

wania. Oznacza to przekroczenie granicy pracy wzmacniacza magnetycznego.

Wzmacniacze magnetyczne, poza podstawowymi parametrami jak napięcie i moc znamionowa, charakteryzowane są ponadto przez:

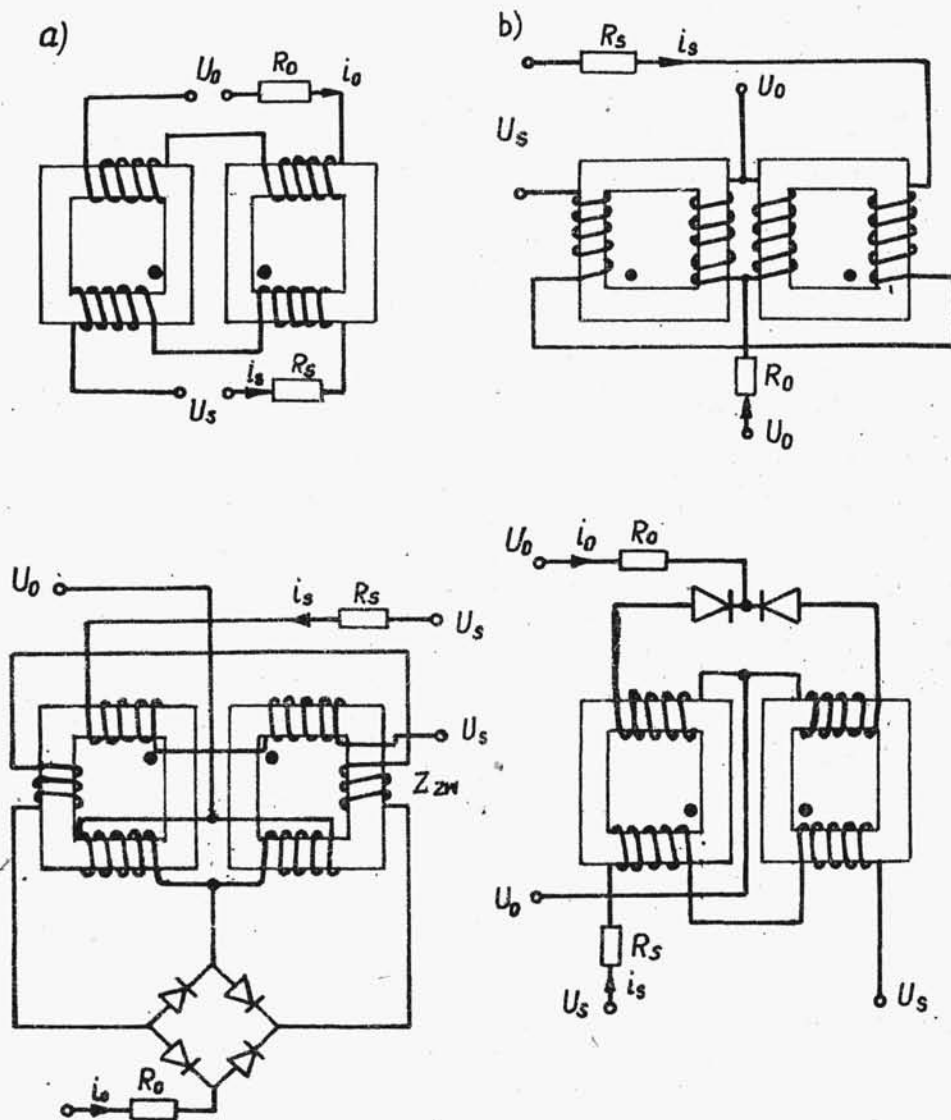
- zależność prądu roboczego od sterującego $I_o = f(I_s)$, czyli tzw. charakterystykę sterowania;
- współczynnik wzmocnienia mocy k_p , wyrażający stosunek mocy wyjściowej (w obwodzie roboczym) do mocy wejściowej (w obwodzie sterującym),
- stałą czasową T , określającą dynamiczne właściwości wzmacniacza;
- współczynnik dobroci, określony stosunkiem współczynnika wzmocnienia do stałej czasowej ($d = \frac{k_p}{T}$);
- współczynnik sprzężenia zwrotnego k_{sz} (tylko dla wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym), określający wpływ obwodu roboczego na obwód sterujący.

4.2. Układy wzmacniaczy

Opisany powyżej najprostszy układ wzmacniacza jednordzeniowego nie jest stosowany praktycznie, m.in. z uwagi na konieczność włączania dodatkowego dławika w obwodzie sterującym dla tłumienia składowej zmiennej prądu transformowanego z obwodu roboczego.

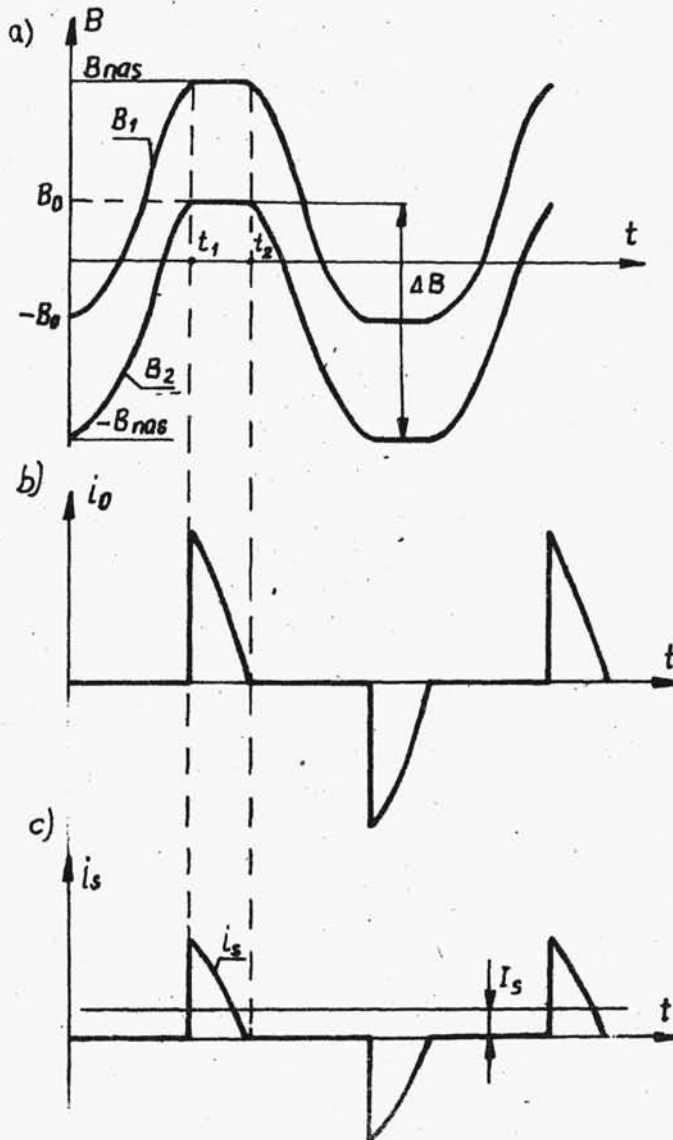
Praktycznie stosowane rozwiązania wzmacniaczy są dwurdzeniowe, przy czym rozróżnia się dwa sposoby połączeń uzwojeń roboczych: równoległe i szeregowo. Ponadto, wzmacniacze mogą pracować bez- lub ze sprzężeniem zwrotnym. W tym ostatnim przypadku rozróżnia się sprzężenie wewnętrzne i zewnętrzne. Ideowe schematy poszczególnych układów przedstawiono na rys. 4.7.

Zajmiemy się teraz bliżej układem wzmacniacza szeregowego bez sprzężenia zwrotnego (rys. 4.7a). Przyjmijmy, że rdzenie są wykonane z blach o idealnej charakterystyce magnesowania, a rezystancja uzwojeń jest pomijalnie mała. Uzwojenia sterują-



Rys.4.7. Ideowe schematy układów dwurdzeniowych wzmacniaczy magnetycznych: a) szeregowego, b) równoległego, c) z zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym, d) z wewnętrznym sprzężeniem zwrotnym

ce obu rdzeni są połączone szeregowo i przeciwsobnie tak, że SEM indukowane w tych uzwojeniach przez składowe zmienne strumieni magnetycznych w rdzeniach wzajemnie się znoszą. Uzwojenia robocze obu dławików są połączone szeregowo i obciążone rezystancją R_0 .



Rys.4.8. Przebiegi czasowe indukcji (a), prądu roboczego (b) i prądu sterującego (c) w stanie ustalonym wzmacniacza szeregowego

Przebiegi czasowe indukcji magnetycznej w rdzeniach i prądów w uzwojeniach w stanie ustalonym przedstawiono na rys. 4.8. Prąd sterujący I_s wywołuje w obu rdzeniach stan podmagiesowania, przy czym w jednym z rdzeni w kierunku zgodnym ze strumieniem wywołanym prądem w uzwojeniu roboczym (prądu przemennego), a w drugim rdzeniu kierunki obu strumieni są przeciwne.

W czasie $0 - t_1$ indukcja magnetyczna w rdzeniu 1 będzie się zmieniała (w stanie ustalonym) od wartości $-B_0$ do wartości indukcji nasycenia B_{nas} , analogicznie jak to przedstawiono uprzednio na rys. 4.5a. W tym samym czasie indukcja w rdzeniu 2 zmienia się od $-B_{nas}$ do B_0 . Oba rdzenie są więc w tym czasie w stanie nienasyconym, a zakładając idealną charakterystykę magnesowania ($L = \infty$) można przyjąć, że prąd roboczy jest równy zero ($i_0 = 0$). Przez uzwojenie sterujące przepływa prąd stały $I_s = \frac{U_s}{R_s}$. W chwili czasowej t_1 w rdzeniu 1 występuje nasycenie, indukcja osiąga stałą wartość B_{nas} , a reaktancja uzwojeń tego rdzenia staje się równa zero. Stan taki utrzymuje się od t_1 do $t_2 = \frac{\pi}{\omega}$, tj. końca półokresu napięcia roboczego. Uzwojenie sterujące rdzenia 2 jest od chwili t_1 zwarte przez rezystancję $R_s^{x)}$. Ponieważ rdzeń 2 w czasie $t_2 - t_1$ pozostaje w stanie nienasyconym ($B_2 < B_{nas}$), musi być w tym przedziale czasu spełniony warunek $i_0 z_0 = i_s z_s$. W obwodzie sterującym wystąpi więc składowa zmienna prądu i_s indukowana w uzwojeniu sterującym rdzenia 2. Jeżeli przyjmie się, że rezystancja R_s jest bardzo mała, to napięcie indukowane $R_s i_s$ jest również niewielkie, a więc występuje przy bardzo małych zmianach indukcji w rdzeniu. Oznacza to, że w przedziale czasu $t_1 \div t_2$ indukcja magnetyczna B_2 będzie w przybliżeniu stała. Można więc przyjąć, że indukcyjność uzwojenia roboczego rdzenia 2 jest również w przybliżeniu równa zero. Oznacza to, że prąd w obwodzie roboczym będzie w tym przedziale czasowym ograni-

x) Jeżeli pominie się rezystancję wewnętrzną źródła napięcia sterującego.

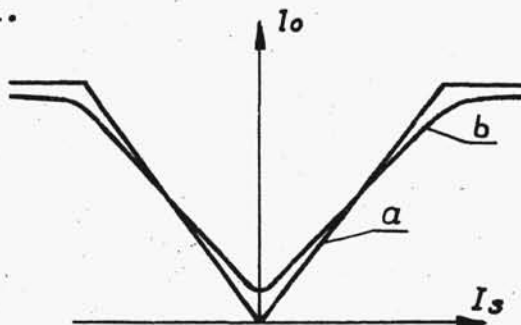
czony jedynie rezystancją roboczą R_o i wyniesie $i_o = \frac{U_{om}}{R_o} \sin \omega t$ (rys.4.8b).

Składowa zmienna prądu sterującego wynosi (rys.4.8c):

$$u_s = i_o \frac{z_o}{z_s} = \frac{U_{om}}{R_o} \frac{z_o}{z_s} \sin \omega t.$$

W następnym półokresie przebiegi będą podobne z tym, że odwrócić się role obu rdzeni.

Na rys.4.9 przedstawiono przykładową charakterystykę sterowania $I_o = f(I_s)$ wzmacniacza szeregowego, w przypadku idealnej charakterystyki magnesowania (a) oraz w warunkach rzeczywistych (b).



Rys.4.9. Przykładowa charakterystyka sterowania wzmacniacza szeregowego

Płaska część charakterystyki odpowiada tak znacznemu podmagnesowaniu rdzenia składową stałą, że w całym przedziale zmienności napięcia przemiennego rdzenie nie wychodzą ze stanu nasycenia, a wartość prądu roboczego nie zależy od prądu sterującego.

Współczynnik wzmocnienia mocy k_p wzmacniacza szeregowego przy obciążeniu rezystancyjnym, wyraża się zależnością:

$$k_p = \frac{I_o^2 R_o}{I_s^2 R_s} = \left(\frac{z_s}{z_o} \right)^2 \frac{R_o}{R_s}, \quad (4.5)$$

gdyż:

$$I_o = I_s \frac{z_s}{z_o},$$

przy czym:

I_o, I_s - średnie wartości prądów w obwodzie roboczym i sterowania.

Stała czasowa wzmacniacza szeregowego z obciążeniem rezystancyjnym wyraża się wzorem:

$$T_S = \frac{L_S}{R_S}.$$

Określa ona właściwości dynamiczne wzmacniacza, a ściśle biorąc jest miarą opóźnienia odpowiedzi prądu sterującego na wymuszenie napięciowe w tym obwodzie.

Do wyznaczenia stałej czasowej wykorzystuje się równanie napięciowe dla obwodu sterującego wzmacniacza w stanie nieustalonym:

$$U_S = i_S R_S + \frac{d\psi_S}{dt} = i_S R_S + z_S S_{Fe} \frac{dB}{dt}, \quad (4.6)$$

gdzie:

$\psi_S = z_S S_{Fe} B$ - całkowity strumień magnetyczny skojarzony z uzwojeniem sterującym.

Ponieważ uzwojenia sterujące na obu rdzeniach są połączone przeciwsobnie, to indukcja wypadkowa $B = B_1 - B_2$, gdzie B_1, B_2 - wartości indukcji magnetycznej w rdzeniach 1 i 2. Składowe zmienne indukcji (wywołane prądem roboczym płynącym szeregowo przez uzwojenia robocze obu rdzeni) są takie same, tak więc różnica $B_1 - B_2$ pozostaje stała i wynosi $B_1 - B_2 = 2B_0$, gdzie B_0 - wartość indukcji oznaczona na rys.4.8a.

Przekształcając równanie (4.6) otrzymuje się:

$$\frac{U_S}{R_S} = T_S \frac{di_S}{dt} + i_S. \quad (4.7)$$

Ponadto można napisać:

$$T_S = \frac{L_S}{R_S} = \frac{2 z_S S_{Fe}}{R_S} \frac{dB_0}{di_S}. \quad (4.8)$$

Z rys.4.8a można określić, że:

$$B_0 = B_{nas} - \frac{\Delta B}{2},$$

przy czym:

ΔB - całkowita zmiana indukcji w ciągu półokresu.

Uwzględniając związek pomiędzy zmianą indukcji ΔB a napięciem zasilającym obwód roboczy oraz mając na uwadze zależ-

ność pomiędzy prądem sterującym i_s oraz ΔB , po przekształceniach otrzymuje się (wg [8]):

$$T_s = \frac{1}{4f} \frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2. \quad (4.9)$$

W podobny sposób analizuje się pracę i określa charakterystyczne parametry innych układów wzmacniaczy magnetycznych. Czytelnika zainteresowanego bliżej tą tematyką można skierować do [8, 10].

Tablica 4.1

Charakterystyczne parametry wzmacniaczy

rodzaj układu parametr	szeregowy	równoległy	zewnętrzne sprzężenie zwrotne	wewnętrzne sprzężenie zwrotne
k_p	$\frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2$	$4 \frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2$	$\frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2 \frac{1}{(1-K_{sz})^2}$	$\frac{\Delta U_o}{\Delta \theta_s} \cdot \frac{Z_s^2}{R_o R_s}$
T	$\frac{1}{4f} \frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2$	$\frac{1}{f} \left[\frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2 - \frac{R_o}{2v_o} \right]$	$\frac{1}{4f} \frac{R_o}{R_s} \left(\frac{Z_s}{Z_o} \right)^2 \frac{1}{1-K_{sz}}$	$\frac{1}{2f} \frac{Z_s}{Z_o} \frac{\Delta U_o}{R_s \Delta I_s}$

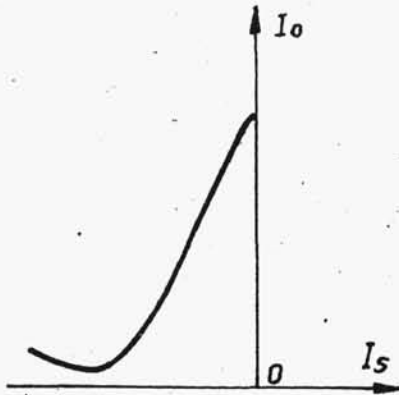
W tablicy 4.1 przedstawiono charakterystyczne parametry dla czterech typowych układów wzmacniaczy. Na rys.4.10 przedstawiono przykładową charakterystykę sterowania wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym.

We wzmacniaczu z dodatnim zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym stosuje się dodatkowe podmagnesowanie rdzeni wyprostowanym prądem roboczym, przepływającym przez dodatkowe uzwojenia sprzężenia zwrotnego (rys.4.7c).

Dodatnie sprzężenie zwrotne może być uzyskane również bez dodatkowych uzwojeń, przy wykorzystaniu jedynie uzwojeń roboczych, pod warunkiem, że prąd roboczy przepływa stale w tym samym kierunku. Jednokierunkowy przepływ prądu uzyskuje się przez zastosowanie diod w obwodzie roboczym wzmacniacza (rys. 4.8d).

Jak wynika z tablicy 4.1, poszczególne układy wzmacniaczy różnią się istotnie własnościami technicznymi. Porównując ukła-

dy bez sprzężenia zwrotnego można stwierdzić, że układ szeregowy ma lepsze własności dynamiczne (mniejszą stałą czasową)



Rys.4.10. Przykładowa charakterystyka sterowania wzmacniacza z dodatnim sprzężeniem zwrotnym

niż układ równoległy. Oba charakteryzują się jednak stosunkowo małym współczynnikiem wzmocnienia. Układy z dodatnim sprzężeniem zwrotnym pozwalają na uzyskanie znacznie większych wzmocnień, ale i one różnią się między sobą. Układy z zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym wymagają dodatkowych uzwojeń sprzęgających, przystosowanych do przepływu prądu roboczego, co istotnie zwiększa wymiary i masę urządzenia. Wzmacniacze ze sprzężeniem wewnętrznym (z samonasyceniem) nie wyma-

gają dodatkowych uzwojeń i umożliwiają uzyskanie bardzo dużych wzmocnień, ale ich właściwości dynamiczne nie są dobre. Stałe czasowe mogą osiągać wartości wielu sekund.

Na pracę wzmacniaczy magnetycznych (szczególnie w układach ze sprzężeniem) wpływa kształt pętli histerezy materiału użytego do budowy rdzenia. Nie wnikając w szczegóły, które Czytelnik może znaleźć w [8], można stwierdzić, że najwłaściwsze na rdzenie wzmacniaczy są materiały odznaczające się wąską i wysoką pętlą histerezy, tj. o możliwie dużej indukcji nasycenia i małym natężeniu koercji.

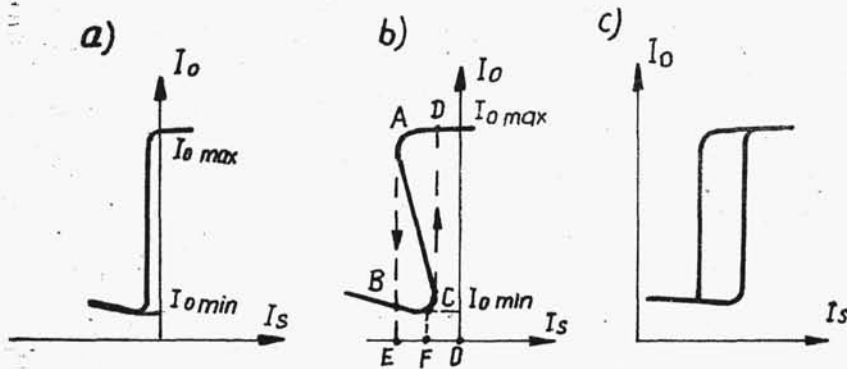
W zależności od potrzeb, stosowane są różne specjalne układy wzmacniaczy, jak np. wzmacniacze rewersyjne czy szybko-działające. Należy jednocześnie podkreślić, że wzmacniacze magnetyczne straciły w ostatnim dziesięcioleciu istotnie na znaczeniu. Spowodowane to zostało przede wszystkim szerokim wprowadzeniem elementów półprzewodnikowych, a w szczególności tyrystorów i symistorów. Tym niemniej, niektóre istotne zalety wzmacniaczy magnetycznych jak odporność na przepięcia i przetężenia, duża wytrzymałość mechaniczna i prostota budowy powodują, że w przypadkach, gdy wymiary i masa przy-

rzędu nie mają istotnego znaczenia, urządzenia te mogą być nadal z powodzeniem stosowane. Idea wzmacniacza jest nadal wykorzystywana w układach do pomiaru prądu stałego (transduktory).

Spśród zastosowań wzmacniaczy magnetycznych, warto zwrócić uwagę na magnetyczny przekąźnik bezstykowy. W stosunku do typowych przekąźników zestykowych wykazuje on szereg zalet, gdyż - z uwagi na brak części ruchomych - umożliwia uzyskanie znacznie większej częstości łączeń, łączy bezłukowo i cicho oraz jest bardziej niezawodny w działaniu. Jedyną, niekiedy istotną wadą przekąźnika magnetycznego jest brak galwanicznej przerwy w stanie otwartym.

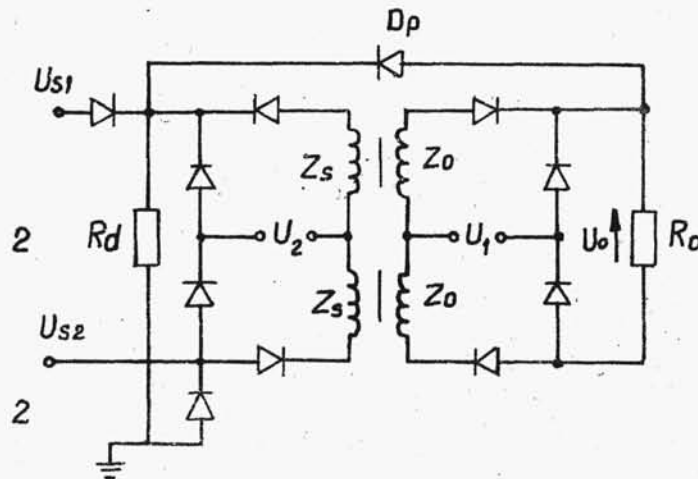
Do realizacji przekąźnika magnetycznego wykorzystuje się wzmacniacz z dużym sprzężeniem zwrotnym. Gdy $k_{sz} = 1$, charakterystyka sterowania ma odcinek o pionowym przebiegu (rys. 4.11a). Niewielka zmiana prądu sterującego w pobliżu tej części charakterystyki powoduje praktycznie skokową zmianę punktu pracy od I_{omin} do I_{omax} lub odwrotnie w zależności od kierunku zmian prądu i_s . W przypadku $k_{sz} > 1$ otrzymuje się charakterystykę sterowania jak na rys. 4.11b. Przy braku prądu sterującego ($i_s = 0$) w obwodzie roboczym płynie prąd I_{omax} . Przy pojawieniu się niewielkiego sygnału sterującego o znaku ujemnym, prąd roboczy zmienia się niewiele (na odcinku $I_{omax} - D - A$). Jeżeli jednak sygnał sterujący przekroczy wartość OF , nastąpi skokowa zmiana punktu pracy z A do B i prąd roboczy zmaleje praktycznie do wartości I_{omin} . Podobnie przy zmniejszaniu prądu sterującego poniżej wartości OF nastąpi skokowa zmiana punktu pracy z C do D , a prąd roboczy zwiększy się z I_{omin} do I_{omax} . Charakterystykę sterowania można przesuwac za pomocą prądu polaryzacji (rys. 4.11c). Uzyskuje się dzięki temu różny stan wyjściowy przekąźnika. W układzie wg rysunku 4.12. mamy przekąźnik ze stykami normalnie zamkniętymi, tzn. że przy braku prądu sterowania prąd roboczy ma wartość największą, co oznacza, że przekąźnik przewodzi. Przesunięcie charakterystyki w prawo (rys. 4.11c) umożliwia uzyskanie przekąźnika ze stykami normalnie otwartymi; przy braku prądu sterującego płynie minimalny prąd roboczy tzn. że przekąźnik nie przewodzi.

Schemat układu realizującego szybki przełącznik magnetyczny przedstawiono na rys.4.12. Przełącznik ma dwa wejścia: 1 - do którego doprowadzony sygnał powoduje zadziałanie (zmianę



Rys.4.11. Charakterystyki sterowania wzmacniacza z dużym współczynnikiem sprzężenia zwrotnego

stanu) oraz 2 - służące do powrotu do stanu wyjściowego. Przy braku sygnałów wejściowych (u_{s1} i u_{s2}) napięcie przemienne u_2 w obwodzie sterującym w każdym półokresie przemagnesowuje



Rys.4.12. Ideowy schemat przełącznika magnetycznego

kolejną oba rdzenie. W rezultacie prąd i_o w obwodzie roboczym jest bardzo mały. Jeżeli zostanie doprowadzony sygnał zadziałania (napięcie dodatnie na wejściu 1), to źródło na-

pięcia przemagnesowującego u_2 zostanie zablokowane spadkiem napięcia na rezystancji R_d . Rdzenie nie będą przemagnesowywane i na wyjściu pojawi się maksymalna wartość prądu roboczego i_0 oraz napięcie u_0 . Napięcie u_0 doprowadzone przez diodę D_p do wejścia u_{s1} zastępuje sygnał wejściowy i spełnia funkcję podtrzymania stanu przekaźnika, bez względu na dalszą obecność lub brak sygnału zadziałania.

5. DŁAWIKI DO OGRANICZANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH

5.1. Wprowadzenie

Dławiki indukcyjne, włączone szeregowo do obwodu, są stosowane do ograniczania prądów zwarciovych i podtrzymywania napięcia na szynach zbiorczych, przede wszystkim w sieciach kablowych średnich napięć. Stosuje się do tego celu dławiki o stałej, niezależnej od wartości przepływającego prądu wartości indukcyjności, co osiąga się przez budowę dławików bez rdzeni ferromagnetycznych.

Dławiki do ograniczania prądów zwarciovych, poza parametrami właściwymi dla wszystkich aparatów (U_{nl} , I_{nc} , i_{ns} , I_{nn}), charakteryzują się ponadto:

- znamionowym napięciem zwarcia,
- znamionową mocą przepustową.

Znamionowe napięcie zwarcia $u_d\%$ jest to względna strata napięcia w dławiku przy przepływie znamionowego prądu ciągłego. Jest ono liczbowo równe względnej impedancji dławika $Z_d\%$, czyli impedancji dławika Z_d odniesionej do impedancji zastępczej Z_n odbiornika w warunkach obciążenia znamionowego:

$$u_d\% = Z_d\% = \frac{Z_d}{Z_n} 100\% = \frac{Z_d \sqrt{3} I_n}{U_n} 100\% , \quad (5.1)$$

ponieważ zgodnie z definicją:

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} ,$$