nieliniowej admitancji zewnętrznej.

Przy biegu jałowym napięcie ustalone na zaciskach generatora otrzymamy w punkcie przecięcia charakterystyki prądu magnesującego maszyny asynchronicznej z napięciową charakterystyką admitancji stabilizatora. Na rys. 8 przedstawiono charakterystykę prądu magnesującego $I_\mu = f(U)$, charakterystykę prądu dławików I_L, baterii kondensatorów I_c i charakterystykę wypadkową stabilizatora $I_{st} = I_c + I_L$.

Przy zastosowaniu stabilizatora napięcie generatora może ustalić się na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania maszyny asynchronicznej, ponieważ czynnikiem stabilizującym jest zmienna reaktancja pojemnościowa stabilizatora, a nie nieliniowość reaktancji generatora.

4. Charakterystyki zewnętrzne

Można wyznaczyć przebieg charakterystyki zewnętrznej generatora $U = f(I_o)$ przy $\cos\varphi = \text{const}$ przy upraszczającym założeniu, że nasycenie obwodu magnetycznego maszyny asynchronicznej wpływa wyłączenie na wartość prądu magnesującego, a zatem przesuwa na rys. 5 wykres kołowy w stronę większych wartości zmiennej $-j\underline{B}_s$, natomiast nie zmienia średnicy tego koła. Prąd bierny generatora $\underline{I}_Q$ można przy tym założeniu przedstawić jako sumę prądu magnesującego $\underline{I}_\mu$, który zmienia się na skutek nasycenia i prądu $\Delta \underline{I}_Q = \underline{U} \cdot \Delta \underline{B}_s$, który jest uzależniony od położenia punktu pracy maszyny asynchronicznej na wykresie kołowym. Na rys. 7 zaznaczono wartość $\Delta \underline{B}_s$. Napięcie jakie ustali się na zaciskach generatora wyznaczyć można na podstawie bilansu prądów w węźle przyłączenia stabilizatora (rys. 6). Przy pominięciu strat mocy czynnej w stabilizatorze (straty te można uwzględnić włączając zastępczą oporność strat stabilizatora do odbiornika) prąd czynny generatora płynie tylko do odbiornika.

Bilans prądów biernych w węźle przyłączenia stabilizatora można przedstawić w postaci

$$I_{st} = I_{Q\Sigma} \tag{4}$$

przy czym

$$I_{Q\Sigma} = I_{\mu} + \Delta I_Q + I_{oQ}$$

W równaniu (4) założono, że odbiornik ma charakter czynno-indukcyjny. Stabilizator pokrywa pobór prądu biernego przez generator $(I_{\mu} + \Delta I_Q)$ i odbiornik I_{oQ}. Łączny pobór prądu biernego jest uzależniony od napięcia na zaciskach generatora, z uwagi na zależność prądu I_{μ} i I_{oQ} od napięcia.

Na rys. 8 przedstawiono charakterystykę poboru prądu biernego przez generator i odbiornik w funkcji napięcia dla kilku wartości prądu obciążenia $\hat{I}_o = I_{oP} + jI_{oQ} = I_o(\cos\varphi + j\sin\varphi)$, traktowanych jako parametr stały.

Wartość dodatkowego prądu biernego $\Delta \underline{I}_Q = \Delta \underline{B}_s \cdot \underline{U}$ znajdujemy na podstawie wykresu kołowego admitancji generatora dla punktu $\underline{G}_s = \frac{U}{I_P}$ przyjmując różne wartości napięcia $\underline{U}$. Zamiast posłużyć się wykresem kołowym admitancji możemy obliczyć wartość prądu ΔI_Q na podstawie schematu zastępczego maszyny asynchronicznej

$$\Delta I_Q \approx \frac{U(X_{s1} + cX'_{s2})}{\left(R_1 + c\frac{R_2}{\sigma}\right)^2 + \left(X_{s1} + c\,X'_{s2}\right)^2} \tag{5a}$$

$$I_P \approx \frac{U\left(R_1 + c\frac{R'_2}{\sigma}\right)}{\left(R_1 + c\frac{R'_2}{\sigma}\right)^2 + \left(X_{s1} + c\,X'_{s2}\right)^2} \tag{5b}$$

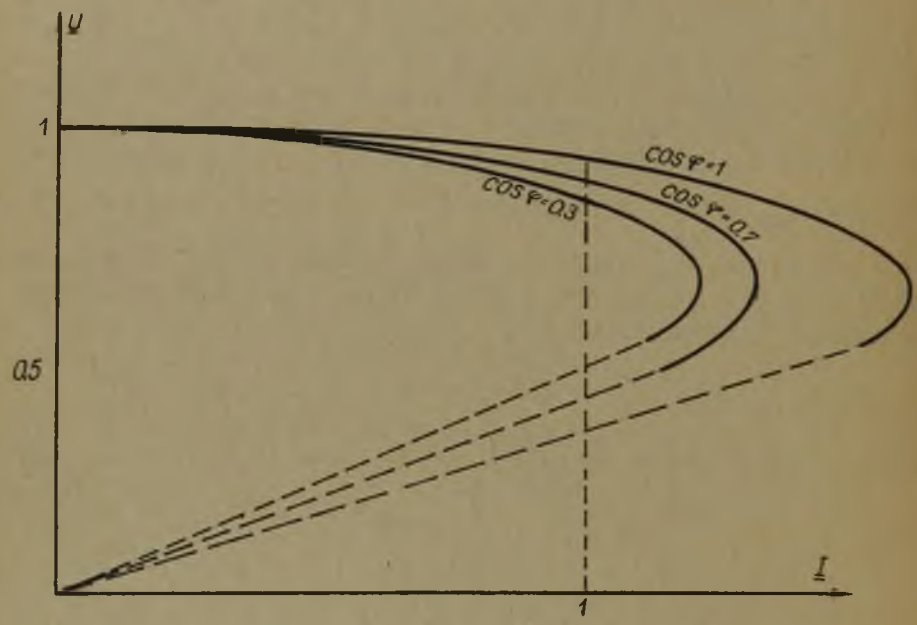
$$c = 1 + \frac{R_1 + jX_{s1}}{jX_{\mu}} \approx 1 + \frac{1}{2}\frac{I_{bj}}{I_{zw}}$$

I_{bj} - prąd biegu jałowego silnika asynchronicznego przy napięciu U,

I_{zw} - prąd zwarcia silnika asynchronicznego przy napięciu U,

σ - poślizg.

Przy założeniu, że nasycenie obwodu magnetycznego maszyny asynchronicznej nie wpływa na średnicę wykresu kołowego można przyjąć $c = const \approx 1,05$.



Rys. 9. Charakterystyki zewnętrzne samowzbudnego generatora asynchronicznego

Z równań 5a i 5b otrzymamy równanie określające prąd ΔI_Q w zależności od prądu czynnego $I_P = I_o \cdot \cos\varphi$.

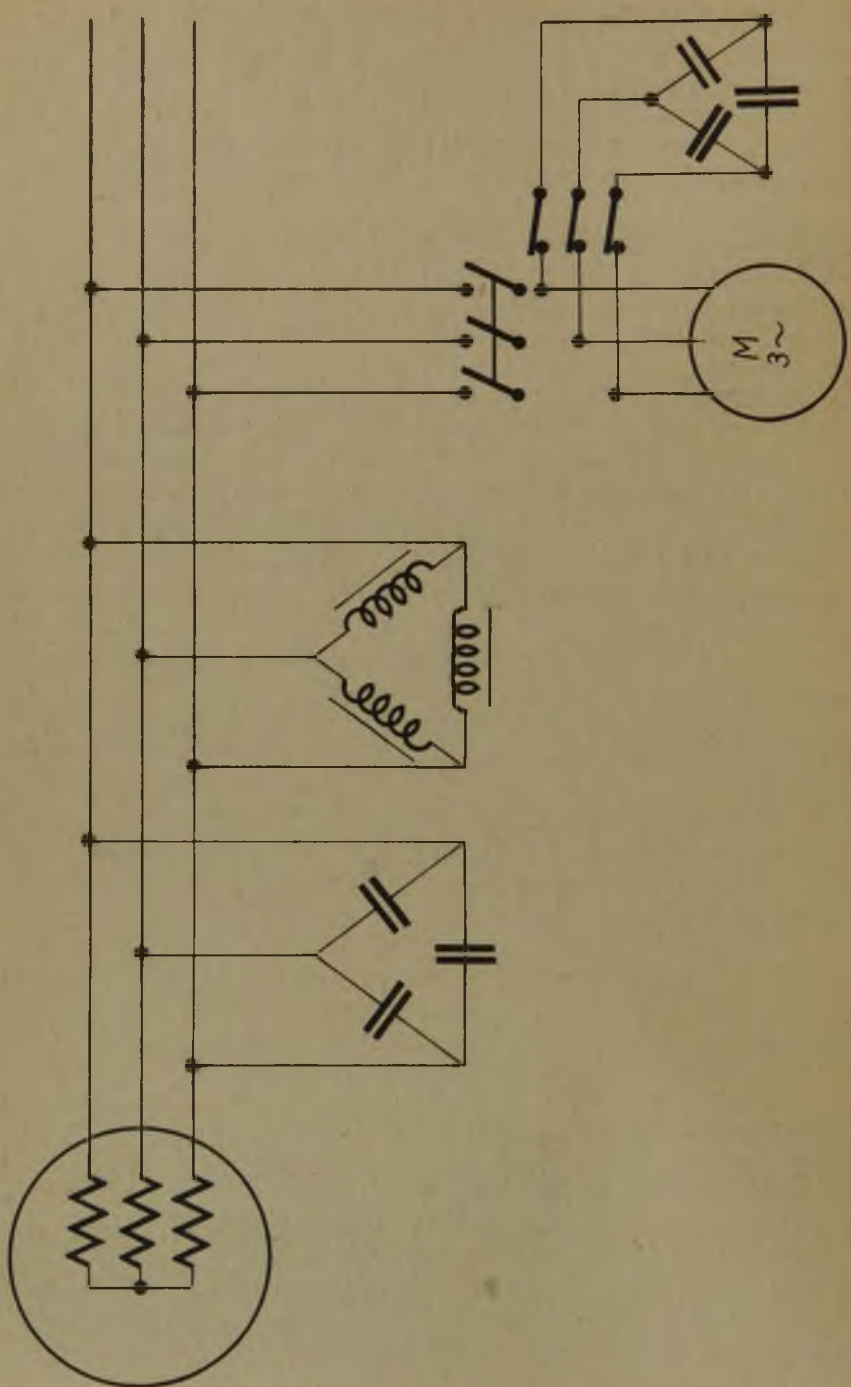
$$\Delta I_Q = \frac{U}{2(X_{s1} + cX_{s2})} \pm \sqrt{\left[\frac{U}{2(X_{s1} + cX_{s2})}\right]^2 - (I_o \cos\varphi)^2} \quad (6)$$

Na rys. 8 przedstawiona jest gromada krzywych I_Q dla różnych wartości prądu obciążenia. Punkty przecięcia tych charakterystyk z charakterystyką stabilizatora określają każdorazowo ustalone napięcie na zaciskach generatora. Rys. 9 przedstawia typową charakterystykę zewnętrzną generatora asynchronicznego, wyznaczoną na podstawie tej konstrukcji.

Na części charakterystyki zewnętrznej zaznaczonej linią przerywaną napięcie generatora jest niestabilne. Na niestabilnej części charakterystyki, przy dowolnie małej zmianie impedancji obciążenia, następuje zanikanie napięcia generatora lub samowzbudzenie do wyższej wartości napięcia na stabilnym odcinku charakterystyki. Przy użyciu dławików o nieliniowej charakterystyce prądu biernego możemy uzyskać pracę stabilną w zakresie obciążeń od zera do obciążenia znamionowego maszyny asynchronicznej. Przy ostrym zakrzywieniu charakterystyki magnesowania dławików zmienność napięcia nie przekracza $(1,5\%-3\%)U_N$ przy obciążeniu czynnym generatora. Przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym zmienność napięcia jest większa. Przy napięciu niższym od napięcia przy zakrzywieniu charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego dławików, admitancja dławików jest bardzo mała, na skutek czego występuje praktycznie całkowita pojemność baterii kondensatorów. Maksymalna dopuszczalna admitancja baterii kondensatorów stabilizatora jest mniejsza od admitancji granicznej, powyżej której nie zachodzi samowzbudzenie. Przy idealnym biegu jałowym generatora i przy pominięciu oporności czynnej stojana graniczna admitancja baterii kondensatorów

$$\underline{B}_{c\ gr} = \frac{1}{X}.$$

Przy obciążeniu generatora opornością czynną graniczna pojemność kondensatorów stabilizatora jest jeszcze mniejsza. Jeżeli przewiduje się duże chwilowe zwyżki admitancji obciążenia generatora o niskim indukcyjnym współczynniku mocy, np. przy rozruchu silników asynchronicznych z wirnikiem zwartym zasilanych z asynchronicznego generatora samowzbudnego, musimy przewidzieć dodatkową kompensacyjną baterię kondensatorów przyłączoną do zacisków tych silni-

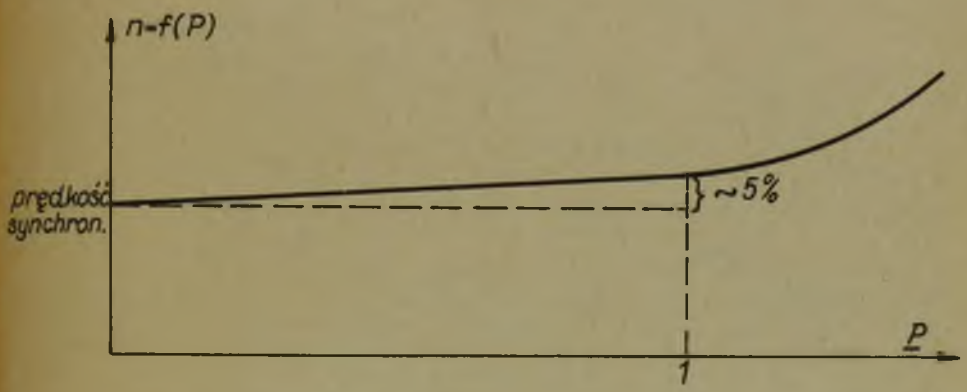


Rys. 10. Schemat układu przy rozruchu silnika asynchronicznego zasilanego z samowzbudnego generatora asynchronicznego

ków (rys. 10). Z uwagi na ograniczoną z góry pojemność baterii kondensatorów stabilizatora nie można na stałe włączyć tej baterii kompensującej do stabilizatora. Po dokonaniu rozruchu bateria kompensująca jest odłączona i może służyć do rozruchu następnych silników.

5. Stabilizacja częstotliwości generatora

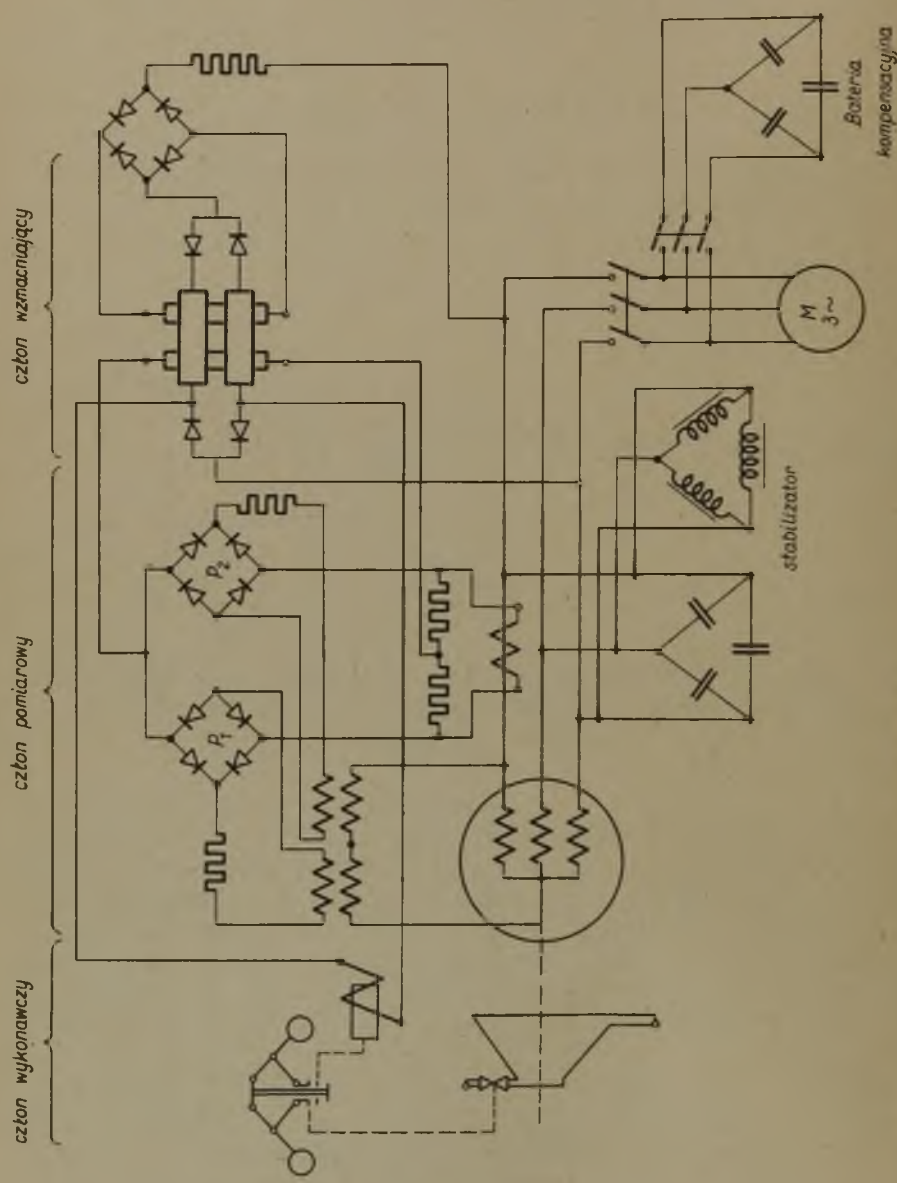
W dotychczasowych rozważaniach przyjęta częstotliwość napięcia generatora jest znamionowa.



Rys. 11. Charakterystyka prędkości obrotowej turbiny przy stałej częstotliwości napięcia samowzbudnego generatora asynchronicznego

Ponieważ generator asynchroniczny pracuje przy ujemnym poślizgu zwiększającym się w miarę powiększania mocy czynnej (por. skalę poślizgu na rys. 1) maszyna napędzająca powinna wykazywać antystatyczną charakterystykę prędkości, przedstawioną na rys. 11. Antystatyczną charakterystykę turbiny napędzającej możemy uzyskać za pomocą dodatkowego układu sterującego, oddziałującego na regulator prędkości obrotowej turbiny.

Na rys. 12 jest przedstawiony układ pomiarowy reagujący na składową czynną prądu obciążenia (I cos φ), który zasila uzwojenie sterująca wzmacniacza magnetycznego. Wzmacniacz magnetyczny steruje cewkę elektromagnesu, który zmienia naciąg sprężyny odśrodkowego regulatora prędkości turbiny.



Rys. 12. Układ sterowania naciągu sprężyny odśrodkowego regulatora prędkości turbiny napędowej generatora

Jako zasadę działania układu pomiarowego przyjęto sterowanie okresów przewodzenia prostowników P_1 i P_2 zapomocą prądu obu uzwojeń wtórnych przekładnika napięciowego. Prąd jednocześnie komutujących gałęzi prostownika P_1 i P_2 steruje okres przewodzenia prądu sterującego amplistatu.

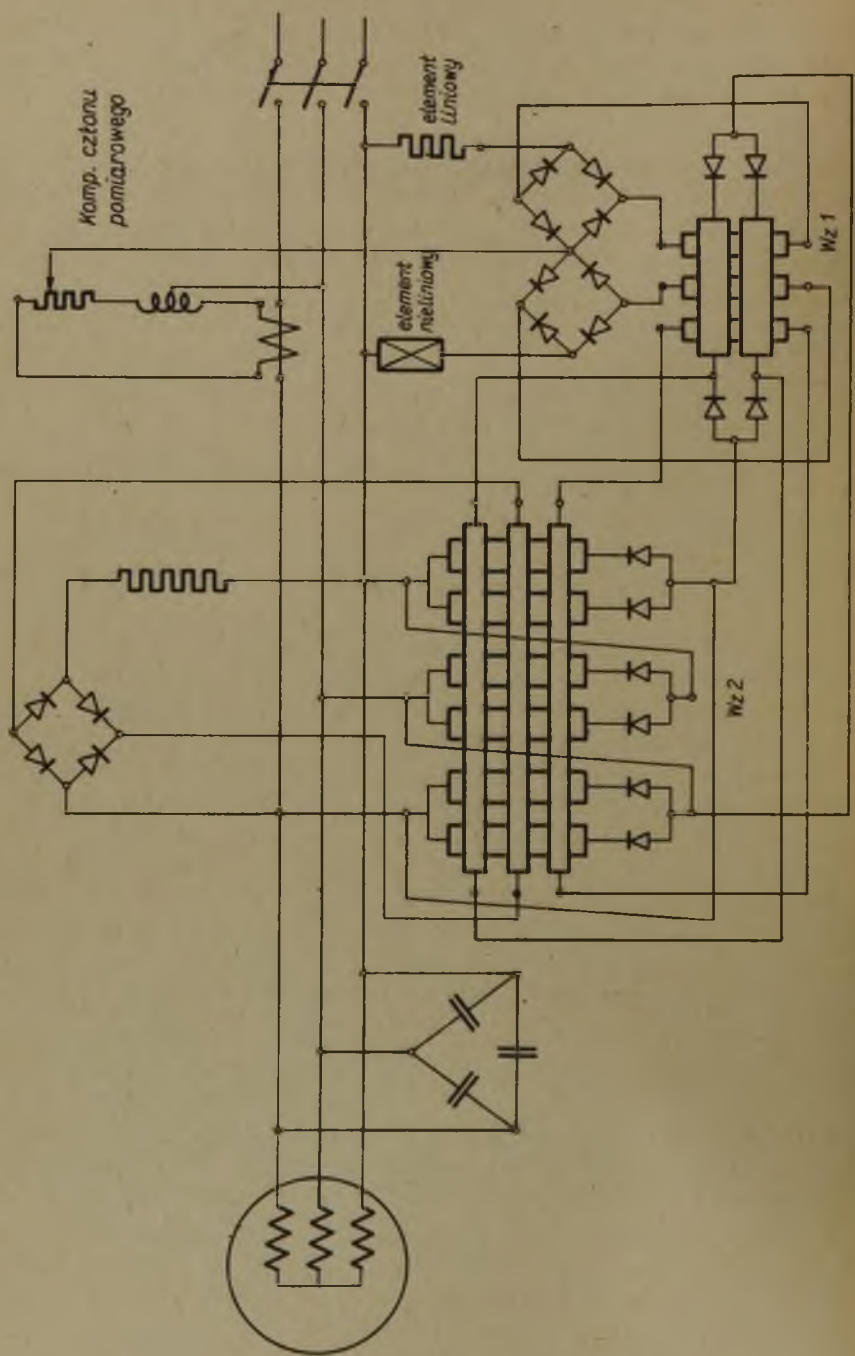
Jeśli przez odpowiedni dobór oporności dodatkowych w obwodzie przekładników napięciowych dobierze się znacznie większy prąd strony wtórnej przekładników napięciowych od prądu sterującego amplistatu okres przewodzenia prostownika P_1 i P_2 jest zbliżony do połowy okresu krzywej napięcia. W tym przypadku średnia wartość prądu sterującego, wytworzonego przez napięcie zbierane z oporności obciążającej przekładnik prądowy, jest proporcjonalna do składowej czynnej prądu obciążenia generatora.

Stosowane są również inne układy, które powodują antystatyczną charakterystykę prędkości obrotowej turbiny [1].

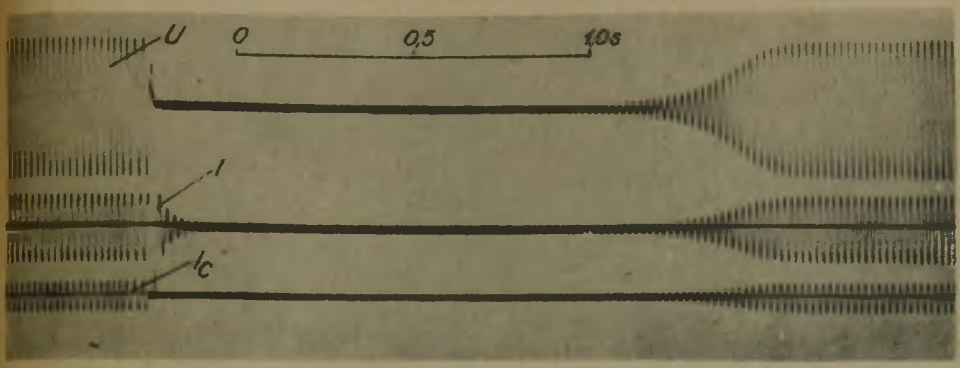
Jeżeli turbina nie wykazuje antystatycznej charakterystyki prędkości występuje spadek częstotliwości napięcia generatora, który powiększa się w miarę wzrostu obciążenia czynnego.

Z uwagi na to, że poślizg rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie ze wzrostem obciążenia czynnego, nachylenie charakterystyki częstotliwości odpowiada sumie wartości poślizgu i statyzmu turbiny. Wynika stąd warunek doboru właściwego nachylenia antystatycznej charakterystyki prędkości turbiny. Ewentualne zmiany częstotliwości napięcia generatora powodują zmiany stabilizowanego poziomu napięcia generatora. Z powodu uzależnienia prądu dławików stabilizatora od częstotliwości zasilania.

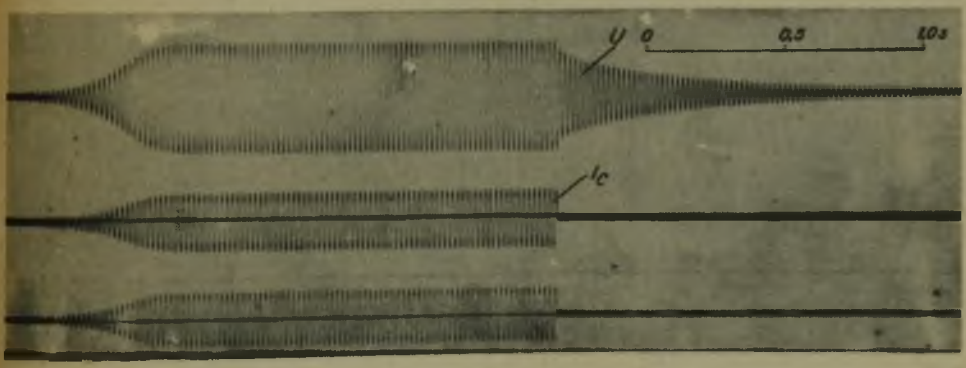
Na rys. 13 jest przedstawiony transduktorowy układ regulacji napięcia generatora asynchronicznego. Trójfazowy transduktor W_{z2} pracuje w charakterze regulowanej reaktancji indukcyjnej, bocznikującej baterię kondensatorów. Podstawowe uzwojenie sterujące jest zasilane z wzmacniacza wstępnego W_{z1} sterowanego z członu pomiarowo - porównawczego. Przy pomocy kompoundacji członu pomiarowego można kompensować spadek napięcia na odległym końcu linii. Podatne sprzężenie zwrotne stabilizuje układ regulacji.



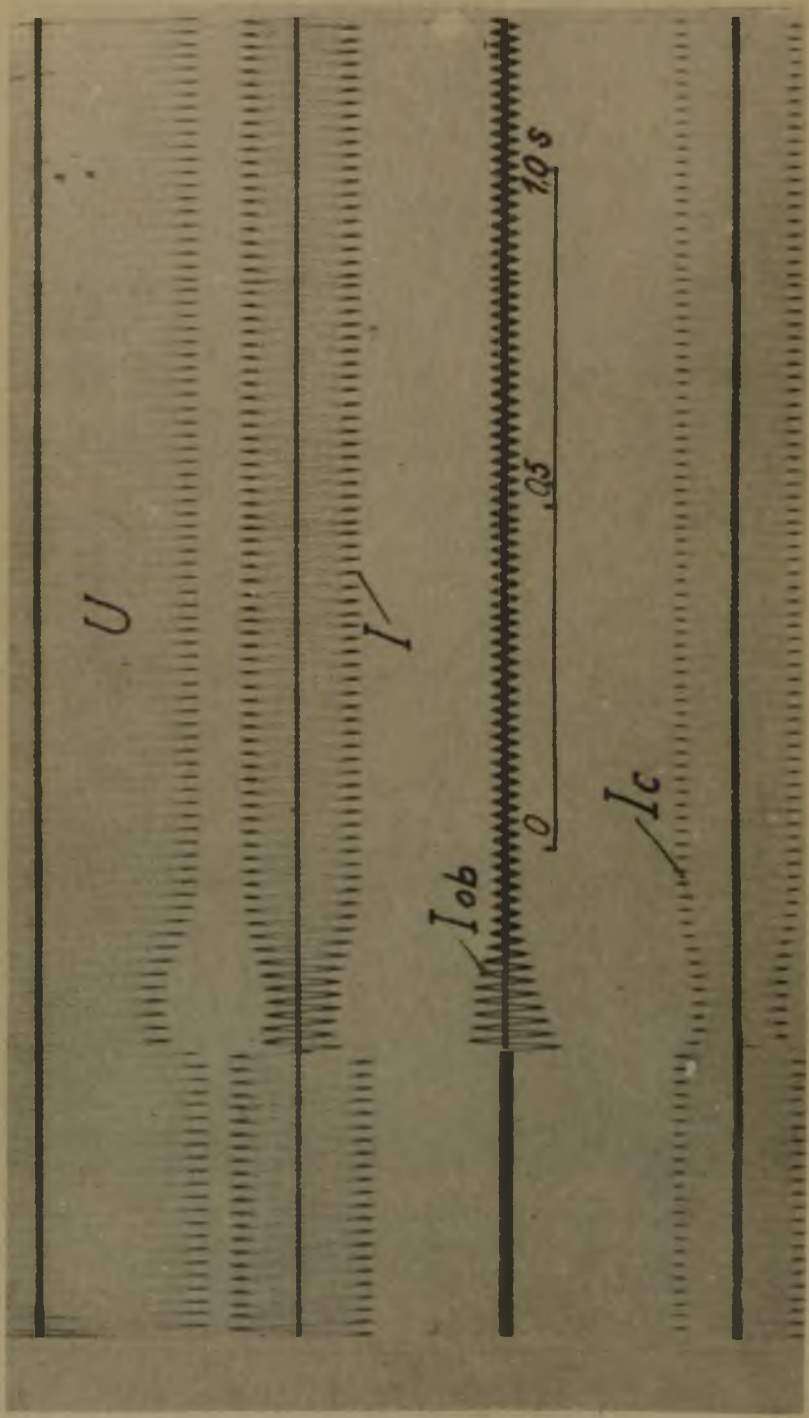
Rys. 13. Transduktorowy układ regulacji napięcia samowzbudnego generatora synchronicznego



Rys. 14. Oscylogram zwarcia i samowzbudzenia generatora asynchronicznego o parametrach 7 kW, U_N - 380 V n_{synchr} - 1500 obr/min, U - napięcie generatora, I - prąd obciążenia, I_c - prąd baterii kondensatorów



Rys. 15. Oscylogram samowzbudzenia i zanik napięcia na zaciskach generatora po wyłączeniu baterii kondensatorów Oznaczenie przebiegów jak na rys. 14



Rys. 16. Oscylogram rozruchu silnika klatkowego mocy 5 kW przyłączonego do zacisków samowzbudnego generatora asynchronicznego mocy 7 kW

U - napięcie generatora, I - prąd stojana generatora, I_{ob} - prąd rozruchu silnika przyłączonego, I_c - prąd baterii kondensatorów

6. Własności eksploatacyjne generatora

Zaletą generatora asynchronicznego jest przede wszystkim jego prostota budowy (zwykły klatkowy silnik asynchroniczny) i łatwość obsługi. Przy pracy równoległej z siecią sztywną generator pracuje przy wymuszonej częstotliwości stojana, natomiast przy przerwie połączenia z systemem jako samowzbudny generator asynchroniczny, pobierający prąd bierny z baterii kondensatorów.

Układ regulacji umożliwia utrzymanie poziomu napięcia przy pracy samotnej i pełne wykorzystanie znamionowej mocy turbiny.

W odróżnieniu od generatora synchronicznego prąd zwarcia ustalonego samowzbudnego generatora asynchronicznego jest równy zero. Własność ta utrudnia rozwiązanie selektywnego układu zabezpieczeń sieci zasilanej z samowzbudnego generatora asynchronicznego.

Na rys. 14 jest przedstawiony oscylogram zwarcia symetrycznego 6-biegunowego samowzbudnego generatora asynchronicznego (P_N = 7 kW, U_N = 220 V, I_N = 27 A).

Na oscylogramie jest widoczny momentalny zanik napięcia na zaciskach i zanik prądu baterii kondensatorów I_c. Prąd zwarcia zanika wykładniczo ze stałą czasową T_{zw} w ciągu kilku okresów do zera.

Po usunięciu zwarcia następuje powtórne samowzbudzenie generatora. Zapoczątkowanie procesu samowzbudzenia jest spowodowane przez magnetyzm szczątkowy wirnika generatora.

Na rys. 15 jest przedstawiony oscylogram samowzbudzenia generatora przy biegu jałowym i przebieg zaniku napięcia po wyłączeniu baterii kondensatorów.

Na rys. 16 przedstawiono oscylogram rozruchu klatkowego silnika asynchronicznego mocy 5 kW przyłączonego do zacisków generatora samowzbudnego. Początkowy prąd rozruchu jest równy 3,5-krotnej wartości prądu znamionowego, a napięcie zmniejsza się do wartości 78% U_N. Po siedmiu okresach na zaciskach generatora ustala się ponownie napięcie znamionowe.

Rękopis złożono w Redakcji w lutym 1966 r.

LITERATURA

[1] Kümmel F.: Der selbsterregte Asynchrongenerator mit annähern konstanter Spannung. ETZ A 21/1955.

[2] Barkle J.E., Ferguson R.W.: Induction generator. Theory and application. AIEE Trans. 1954 str. 12-19.

[3] Paszek W.: Przybliżona analizy generatora synchronicznego jako obiektu regulacji. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka 16, 1963.

САМОВОЗБУЖДАЮЩИЙСЯ АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР
СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Р е з ю м е

Представлены условия стабильности напряжения самовозбуждающегося асинхронного генератора при нагрузке эмкостным импедансем.
Стабильность напряжения получается при помощи управляемых или неуправляемых дросселей, шунтирующих внешнюю емкость.

SELF-EXCITED ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH THE STABILISED VOLTAGE

S u m m a r y

Description of the conditions of the voltage stability of the self-excited asynchronous generator at the load by the capacitive impedance. The voltage stabilization is arrived by the controlled or uncontrolled reactors shunting the external capacity.