ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 98 Elektryka z. 17 1964

WŁADYSŁAW PASZEK
Katedra Maszyn Elektrycznych

REGULACJA NAPIĘCIA PRĄDNICY PRĄDU STAŁEGO PRZY POMOCY TRANSDUKTORÓW

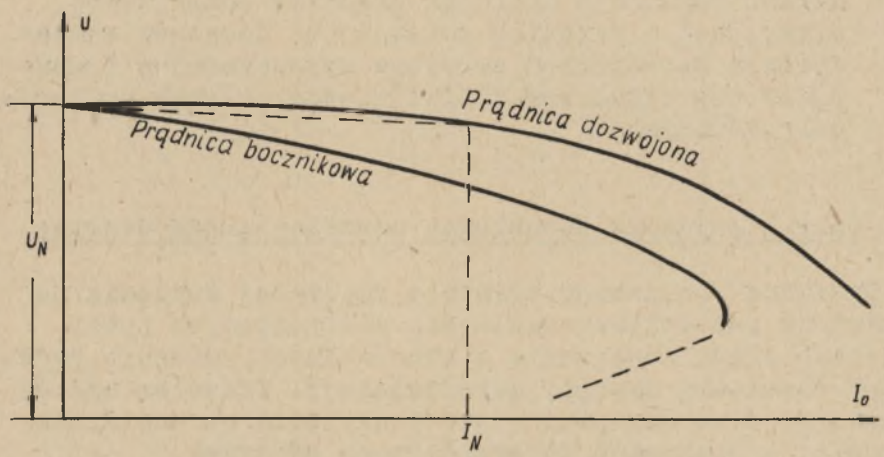
Streszczenie. Praca zawiera analizę działania układu regulacji napięcia prądnicy bocznikowej, dozwojonej i prądnicy z napięciowym dodatnim magnetycznym sprzężeniem zwrotnym wyposażonej w transduktorowy regulator z nieliniowym członem pomiarowo-porównawczym.

1. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy prądu stałego

Prądnica bocznikowa wykazuje zmienność napięcia na zaciskach pod wpływem wielkości zakłócających (przy zmianach prądu obciążenia i ewentualnych zmianach prędkości obrotowej maszyny napędzającej). Zadaniem układu regulacji jest utrzymać stałość napięcia na zaciskach prądnicy w granicach dopuszczalnych odchyłek.

Wymagania stawiane układowi regulacji obejmować mogą dokładność napięcia prądnicy w stanie ustalonym oraz szybkość ustalania napięcia przy nagłych zmianach prądu obciążenia. W przypadku w przybliżeniu stałej prędkości obrotowej prądnicy, podstawową wielkością zakłócającą jest prąd obciążenia. Uboczne wielkości zakłócające, jak zmiany prędkości obrotowej prądnicy i zmiany temperatury uzwojeń, odgrywają zwykle mniejszą rolę w porównaniu z prądem obciążenia prądnicy. W celu zmniejszenia wpływu podstawowej wielkości zakłócającej na napięcie prądnicy, można zastosować kompensację wielkości zakłócającej. W przypadku prądnic prądu stałego można w znacznym stopniu skompensować zmienność napięcia, spowodowaną przez prąd obciążenia za pomocą dozwojenia szeregowego prądnicy bocznikowej.

Rys.1 przedstawia typową charakterystykę zewnętrzną prądnicy bocznikowej z dozwojeniem i bez dozwojenia. Jeżeli jest pożądana większa dokładność stabilizacji napięcia prądnicy, aniżeli jest osiągalna za pomocą kompensacji, musimy wyposażyć prądnicę w regulator napięcia. Zadaniem układu regulacji jest pomierzyć odchyłkę napięcia prądnicy niezależnie od przyczyny, która ją spowodowała i przekazać ją na człon wzmacniający regulatora, który poprzez zmianę prądu wzbudzenia prądnicy spowoduje zmniejszenie, względnie zupełne zniesienie powstałej odchyłki.

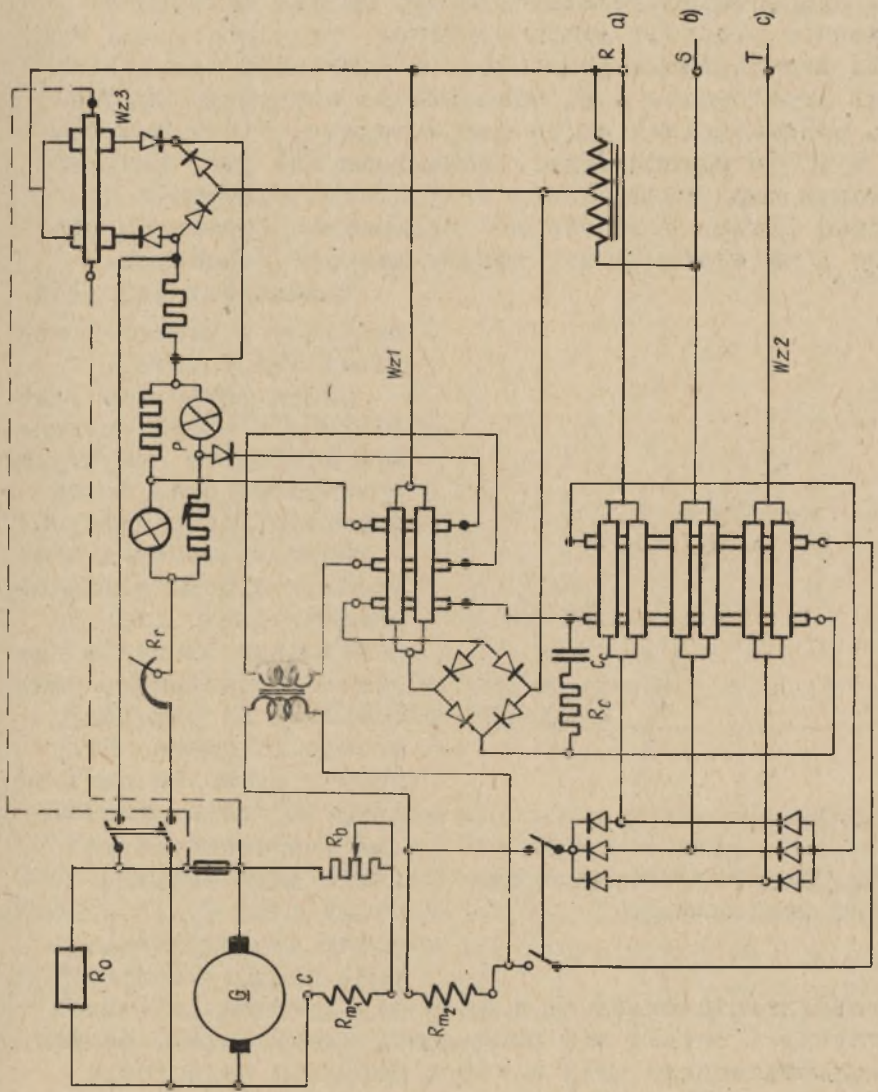


Rys.1. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy bocznikowej

2. Opis układu regulacji. Charakterystyka układu przy biegu jałowym prądnicy

Rys.2 przedstawia układ regulacji napięcia prądnicy prądu stałego złożony z członu pomiarowo-porównawczego i z kaskady dwóch wzmacniaczy magnetycznych.

Wstępny stopień wzmocnienia Wz1 jest transduktorem jednofazowym o układzie równoległym z dodatnim prądowym sprzężeniem zwrotnym. Podstawowe uzwojenie sterujące wzmacniacza jest przyłączone do zacisków wyjściowych



Rys.2

członu pomiarowo-porównawczego P złożonego z mostka oporności liniowych i nieliniowych.

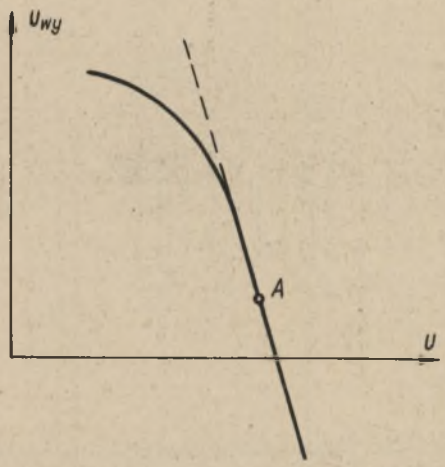
Drugim stopniem wzmocnienia i członem wykonawczym regulatora jest transduktor trójfazowy z dodatnim prądowym sprzężeniem zwrotnym, który zasila uzwojenie wzbudzenia prądnicy prądu stałego.

Dla zapobieżenia jednoczesnej komutacji wszystkich gałęzi prostownika s.z. wzmacniacza wstępnego wprowadzono pojemnościowy układ kompensujący, który bocznikuje wyjście wzmacniacza. Wzmacniacz Wz1 jest zasilany obniżonym napięciem sieci, przy którym otrzymuje się mniejszą liczbę prostowników selenowych łączonych szeregowo i mniejszą liczbę zwojów uzwojeń roboczych.

Wzmacniacz Wz2 jest zasilany z przemysłowej sieci trójfazowej.

Człon pomiarowy jest złożony z dwóch oporności liniowych (zwykłych oporników) oraz dwóch oporności nieliniowych.

Charakterystyka sterowania członu pomiarowo-porównawczego (rys.3) w roboczym zakresie napięcia wyjściowego jest zbliżona do przebiegu prostoliniowego. Przy pomocy opornika nastawczego R_r można przesuwać charakterystykę sterowania mostka. Punkt A na rys.3 odpowiada pracy prądnicy przy biegu jałowym.

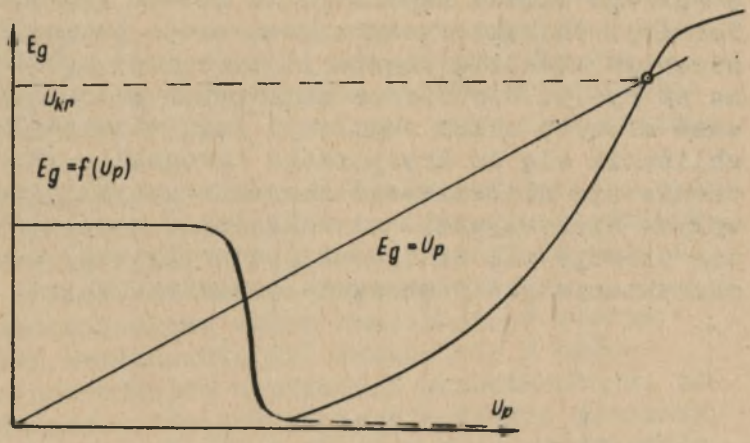


Rys.3. Charakterystyka członu pomiarowego

Przy obciążeniu prądnicy maleje napięcie na zaciskach generatora i ustala się nowy punkt pracy członu pomiarowo-porównawczego przy wyższym napięciu wyjściowym przekątnej mostka. Po wzmocnieniu odchyłki napięcia w wzmacniaczu wstępnym, następuje powiększenie prądu wyjściowego wzmacniacza Wz2 zasilającego uzwojenie wzbudzenia. Powiększenie prądu wzbudzenia zmniejsza powstałą

obniżkę napięcia tym skuteczniej, im większe jest statyczne wzmocnienie napięcia obiegu regulacji.

Wypadkowe wzmocnienie napięcia jest iloczynem wzmocnienia napięcia członu pomiarowo-wyrównawczego K_{up}, wzmacniacza wstępnego K_{u1}, wzmacniacza końcowego K_{u2}, oraz samej prądnicy K_{ug}.



Rys.4. Wypadkowa charakterystyka sterowania otwartego układu regulacji

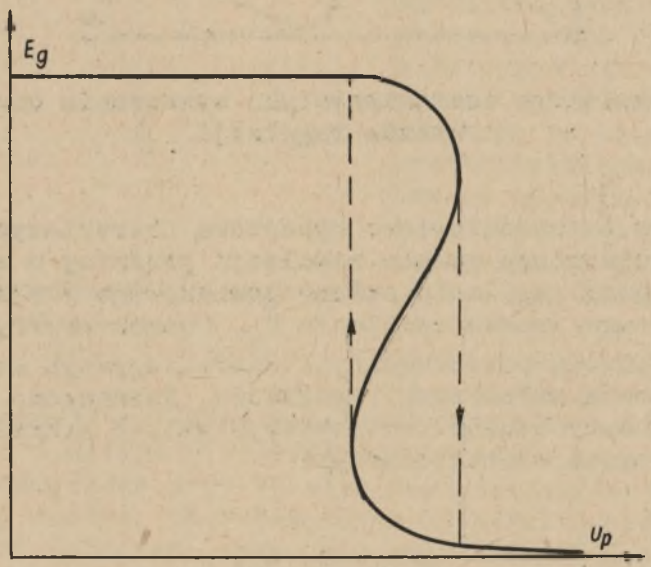
Na rys.4 przedstawiono wypadkową charakterystykę sterowania otwartego układu regulacji prądnicy w stanie jałowym przy zasilaniu członu pomiarowego z oddzielnego pomocniczego źródła zasilania U_p. Charakterystyka ta jest wypadkową poszczególnych charakterystyk statycznych członów składowych regulatora. Zaznaczono grubą linią roboczy odcinek charakterystyki. W zakresie liniowej części charakterystyki

$$\Delta E_g = \Delta U \, K_u,$$

gdzie: $K_u = K_{up} \, K_{u1} \, K_{ug}$.

E_g oznacza wewnętrzne napięcie rotacji prądnicy, które przy biegu jałowym jest równe w przybliżeniu napięciu na zaciskach.

Przy nieograniczenie dużym wzmocnieniu otwartego układu otrzymuje się astatyczną charakterystykę zewnętrzną prądnicy. Taką charakterystykę można otrzymać w rozpatrywanym układzie przy powiększeniu dodatniego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza wstępnego do wartości krytycznej. Przy nadkrytycznym sprzężeniu zwrotnym otrzymuje się niejednoznaczną charakterystykę sterowania otwartego układu regulacji na skutek przekaźnikowej deformacji charakterystyki sterowania transduktora. Przy otwartym układzie regulacji występuje pętlica zaznaczona na rys.5. W obszarze zamkniętym przez linie przerywane otwarty układ regulacji jest niestabilny. W miarę zbliżania się do krytycznego sprzężenia zwrotnego uwydatnia się nieliniowość charakterystyki sterowania, co wpływa niekorzystnie na dokładność regulacji, Przeważnie stosuje się statyczne (podkrytyczne) nastawienie charakterystyki sterowania otwartego układu regulacji.



Rys.5. Wypadkowa charakterystyka sterowania otwartego układu regulacji przy nadkrytycznym dodatnim sprzężeniu zwrotnym transduktora wstępnego

Charakterystyka sterowania przedstawiona na rys.4 ma niekorzystny wznoszący przebieg w zakresie nieroboczym z powodu rosnącej charakterystyki sterowania wzmacniaczy magnetycznych przy ujemnym wysterowaniu.

Jeżeli nierobocza część charakterystyki sterowania otwartego układu regulacji posiada punkt przecięcia z prostą $E_g = U_p$ (rys.4) układ utraci własności regulacyjne, gdy z jakiś powodów napięcie prądnicy wzrośnie powyżej wartości U_{kr}.

Przy pomocy prostownika w obwodzie wyjściowym członu pomiarowego (rys.4) można odciąć człon pomiarowy od wzmacniacza wstępnego przy przekroczeniu napięcia na krańcu roboczej charakterystyki sterowania. Na rys.4 zaznaczono linią przerywaną wypadkową charakterystykę sterowania otwartego układu regulacji przy zastosowaniu prostownika odcinającego.

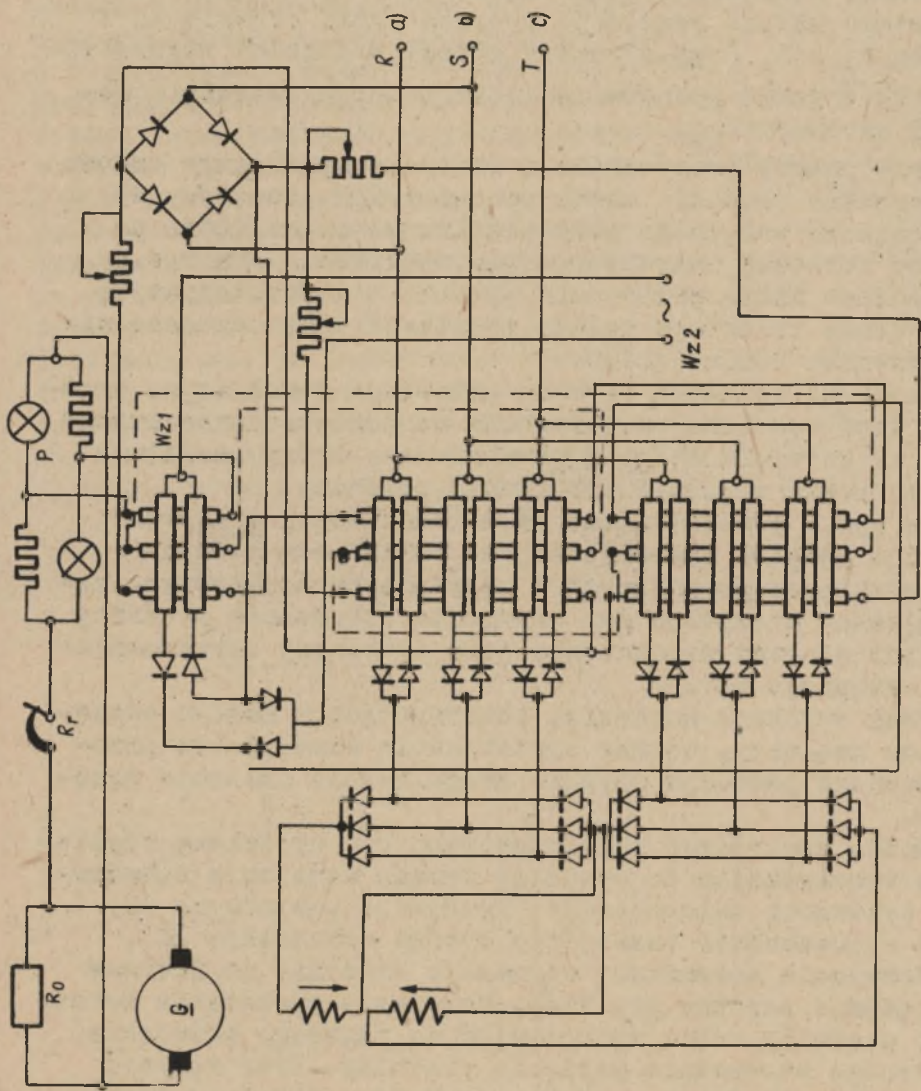
Jeśli są pożądane szybkie przebiegi regulacyjne prądnicy jest wskazane zastosowanie wzmacniacza przeciwsobnego na ostatnim stopniu wzmocnienia, który umożliwia zmianę znaku napięcia wzbudzenia prądnicy.

Na rys.6 przedstawiono układ regulacji, w którym ostatni stopień wzmocnienia Wz2 składa się z dwóch transduktorów pracujących w układzie przeciwsobnym, zasilających oddzielne dwa uzwojenia wzbudzenia prądnicy. Ostatni stopień wzmocnienia jest sterowany ze wzmacniacza wstępnego Wz1.

Przy zwyżkach napięcia, towarzyszących nagłym odciążeniom prądnicy, ujemne wysterowanie wzmacniacza przeciwsobnego powoduje szybkie zregulowanie napięcia prądnicy.

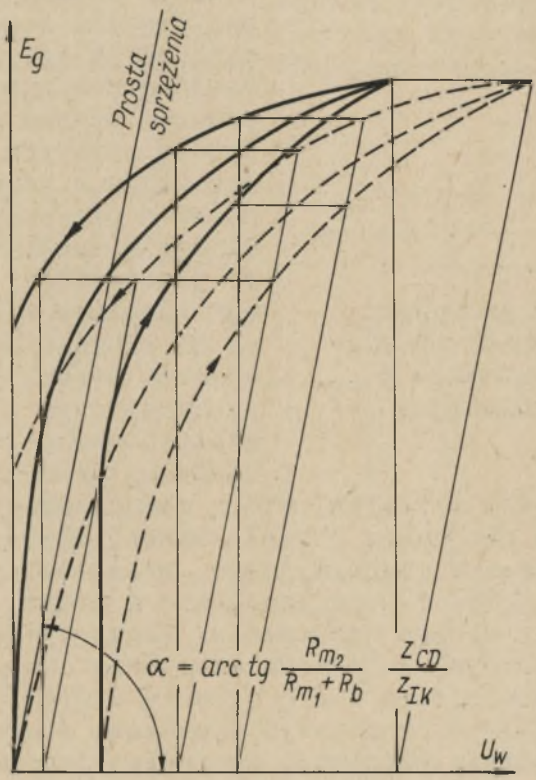
Można zmniejszyć zapotrzebowaną moc wyjściową regulatora wprowadzając do prądnicy drugie uzwojenie wzbudzenia połączone samowzbudnie (uzwojenie bocznikowe CD) bądź obcowzbudnie (uzwojenie obcego wzbudzenia IK).

Uzwojenie bocznikowe wprowadza dodatnie napięciowe sprzężenie zwrotne prądnicy. Uzwojenie sprzężenia zwrotnego prądnicy można wykorzystać do płynnego przejścia na ręczne sterowanie napięcia prądnicy. Przy ręcznym sterowaniu napięcia prądnica pracuje w układzie samowzbudnym (por. rys.2).



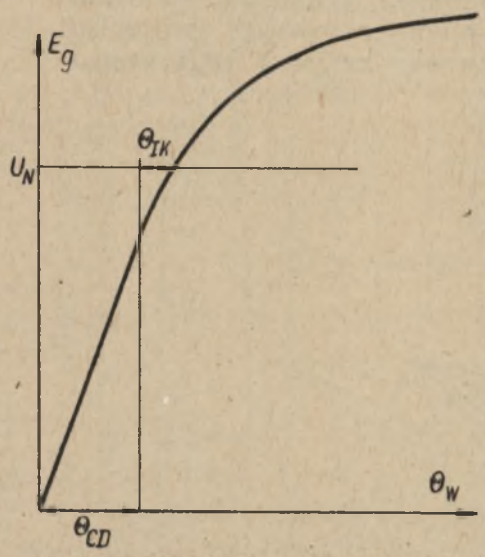
Rys.6

Na rys.7 przedstawiono konstrukcję charakterystyki sterowania prądnicy wyposażonej w dodatnie napięciowe sprzężenie zwrotne. Na granicy samowzbudzenia prosta sprzężenia pokrywa się z prostoliniowym odcinkiem średniej charakterystyki magnesowania. W miarę powiększania dodatniego sprzężenia zwrotnego rośnie wzmocnienie napięcia, lecz równocześnie rośnie stała czasowa i zwiększa się nieliniowość charakterystyki prądnicy. Ponadto uwydatnia się zniekształcenie charakterystyki prądnicy spowodowane przez pętlicę histerezy krzywej magnesowania prądnicy.



Rys.7. Konstrukcja charakterystyki sterowania prądnicy wyposażonej w dodatnie napięciowe sprzężenie zwrotne

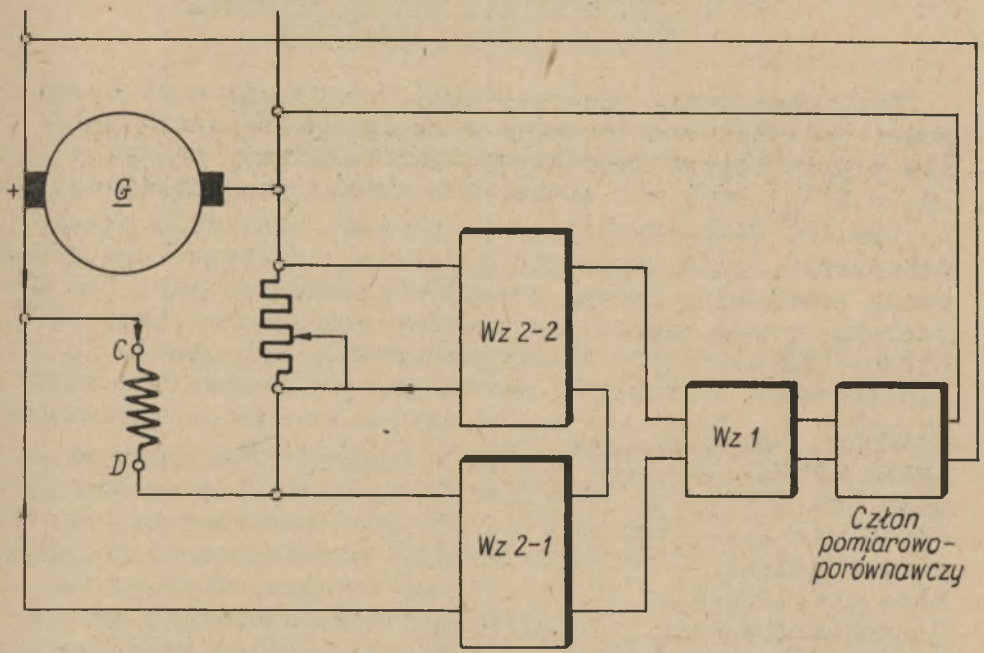
Uzwojenie obcego wzbudzenia prądnicy wytwarza podstawowy przepływ wzbudzenia θ_{Ik}. Drugie uzwojenie prądnicy - uzwojenie regulacyjne jest zasilane z wzmacniacza magnetycznego. Na rys.8 zaznaczono linią przerywaną stały przepływ wzbudzenia oraz przepływ regulacyjny. Przy obcym wzbudzeniu można zmniejszyć stałą czasową prądnicy. Jeżeli przyjmie się, że oba uzwojenia wzbudzenia są magnetycznie idealnie sprzężone, stała czasowa obwodów uzwojeń wzbudzenia prądnicy jest sumą stałych czasowych obwodów obu uzwojeń rozpatrywanych odrębnie. Na stałą czasową prądnicy wpływają ponadto zwarte obwody prądów wirowych w jarzmie stojana prądnicy, które w pierwszym przybliżeniu można zastąpić zwojem zwartym, sprzężonym idealnie z obu uzwojeniami wzbudzenia. Stała czasowa prądnicy obcowzbudnej jest sumą trzech stałych czasowych: stałej czasowej obwodu zastępczego strug prądów wirowych, którą można zmniejszyć przy złożeniu jarzma stojana z pakietu blach, stałej czasowej obwodu uzwojenia regulacyjnego, która maleje przy zmniejszeniu objętości tego uzwojenia i stałej czasowej obwodu uzwojenia obcego wzbudzenia. Przez wprowadzenie oporności dodatkowych do obwodu uzwojenia obcego wzbudzenia możemy zmniejszyć stałą czasową obwodu tego uzwojenia i równocześnie zmniejszyć wypadkową stałą czasową prądnicy. Oczywiście włączenie oporności dodatkowej powoduje powiększenie mocy zasilania tego uzwojenia, bowiem dla otrzymania niezmienionego przepływu jest konieczne wyższe napięcie zasilania uzwojenia wzbudzenia.



Rys.8. Rozdział przepływu wzbudzenia prądnicy na stały przepływ wzbudzenia i przepływ regulacyjny

Powiększenie oporności w obwodzie regulacyjnego uzwojenia wzbudzenia jest niewskazane ponieważ musielibyśmy powiększyć równocześnie moc wzmacniaczy regulatora. Natomiast powiększenie mocy zasilania uzwojenia podstawowego wpływa tylko na obniżenie sprawności zespołu, a nie przyczynia się do powiększenia zapotrzebowanej mocy wyjściowej regulatora. Należy podkreślić, że zmniejszenie stałej czasowej prądnicy można uzyskać w ten sposób za cenę mocy traconej w obwodach wzbudzenia. Na uwagę zasługuje zasilanie uzwojenia obcego wzbudzenia prądem wyprostowanym poprzez reaktancję szeregową włączoną w obwód prądu zmiennego przed prostownikiem. Zmniejszenie stałej czasowej uzwojenia obcego wzbudzania otrzymuje się w tym przypadku kosztem spożycia mocy biernej, którą można odpowiednio skompensować.

Przy braku oddzielnych uzwojeń wzbudzenia można przystosować układ regulacji do jednego uzwojenia wzbudzenia, które spełnia zadanie dwóch, względnie trzech oddzielnych uzwojeń.



Rys.9. Schemat blokowy układu regulacji z przeciwsobnym wzmacniaczem wykonawczym regulatora, przyłączonym do prądnicy o jednym uzwojeniu wzbudzenia

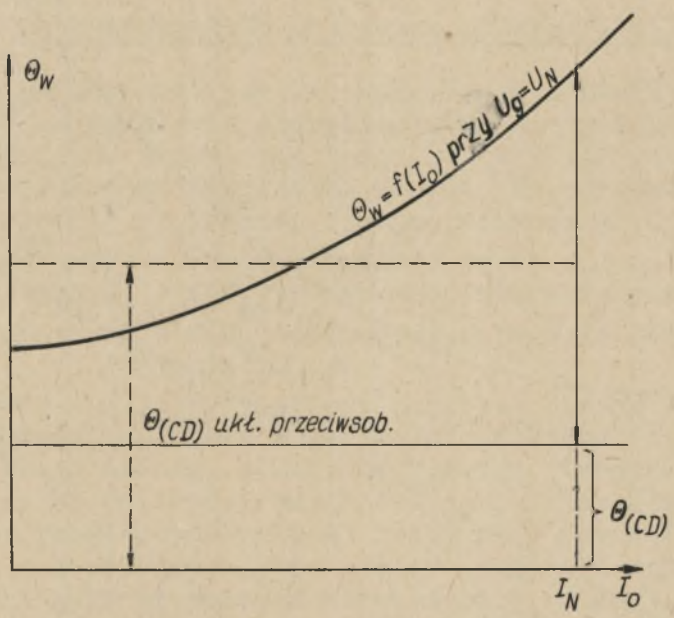
Na rys.9 jest przedstawiony schemat blokowy układu regulacji z przeciwsobnym wzmacniaczem zasilającym jedno uzwojenie wzbudzenia prądnicy. Uzwojenie wzbudzenia prądnicy jest również włączone w obwód dodatniego napięciowego sprzężenia zwrotnego prądnicy. Zgodnie magnesujący transduktor Wz2-1 układu przeciwsobnego jest przyłączony równolegle do uzwojenia wzbudzenia prądnicy, natomiast transduktor przeciwnie magnesujący Wz2-2 jest przyłączony równolegle do oporności dodatkowej w obwodzie dodatniego sprzężenia zwrotnego prądnicy.

Wytworzony przez prąd transduktora Wz2-2 spadek napięcia na tej oporności odejmuje się od napięcia twornika prądnicy i zmniejsza w ten sposób przepływ wzbudzenia. Sposób przyłączenia układu przeciwsobnego pozostaje niezmieniony przy obcym zasilaniu uzwojenia wzbudzenia. Przy wykorzystaniu jednego uzwojenia wzbudzenia prądnicy zapotrzebowana moc wyjściowa regulatora jest większa, aniżeli przy uzwojeniu rozdzielonym galwanicznie.

3. Charakterystyka układu regulacji przy obciążeniu prądnicy

Przy obciążeniu prądnicy układ regulacji musi spowodować powiększenie łącznego przepływu wzbudzenia zgodnie z przebiegiem charakterystyki regulacji prądnicy $\theta_w = f(I_o)$ przy n = const, U = const, przedstawionej na rys.10. Jeśli prądnica nie posiada uzwojenia obcego wzbudzenia, bądź uzwojenia dodatniego napięciowego sprzężenia zwrotnego, łączny przepływ wzbudzenia musi być wytworzony przez wzmacniacz końcowy regulatora. Przy zastosowaniu uzwojenia obcego wzbudzenia lub uzwojenia napięciowego sprzężenia zwrotnego, przeznacza się stały przepływ θ_{CD} bądź θ_{IK} na dodatkowe uzwojenie wzbudzenia (przy stałym napięciu prądnicy w stanie ustalonym przepływ ten jest stały niezależnie od tego, czy uzwojenie dodatkowe jest połączone w układzie samowzbudnym, czy obcowzbudnym), a przepływ rosnący monotonicznie ze wzrostem obciążenia na uzwojenie regulacyjne. W przypadku jednokierunkowego przeciwsobnego wzmacniacza na ostatnim stopniu wzmocnienia, minimalny przepływ wytworzony przez wzmacniacz końcowy powinien być kilkakrotnie wyż-

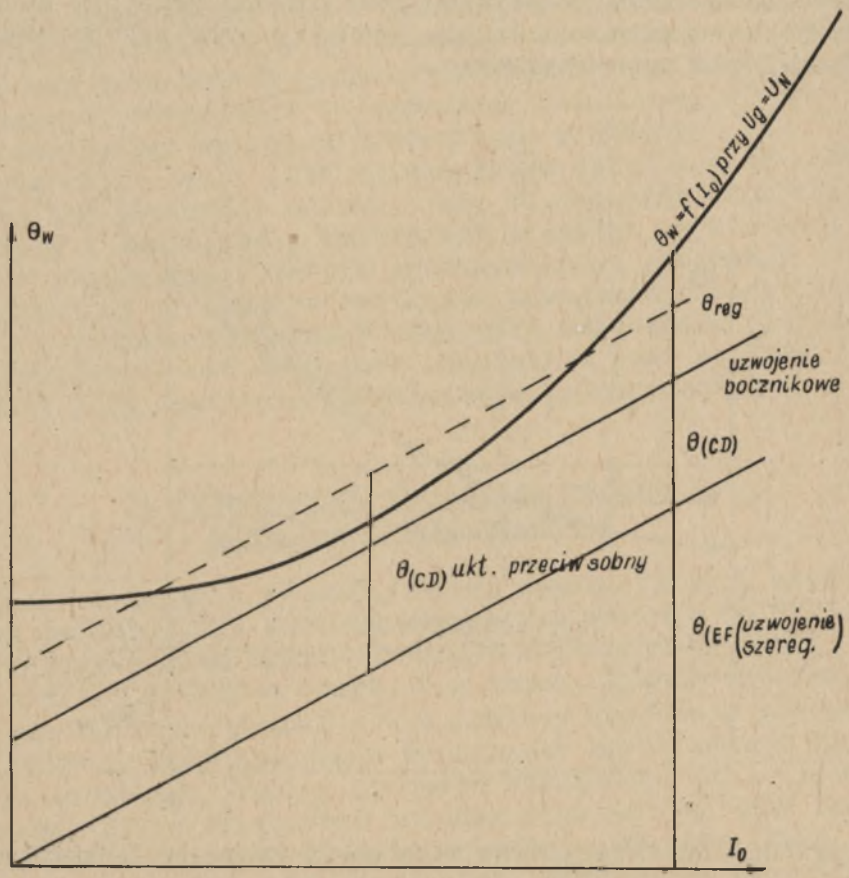
szy od przepływu przy minimalnym wysterowaniu wzmacniacza, w celu pozostawienia odpowiedniego zapasu regulacyjnego przy biegu jałowym prądnicy. Przy użyciu wzmacniacza przeciwsobnego można przyjąć większy przepływ wytworzony przez dodatkowe uzwojenie wzbudzenia. Na rys.10 zaznaczono linią przerywaną powiększony przepływ dodatkowego uzwojenia wzbudzenia prądnicy przy zastosowaniu wzmacniacza przeciwsobnego.



Rys.10. Charakterystyka regulacji prądnicy bocznikowej

Jeżeli prądnica jest wyposażona w dozwojenie szeregowe EF, które w dużym stopniu kompensuje spadek napięcia prądnicy przy wzroście obciążenia, zadanie układu regulacyjnego sprowadza się tylko do korekcji napięcia. W tym przypadku regulator jest nazywany korektorem napięcia prądnicy. Na rys.11 zaznaczono rozdział przepływów wzbudzenia prądnicy na bocznikowe uzwojenie dodatkowe, uzwojenie szeregowe oraz uzwojenie regulacyjne z wyj-

ściem jednokierunkowym. Linią przerywaną zaznaczono zwiększony przepływ pomocniczego uzwojenia wzbudzenia przy zastosowaniu układu przeciwsobnego.



Rys.11. Rozdział przepływu wzbudzenia prądnicy dozwojonej wyposażonej w korektor napięcia

Jeżeli zależy na utrzymaniu stałości napięcia na odległym krańcu linii łączącej odbiornik z prądnicą, układ regulacji powinien posiadać lekko wznoszącą się charakterystykę zewnętrzną. Taką charakterystykę zewnętrzną otrzymuje się przy pomocy kompoundacji członu

pomiarowego regulatora. W układzie przedstawionym na rys.2 spadek napięcia zbierany z bocznika, po wzmocnieniu za pomocą wzmacniacza Wz3, jest wtrącony w obwód członu pomiarowego. Przez zmianę oporności obciążenia wzmacniacza Wz3 można nastawić pożądany współczynnik statyzmu napięcia prądnicy

$$s = -\frac{\partial U}{\partial I_o} \cdot \frac{I_N}{U_N} \qquad (2)$$

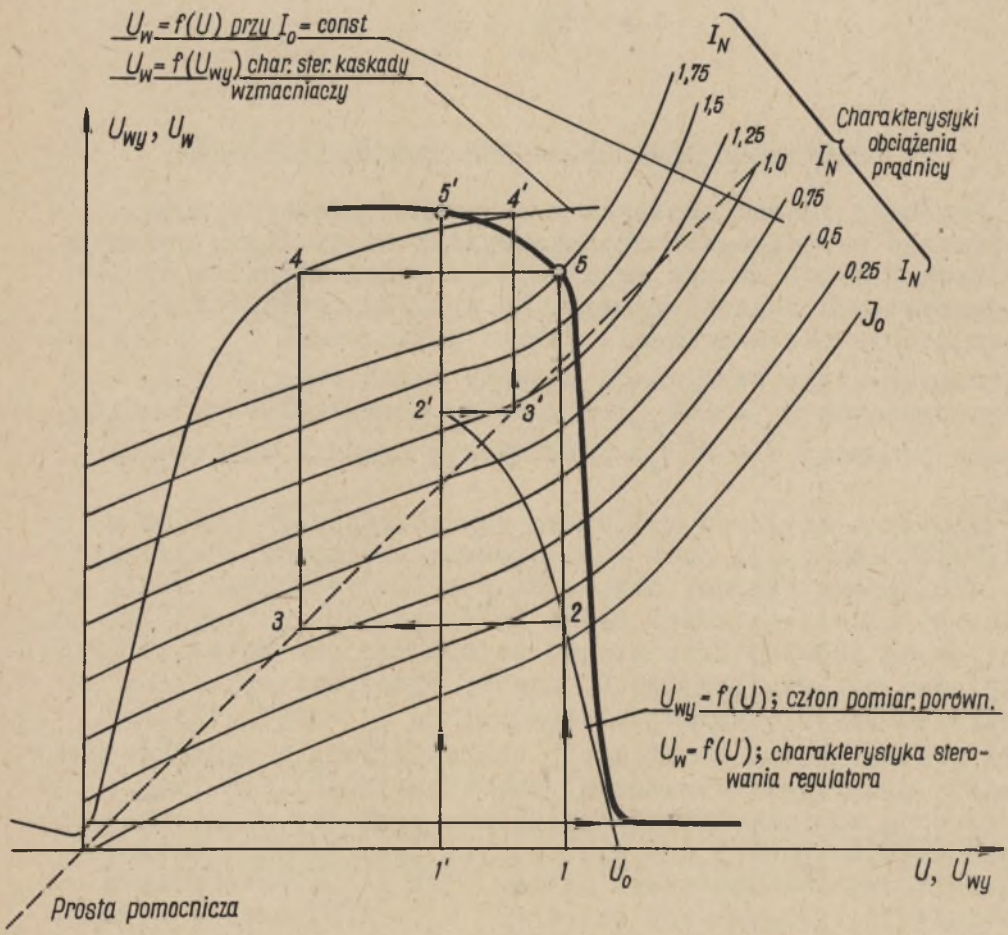
4. Charakterystyki statyczne układu regulacji

Przebieg charakterystyki zewnętrznej prądnicy można wyznaczyć na podstawie charakterystyk statycznych poszczególnych członów układu regulacji, z uwzględnieniem nieliniowości tych charakterystyk. Na rys.12a przedstawiono charakterystykę sterowania członu pomiarowego $U_{wy} = f(U)$, charakterystykę sterowania kaskady dwóch wzmacniaczy magnetycznych $U_w = f(U_{wy})$ i gromadę charakterystyk obciążenia prądnicy $U = f(U_w)$ przy stałym prądzie odbiornika I_o.

Ponieważ wielkość wyjściowa poprzedzającego członu w układzie regulacji jest równocześnie wielkością wejściową następnego członu, obrano na rys.12a jednakowe skale dla tej samej wielkości dwóch kolejnych charakterystyk. Za pomocą prostej pomocniczej nachylonej pod kątem 45° względem osi współrzędnych, możemy wyznaczyć wypadkową charakterystykę sterowania regulatora $U_w = f(U)$. Na rys. 12a przedstawiono konstrukcję charakterystyki wypadkowej. Punkty przecięcia wypadkowej charakterystyki regulatora z gromadą charakterystyk obciążenia prądnicy wyznaczają poszczególne punkty charakterystyki zewnętrznej. Zarówno charakterystyka otwartego układu, jak i charakterystyka obciążenia, przedstawia zależność $U_w = f(U)$ przy I_o=const.

Na podstawie charakterystyki napięcia na zaciskach prądnicy w funkcji prądu odbiornika można ocenić dokładność regulacji napięcia. Dokładność można określić przez podanie maksymalnego względnego uchybu napięcia prądnicy. Maksymalny uchyb względny jest wyrażony przez względną maksymalną odchyłkę napięcia prądnicy odniesioną do wartości znamionowej.

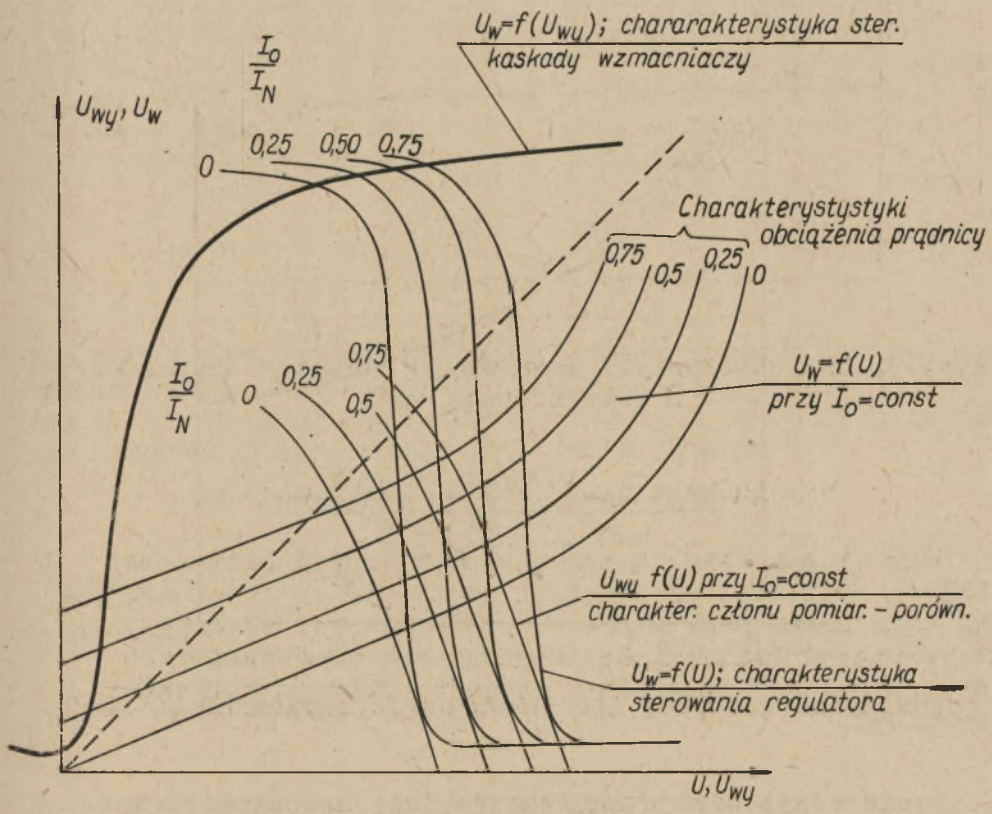
Celem zmniejszenia maksymalnej odchyłki nastawia się układ regulacji w ten sposób, by napięcie znamionowe było równe średniej wartości napięcia wziętej w całym zakresie zmienności obciążenia. Maksymalna odchyłka napięcia prądnicy występuje przy dwóch skrajnych położe-



Rys.12. Konstrukcja wypadkowej charakterystyki otwartego układu regulacji i charakterystyki zewnętrznej

a) bez kompoundacji członu pomiarowego, b) z kompoundacją członu pomiarowego

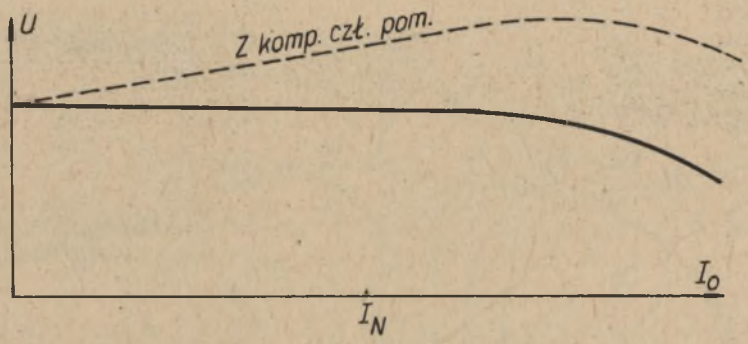
niach charakterystyk statycznych poszczególnych członów układu regulacyjnego. Skrajne charakterystyki prądnicy otrzymuje się przy uwzględnieniu dwu skrajnych gałęzi pętlicy histerezy prądnicy, natomiast dla wzmacniaczy magnetycznych przy dwóch skrajnych wartościach napięcia zasilania obwodu uzwojeń roboczych jeśli napięcie to zmienia się z jakiś powodów.



Rys.12b

Przy zastosowaniu kompoundacji członu pomiarowego przebieg charakterystyki członu pomiarowego jest uzależniony od prądu obciążenia. Uważając prąd odbiornika jako stały parametr otrzymuje się na wykresie gromadę charakterystyk członu pomiarowego przesuniętą równolegle w prawo dla

rosnących prądów odbiornika (rys.12b). Punkty przecięcia gromady wypadkowych charakterystyk otwartego układu regulacji z gromadą charakterystyk obciążenia wyznaczają poszczególne punkty charakterystyki zewnętrznej. Na rys.13 przedstawiono zależność napięcia na zaciskach prądnicy w funkcji prądu odbiornika I_o przy zastosowaniu kompoundacji członu pomiarowego.



Rys.13. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy wyposażonej w układ regulacji

5. Stabilność układu regulacji

Ograniczymy się do badania stabilności statycznej układu regulacji przy małych wychyleniach z domniemanego ustalonego punktu pracy, który znamy z analizy charakterystyk statycznych. W przypadku transduktora o skompensowanym naturalnym ujemnym prądowym sprzężeniu zwrotnym.

$$\frac{\Delta U_{wy}(p)}{\Delta U_{we}(p)} = \frac{K_u}{1 + pT}$$

Przyrostowe wzmocnienie napięcia K_u i stała czasowa T zależy od punktu pracy transduktora.
Przez ΔU_{wy}, ΔU_{we} oznaczono odchyłki od założonego punktu pracy ustalonej transduktora.

Przy nienasyconym obwodzie magnetycznym i przy pominięciu pętlicy histerezy można traktować prądnicę jako liniowy wzmacniacz inercyjny o statycznym wzmocnieniu K_{ug}. Przy założeniu idealnego sprzężenia uzwojeń wzbudzenia prądnica przedstawia wzmacniacz inercyjny pierwszego rzędu, którego stała czasowa T_{wo} jest sumą stałych czasowych wszystkich uzwojeń wzbudzenia i zastępczego obwodu strug prądów wirowych stojana prądnicy (o ile stojan jest wykonany z bloku litego). Uwzględnienie indukcyjności rozproszeń poszczególnych uzwojeń przy nieidealnym sprzężeniu magnetycznym między uzwojeniami wzbudzenia prowadzi do skomplikowania transmitancji, natomiast praktyczny wynik rozważań przy ocenie przebiegów regulacji zostanie prawie niezmieniony. W stanie nienasyconym możemy przedstawić transmitancję prądnicy.

$$\frac{\Delta E_g(p)}{\Delta U_w(p)} = \frac{K_{ugo}}{1+pT_{wo}} \tag{3}$$

Nasycenie obwodu magnetycznego prądnicy powoduje zmniejszenie wzmocnienia i stałej czasowej. Przy małym wychyleniu z punktu pracy od założonej wartości ustalonej, można przedstawić transmitancję prądnicy w postaci

$$\frac{\Delta E_g(p)}{\Delta U_w(p)} = \frac{K_{ug}}{1+pT_w} \tag{4}$$

przy czym

$$K_{ug} = K_{ug}\xi$$

Jeśli nasycenie występuje tylko w tworniku prądnicy

$$T_w \approx T_{wo}\left[\xi + \frac{L_{\sigma m}}{L_{wo}}(1-\xi)\right],$$

gdzie: $\frac{L_{\sigma m}}{L_{wo}}$ - stosunek indukcyjności rozproszenia magnetycznego do indukcyjności uzwojenia wzbudzenia przy nienasyconym obwodzie magnet.

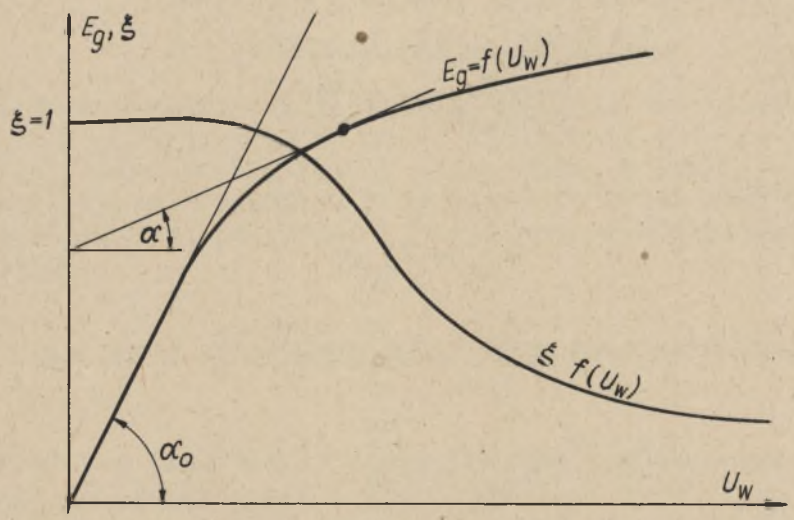
Jeśli nasycenie występuje tylko w jarzmie stojana

$$T_w = T_{wo}\xi$$

W rzeczywistości zachodzi przypadek pośredni. Współczynnik nasycenia ξ można wyznaczyć na podstawie charakterystyki biegu jałowego prądnicy jako stosunek nachylenia krzywej w rozpatrywanym punkcie pracy do początkowego nachylenia charakterystyki biegu jałowego (rys.14)

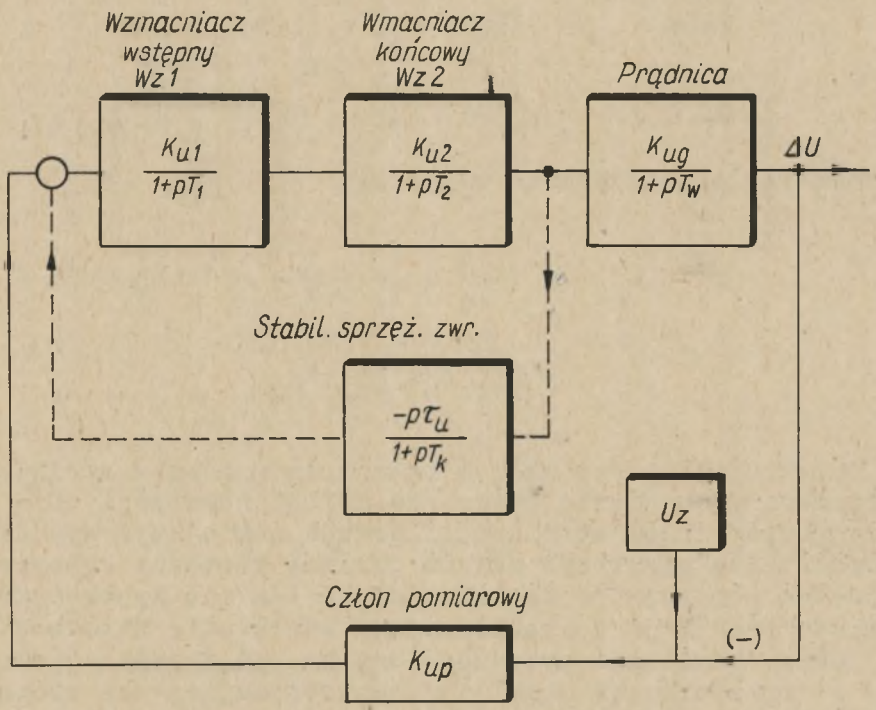
$$\xi = \frac{t_g \alpha}{t_g \alpha_o} \tag{5}$$

Stosunek indukcyjności rozproszenia magnetycznego $L_{\sigma m}$ do całkowitej indukcyjności uzwojenia wzbudzenia L_{wo} w stanie nienasyconym waha się praktycznie w granicach 0,05-0,15.



Rys.14. Charakterystyka współczynnika nasycenia prądnicy

Na rys.15 jest przedstawiony schemat strukturalny układu regulacji przy biegu jałowym prądnicy. Na schemacie zaznaczono transmitancję przyrostową poszczególnych



Rys.15. Schemat strukturalny układu regulacji

członów. Analizę ograniczymy do przypadku biegu jałowego prądnicy, przy którym występują na ogół gorsze warunki stabilności, aniżeli przy obciążeniu. Mając na uwadze, że transmitancja kaskady wzmacniacza jest iloczynem transmitancji poszczególnych członów, otrzymuje się na podstawie schematu strukturalnego wielomian charakterystyczny $W_3(p)$ zamkniętego układu regulacji

$$W_3(p) = (1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_w) + K_{up}\cdot K_{u1}\cdot K_{u2}\cdot K_{ug} = \tag{6}$$

$$= a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3$$

Warunek stabilności układu przy dodatnich wszystkich współczynnikach wielomianu określa nierówność Hurwitza

$$\begin{vmatrix} a_0, & a_1 \\ a_2, & a_3 \end{vmatrix} > 0,$$

którą można przedstawić w postaci

$$(T_1 + T_2 + T_w)\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_w}\right) - 1 > K_u = \\ = K_{up}\, K_{u1}\, K_{u2}\, K_{ug} \tag{7}$$

Warunek stabilności układu ogranicza z góry wartość granicznego wzmocnienia otwartego układu regulacji. Dla uzyskania zapasu stabilności trzeba zmniejszyć wypadkowe wzmocnienie otwartego układu poniżej wartości krytycznej kosztem pogorszenia dokładności, o ile nie wyposażymy układu regulacji w stabilizujące sprzężenie zwrotne.

Układ regulacji przedstawiony na rys.2 jest wyposażony w transformator stabilizujący obejmujący oba stopnie wzmocnienia regulatora. Stabilizujące sprzężenie zwrotne reaguje na pochodną napięcia uzwojenia wzbudzenia i nie wpływa na kształt charakterystyk statycznych układu regulacji. Wyjście transformatora stabilizującego jest przyłączone do pomocniczego uzwojenia sterującego wzmacniacza wstępnego Wz1. Za pomocą oporności dodatkowej w obwodzie pierwotnym transformatora można ograniczyć wartość składowej stałej prądu uzwojenia pierwotnego w stanie ustalonym. Za pomocą szczeliny powietrznej w obwodzie transformatora można nastawić optymalny współczynnik indukcyjności wzajemnej transformatora.

Na rys.15 przedstawiono linią przerywaną miejsce przyłączenia stabilizującego sprzężenia zwrotnego. Transmitancję podatnego sprzężenia zwrotnego aproksymowano równaniem

$$\frac{\Delta U_{we}(p)}{\Delta U_{wy}(p)} = \frac{p\tau_u}{1+pT_k} \tag{8}$$

Stabilizacyjne sprzężenie zwrotne powiększa stopień wielomianu charakterystycznego

$$W_4(p) = \left[(1+pT_k)(1+pT_1)(1+pT_2) + pK_{u1}\,K_{u2}\,\tau_u\right]\cdot(1+pT_w) +$$

$$+ K_{up}K_{u1}K_{u2}K_{ug}\,(1+pT_k) = a_o p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4,$$

gdzie

$$a_o = T_k \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_w$$

$$a_1 = T_k\,T_1\,T_2 + T_1\,T_2\,T_w + T_2\,T_w\,T_k + T_w\,T_k\,T_1,$$

$$a_2 = T_k\,T_1 + T_k\,T_2 + T_k\,T_w + T_1\,T_2 + T_1\,T_w + T_2\,T_w +$$

$$+ K_{u1}\,K_{u2}\,\tau_u\,T_w,$$

$$a_3 = T_k + T_1 + T_2 + T_w + K_{u1}\,K_{u2}\,\tau_u + K_{up}\,K_{u1}\,K_{u2}$$

$$K_{ug}\,T_k,$$

$$a_4 = 1 + K_{up}\,K_{u1}\,K_{u2}\,K_{ug} \tag{9}$$

Przy dodatnich współczynnikach wielomianu charakterystycznego $W_4(p)$ warunek stabilności

$$a_1(a_2\,a_3 - a_1\,a_4) - a_o\,a_3^{\,2} > 0 \tag{10}$$

Przyjmując uproszczenie, że układ regulacji jest układem o bardzo dużym wzmocnieniu kaskady objętej sprzężeniem, otrzymuje się na mocy [3] uproszczony wielomian charakterystyczny

$$W_{m+1}(p) = W_2(p) = p\tau_u(1+pT_w) + K_{ug}\,(1+pT_k) \tag{11}$$

który spełnia zawsze konieczne warunki stabilności układu regulacji.

Warunek dostateczny

$$B_1 A_o - A_1 B_o > 0,$$

czemu odpowiada

$$\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_w} + \frac{1}{T_k}\right) T_w > \left(1+K_{ug} K_{up} \frac{T_k}{\tau_u}\right) \qquad (12)$$

Na rys.6 jest przedstawiony układ stabilizujący, w którym wykorzystano podatne sprzężenie zwrotne reagujące na pochodną strumienia podmagnesowania [3] przeciwsobnego wzmacniacza transduktorowego Wz2.

Rękopis złożono w redakcji w marcu 1963 r.

LITERATURA

[1] Z. Gogolewski, W. Gabryś: Maszyny prądu stałego. PWT 1960.

[2] W.G. Komar: Regulirowanie napriażenia generatorów postojannogo toka magnitnymi usilitielami. Elektriczestwo 4/1949.

РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОМОЩИ ТРАНСДУКТОРОВ

Содержание

Автором дается анализ действия системы регулировки напряжения шунтового генератора, со смешанным возбуждением и генератора с положительной обратной связью по напряжению, оборудованного трансдукторным регулятором с нелинейной измерительно-сравнительным звенем.

RÉGLAGE DE LA TENSION DE LA DYNAMO À COURANT CONTINU À L'AIDE DES TRANSDUCTEURS

Résumé

Ce rapport contient l'analyse du système de réglage de tension de la dynamo a excitation en dérivation, et celle à excitation compound et aussi de la dynamo à contre-réaction positive de tension, munie de régulateur avec le membre non-linéaire de mesure.