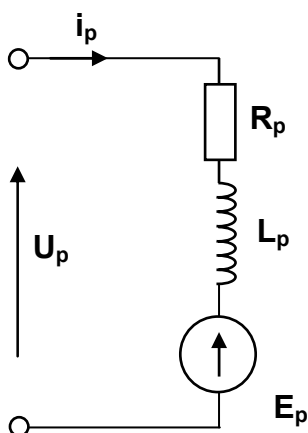


STEROWANIE UZWOJEŃ SILNIKÓW SKOKOWYCH.

Schemat zastępczy pasma.

Wzmacniacze mocy powinny zapewnić odpowiednio szybkie narastanie i opadanie prądu w pasmach. Należy pamiętać, że pojedyncze pasmo (uzwojenie) można w uproszczeniu przedstawić jako indukcyjność L_p (w rzeczywistości zmienną) i rezystancję R_p reprezentującą straty w uzwojeniu. Stała czasowa wynosi $\tau = L_p/R_p$.



Rys.1. Schemat równoważny pasma silnika skokowego.

Schemat równoważny jednego pasma zawiera także siłę elektromotoryczną E_p indukowaną w uzwojeniu. Dla silników skokowych magnetoelektrycznych (z magnesami trwałymi) i hybrydowych, wirujący rotor z magnesami trwałymi wytwarza wirujące pole magnetyczne, które indukuje siłę elektromagnetyczną E_p . Jest ona proporcjonalna do prędkości obrotowej

$$E_p = K_E \omega$$

gdzie K_E – stała elektryczna.

W silnikach reluktancyjnych powyższy schemat zastępczy pasma jest słuszny, jednak należy go rozpatrywać w całym zamkniętym obwodzie

$$U_p - R_p i_p = \frac{d\lambda}{dt}$$

λ - strumień sprzężony ($\Phi \cdot n$), gdzie strumień sprzężony określa się

$$\lambda_p = L_p i_p$$

i w rezultacie
$$U_p - R_p i_p = L_p \frac{di_p}{dt} + i_p \frac{dL_p}{dt} = L_p \frac{di_p}{dt} + \omega i_p \frac{dL_p}{d\Theta}$$

gdzie $\Theta = \omega t$ – kąt obrotu.

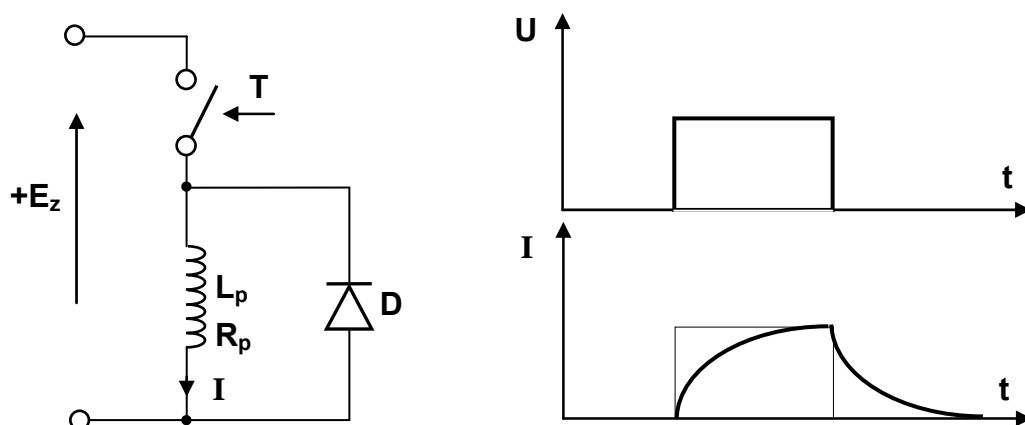
Drugi człon równania jest proporcjonalny do prędkości obrotowej ω i może być uważany za równoważny SEM.

$$E_p = \omega i_p \frac{dL_p}{d\Theta}$$

Ponieważ zmienność $L_p=f(\Theta)$ jest złożona i charakterystyczna dla danego typu silnika, dlatego E_p jest zmienna w zależności od kąta pozycji rotora i tym samym zmienna w czasie.

Sterowanie uzwojeń.

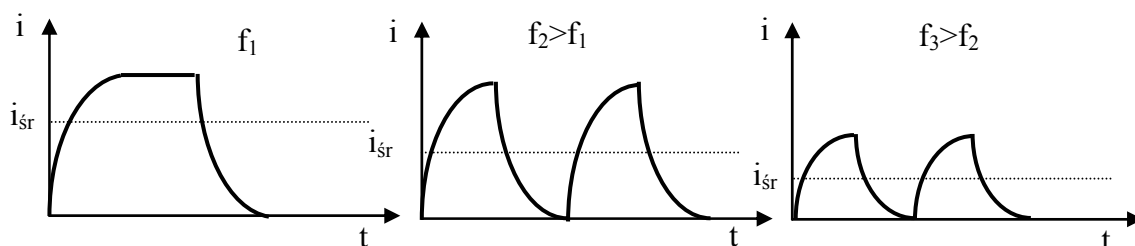
Najprostsze jest sterowanie impulsami napięciowymi.



$$\text{Straty mocy w uzwojeniu: } P = RI_m^2$$

Rys.2. Przebieg prądu przy sterowaniu obciążeń rezystancyjno - indukcyjnych przy sterowaniu napięciowym.

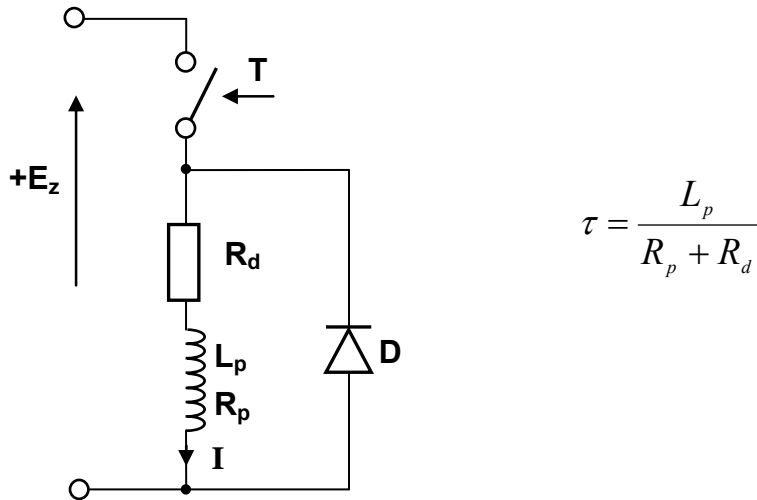
Przy dużych częstotliwościach czas trwania impulsu napięciowego jest krótki i prąd nie może osiągnąć swojej maksymalnej wartości przed wyłączeniem napięcia (rys.3.). Prowadzi to, przy zwiększaniu częstotliwości, do znacznego zmniejszenia momentu obrotowego silnika.



Rys.3. Wpływ wzrostu częstotliwości pracy silnika na kształt impulsu prądowego i wartość średniego prądu w uzwojeniach silnika.

Prowadzi to do zaniżenia częstotliwości pracy start – stopowej, a przede wszystkim synchronicznej. Dlatego sterowniki stałonapięciowe stosujemy dla niezbyt dużych częstotliwości pracy.

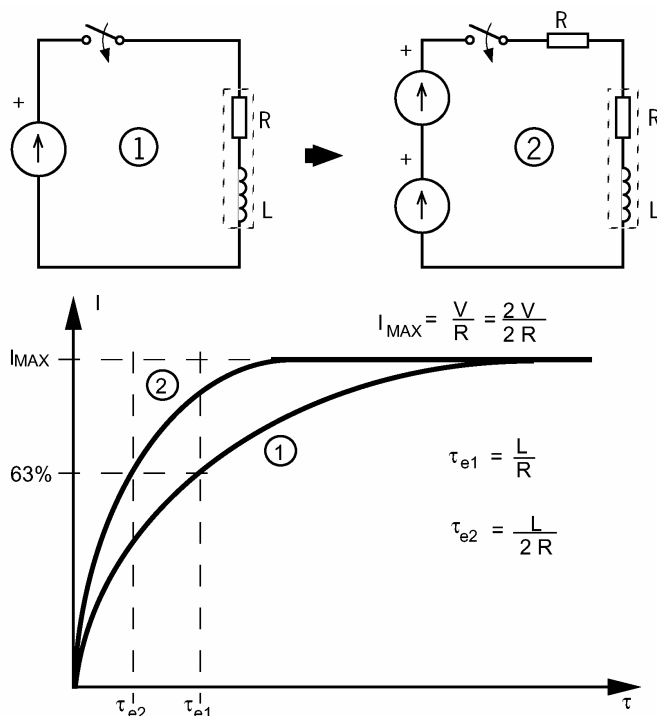
Najprostszym, ale nieekonomicznym (ze względu na straty mocy) sposobem forsowania prądu pasma jest szeregowe przyłączenie do uzwojenia rezystancji R_d , co prowadzi do zmniejszenia stałej czasowej (rys.4.).



Rys.4. Wpływ rezystora szeregowego na zmniejszenie stałej czasowej narostu prądu.

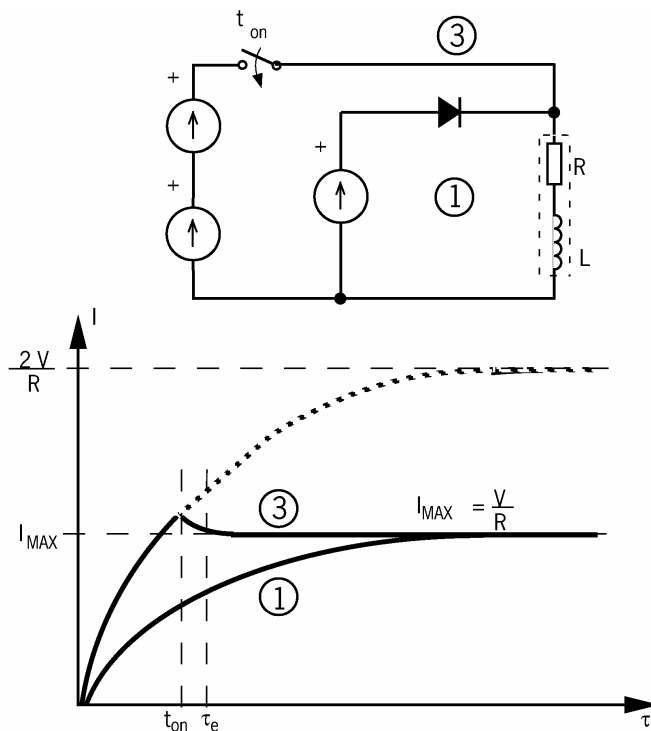
Aby uzyskać taką samą wartość prądu średniego należy odpowiednio zwiększyć napięcie zasilające.

Na rys.5. pokazano wpływ zwiększenia napięcia i zmniejszenia stałej czasowej.



Rys.5. Wpływ zwiększenia napięcia i rezystancji dodatkowej na sterowanie uzwojenia.

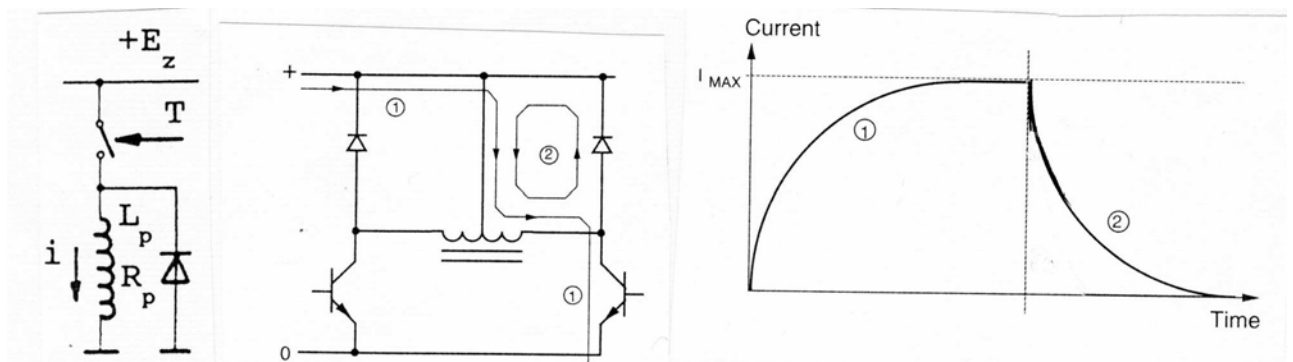
Innym sposobem forsowania szybkiego narostu prądu jest chwilowe włączenie na początku impulsu wyższego napięcia jak pokazano na rys.6.



Rys.6. Forsowanie narostu prądu przez chwilowe włączenie wyższego napięcia (sterowanie dwunapięciowe).

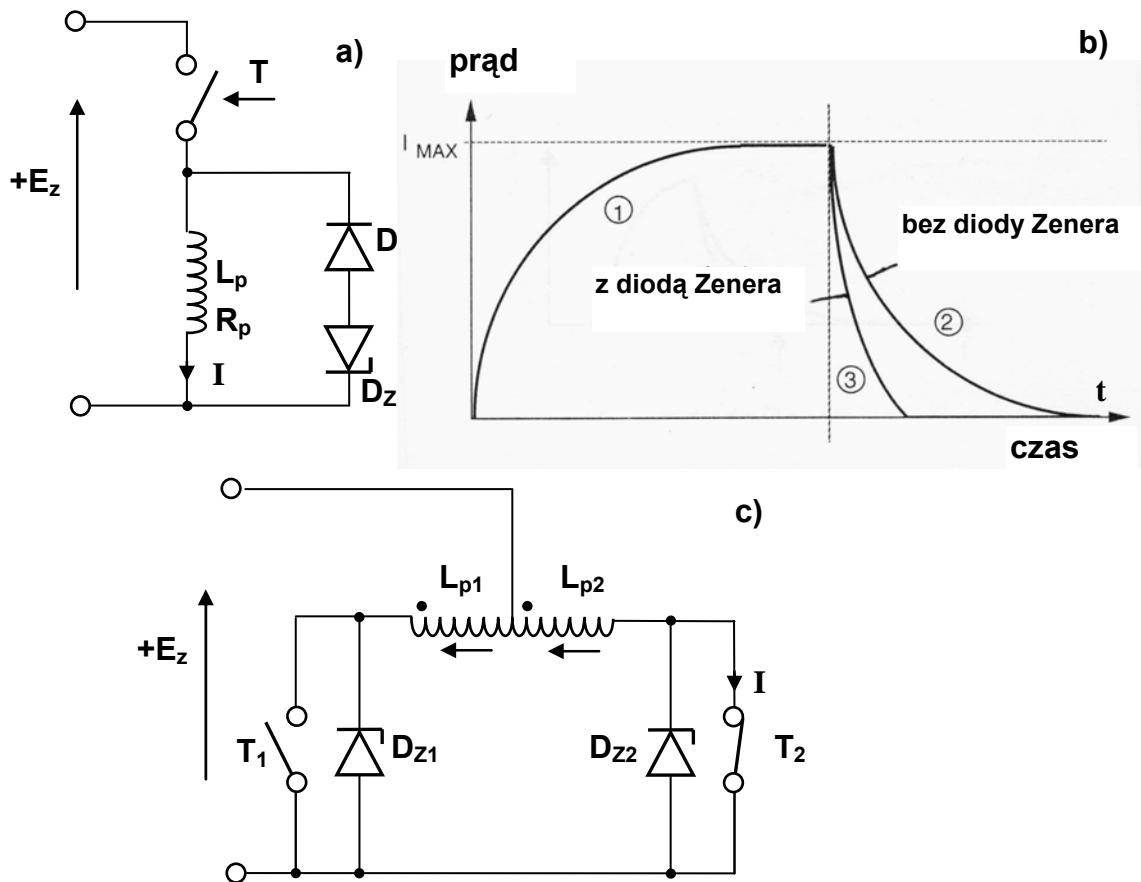
Innym poważnym problemem jest zapewnienie szybkiego zanikania prądu w uzwojeniu.

Typowa dioda prostownicza dołączona równolegle do uzwojenia daje wolne opadanie prądu w uzwojeniu rys.7.



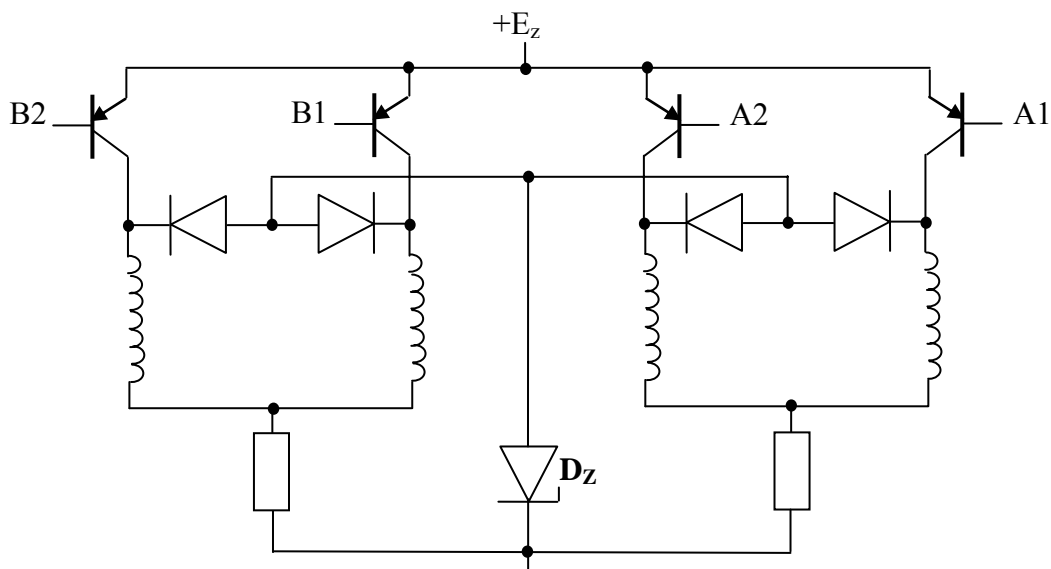
Rys.7. Wpływ diody równoległej na szybkość opadania prądu w uzwojeniu.

Zastosowanie diody Zenera pozwala zmniejszyć czas opadania prądu. Sposób ten nazywany jest „metodą dopuszczalnych przebiegów” (rys.8.).



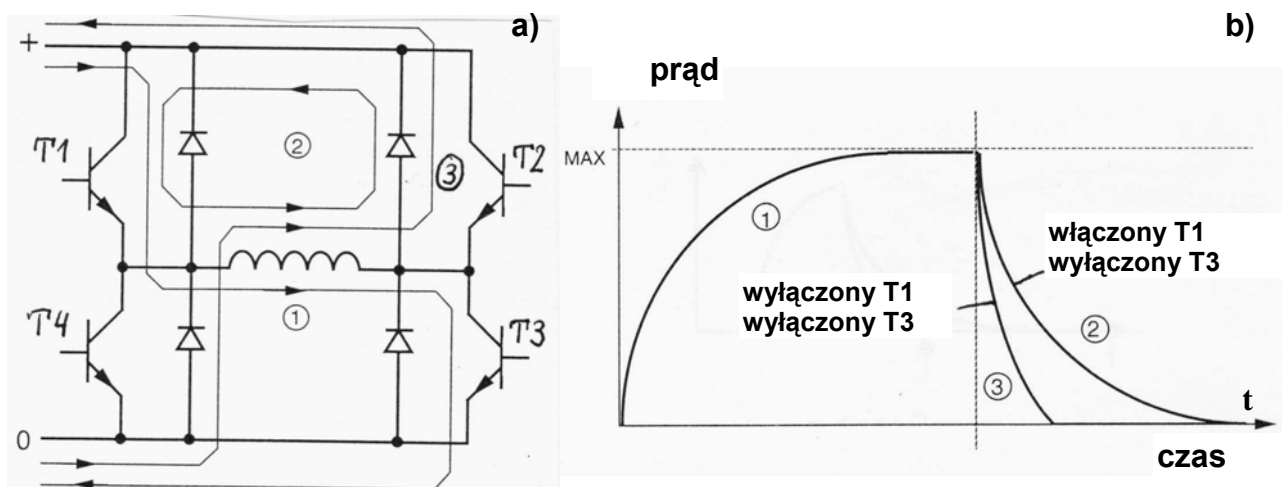
Rys.8. Ograniczenie szybkości wyłączenia przez zastosowanie diody Zenera.
 a) dla pojedynczego uzwojenia, b) wpływ diody Zenera na prędkość opadania prądu,
 c) dla pasma sterowanego unipolarne.

Przykładem zastosowania tłumienia przepięć z zastosowaniem diody Zenera jest układ na rys.9. Dioda D_z ogranicza przepięcia, rozładowuje energię ze wszystkich uzwojeń.



Rys.9. Typowy układ ograniczenia przepięć w sterowaniu silnika skokowego.

W układzie mostkowym (rys.10.) do ograniczenia czasu opadania prądu wykorzystuje się diody przyłączone równolegle do kluczy. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest powrót energii z indukcyjności uzwojenia do źródła zasilania.

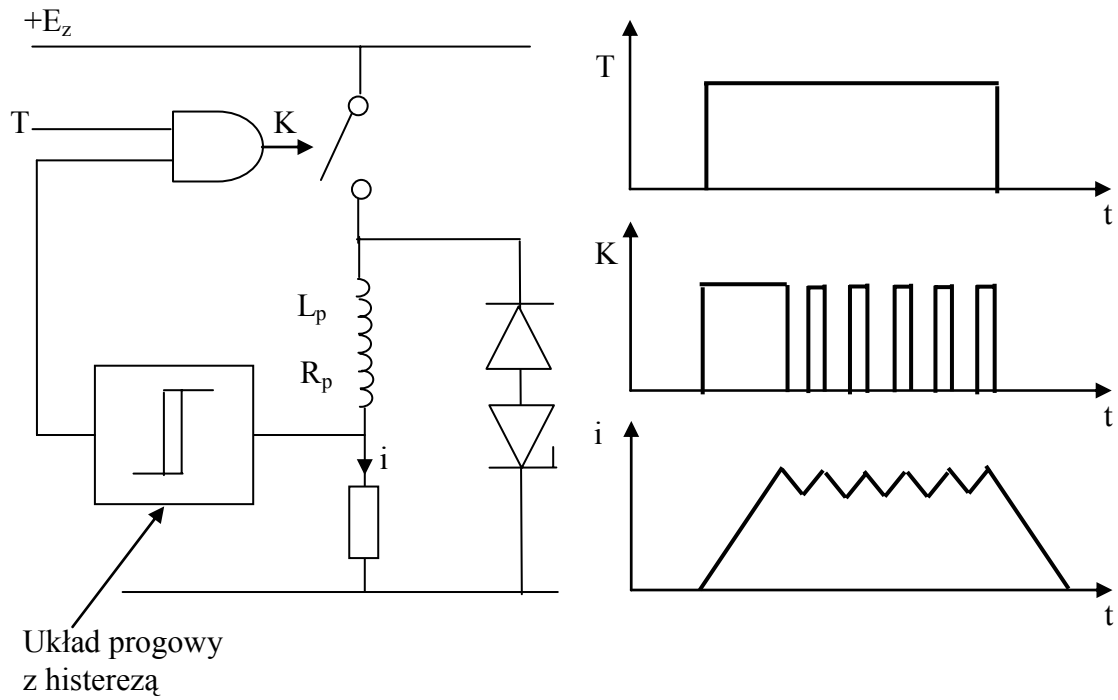


Rys.10. Układ tłumienia przebiegów z dwoma kluczami przy sterowaniu bipolarnym.

Przy wyższych częstotliwościach impulsów sterujących, kiedy skutki ograniczenia prądu są znaczne, stosuje się sterowniki stałoprądowe. Stosujemy napięcie zasilania o wyższej wartości, które wymusza szybszy czas narastania prądu w uzwojeniu tak, by utrzymać średnią jego wartość na stałym poziomie. Układ sterujący stabilizuje prąd w uzwojeniu technikami regulacji czasu włączenia napięcia, w stosunku do czasu wyłączenia. Znanymi np. z zasilaczy impulsowych. Napięcie zasilania może w przypadku sterowania stałoprądowego wielokrotnie przewyższać wartość napięcia nominalnego. Wówczas silnik ma przy dużych częstotliwościach pracy mniejszą sprawność, ale rozwijane momenty są wyższe, a maksymalne częstotliwości pracy są dwu-, trzykrotnie większe w porównaniu ze sterowaniem stałonapięciowym.

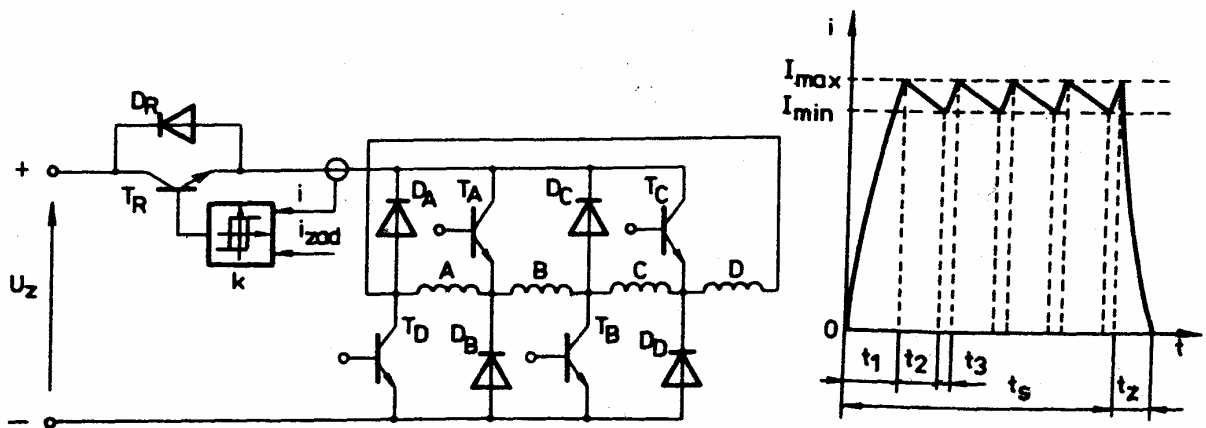
Układy z kluczowanymi źródłami prądowymi stosuje się, gdy wymagania dotyczące parametrów napędu są szczególnie wysokie i dotyczą dużych częstotliwości pracy start – stopowej.

Najprostszym rozwiązaniem układu źródła prądowego jest histerezowy stabilizator prądu o bramkowym włączeniu, pokazany na rys.11.



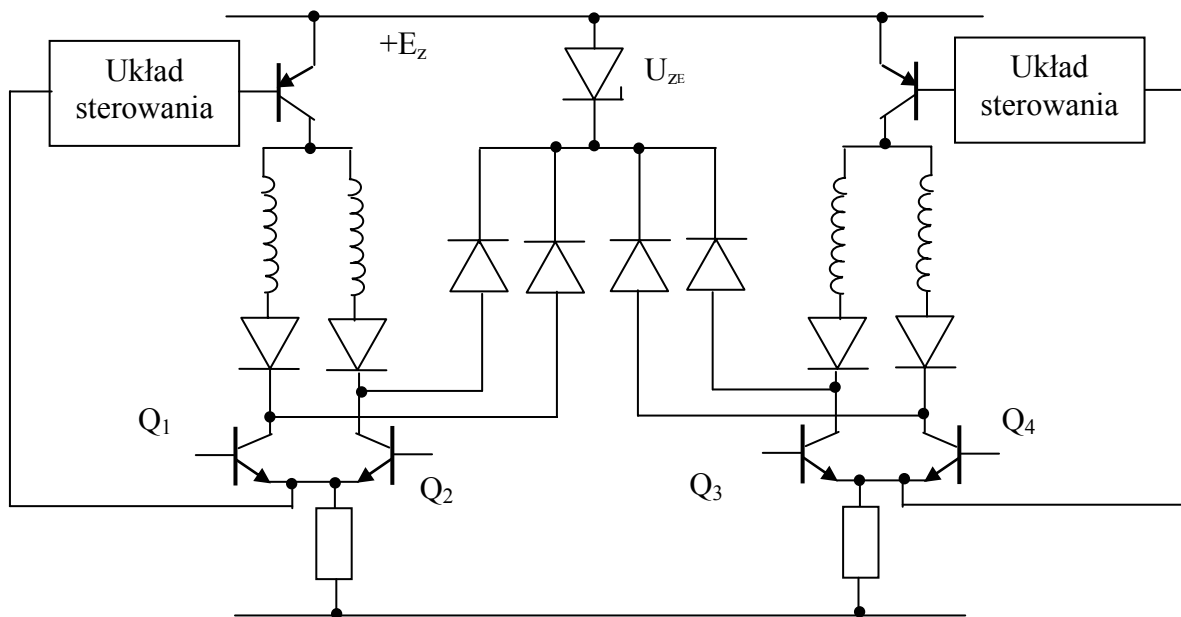
Rys.11. Histerezowy stabilizator prądu uzwojenia.

Stabilizację prądu zasilania uzwojeń sterowanych unipolarnie zapewnia układ z rys.12.



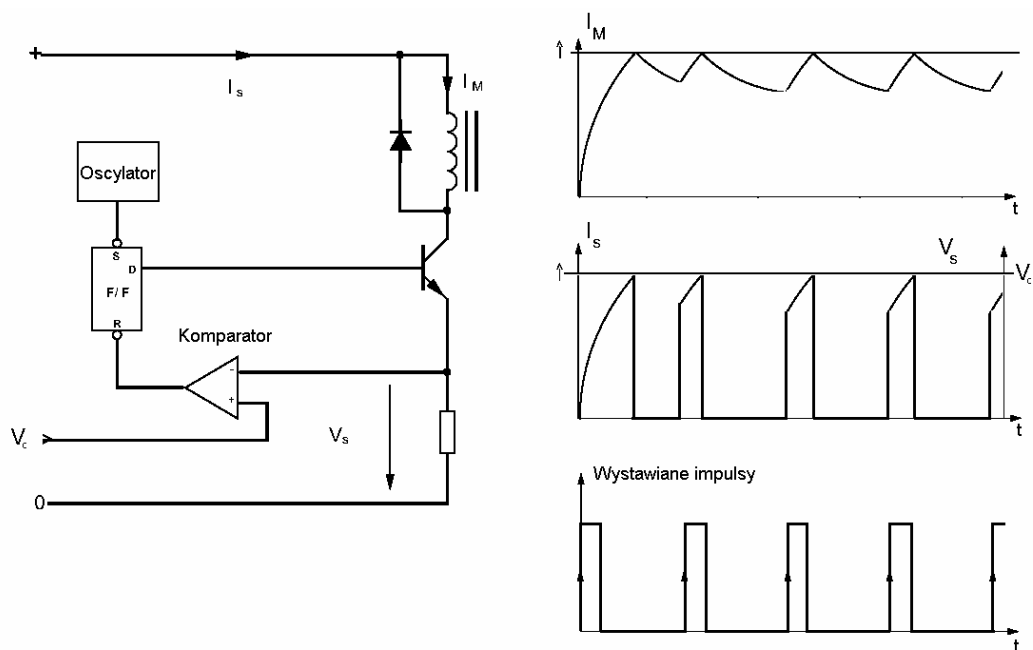
Rys.12. Stabilizator prądu uzwojenia sterowanego unipolarnie.

Przy stabilizacji impulsowej prądu w pasmach można wykorzystać fakt, że uzwojenia w pasmach sterowanych unipolarnie nie przewodzą równocześnie i wystarczy stabilizować prąd dla obu uzwojeń (układ pokazano na rys. 13).



Rys.13. Sterowanie impulsowe prądu pasm silnika sterowanego unipolarnie.

Lepsze właściwości niż stabilizacja impulsowa typu histerezyowego ma stabilizator impulsowy prądu o stałej częstotliwości kluczowania z rys.14.

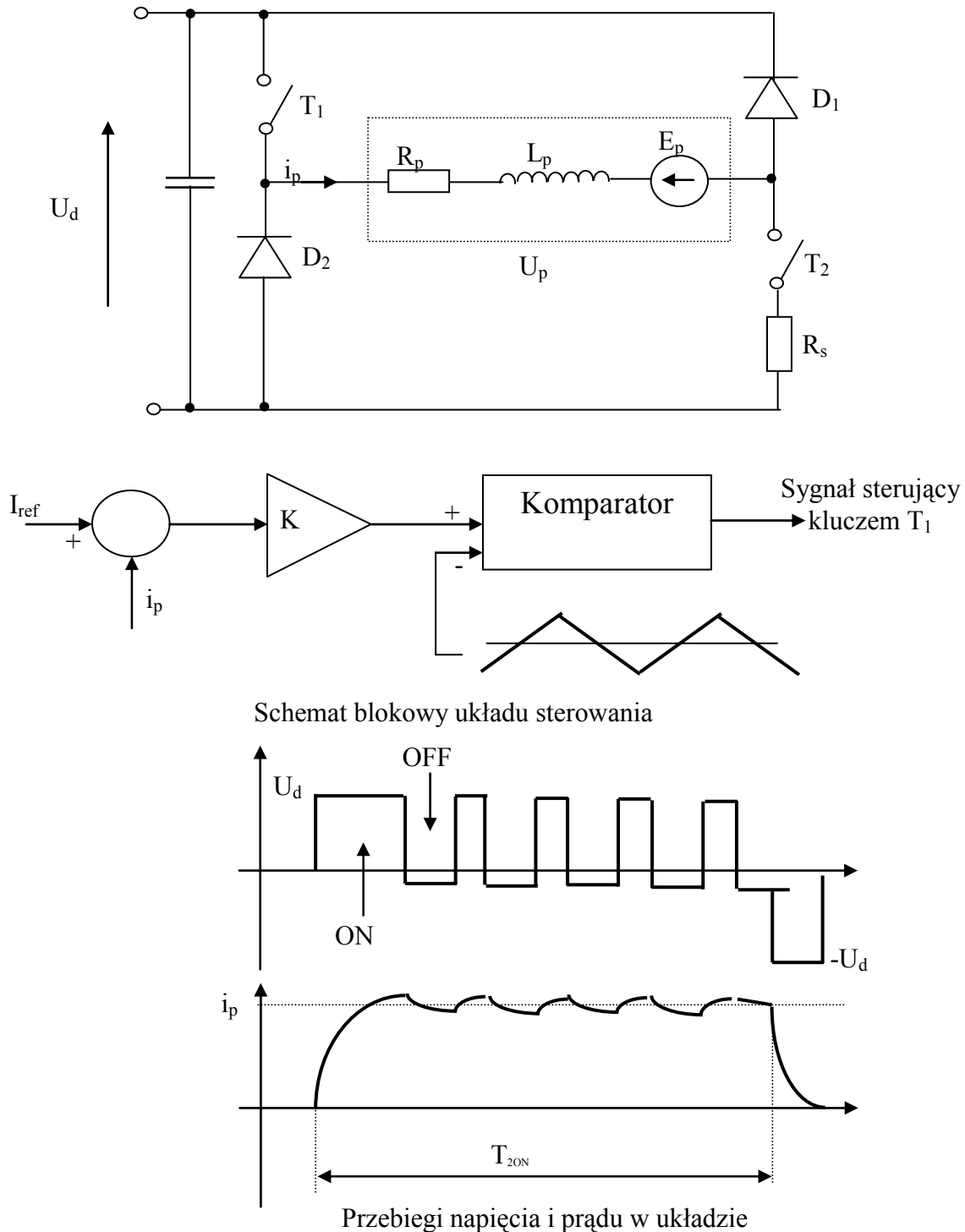


Rys.14. Stabilizator impulsowy prądu uzwojenia sterowanego unipolarnie.

Stabilizacja prądu przez modulację współczynnika wypełnienia (PWM - ang. Pulse-Width Modulation) znajduje zastosowanie także w sterowaniu pasm silników skokowych. Technika ta używana w energoelektronice może mieć zastosowanie do sterowania wszystkich omówionych konfiguracji. Pokażemy ją na pełnym układzie mostkowym. Dla przejrzystości

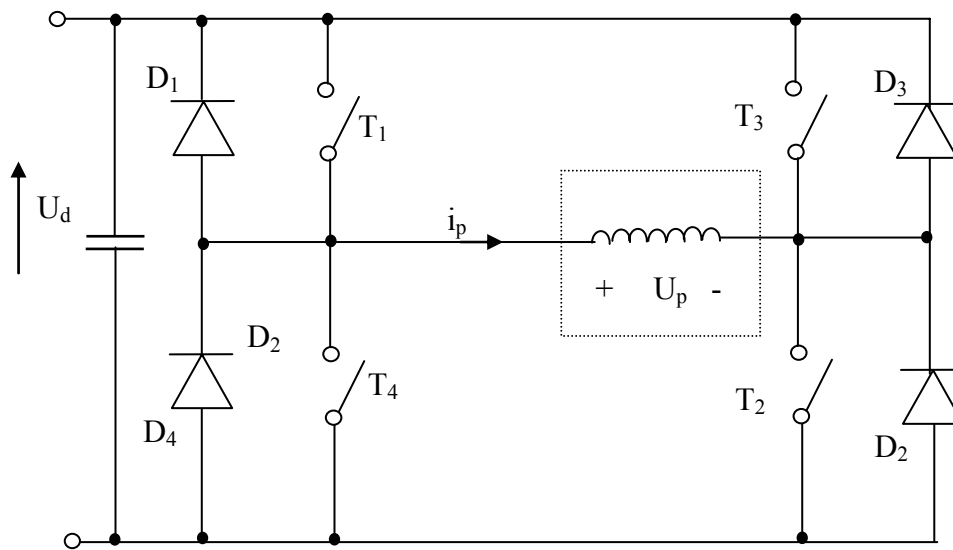
dydaktycznej narysowano (rys.15) jedynie półmostek - elementy mające udział w pracy dla prądu płynącego w jedną stronę w paśmie.

Zastosowanie dwóch tranzystorów: T_1 – stabilizujący prąd uzwojenia i T_2 – włączający prąd uzwojenia, umożliwia uzyskanie dobrych parametrów dynamicznych (szybki narost i opadanie prądu w uzwojeniu) i energetycznych (odzyskiwanie energii). Układ, schemat blokowy sterowania i przebiegi pokazano na rys.15.



Rys.15. Sterowanie unipolarne impulsowe półmostkowe prądu pasma silnika
a) schemat; b) stabilizator prądu (PWM); c) przebiegi .

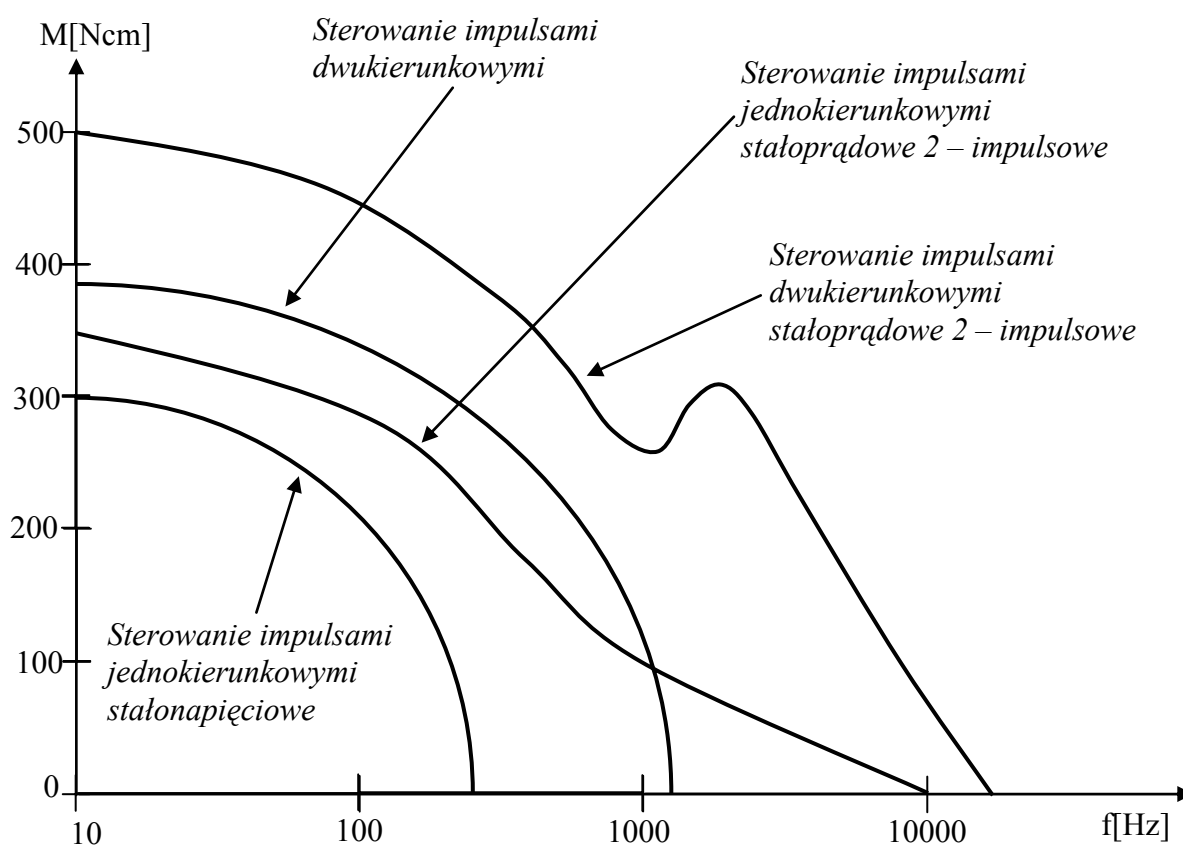
Analogicznie działa układ sterowania bipolarnego w pełnym układzie mostkowym z rys.16



Rys.16. Sterowanie bipolarne impulsowe mostkowe prądu pasma silnika.

W układach sterowania z impulsowymi źródłami prądu napięcie wejściowe jest kluczkowane a wartość jego może przekraczać $10 \div 20$ krotnie wartość napięcia nominalnego silnika. Układ zapewnia bardzo krótki czas narastania prądu oraz utrzymanie odpowiedniej wartości średniej tego prądu podczas trwania impulsu sterującego. Układy tego typu są szczególnie przydatne w przypadku pracy silnika z dużymi częstotliwościami start – stopowymi, bądź jest rozpędzany do dużych częstotliwości pracy synchronicznej, a następnie hamowany i cykl ten się powtarza. Zaletą tego sposobu sterowania jest dobra sprawność energetyczna, pod warunkiem zastosowania dobrych elementów kluczujących. Przy dużych częstotliwościach pracy synchronicznej napęd ze sterownikiem jest wrażliwy na zjawisko rezonansu.

Poniżej (rys.17) przedstawiono wykres porównawczych charakterystyk silnika skokowego dla różnych układów sterujących.



Rys.17. Wykres porównawczy charakterystyk silnika skokowego dla różnych układów sterujących.

Komutacja kombinowana.

W większości zastosowań czas pozycjonowania silników skokowych determinuje szybkość pracy mechanizmu. Istotnym problemem jest skracanie czasu ruchu do zadanej pozycji. Można to uzyskać stosując silnik o większym momencie lub przez specjalne sterowanie pracą silnika. Poprawę właściwości dynamicznych można uzyskać przez zapewnienie odpowiedniej stromości przedniego i tylnego zbocza impulsu prądowego. Przez kształtowanie odpowiedniej serii impulsów sterujących można uzyskać wymaganą szybkość pozycjonowania.

Przykładem może być metoda hamowania przez ponowne włączenie poprzednio zasilanej fazy.

Metoda komutacji kombinowanej z zasilaniem zmiennej liczby uzwojeń w czasie ruchu wirnika silnika skokowego jest przydatna w mechanizmach, w których przesunięcia są małe, a ruch roboczy wykorzystuje się do jednego lub kilku skoków silnika. Zasadą tej metody jest dostarczenie większej ilości energii w czasie rozruchu i ruchu, przez chwilowe wzbudzenie większej liczby uzwojeń niż przy typowej komutacji.

Pierwszą możliwością stosowaną w praktyce jest metoda polegająca na wzbudzeniu trzech faz w czasie ruchu i pozostawieniu tylko jednej wzbudzonej fazy, gdy układ pozostaje w spoczynku. Charakterystyczne dla tej metody jest to, że położenia równowagi stabilnej wirnika przy wzbudzanych w czasie ruchu trzech fazach i jednej po przełączeniu – pokrywają się.

Drugą możliwością komutacji kombinowanej jest sytuacja, gdy położenie równowagi stabilnej wirnika przy wzbudzonej większej liczbie faz leży przed położeniem równowagi stabilnej po przełączeniu zasilania. Czas zasilania większej liczby uzwojeń jest ograniczony poprawnością działania układu i nie może być dłuższy od czasu dojścia wirnika do wybranego położenia. Forsowanie narastania prądu w uzwojeniach powoduje zwykle znaczny wzrost czasu drgań po wykonaniu ruchu. Można temu przeciwdziałać stosując komutację kombinowaną. Położenie równowagi stabilnej dla wzbudzonych dwóch kolejnych faz leży pomiędzy położeniem równowagi stabilnej dla każdej z tych faz zasilanych pojedynczo, można więc, zasilając początkowo dwie fazy, uzyskać dojście wirnika do położenia równowagi stabilnej dla wzbudzonych dwóch faz. Układ będzie się nadal poruszał dzięki zgromadzonej energii kinetycznej. Gdy prędkość wirnika zmaleje do zera, znajdzie się on w pobliżu wybranego położenia równowagi stabilnej. Przełączając wtedy zasilanie na jedną fazę można uzyskać aperiodyczne dojście wirnika do zadanego położenia.

Taki sposób komutacji jest zbliżony do metody hamowania poprzednio zasilaną fazą. Jego zaletą jest mniejsza liczba przełączeń zasilania.

Trzecią możliwością komutacji kombinowanej ze wzbudzeniem większej liczby faz jest przypadek, gdy położenie równowagi stabilnej przy wzbudzonej większej liczbie faz leży za wybranym położeniem. Stosowanie tego typu komutacji jest celowe przy dużych obciążeniach silnika, gdy zdecydowany wpływ na czas pozycjonowania ma czas ruchu do położenia równowagi. W praktycznych rozwiązaniach konstrukcyjnych dużemu obciążeniu towarzyszy zwykle znaczne tarcie suche i powstające drgania są szybko tłumione. Wzrost chwilowej wartości momentu można uzyskać stosując forsowanie narastania prądu w uzwojeniach lub zasilanie trzech kolejnych faz silnika z przełączeniem na jedną przy pokrywających się położeniach równowagi stabilnej. Można także wykorzystać dla szybszego pozycjonowania kształtowanie charakterystyki chwilowego momentu silnika przez zastosowanie wzbudzenia dwóch następnych faz silnika z przyłączeniem na pierwszą z nich.