

zabezpieczania względnie sygnalizacji zwarcé doziemnych. Stosowany jest wówczas układ połączeń jak na rys.3.33a. Dodatkowe uzwojenia wtórne (oznaczone symbolami  $m_2$   $n_2$ ) są połączone w układzie otwartego trójkąta. W normalnych warunkach pracy napięcie na zaciskach tego trójkąta jest równe zeru (rys. 3.33b). W przypadku zwarcia jednej z faz z ziemią (np. fazy A) wykres wektorowy napięć w obwodzie otwartego trójkąta przedstawia się jak na rys.3.33c. Wynika z niego, że na zaciskach trójkąta wystąpi napięcie zerowe o wartości  $U_0 = 3U_{AO}$ .

Przy doborze przekładnika napięciowego należy kierować się warunkami układowymi, przeznaczeniem oraz parametrami elektrycznymi sieci. Warunki układowe będą decydowały czy to ma być przekładnik do pomiaru napięć międzyfazowych czy fazowych, czy ma mieć jedno czy dwa uzwojenia wtórne, czy ma być z izolacją główną żywiczną czy papierowo-olejową. Umożliwią one również ustalenie znamionowych napięć wtórnych przekładników (100 V;  $100/\sqrt{3}$  V;  $\frac{100}{3}$  V). Przeznaczenie przekładnika dostarczy danych dotyczących rodzaju i liczby przyrządów przyłączanych, ich poboru mocy, co umożliwi ustalenie wymaganej mocy znamionowej obciążenia i klasy dokładności.

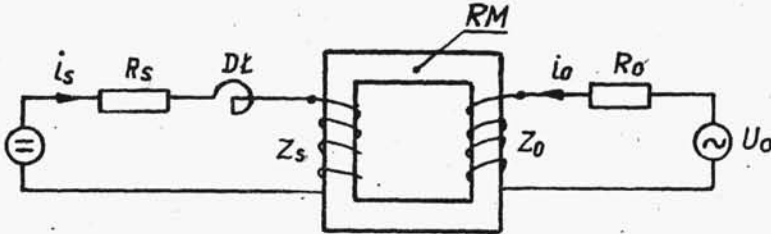
Napięcie znamionowe sieci jest podstawą do określenia znamionowego napięcia pierwotnego przekładnika.

## 4. WZMACNIACZE MAGNETYCZNE

### 4.1. Zasada działania

Wzmacniacz magnetyczny jest aparatem, w którym dla wzmocnienia sygnału wykorzystuje się zmianę przenikalności magnetycznej rdzenia. Schemat wzmacniacza magnetycznego w najprostszej postaci przedstawiono na rys.4.1. Na rdzeniu magnetycznym (RM) nawinięte są dwa uzwojenia: uzwojenie robocze o  $z_0$  zwojach oraz uzwojenie sterujące o  $z_g$  zwojach. Uzwojenie robocze przyłączone jest do źródła prądu przemiennego szeregowo z rezystancją roboczą  $R_0$ , a uzwojenie sterujące zasilane jest

ze źródła prądu stałego. Przy przepływie prądu przemiennego przez uzwojenie  $z_0$ , w uzwojeniu  $z_s$  indukuje się SEM wywołujące prąd przemienny w uzwojeniu sterującym. Do ograniczenia tego prądu, w obwodzie sterującym włączony jest dodatkowy dławik (DL).



Rys.4.1. Ideowy schemat wzmacniacza magnetycznego z pojedynczym rdzeniem

Zasada działania wzmacniacza magnetycznego opiera się na zależności przenikalności magnetycznej materiału ferromagnetycznego od prądu (rys.4.2). Na wstępie rozpatrzmy pracę układu przy braku sygnału sterującego, tj. przy  $i_s = 0$ . Układ staje się wówczas dławikiem z rdzeniem magnetycznym. Reakcyjność indukcyjna uzwojenia  $z_0$  nawiniętego na rdzeniu o stałym przekroju  $S_{Fe}$  i średniej drodze strumienia  $l_{Fe}$  wykonane go z blachy o danej charakterystyce magnesowania  $B = f(H)$  i wynikającej z niej zależności  $\mu = f(B)$ , wynosi:

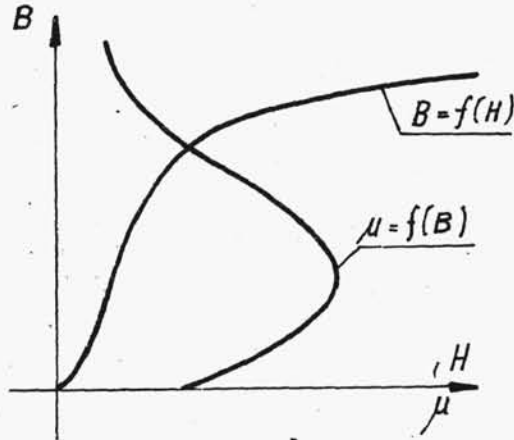
$$X_0 = \omega L_0 = \omega \frac{\Psi}{I}, \quad (4.1) \quad B$$

przy czym:

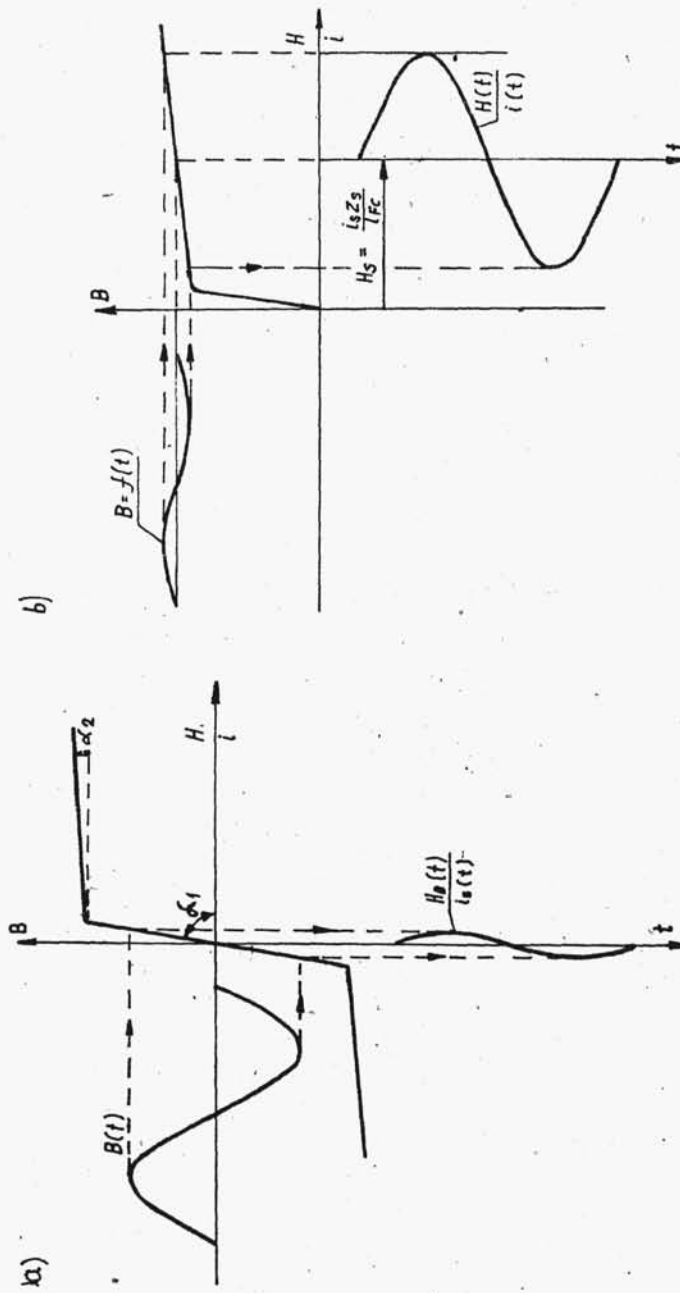
$$\begin{aligned} \Psi &= z_0 B S_{Fe} = \\ &= z_0 \mu H S_{Fe} . \end{aligned}$$

Zgodnie z prawem przepływu dla rdzenia bez szczelin

$$H l_{Fe} = I z_0 ,$$



Po przekształceniach będzie: rys.4.2. Przykładowe charakterystyki  $B = f(t)$  oraz  $\mu = f(B)$



Rys.4.3. Przebiegi indukcji magnetycznej w rdzeniu i prądu roboczego:  
a) przy braku prądu sterującego, b) z prądem sterującym

$$X_0 = \mu \frac{\omega z_0^2 S_{Fe}}{l_{Fe}} . \quad (4.2)$$

Ze wzoru (4.2) wynika, że przy danych parametrach rdzenia i uzwojenia oraz stałej częstotliwości, reaktancja uzwojenia zależy jedynie od  $\mu$ . Przy braku prądu sterującego i napięciu uzwojenia roboczego nie przekraczającego wartości tzw. napięcia krytycznego, rdzeń znajduje się w stanie nienasyconym, a  $\mu$  ma bardzo duże wartości. Oznacza to, że  $X_0$  ma również dużą wartość, a w obwodzie roboczym płynie bardzo mały prąd, nazywany prądem stanu jałowego. Na wartość tego prądu nie wpływa praktycznie rezystancja obciążenia  $R_0$ , gdyż jest ona znacznie mniejsza od  $X_0$ . Stan ten zilustrowano przebiegami czasowymi indukcji i prądu (rys. 4.3). Charakterystykę magnesowania przedstawiono tu upraszczająco w postaci dwóch prostych, z których jedna (bardziej stroma o kącie nachylenia  $\alpha_1$ ) odpowiada stanowi nienasyconemu, a druga (o b. małym kącie nachylenia  $\alpha_2$ ) - stanowi nasycenia rdzenia. Przyjęcie liniowej charakterystyki oznacza, że wartość  $X_0$  dla poszczególnych linii aproksymujących ma wartość stałą. Przebieg indukcji magnetycznej, proporcjonalny do przebiegu napięcia panującego na uzwojeniu  $z_0^{x)}$ , jest przez charakterystykę magnesowania związany z przebiegiem natężenia pola magnetycznego, względnie w innej skali z przebiegiem prądu płynącego przez uzwojenie robocze.

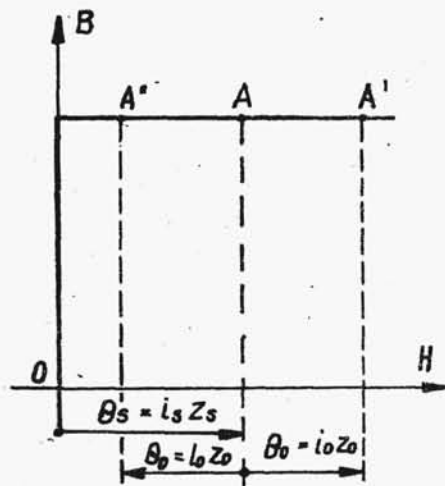
Warto podkreślić, że w przypadku przyjęcia idealnej charakterystyki magnesowania (tj.  $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$  i  $\alpha_2 = 0$ ) prąd jałowy - dla napięcia zasilania nie przekraczającego napięcia krytycznego - byłby równy zeru.

Przy podwyższaniu napięcia zasilającego będzie występował liniowy wzrost prądu (wartość  $X_0$  ma stałą wartość), aż do osiągnięcia napięcia krytycznego. Po przekroczeniu napięcia krytycznego (odpowiadającego osiągnięciu stanu nasycenia w

<sup>x)</sup> Wobec bardzo małego spadku napięcia na rezystancji obciążenia, napięcie na uzwojeniu jest praktycznie równe napięciu zasilania.

w rdzeniu) maleje gwałtownie przenikalność magnetyczna  $\mu$ , a tym samym i reaktancja uzwojenia. W części trwania każdego półokresu napięcia zasilającego, gdy występuje nasycenie, w uzwojeniu roboczym płynie prąd ograniczony praktycznie jedynie przez  $R_0$  (gdyż  $X_0$  ma bardzo małą wartość). Dla uniknięcia nasycenia, napięcie zasilania obwodu probierczego nie może przekraczać wartości napięcia krytycznego.

Rozpatrzmy teraz zjawiska występujące w rdzeniu w przypadku, kiedy występuje również prąd sterujący. Dla uproszczenia, a szczególnie dla uzyskania większej przejrzystości rozważań, założymy, że rdzeń ma idealną charakterystykę magnesowania<sup>x)</sup>



Rys.4.4. Rysunek ilustrujący stan magnetyczny rdzenia przy magnesowaniu prądem sterującym i roboczym

(rys.4.4). Prąd sterujący o wartości  $i_s$  wywołuje podmagnesowanie i nasycenie rdzenia, przenosząc punkt pracy na charakterystyce magnesowania do punktu A. Przepływ podmagnesujący od prądu stałego oznaczono na rys.4.4 jako  $\theta_s = i_s Z_s$ . Przepływ od prądu przemiennego ( $\theta_0$ ) będzie zmniejszał względnie powiększał wartość przepływu od prądu stałego, w zależności od znaku zasilającego napięcia przemiennego. W przypadku odejmowania się przepływów czyli odwzbudzenia rdzenia, prąd  $i_0$  osiąga - jak to już wyjaśniono w punkcie 2.1 -

wartość wyznaczoną z warunku równości przepływów  $\theta_0 = -\theta_p$ , tj.  $i_0 = -i_s \frac{Z_s}{Z_0}$ . Wynika stąd, że wartość prądu sterującego ( $i_s$ ) wpływa na wartość prądu roboczego ( $i_0$ ). Dla pełniej-

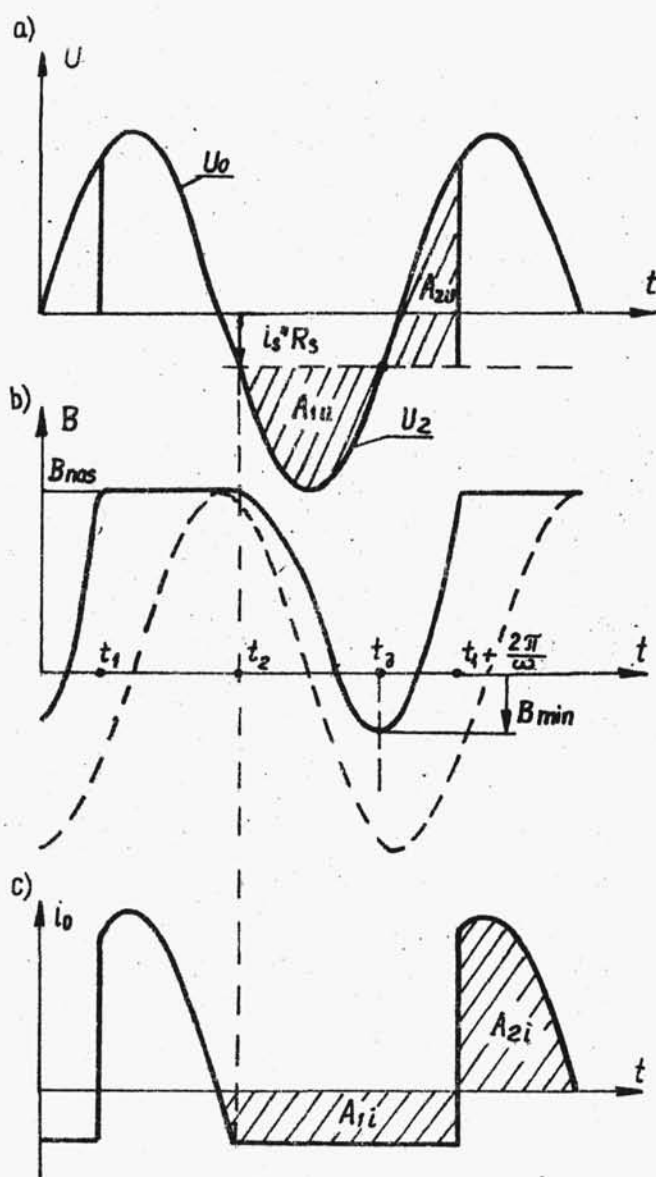
x) Rdzenie wzmacniaczy magnetycznych są budowane z materiałów ferromagnetycznych o bardzo dużej przenikalności tak, że założenie o idealnej charakterystyce ma uzasadnienie.

szego wyjaśnienia tej zależności przedstawimy przebiegi czasowe napięcia zasilającego ( $u$ ), indukcji magnetycznej w rdzeniu ( $B$ ) oraz prądu roboczego ( $i_o$ ) występujące w układzie (rys.4.5). Na rys.4.5a przedstawiono przebieg napięcia zasilającego obwód roboczy. Rys.4.5b przedstawia przebieg indukcji magnetycznej w rdzeniu. W przypadku braku prądu sterującego, przebieg indukcji (linia przerywana) byłby opóźniony o  $\frac{\pi}{2}$  względem napięcia i miałby charakter sinusoidalny, jeżeli napięcie nie przekraczałoby napięcia krytycznego. Prąd roboczy byłby wówczas równy zeru. W obecności prądu sterującego powodującego podmagnesowanie rdzenia, przebiegi indukcji i prądu są odmienne niż poprzednio. Prześledźmy je wychodząc ze stanu nasycenia. W tym stanie dla przepływu wypadkowego  $\Theta_w = \Theta_s + \Theta_o > 0$ ,  $X_o = 0$ , a wartość prądu roboczego jest ograniczona jedynie rezystancją  $R_o$ . Przebieg prądu w tym obszarze jest w fazie z napięciem zasilającym  $i_o = \frac{u_o}{R_o}$ . Wyjście ze stanu nasycenia nastąpi wówczas, gdy będzie spełniony warunek  $i_o = -i_s''$  (gdzie  $i_s'' = i_s \frac{z_s}{z_o}$ ), tzn. że zostanie skompensowane podmagnesowujące działanie prądu sterującego ( $\Theta_o = -\Theta_s$  na rys.4.4). Wartość tego prądu roboczego będzie stała, aż do ponownego wejścia rdzenia w nasycenie.

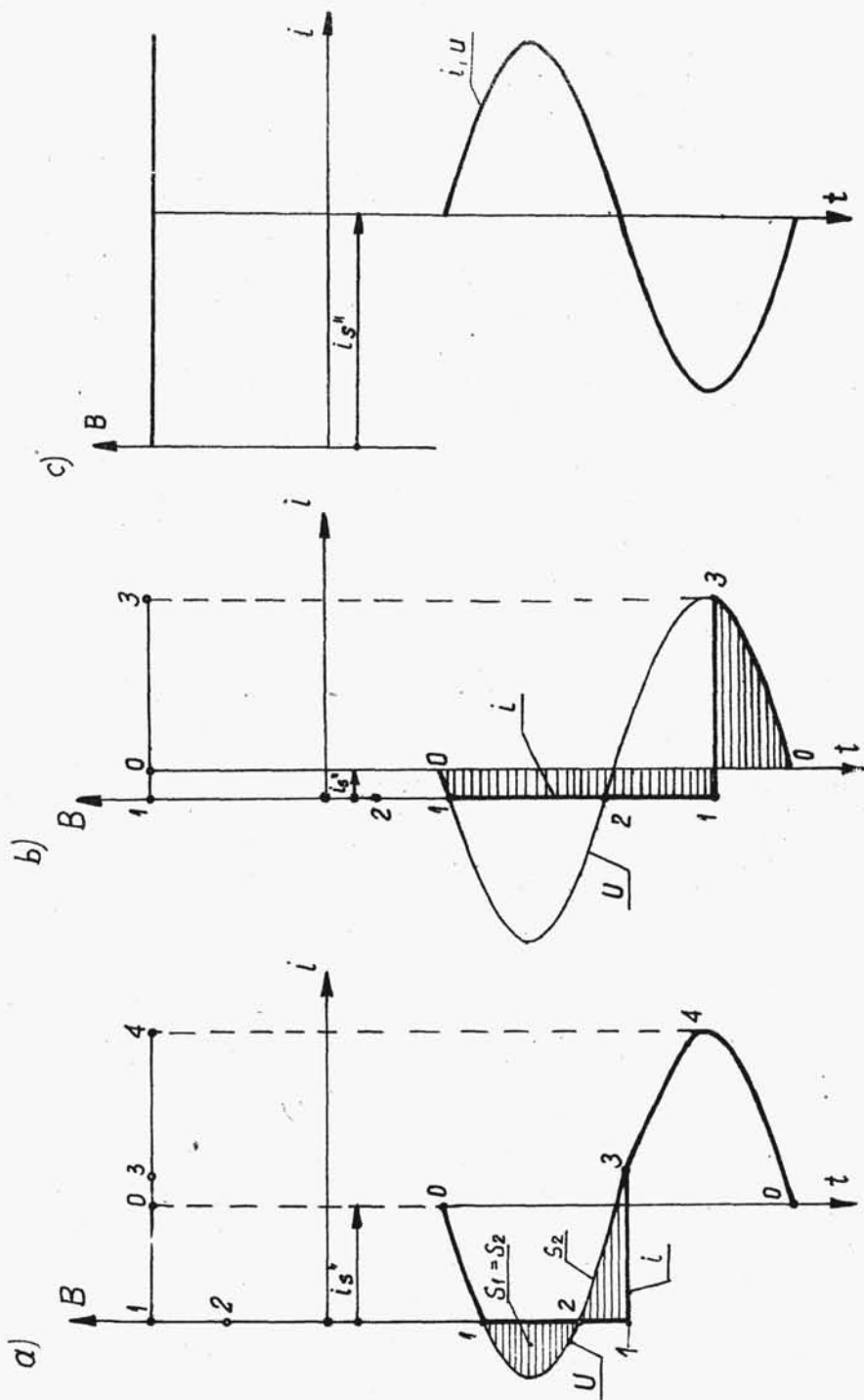
Wyjście z nasycenia nastąpi w chwili czasowej  $t_2$ , gdy spadek napięcia na rezystancji obciążenia wynosi  $u = -R_o i_s''$  i od tej chwili na uzwojeniu roboczym występuje napięcie  $u_z = u_o - R_o i_s''$ , czyli napięcie mierzone od poziomu oznaczonego na rys.4.5a linią przerywaną. Napięcie to wywołuje przebieg indukcji w nienasyconym rdzeniu o chwilowej wartości:

$$B = \frac{1}{z_o S_{Fe}} \int_{t_2}^t u_z dt . \quad (4.3)$$

Indukcja magnetyczna w rdzeniu osiąga minimum, gdy napięcie przyłożone do uzwojenia roboczego zmienia znak (chwila  $t_3$ ), a następnie zaczyna wzrastać, zmierzając do nasycenia. Prąd



Rys.4.5. Przebiegi czasowe napięcia zasilającego  $u_0$  (a), indukcji magnetycznej  $B$  (b) oraz prądu roboczego  $i_0$  (c) w stanie ustalonym wzmacniacza jednordzeniowego.



Rys.4.6. Przebiegi czasowe prądu roboczego przy różnych wartościach prądu sterującego wzmacniacza jednorzutowego



$$i_0 \text{ ma w tym czasie wartość stałą, spełniającą zależność } i_0 = \\ = i_s \frac{z_B}{z_0}.$$

Ponieważ zmiany indukcji przy zmniejszaniu jak i przy zwiększaniu (tj. od  $B_{nas}$  do  $B_{min}$  i od  $B_{min}$  do  $B_{nas}$ ) muszą być takie same, spełniona będzie równość:

$$\int_{t_2}^{t_3} u_z dt = \int_{t_3}^{t_1 + \frac{2\pi}{\omega}} u_z dt. \quad (4.4)$$

Wynika stąd równość pól zawartych pod przebiegami napięcia  $A_{1u} = A_{2u}$ , będącymi miarami powyższych całek. Warunek (4.4) pozwala na określenie czasu  $t_3$ , po którym rdzeń osiąga stan nasycenia. Od chwili nasycenia rdzenia, prąd roboczy  $i_0$  będzie się zmieniał w takt napięcia zasilającego ( $i_0 = \frac{u_0}{R_0}$ ).

Warunek (4.4) oznacza również równość pól  $A_{1i}$  i  $A_{2i}$  ograniczonych przebiegiem prądu, jak to pokazano na rys.4.5c. Oznacza to, że w przebiegu prądu roboczego nie występuje składowa stała oraz, że średnia wartość tego prądu za okres zmienności równa się zeru. Średnia wartość prądu roboczego wyprostowanego jest natomiast zależna jedynie od wartości prądu sterującego.

Na rys.4.6 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu obciążenia dla różnych wartości prądu sterującego, otrzymane przy założeniu idealnej krzywej magnesowania. Przebiegi sinusoidalne przedstawiają napięcie zasilające obwód roboczy, a w częściach 0 - 1 oraz 3 - 4 - 0 również - tylko w innej skali - prąd roboczy  $i_0$ . Przebiegi te, skojarzone z charakterystyką magnesowania, pozwalają na prześledzenie wzajemnych zależności pomiędzy poszczególnymi wielkościami (patrz punkty 0 ... 4 na przebiegach czasowych i na charakterystyce magnesowania). Na rys.4.6c przedstawiono przypadek znacznego podmagesowania rdzenia tak, że w całym przedziale zmienności napięcia roboczego nie nastąpi wyjście rdzenia z nasycenia. Prąd w obwodzie nie będzie zależał wówczas od prądu stero-

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-