

11. ELEKTROMASZYNOWE ELEMENTY AUTOMATYKI

11.1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Przetworniki elektromaszynowe są bardzo często elementami układów automatyki i telemechaniki. Są to małe maszyny elektryczne, czasem mające specjalną konstrukcję albo działające na innej zasadzie, niż typowe maszyny elektryczne. Zadaniem tych maszyn (przetworników) jest przetwarzanie sygnałów, będących wielkościami jednego rodzaju, na odpowiedzi, będące wielkościami innego rodzaju.

Elektromaszynowe elementy automatyki mogą być podzielone na następujące grupy:

- silniki wykonawcze, przetwarzające sygnał elektryczny (napięcie sterujące U_s) na sygnał mechaniczny (obróć wału);
- prądnice tachometryczne, przetwarzające sygnał mechaniczny (prędkość obrotową) na sygnał elektryczny (napięcie);
- przetworniki położenia, przetwarzające sygnały (wielkości) charakteryzujące położenie (np. kąt albo położenie) na sygnał elektryczny.

Elektromaszynowe elementy automatyki często muszą się odznaczać szczególnymi cechami, które w zwykłych maszynach elektrycznych nie odgrywają zasadniczej roli. Maszyny te powinny m. in. dawać odpowiedzi obciążone bardzo małymi błędami. Uzyskanie tego wymaga stosowania specjalnych procesów technologicznych, gwarantujących dużą precyzję wykonania. Częstym wymaganiem stawianym tym maszynom są małe wymiary i mała masa.

11.2. SILNIKI WYKONAWCZE

11.2.1. Silniki wykonawcze prądu stałego

Silniki wykonawcze prądu stałego mają najczęściej obwód magnetyczny wykonany z blach. Budowane są one albo jako silniki obcowzbudne (ze wzbudzeniem elektromagnetycznym) albo jako silniki z magnesami trwałymi. Silnik obcowzbudny może być sterowany napięciem twornika albo napięciem magnesującym¹⁾. Silnik z magne-

¹⁾ Jest to napięcie doprowadzone do uzwojenia umieszczonego na magnesach. W poprzednich rozdziałach nazywano je napięciem wzbudzenia.

sami trwałymi może być sterowany napięciem twornika. W porównaniu ze zwykłymi silnikami obcowzbudnymi silnik wykonawczy prądu stałego, jako maszyna o bardzo małej mocy znamionowej ma znacznie większą wartość względną momentu tarcia (do kilkudziesięciu procent wartości momentu znamionowego), prądu jałowego (do 20÷25% wartości prądu znamionowego), strat mechanicznych (do 20÷25% wartości mocy znamionowej) i strat wzbudzenia (do 30÷50% wartości mocy znamionowej). Sprawność tych silników o mocach znamionowych 5÷10 W wynosi zwykle 25÷30%. Niektóre bardzo małe (np. o mocy kilku watów) silniki prądu stałego ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym w wykonaniu specjalnym (uzwojenie bezrdzeniowe, magnesy o bardzo dużym $(BH)_{\max}$, złoty komutator, specjalne szczotki) mają sprawność dochodzącą nawet do 70%.

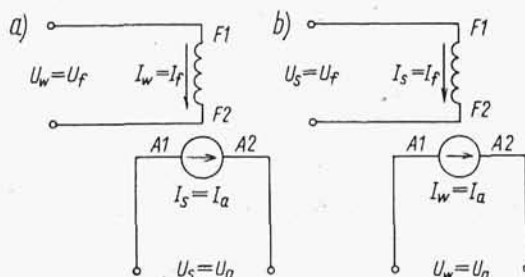
Do najważniejszych zalet silnika wykonawczego prądu stałego należą:

- samohamowność;
- stabilność charakterystyki mechanicznej i regulacyjnej;
- małe wymiary;
- szybka odpowiedź.

Do wad tego silnika należą:

- duży moment tarcia;
- ślizgowy styk szczotki z komutatorem, co zmniejsza pewność ruchu i może spowodować iskrzenie.

Do silnika prądu stałego obcowzbudnego doprowadzone są dwa napięcia. Jedno z nich o niezmienniej wartości doprowadza się do jednego z obwodów (magnesującego lub twornika) w sposób ciągły. To napięcie nazywa się *napięciem wzbudzenia* i oznacza się U_w , niezależnie od tego, do którego uzwojenia jest doprowadzone. Drugie napięcie o regulowanej wartości doprowadza się (najczęściej impulsami) do drugiego z uzwojeń. To napięcie nazywa się *napięciem sterującym* i oznacza się U_s .



Rys. 11.1. Schemat silnika obcowzbudnego prądu stałego sterowanego:

a) napięciem twornika; b) napięciem magnesującym

Rozróżnia się silniki wykonawcze sterowane napięciem twornika (rys. 11.1a) lub napięciem magnesującym (rys. 11.1b). Zgodnie z rozważaniami prowadzonymi w rozdz. 6:

- moment wytworzony w silniku

$$M = c_M \Phi I_a$$

– prąd płynący przez twornik

$$I_a = \frac{U_a - U_{ia}}{R_a}$$

– napięcie indukowane w tworniku

$$U_{ia} = c_U \Phi n$$

Stąd

$$I_a = \frac{U_a - c_U \Phi n}{R_a} \quad (11.1)$$

oraz

$$M = \frac{c_M \Phi U_a - c_U c_M \Phi^2 n}{R_a} \quad (11.2)$$

W przypadku sterowania napięciem twornika $U_w = U_f = \text{const}$; $I_w = I_f = \text{const}$; $U_s = U_a = \text{var}$. Ponadto zakłada się prostoliniową charakterystykę magnesowania, więc $\Phi = c_\Phi U_f$. Oznacza się

$$k = \frac{U_s}{U_w} = \frac{U_a}{U_f} \quad (11.3)$$

Wtedy

$$M = \frac{c_M c_\Phi k U_f^2 - c_U c_M c_\Phi^2 U_f^2 n}{R_a} \quad (11.4)$$

Moment początkowy (przy $n = 0$) przy $U_a = U_f$ (czyli przy $k = 1$) przyjmuje się za jednostkę momentu

$$M_{p(j)} = \frac{c_M c_\Phi U_f^2}{R_a} \quad (11.5)$$

Wtedy względna wartość momentu

$$m = \frac{M}{M_{p(j)}} = k - c_U c_\Phi n \quad (11.6)$$

Prędkość obrotowa przy biegu jałowym ($M = 0$) i przy $U_a = U_f$ ($k = 1$) przyjęta jest za jednostkę prędkości

$$n_0 = n_{(j)} = \frac{1}{c_U c_\Phi} \quad (11.7)$$

Prędkość obrotowa względna $v = n/n_0$, stąd

$$m = k - v \quad (11.8)$$

Oznacza to, że zależność momentu od prędkości obrotowej, czyli charakterystyka mechaniczna, obcowzbudnego silnika wykonawczego prądu stałego jest charakterystyką prostoliniową.

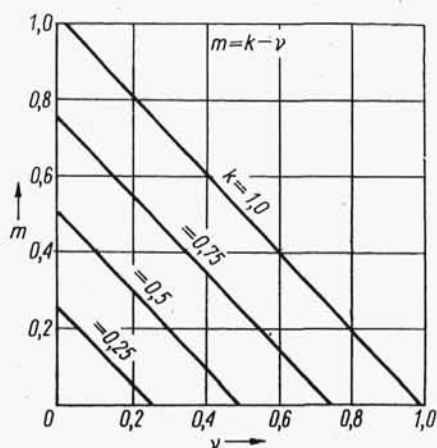
Wartość względna momentu początkowego

$$m_p = k$$

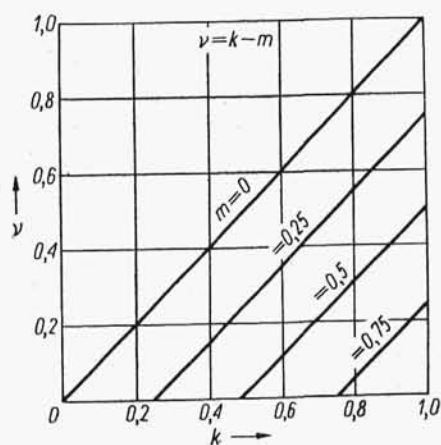
i zgodnie z definicją współczynnika k według wzoru (11.3) jest proporcjonalna do regulowanej wartości napięcia twornika. Względna wartość prędkości biegu jałowego

$$v_0 = k$$

Prostoliniowość charakterystyk mechanicznych (rys. 11.2) i regulacyjnych (rys. 11.3) jest dużą zaletą silnika wykonawczego obcowzbudnego prądu stałego sterowanego napięciem twornika.



Rys. 11.2. Charakterystyki mechaniczne silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem twornika



Rys. 11.3. Charakterystyki regulacyjne silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem twornika

Moc sterująca $P_s = U_a I_a$, skąd po wykorzystaniu poprzednich wzorów

$$P_s = \frac{k^2 U_f^2}{R_a} - \frac{kv U_f^2}{R_a} \quad (11.9)$$

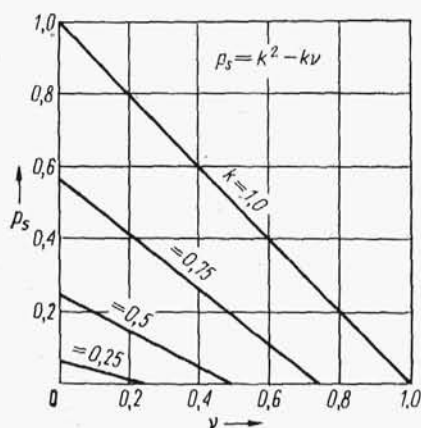
Przyjmuje się za jednostkę mocy moc przy $k = 1$ i $v = 0$, czyli moc

$$P_{s(1)} = \frac{U_f^2}{R_a} \quad (11.10)$$

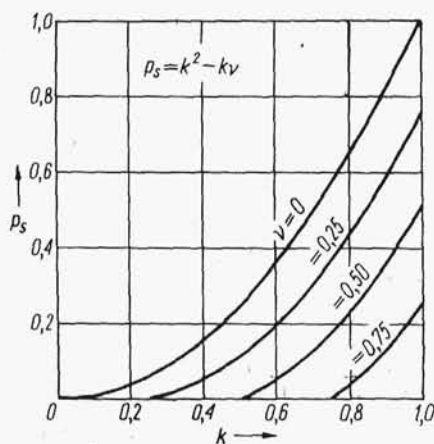
stąd względna wartość mocy sterującej

$$p_s = k^2 - kv \quad (11.11)$$

Zależność $p_s = f(v)$ pokazano na rys. 11.4, a zależność $p_s = f(k)$ na rys. 11.5.



Rys. 11.4. Zależność mocy sterującej od prędkości obrotowej silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem twornika



Rys. 11.5. Zależność mocy sterującej od napięcia twornika silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem twornika

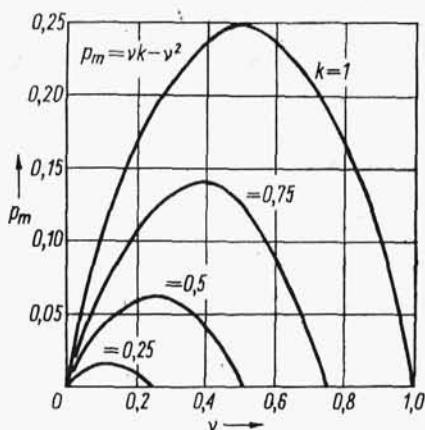
Przy pominięciu strat mechanicznych i wentylacyjnych moc mechaniczna

$$P_m = P_s - R_a I_a^2 = \frac{U_f^2}{R_a} (vk - v^2) \quad (11.12)$$

a względna wartość mocy mechanicznej

$$p_m = vk - v^2 \quad (11.13)$$

Przy $k = \text{const}$ równanie (11.13) oznacza parabolę (rys. 11.6). Współrzędne ekstremum paraboli wynoszą $v_{\text{ex}} = k/2$, $p_{\text{ex}} = k^2/4$. Maksymalna moc mechaniczna jest proporcjonalna do k^2 .



Rys. 11.6. Zależność mocy mechanicznej od prędkości silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem twornika

W silniku wykonawczym obcowzbudnym prądu stałego sterowanym napięciem magnesującym jest $U_w = U_a = \text{const}$, $U_s = U_f = \text{var}$.

Oznacza się

$$k = \frac{U_s}{U_w} = \frac{U_f}{U_a} \quad (11.14)$$

Wtedy ze wzoru (11.2) przy założeniu liniowości charakterystyki magnesowania otrzymuje się

$$M = \frac{c_M c_\Phi k U_a^2 - c_U c_M c_\Phi^2 k^2 U_a^2 n}{R_a} \quad (11.15)$$

Za jednostkę momentu przyjmuje się moment początkowy (przy $n = 0$) przy $U_f = U_a$ ($k = 1$)

$$M_{p(j)} = \frac{c_M c_\Phi U_a^2}{R_a}$$

co przy $k = 1$ oznacza tę samą wartość, co i wartość określona wzorem (11.5).

Za jednostkę prędkości przyjmuje się prędkość przy biegu jałowym ($M = 0$) przy $U_f = U_a$ ($k = 1$), czyli prędkość określoną wzorem (11.7). Wtedy związek między

dzy względną wartością momentu m i względną wartością prędkości obrotowej v ma postać

$$m = k - k^2 v \quad (11.16)$$

Względna wartość momentu początkowego

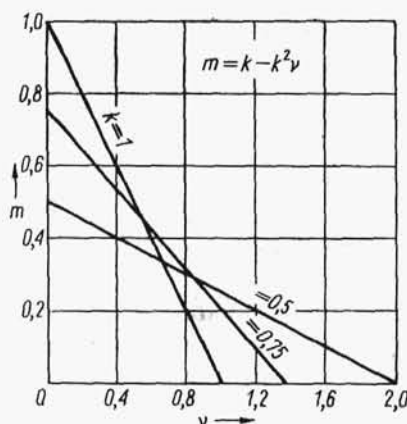
$$m_p = k$$

czyli wyraża się identycznie, jak w przypadku sterowania napięciem twornika. Względna wartość prędkości biegu jałowego

$$v_0 = \frac{1}{k}$$

Przy wzroście napięcia sterującego (w tym przypadku napięcia magnesującego) moment początkowy rośnie, a prędkość biegu jałowego maleje.

Na rysunku 11.7 przedstawiono, wykreślone według wzoru (11.16), charakterystyki mechaniczne silnika wykonawczego obcowzbudnego prądu stałego sterowanego napięciem magnesującym.

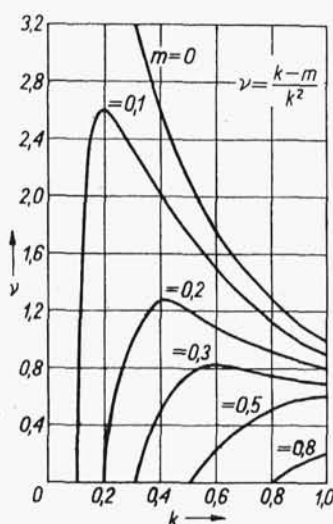


Rys. 11.7. Charakterystyki mechaniczne silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem magnesującym

Ze wzoru (11.16) otrzymuje się wyrażenie na charakterystykę regulacyjną

$$v = \frac{k - m}{k^2} \quad (11.17)$$

Prędkość obrotowa v nie jest liniową funkcją napięcia sterującego, czyli napięcia magnesującego k (rys. 11.8). Współrzędne ekstremum charakterystyki $v = f(k)$ wynoszą $k_{ex} = 2m$; $v_{ex} = 1/4m$. Charakterystyki regulacyjne przy takim sposobie sterowania są nieliniowe i niejednoznaczne: przy małej wartości m (z wyjątkiem $m = 0$) każdej wartości prędkości v odpowiadają dwie wartości napięcia sterującego (magnesującego) k . Dla zapewnienia jednoznaczności sterowanie napięciem magnesującym stosuje się dla $k > 0,5$.



Rys. 11.8 Charakterystyki regulacyjne silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem magnesującym

Moc sterująca

$$P_s = U_f I_f = \frac{U_f^2}{R_f} = \frac{k^2 U_a^2}{R_f} \quad (11.18)$$

Za jednostkę mocy przyjmuje się moc przy $k = 1$ i $v = 0$, czyli moc

$$P_{s(j)} = \frac{U_a^2}{R_a} \quad (11.19)$$

Względna wartość mocy sterującej

$$p_s = \frac{P_s}{P_{s(j)}} = k^2 \frac{R_a}{R_f} \quad (11.20)$$

zależy od wartości sygnału sterującego, natomiast nie zależy od prędkości. Ta moc sterująca jest znacznie mniejsza niż moc sterująca przy sterowaniu napięciem twornika. Moc twornika przy sterowaniu napięciem magnesującym U_f

$$P_a = U_a I_a = U_a \frac{U_a - U_{ia}}{R_a} = U_a \frac{U_a - c_U c_\Phi n k U_a}{R_a}$$

Ponieważ

$$n_0 = \frac{1}{c_U c_\Phi}$$

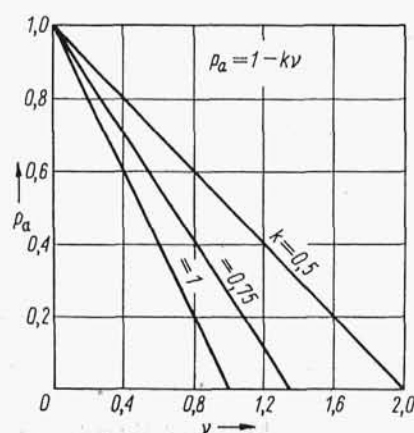
zatem moc twornika

$$P_a = \frac{U_a^2}{R_a} (1 - kv) \quad (11.21)$$

a wartość względna

$$p_a = 1 - kv \quad (11.22)$$

Ze wzrostem prędkości obrotowej v moc twornika P_a maleje (rys. 11.9).

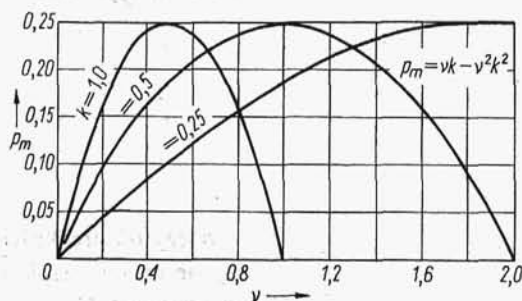


Rys. 11.9. Przebieg mocy twornika w funkcji prędkości silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem magnesującym

Moc mechaniczna (względna wartość)

$$p_m = vm = vk - v^2 k^2 \quad (11.23)$$

Współrzędne ekstremum funkcji $p_m = f(v)$ wynoszą: $v_{ex} = 1/2k$, $p_{ex} = 1/4$. Maksymalna wartość mocy mechanicznej P_m nie zależy od wartości doprowadzonego napięcia magnesującego (rys. 11.10).



Rys. 11.10. Przebiegi mocy mechanicznej w funkcji prędkości silnika wykonawczego prądu stałego obcowzbudnego sterowanego napięciem magnesującym

Stan dynamiczny silnika prądu stałego obcowzbudnego opisano w p. 6.2.3.3.

Z porównania sterowania silnika wykonawczego prądu stałego napięciem twornika i napięciem magnesującym wynikają następujące zalety sterowania napięciem twornika:

- liniowość charakterystyk mechanicznych i regulacyjnych;
- jednoznaczność charakterystyk regulacyjnych;
- większe nachylenie charakterystyk $m = f(v)$, więc większy przyrost momentu na jednostkę zmiany prędkości i szybszy rozruch;
- równoległość charakterystyk mechanicznych, co daje jednakowy czas rozruchu przy dowolnej wartości sygnału sterującego;

- mniejsze straty przy nieruchomym wirniku, ponieważ wtedy jest zasilane tylko uzwojenie magnesów, a więc uzwojenie mniejszej mocy;
- mniejsze zużycie szczotek i komutatora (w stanie nieruchomym przez szczotki i komutator prąd nie płynie);

oraz następujące zalety sterowania napięciem magnesującym:

- moc sterująca jest mniejsza;
- maksymalna moc mechaniczna jest niezależna od wartości sygnału, więc przy małej wartości sygnału można uzyskać duże wykorzystanie maszyny.

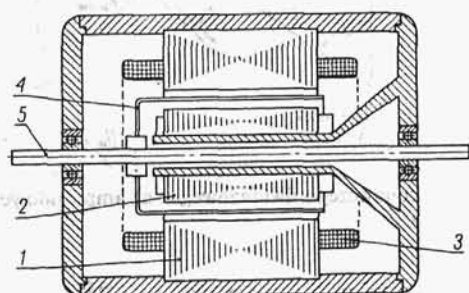
Najczęściej stosuje się sterowanie silnika wykonawczego prądu stałego za pomocą napięcia twornika.

11.2.2. Silniki wykonawcze indukcyjne

Podstawowymi wymaganiami stawianymi silnikom wykonawczym indukcyjnym są:

- szeroki zakres płynnej regulacji prędkości obrotowej;
- liniowość charakterystyk mechanicznych i charakterystyk regulacji w całym zakresie zmian prędkości obrotowej;
- stabilność pracy w całym zakresie zmian prędkości obrotowej;
- zdefiniowany kierunek prędkości obrotowej i możliwość jej zmian;
- duża wartość momentu początkowego;
- duża szybkość działania (mała elektromechaniczna stała czasowa);
- samohamowność;
- mała strefa nieczułości w stanie jałowym (małe opory tarcia).

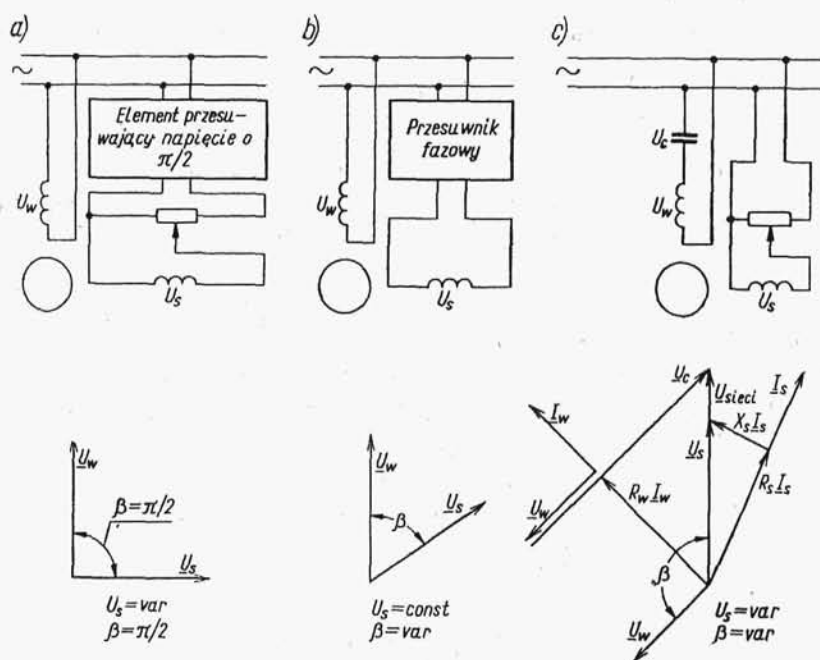
Spośród silników indukcyjnych tylko silnik dwufazowy spełnia (niektóre tylko w przybliżeniu) powyższe wymagania i dlatego silniki wykonawcze indukcyjne są wyłącznie maszynami dwufazowymi. Moce znamionowe tych silników są zawarte w granicach od ułamka wata do kilkuset watów. Wirnik silnika wykonawczego indukcyjnego może być zwykłym wirnikiem klatkowym lub kubkowym (rys. 11.11), charakteryzującym się mniejszym momentem bezwładności. Rdzeń takiego silnika wykonawczego składa się z dwóch stojanów: zewnętrznego 1 i wewnętrznego 2. W żłobkach zewnętrznego stojana jest umieszczone dwufazowe uzwojenie 3. W szcze-



Rys. 11.11. Silnik wykonawczy indukcyjny dwufazowy kubkowy
1 – stojan zewnętrzny, 2 – stojan wewnętrzny, 3 – uzwojenie dwufazowe,
4 – kubek, 5 – wałek

linie między stojanami 1 i 2 wiruje kubek 4 z blachy przewodzącej (np. aluminiowej), sztywno osadzony na wałku 5. Kubek spełnia rolę zwartego uzwojenia wirnika. Moment inercji wirnika jest bardzo mały, co jest zasadniczą zaletą tego silnika.

Najkorzystniejszy przypadek normalnej pracy silnikowej (tzn. magnetyczne pole „kołowe”) w maszynie dwufazowej uzyskuje się, gdy kąt przesunięcia przestrzennego między osiami uzwojeń stojana i kąt przesunięcia czasowego między prądami płynącymi przez te uzwojenia są równe $\pi/2$ (oraz amplitudy zmiennych w czasie przepływów tych uzwojeń są sobie równe). W każdym innym przypadku otrzymuje się tzw. magnetyczne pole „eliptyczne”, którego skrajnym przypadkiem jest magnetyczne pole „oscylujące”, powstające przy zasilaniu jednofazowym. Wiadąc stąd, że zmianę poślizgu można uzyskiwać przez zmianę wartości napięcia sterującego U_s albo przez zmianę kąta przesunięcia β napięcia sterującego U_s względem napięcia wzbudzenia U_w . W związku z tym otrzymuje się następujące możliwości sterowania silnika wykonawczego dwufazowego: sterowanie amplitudowe (rys. 11.12a), sterowanie fazowe (rys. 11.12b) i sterowanie amplitudowo-fazowe (rys. 11.12c).

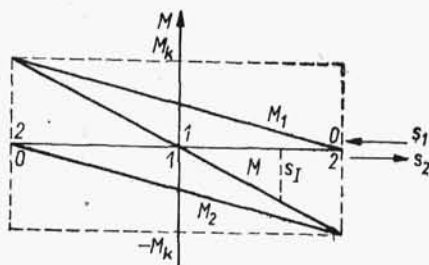


Rys. 11.12. Sterowanie silnika wykonawczego dwufazowego: a) amplitudowe; b) fazowe; c) amplitudowo-fazowe

Warunkiem stabilności pracy silnika (p. 8.3.6.1) jest $\frac{dM}{dn} < 0$, co jest spełnione tylko dla $s < s_k$. W celu uzyskania stabilności pracy w całym zakresie prędkości obrotowej należy uzyskać $s_k > 1$, tzn. należy uzyskać taką krzywą $M =$

$= f(n)$, aby poślizg krytyczny był większy od 1. Poślizg krytyczny silnika wykonawczego ma zwykle wartość $2 \div 3$. Można to uzyskać przez uzyskanie odpowiednio dużej rezystancji obwodu wirnika.

Duża rezystancja obwodu wirnika zapewnia także samohamowność silnika wykonawczego. W przypadku przzerwania sygnału silnik wykonawczy dwufazowy pracuje jak silnik jednofazowy, dla którego wykres momentów przy niewielkich rezystancjach wirnika pokazany jest na rys. 8.48. Danemu poślizgowi dodatniemu odpowiada dodatnia wartość momentu obrotowego, co oznacza, że przy przejściu na jednofazowe zasilanie kierunek wytworzonego momentu pozostaje niezmieniony, czyli wirnik jest napędzany dalej w tym samym kierunku. Oznacza to, że taki silnik nie jest samohamowany i nie może być stosowany w charakterze silnika wykonawczego.



Rys. 11.13. Momenty silnika indukcyjnego jednofazowego o dużej rezystancji wirnika

Na rysunku 11.13 przedstawiono wykresy momentów: współbieżnego M_1 , przeciwbieżnego M_2 i wypadkowego M jednofazowego silnika indukcyjnego przy dużych rezystancjach wirnika tak, że $s_k > 1$. Przyjęto przy tym dla uproszczenia prostoliniową zależność momentu od poślizgu w zakresie $0 < s < s_k$. Przy dołączonym napięciu wzbudzenia U_w i napięciu sterującym U_s silnik wytwarza odpowiedni moment przy prędkości obrotowej odpowiadającej poślizgowi, np. s_I . Po odłączeniu napięcia sterującego silnik wykonawczy staje się silnikiem jednofazowym o momentach przebiegających jak na rys. 11.13. Poślizgowi s_I odpowiada ujemna wartość momentu, co oznacza, że silnik zostanie zahamowany. Warunek $s_k > 1$, czyli warunek dużej rezystancji silnika oznacza także warunek samohamowności silnika.

Duża rezystancja wirnika zapewnia także szeroki zakres liniowego przebiegu charakterystyk mechanicznych silnika zarówno przy pracy dwufazowej, jak i jednofazowej.

Układ dwufazowy napięć niesymetrycznych: wzbudzenia U_w i sterującego U_s można zgodnie z zasadą omówioną w p. 2.5 transformować do dwóch układów symetrycznych: zgodnego U_1 i przeciwnego U_2 .

Układ zgodny napięć (prądów i przepływów) wywołuje strumień wirujący w kierunku zgodnym z kierunkiem prędkości wirnika: obrotowej n i kątovej ω .

Częstotliwość napięć w wirniku od składowej zgodnej strumienia

$$f_{r1} = p(n_1 - n) = pn_1 s_1 = fs_1$$

przy czym: n_1 – prędkość synchroniczna; $s_1 = (n_1 - n)/n_1$ – poślizg względem składowej zgodnej strumienia.

Prąd w wirniku od składowej zgodnej

$$\underline{I}_{r1} = \frac{s_1 \underline{U}_{ir}}{R_r + jsX_r} = \frac{\underline{U}_{ir}}{\frac{R_r}{s_1} + jX_r} \quad (11.24)$$

przy czym: \underline{U}_{ir} – napięcie indukowane w nieruchomym wirniku; R_r – rezystancja wirnika; X_r – reaktancja nieruchomego wirnika.

Dla tych składowych występuje w wirniku rezystancja R_r/s_1 oraz reaktancja X_r .

Układ przeciwny napięć (prądów, przepływów) wywołuje strumień wirujący w kierunku przeciwnym do kierunku prędkości wirnika: obrotowej n i kątowej ω . Częstotliwość napięć w wirniku od składowej przeciwnej strumienia

$$f_{r2} = p(n_1 + n) = pn_1(2 - s_1) = f(2 - s_1) = fs_2$$

przy czym $s_2 = 2 - s_1 = (n_1 + n)/n_1$ poślizg względem składowej przeciwnej strumienia.

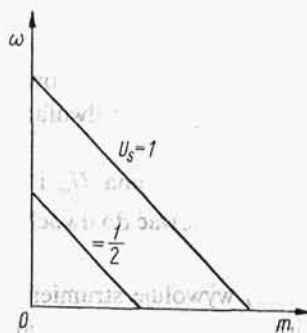
Prąd w wirniku od składowej przeciwnej

$$\underline{I}_{r2} = \frac{(2 - s_1) \underline{U}_{ir}}{R_r + j(2 - s_1) X_r} = \frac{\underline{U}_{ir}}{\frac{R_r}{2 - s_1} + jX_r} \quad (11.25)$$

Dla tych składowych występuje w wirniku rezystancja $R_r/(2 - s_1)$ oraz reaktancja X_r .

Na tej podstawie można narysować schematy zastępcze obwodów wzbudzenia i sterowania, dla składowych zgodnej i przeciwnej analogiczne do schematu z rys. 8.6. Następnie można uzyskać wyrażenia na prądy, moce i momenty od składowych – zgodnej i przeciwnej, a więc można uzyskać także wyrażenie na moment wypadkowy potrzebne do analizy zachowania się silnika wykonawczego.

Moment obrotowy silnika indukcyjnego jest proporcjonalny do kwadratu napięcia zasilającego. Przez analogię można przyjąć, że moment obrotowy silnika



Rys. 11.14. Zlinearyzowane charakterystyki mechaniczne silnika wykonawczego dwufazowego

wykonawczego dwufazowego jest proporcjonalny do iloczynu napięcia wzbudzenia U_w i napięcia sterującego U_s , a przy stałej wartości napięcia wzbudzenia moment jest zależny od napięcia sterującego w pierwszej potęgze. Ponadto można w przybliżeniu przyjąć, że prędkość kątowna (i obrotowa) zmienia się prostoliniowo w funkcji momentu, więc

$$\omega = k_1 m + k_2 u_s \quad (11.26)$$

Na rysunku 11.14 pokazano odpowiadające tej zależności zlinearyzowane charakterystyki mechaniczne silnika wykonawczego dwufazowego.

Stan dynamiczny silnika wykonawczego indukcyjnego jest analogiczny do opisanego w p. 8.4 stanu dynamicznego silnika indukcyjnego.

11.3. PRĄDNICE TACHOMETRYCZNE

11.3.1. Wiadomości ogólne

Zadaniem prądnicy tachometrycznej jest przetwarzanie sygnału mechanicznego (prędkości kątowej) na sygnał elektryczny (napięcie). Podstawowym wymaganiem stawianym prądnicom tachometrycznym jest prostoliniowa zależność napięcia indukowanego do prędkości kątowej (obrotowej), czyli warunek

$$u_i = c_1 \omega = c_2 n \quad (11.27)$$

Między kątem obrotu α i prędkością kątową ω zachodzi związek

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

zatem

$$u_i = c_1 \frac{d\alpha}{dt} \quad (11.28)$$

co pozwala używać prądnicy tachometrycznej jako członu różniczkującego.

Ponadto prądnicom tachometrycznym stawia się wymagania dodatkowe, jak np.:

- niezależność wartości napięcia wyjściowego od kierunku wirowania wału;
- brak składowych zniekształcających przebieg napięcia wyjściowego w funkcji czasu;
- duża czułość, tzn. duża wartość napięcia nawet przy małych prędkościach;
- proporcjonalność napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego przy stałej prędkości;
- małe wymiary i mała masa;
- małe błędy, np. odchylenie od prostoliniowej charakterystyki w zwykłych prądnicach nie większe od 2%, a w prądnicach stosowanych w urządzeniach liczących albo różniczkujących nie większe od setnych części procenta.

11.3.2. Prądnice tachometryczne prądu stałego

Rozróżnia się prądnice tachometryczne prądu stałego:

- ze wzbudzeniem obcym (tzw. prądnice zwykłe tzn. nie unipolarne);
- z magnesami trwałymi;
- unipolarne.

Zasada działania i budowy *prądnicy tachometrycznej obcowzbudnej prądu stałego* jest taka sama, jak zwykłej maszyny prądu stałego. Charakterystyki takiej prądnicy opisano w p. 6.2.2. Ruchomy zestyk szczotek z komutatorem jest najpoważniejszą przyczyną błędów prądnicy. Rezystancja tego zestyku (rezystancje przejścia) ma zmienną wartość, co przy małych prędkościach obrotowych powoduje niestabilność napięcia wyjściowego i powstanie pewnej strefy charakteryzującej się w zakresie niewielkich prędkości obrotowych niepowtarzalnością charakterystyki napięciowej, tj. zależności napięcia od prędkości obrotowej. Moment tarcia szczotek o komutator jest dość duży, co uniemożliwia stosowanie takiej prądnicy do współpracy z silnikiem małej mocy. Przy bardzo dużych prędkościach obrotowych powstają drgania szczotek co powoduje drgania napięcia wyjściowego. Z powodu trudności idealnego ustawienia szczotek w osi poprzecznej, kąty nachylenia charakterystyk prądnicy przy różnych kierunkach wirowania są różne. To wszystko powoduje, że prądnice tachometryczne obcowzbudne prądu stałego są mało dokładne. Podobne wyniki otrzymuje się przy stosowaniu prądnic prądu stałego z magnesami trwałymi. Dzięki magnesom trwałym unika się konieczności doprowadzania do magnesów stałego napięcia o niezmienniej (lecz regulowanej) wartości, co w pewnych warunkach może być dużą zaletą. Natomiast dodatkowymi źródłami błędów mogą być wtedy wstrząsy i uderzenia. Napięcie indukowane w prądnicy prądu stałego jest wyrażone wzorem (3.133). Przy założeniu, że prąd (a więc i reakcja twornika) jest niewielki, czyli że $\Phi = \text{const}$, napięcie indukowane może być wyrażone wzorem (11.27). Napięcie na zaciskach

$$u = u_t - R_{at} i \quad (11.29)$$

przy czym R_{at} – rezystancja obwodu twornika (łącznie z rezystancją przejścia).

Prąd płynący przez uzwojenie twornika

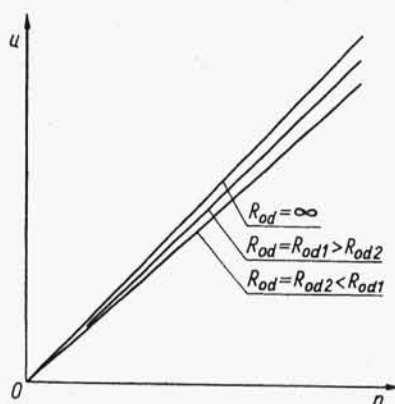
$$i = \frac{u}{R_{od}} \quad (11.30)$$

przy czym R_{od} – rezystancja odbiornika, np. przyrządu pomiarowego.

Ze wzorów (11.30), (11.29) i (3.133) wyznacza się napięcie na zaciskach prądnicy tachometrycznej

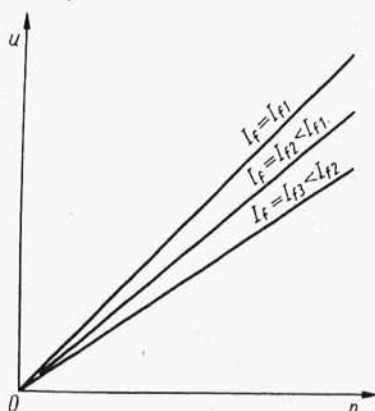
$$u = \frac{1}{1 + \frac{R_{at}}{R_{od}}} c_U \Phi n \quad (11.31)$$

Na podstawie tego wzoru wykreślono przedstawione na rys. 11.15 charakterystyki prądnicy tachometrycznej prądu stałego (obcowzbudnej i z magnesami trwałymi) $u = f(n)$ przy $\Phi = \text{const}$, dla różnych (każdorazowo stałych) wartości R_{od} .



Rys. 11.15. Charakterystyki napięciowe prądnicy tachometrycznej prądu stałego przy $\Phi = \text{const}$

Możliwość otrzymania różnych kątów nachylenia charakterystyk $u = f(n)$ jest jedną z zalet prądnicy tachometrycznej obcowzbudnej (rys. 11.16). W pobliżu początku układu współrzędnych charakterystyki $u = f(n)$ mają przebieg niestabilny z powodu zmiennej wartości rezystancji przejścia, co powoduje dość szeroką strefę nieczułości przy niewielkich wartościach n . Przy stosunkowo dużych wartościach n błąd spowodowany rezystancją przejścia jest odpowiednio mniejszy.



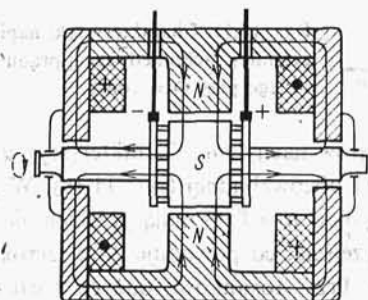
Rys. 11.16. Charakterystyki napięciowe prądnicy tachometrycznej prądu stałego przy $R_{od} = \text{const}$

Ze wzrostem prądu, czyli ze zmniejszeniem się rezystancji odbiornika R_{od} zwiększa się reakcja twornika, zmniejszająca napięcie indukowane i napięcie na zaciskach. Dlatego prądnica tachometryczna prądu stałego powinna pracować przy możliwie dużej rezystancji odbiornika R_{od} . Przy danej wartości rezystancji R_{od} prąd i błąd od reakcji twornika zwiększa się ze wzrostem n . Dlatego nie należy przekraczać pewnych górnych wartości prędkości obrotowych.

Dodatkowym źródłem błędów, zwłaszcza przy stosowaniu prądnicy tachometrycznej jako elementu różniczkującego są ząbki na krzywej napięcia $u = f(t)$ spowodowane przez komutator i żłobki wirnika. Dla zmniejszenia tych ząbków umieszcza się uzwojenie na wirniku bezzłobkowym.

Tej wady nie wykazują *prądnice unipolarne prądu stałego*. Ilustracją zasady działania prądnicy unipolarnej jest szkic tej maszyny pokazany na rys. 11.17.

Jest to maszyna bezkomutatorowa. Cewki magnesów z prądem o odpowiednim kierunku, wykonane w postaci pierścieni, znajdują się na wewnętrznym obwodzie stojana. Występ pierścieniowy w środku stojana tworzy biegun magnetyczny jednego znaku (np. N), a twornik tworzy biegun magnetyczny drugiego znaku (np. S). W blachach twornika są umieszczone pręty miedziane połączone ze sobą na obu końcach pierścieni, po których ślizgają się szczotki.



Rys. 11.17: Szkic prądnicy unipolarnej

Napięcie indukowane w każdym z prętów, będące zarazem napięciem wypadkowym (między pierścieniami)

$$U_i = Blv$$

Ponieważ $v = \pi Dn$ oraz $BlD\pi = \Phi$, to

$$U_i = \Phi n \quad (11.32)$$

przy czym: D – średnica wirnika w miejscu ułożenia prętów; l – długość czynna pręta.

Oznacza to spełnienie podstawowego warunku stawianego prądnicom tachometrycznym, jakim jest proporcjonalność napięcia indukowanego do prędkości obrotowej. Podstawową zaletą prądnic tachometrycznych unipolarnych jest brak ząbków w przebiegu napięcia w funkcji czasu, które w prądnicach obcowzbudnych i w prądnicach ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym są wywołane komutacją. Ta zaleta predestynuje prądnice tachometryczne unipolarne do stosowania ich w urządzeniach różniczkujących.

Do wad tych prądnic należą:

- mała wartość napięcia;
- pulsacje o małej częstotliwości, zależne od prędkości obrotowej, spowodowane niejednorodnością materiału wirnika i nierównomiernością szczeliny;
- obecność ruchomego styku szczotkowego.

Prądnice prądu stałego unipolarne, stosuje się nie tylko jako prądnice tachometryczne, lecz także do zasilania odbiorników o niskim napięciu i o bardzo dużym prądzie jakimi są np. wanny elektrolityczne. Duża wartość prądu prądnicy

unipolarnej wynika z tego, że prąd całkowity jest sumą prądów, płynących we wszystkich – połączonych ze sobą równolegle – prętach.

Stan dynamiczny prądnicy tachometrycznej prądu stałego jest analogiczny do opisanego w p. 6.2.2.3 stanu dynamicznego prądnicy prądu stałego obcowzbudnej. Na podstawie wzoru (3.133) transmitancja operatorowa prądnicy tachometrycznej prądu stałego ma postać

$$G(s) = \frac{\Delta U(s)}{\Delta \Omega(s)} = c \quad (11.33)$$

a więc jest transmitancją operatorową członu bezinercyjnego.

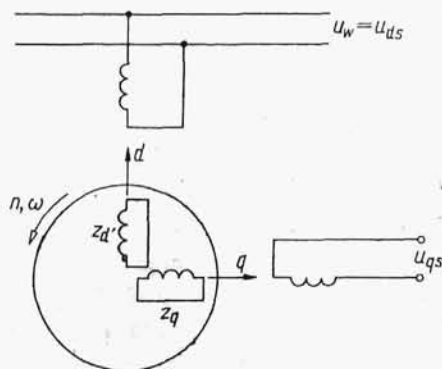
11.3.3. Prądnice tachometryczne synchroniczne

Zasada działania i budowy prądnic tachometrycznych synchronicznych jest analogiczna do zasady działania i budowy zwykłych prądnic synchronicznych z tym, że najczęściej są to prądnice jednofazowe z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku. Napięcie indukowane w tworniku jest proporcjonalne do częstotliwości, a więc i do prędkości obrotowej (i kątowej). Do prędkości obrotowej są także proporcjonalne reaktancje wewnętrzne prądnicy i reaktancje obwodów zewnętrznych, co powoduje nieliniowość charakterystyk $u = f(\omega)$ tych prądnic. Dlatego też takie prądnice tachometryczne na ogół nie są stosowane jako człony układów automatyki pomimo niektórych bardzo istotnych zalet, jak np. prostota budowy i brak ślizgowego styku. Stosuje się je natomiast jako wskaźniki prędkości i wtedy prądnica tachometryczna wraz z odpowiednio wywzorcowanym woltomierzem, wskazującym od razu prędkość obrotową, stanowi nierozłączny komplet.

Częściej stosowane są prądnice tachometryczne synchroniczne z cyfrowym miernikiem częstotliwości na wyjściu.

11.3.4. Prądnice tachometryczne indukcyjne dwufazowe

Zasada działania i budowy prądnicy tachometrycznej indukcyjnej jest analogiczna do zasady działania i budowy silnika wykonawczego indukcyjnego (kubkowego) opisanego w p. 11.2.2. W osi podłużnej modelu (rys. 11.18) jest ustawione uzwoje-



Rys. 11.18. Schemat zastępczy prądnicy tachometrycznej indukcyjnej dwufazowej

nie wzbudzające o z_w zwojach. Napięcie wzbudzenia u_w jest równe podłużnemu napięciu stojana u_{ds} . W osi poprzecznej jest ustawione uzwojenie o liczbie zwojów z_s . W uzwojeniu tym indukuje się poprzeczne napięcie stojana u_{qs} .

W każdym z (umownych) prętów wirnika podczas jego wirowania indukują się napięcia transformacji i napięcia rotacji. Napięcie transformacji można przedstawić jako napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika o z_d zwojach ustawionym w osi podłużnej d . Wartość chwilowa tego napięcia

$$u_{dr} = \xi_d z_d \Phi_{dm} \cos \omega t \quad (11.34)$$

a jego wartość skuteczna

$$U_{dr} = 4,44 \xi_d z_d f \Phi_{dm} \quad (11.35)$$

przy czym: Φ_{dm} – amplituda strumienia wypadkowego od prądu w uzwojeniu wzbudzającym stojana o z_w zwojach i od prądu w podłużnym uzwojeniu wirnika o z_d zwojach; ξ_d – współczynnik uzwojenia.

Rozkład indukcji B_d , odpowiadającej strumieniowi Φ_d zależy od ukształtowania wywołujących go uzwojeń i od ukształtowania szczeliny. Indukcja B_d jest sinusoidalną funkcją czasu

$$B_d = B_{dm} \sin \omega t$$

Częstotliwość f indukcji B_d , strumienia Φ_d i napięcia transformacji u_{dr} indukowanego w (zastępczym) podłużnym obwodzie wirnika jest równa częstotliwości napięcia wzbudzenia, niezależnie od prędkości wirnika.

Przy wirowaniu wirnika z prędkością obrotową n , prędkością kątową $\omega_r = 2\pi n$ i z prędkością obwodową $v = \omega_r D/2$, w prętach wirnika indukują się napięcia rotacji, które można przedstawić jako napięcie w poprzecznym uzwojeniu wirnika

$$u_{qr} = cBlv$$

Napięcie u_{qs} indukowane w poprzecznym uzwojeniu stojana jest, na zasadzie działania transformatora, proporcjonalne do napięcia u_{qr} . Na tej podstawie

$$u_{qs} = k_1 z_s \Phi_{dm} \omega_r \sin \omega t \quad (11.36)$$

albo

$$u_{qs} = k_2 z_s \Phi_{dm} n \sin \omega t$$

Amplitudy tych napięć przy $\Phi_{dm} = \text{const}$ wynoszą

$$U_{qsm} = K_1 \omega_r = K_2 n \quad (11.37)$$

Ze wzorów (11.36) i (11.37) widać, że w poprzecznym uzwojeniu stojana indukuje się napięcie o amplitudzie proporcjonalnej do prędkości kątowej (albo obrotowej) wirnika oraz o częstotliwości równej częstotliwości napięcia wzbudzenia, niezależnie od prędkości wirnika. Ta niezależność częstotliwości napięcia wyjściowego od prędkości obrotowej wirnika jest główną zaletą prądnic tachometrycznych indukcyjnych dwufazowych w porównaniu z prądniami tachometrycznymi.

nymi synchronicznymi. Drugą bardzo ważną ich zaletą jest możliwość stosowania wirnika kubkowego o bardzo małym momencie bezwładności.

Wzory (11.36) i (11.37) wykazują prostoliniową zależność napięcia wyjściowego od prędkości. Ta prostoliniowość jest jednak wynikiem wielu uproszczeń, przyjętych przy wyprowadzaniu wzorów. Prostoliniową zależność napięcia wyjściowego od prędkości można by uzyskać tylko wtedy, gdyby rezystancja uzwojenia wzbudającego i reaktancja wirnika były równe zero, co jest oczywiście nieosiągalne. Błędy wynikające z tej nieliniowości można zmniejszyć przez zmniejszenie względnej prędkości wirnika względem prędkości synchronicznej, czyli przy danej prędkości wirnika przez zwiększenie częstotliwości napięcia wzbudzenia.

Wyznaczona na podstawie wzoru (11.37) transmitancja operatorowa prądnicy tachometrycznej indukcyjnej dwufazowej ma postać

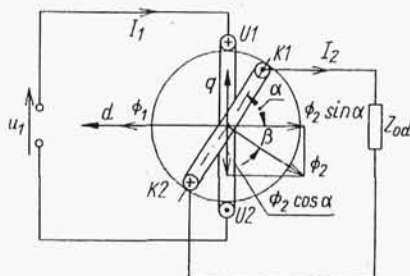
$$G(s) = \frac{\Delta U_{qs}(s)}{\Delta \Omega(s)} = c \quad (11.38)$$

a więc jest transmitancją operatorową członu bezinercyjnego.

11.4. PRZETWORNIKI POŁOŻENIA

11.4.1. Transformatory położenia kąowego

Transformator położenia kąowego jest urządzeniem, w którym napięcie wyjściowe (odpowiedź) jest pewną funkcją kąta obrotu wirnika (sygnału). W zależności od rodzaju tej funkcji może być transformator położenia kąowego sinusowy, kosinusowy, sinusowo-kosinusowy, liniowy itp. Transformator położenia kąowego jest odmianą maszyny indukcyjnej. Rdzenie magnetyczne stojana i wirnika są zbudowane z blach elektrotechnicznych. Uzwojenia stojana i wirnika są uzwojeniami jedno- lub dwufazowymi rozłożonymi, umieszczonymi w żłóbkach. W schemacie najprostszego transformatora położenia kąowego (rys. 11.19) uzwojenie stojana przedsta-



Rys. 11.19. Schemat transformatora położenia kąowego

wione jest przez cewkę U1-U2, a uzwojenie wirnika przez cewkę K1-K2. Uzwojenie stojana jest zasilane napięciem u_1 , a do uzwojenia wtórnego jest dołączony odbiornik o impedancji Z_{od} . Napięcie zasilające jest sinusoidalne

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t$$