

Henryk KOŁODZIEJ

Institut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

## UKŁAD NAWROTNY SILNIKA PRĄDU STAŁEGO Z REWERSJĄ MOMENTU W OBWODZIE WZBUDZENIA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono możliwości zastosowania układu zasilania silnika prądu stałego z rewersją momentu w obwodzie wzbudzenia do napędu maszyn wyciągowych. Określono warunki, jakie powinny zostać spełnione, aby ten rodzaj napędu mógł znaleźć zastosowanie w maszynach wyciągowych.

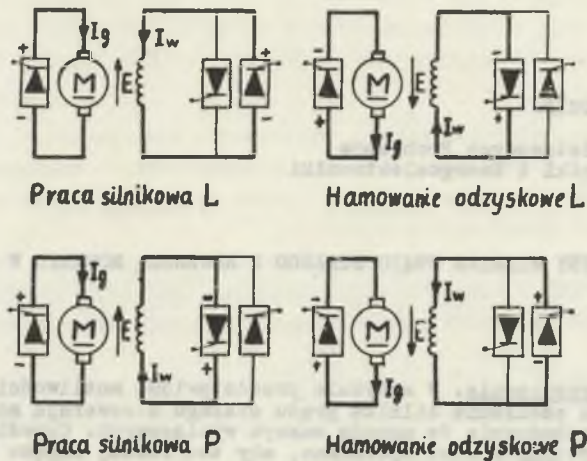
### 1. Wstęp

W nowoczesnych układach napędowych coraz częściej są stosowane silniki prądu stałego zasilane z przekształtników tyrystorowych. Są to na ogół układy, w których zmiana kierunku elektromagnetycznego momentu silnika realizowana jest przez zmianę kierunku prądu twornika. Zastosowanie prostowników sterowanych umożliwia jednak rozpowszechnienie, dość rzadko do tej pory stosowanego układu nawrotnego z rewersją momentu przez zmianę kierunku strumienia wzbudzenia. Możliwości zastosowania tego układu są bardzo szerokie, gdyż w aktualnych warunkach nie stanowią one trudnych i kosztownych inwestycji. Najbardziej przydatny jest ten układ w przemyśle obrabiarkowym i w hutnictwie, gdzie cały szereg napędów oprócz szybkiej rewersji momentu wymaga też regulacji prędkości przez osłabienie prądu wzbudzenia. Artykuł niniejszy ma na celu omówienie przydatności omówionego układu do napędu kopalnianych maszyn wyciągowych.

### 2. Zasada działania układu

Cztery możliwe stany pracy układu zostały przedstawione na rys. 1.

W układzie odbywa się więc hamowanie odzyskowe uzyskane dzięki szybkiemu przełączeniu prądu wzbudzenia oraz przełączeniu mostka tyrystorowego w obwodzie głównym do pracy falownikowej.



Rys. 1

O jakości regulacji decyduje w głównej mierze czas przełączania prądu wzbudzenia.

Układy Leonarda stosowane do napędów kopalnianych są obecnie coraz częściej wypierane przez układy tyrystorowe, mogące już w chwili obecnej konkurować z układami tradycyjnymi pod względem ceny.

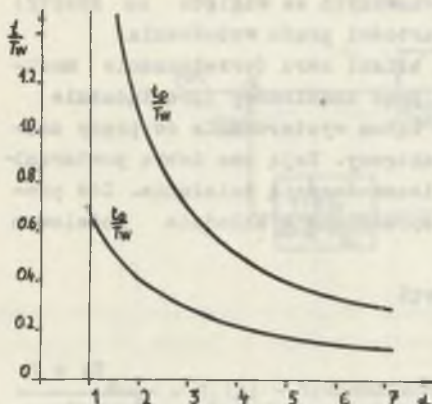
Układem najbardziej konkurencyjnym, pozwalającym maksymalnie obniżyć nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacyjne, jest układ z rewersją momentu w obwodzie wzbudzenia. Obniżenie kosztów inwestycyjnych można ocenić na około 30 do 40% w stosunku do układu z mostkami tyrystorowymi w obwodzie twornika.

### 3. Układ zasilania i sterowania wzbudzenia

Czynnikiem decydującym o jakości regulacji jest czas przełączania prądu wzbudzenia. Jego maksymalne skrócenie wymaga stosowania dużych współczynników forsowania wzbudzenia.

Wykres względnego czasu przełączania -  $\frac{t}{T_w} \frac{P}{W}$  - oraz względnego czasu malenia prądu wzbudzenia do zera  $\frac{t}{T_w} \frac{P}{W}$  ( $T_w$  - stała czasowa obwodu wzbudzenia) przedstawia rysunek 2.

Wielkość stosowanego współczynnika forsowania wzbudzenia zależy od znamionowego napięcia wzbudzenia. Dla niskich znamionowych napięć wzbudzenia (do 100 V) współczynnik forsowania dochodzi do dwunastu [2], tym sa-



Rys. 2

prądu wzbudzenia, ewentualnie zmniejszającego wartość prądu wzbudzenia w czasie postoju maszyny.

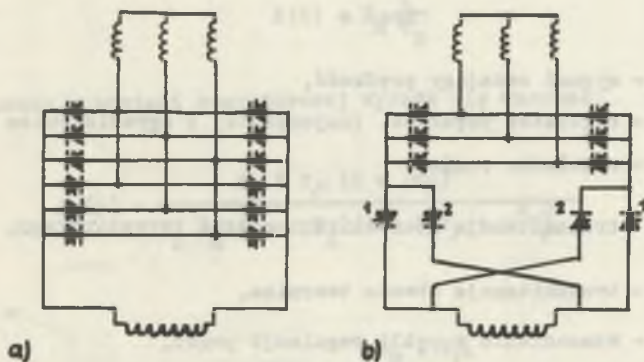
Stosowanie dużych współczynników forsowania wiąże się z koniecznością głębokiego wysterowania mostka tyrystorowego w czasie pracy znamionowej.

Dla ograniczenia składowej zmiennej prądu wzbudzenia należy stosować odpowiednio dobrane dławiki wygładzające.

Podstawowe układy zasilania wzbudzenia przedstawia rys. 3.

Wymagany czas przełączenia może być stosunkowo krótki. Dla wyższych natomiast (200 V i więcej) nie można stosować wysokich współczynników forsowania ze względu na wytrzymałość elektryczną izolacji uzwojenia wzbudzenia a także ze względu na konieczność szeregowego łączenia tyrystorów, co znacznie podnosi koszt układu zasilania obwodu wzbudzenia.

W kopalnianych maszynach wyciągowych nie ma konieczności regulacji prądu wzbudzenia silnika napędowego. Wystarczy więc zastosowanie impulsowego układu sterowania, zmieniającego tylko kierunek



Rys. 3

Układ przedstawiony na rys. 3a wymaga stosowania dwóch mostków tyrystorowych symetrycznych. Układ przedstawiony na rys. 3b ma tylko jeden mostek i dwie pary tyrystorów przełączających. Jest więc prostszy zarówno w

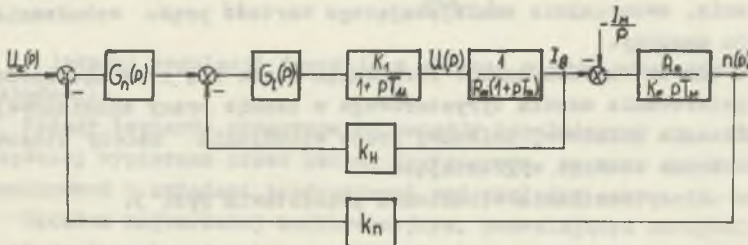


obwodzie głównym, jak i w obwodzie sterowania. W obu układach (w układzie 3a nie stosuje się regulacji prądów wyrównawczych ze względu na koszty) zachodzi konieczność pomiaru chwilowej wartości prądu wzbudzenia.

Elementy pomiarowe muszą wykryć prąd bliski zeru (przełączanie mostków lub tyrystorów przełączających) oraz prąd znamionowy (przełączanie mostka zasilającego z pracy z minimalnym kątem wysterowania do pracy znamionowej). Tymi elementami mogą być kontaktrony. Dają one dobrą powtarzalność pomiarów oraz odznaczają się dużą niezawodnością działania. Ich praca jako elementów wykrywających została sprawdzona w układzie modelowym maszyny wyciągowej.

#### 4. Układ regulacji prędkości

Najczęściej stosowany układ regulacji został przedstawiony na schemacie blokowym rys. 4.

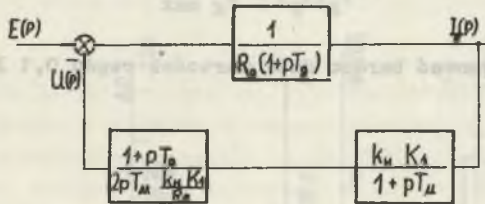


Rys. 4

- $U_z$  - sygnał zadający prędkość,
- $G_n(p)$  - regulator prędkości (najczęściej z ograniczeniem prądu),
- $G_I(p)$  - regulator prądu,
- $\frac{K_1}{1+pT_u}$  - transmitancja sterownika i mostka tyrystorowego,
- $\frac{1}{R_g(1+pT_g)}$  - transmitancja obwodu twornika,
- $k_H$  - wzmacnienie w pętli regulacji prądu,
- $k_n$  - wzmacnienie w pętli regulacji prędkości.

Przedstawiony układ z dwoma szeregowymi regulatorami prądu i prędkości jest najczęściej stosowany w kopalnianych maszynach wyciągowych. Ponieważ w układzie zmiana momentu następuje w obwodzie wzbudzenia, w układzie regulacji występuje zakłócenie w postaci zmiany siły elektromotorycznej.

Układ blokowy przedstawia rys. 5.



Rys. 5

$$\frac{1 + pT_g}{2 pT_{\mu} \frac{k_H k_i}{R_g}} = G_I(p) - \text{transmitancja regulatora prądu}$$

Zmiana prądu twornika wywołana zmianą siły elektromotorycznej przedstawiona jest zależnością:

$$I_g(p) = E(p) \frac{1}{R_g(1 + pT_g)} \cdot \frac{2p T_{\mu}(1+pT_{\mu})}{1 + 2pT_{\mu} + p^2 T_{\mu}^2}$$

Zakładając liniową zmienność E(t) (co dla dużych współczynników forsowania jest prawdziwe)

$$E(t) = E_m \frac{t}{t_p}$$

przebieg prądu w postaci operatorowej wyraża się wzorem:

$$I_g(p) = \frac{E_m 2 T_{\mu} (1 + pT_{\mu})}{t_p R_g p(1 + pT_g)(1 + 2pT_{\mu} + p^2 T_{\mu}^2)}$$

dla  $t \rightarrow \infty$

$$I_{g \max} = \frac{E_m 2 T_{\mu}}{t_p R_g}$$

dla dużych maszyn zachodzi  $T_g < t_p$

można więc założyć

$$I_g(t_p) = I_g \max$$

$I_g \max$  może przyjmować bardzo duże wartości rzędu  $0,1 I_{zw}$

gdzie

$$I_{zw} = \frac{E_M}{R_g}$$

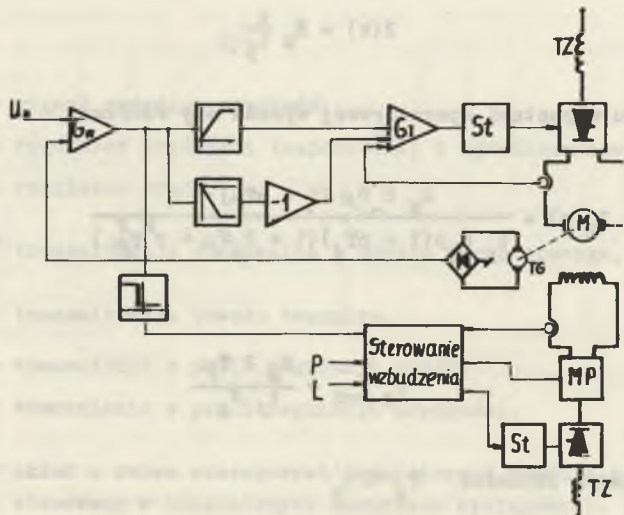
Aby uniknąć tak dużych przetężeń prądu znacznie pogarszających warunki regulacji, należy blokować prąd w obwodzie głównym w czasie przełączania prądu wzbudzenia.

Dla małych maszyn, w przypadku niskich współczynników forsowania nie ma potrzeby blokowania prądu w obwodzie głównym, chyba że ważne są warunki regulacji (blokowanie prądu w obwodzie głównym, gdy prąd wzbudzenia spada do zera).

##### 5. Modelowy układ napędowy z samoczynnym przełączaniem prądu wzbudzenia

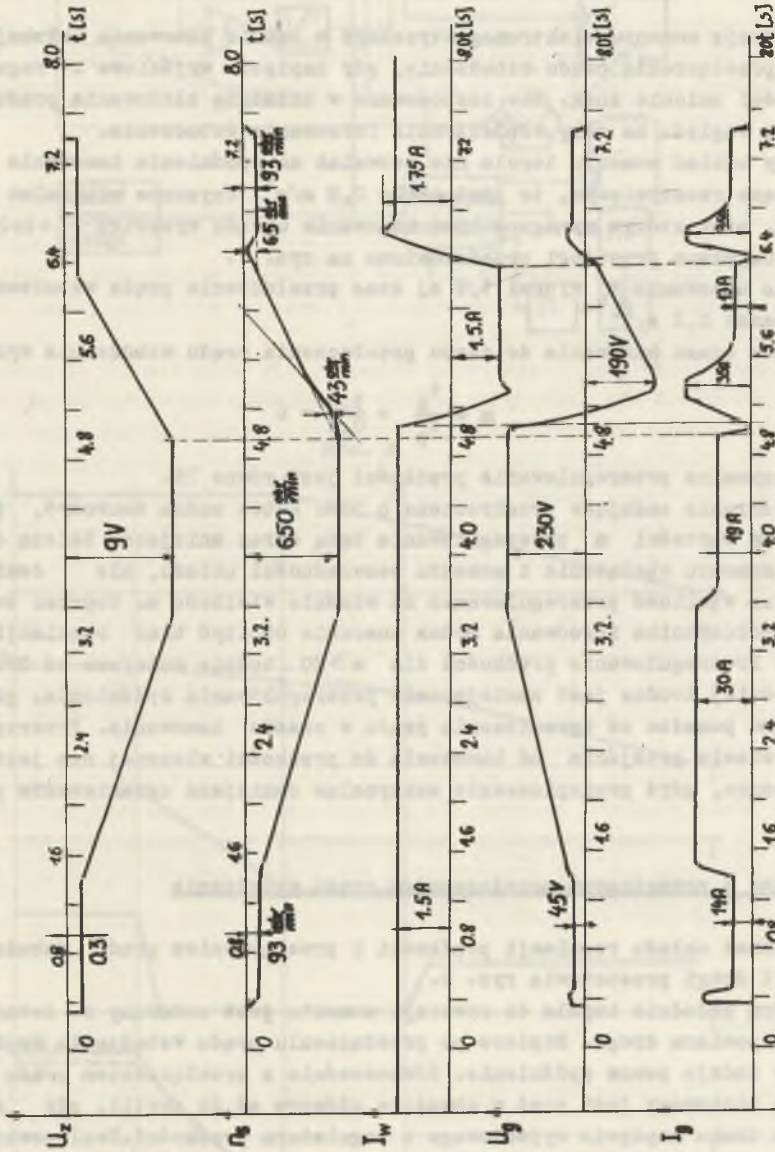
W laboratorium napędu elektrycznego IPPEiE zbudowano układ napędowy maszyny wyciągowej i wykonano pomiary.

Modelowy układ napędowy przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6





Ryb. 7

W skład układu napędowego wchodzi silnik prądu stałego zasilany z symetrycznego mostka tyrystorowego. Obwód wzbudzenia jest także zasilany z mostka tyrystorowego symetrycznego. Zmianę kierunku prądu wzbudzenia zapewniają tyrystory przełączające. Wyboru kierunku jazdy dokonują wejścia L - P.

Rewersję momentu elektromagnetycznego w czasie hamowania uzyskuje się przez przełączenie prądu wzbudzenia, gdy napięcie wyjściowe z regulatora prędkości zmienia znak. Nie zastosowano w układzie blokowania prądu twornika ze względu na mały współczynnik forsowania wzbudzenia.

Duży udział momentu tarcia nie zezwalał na opóźnienia hamowania odpowiadające rzeczywistości, to jest około  $0,8 \text{ m/s}^2$ . Uzyskane minimalne opóźnienie, przy którym wymagane było hamowanie układu wynosiło około  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Uzyskane przebiegi przedstawiono na rys. 7.

Czas hamowania  $t_h$  wynosi  $1,2 \text{ s}$ , czas przełączenia prądu wzbudzenia nie przekracza  $0,2 \text{ s}$ .

Stosunek czasu hamowania do czasu przełączenia prądu wzbudzenia wynosi:

$$m = \frac{t_h}{t_p} = \frac{1,2}{0,2} = 6$$

Maksymalne przeregulowanie prędkości jest równe 7%.

Opóźnienie zadające przekroczone o 50%. Łatwo można zauważyć, że ze wzrostem wartości  $m$  przeregulowania będą coraz mniejsze. Zależą one także od momentu obciążenia i momentu bezwładności układu, ale dominujący wpływ na wielkość przeregulowania ma właśnie wielkość  $m$ . Poprzez zwiększenie współczynnika forsowania można znacznie obniżyć błąd regulacji prędkości. Przeregulowanie prędkości dla  $m > 20$  będzie mniejsze od 2%.

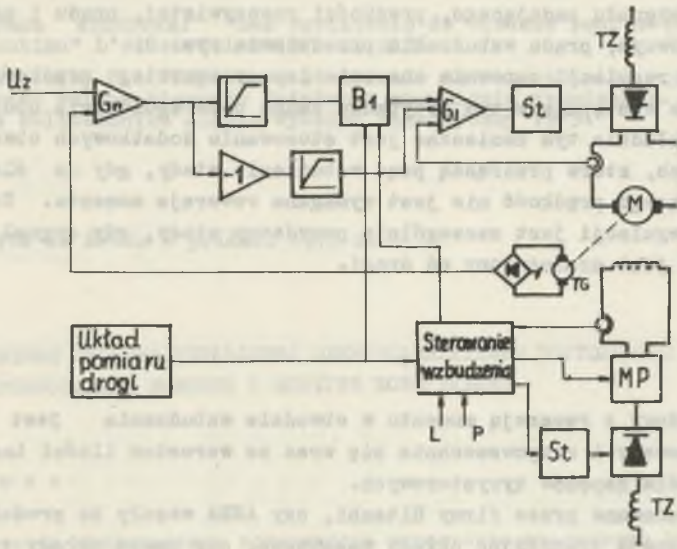
Bardziej trudne jest zmniejszenie przeregulowania opóźnienia, gdyż zależy ono ponadto od ograniczenia prądu w czasie hamowania. Przeregulowanie w czasie przejścia od hamowania do prędkości wleczonej nie jest niebezpieczne, gdyż przyspieszenie maksymalne zmniejsza ograniczenie prądowe.

## 6. Układ z zewnętrznym przełączeniem prądu wzbudzenia

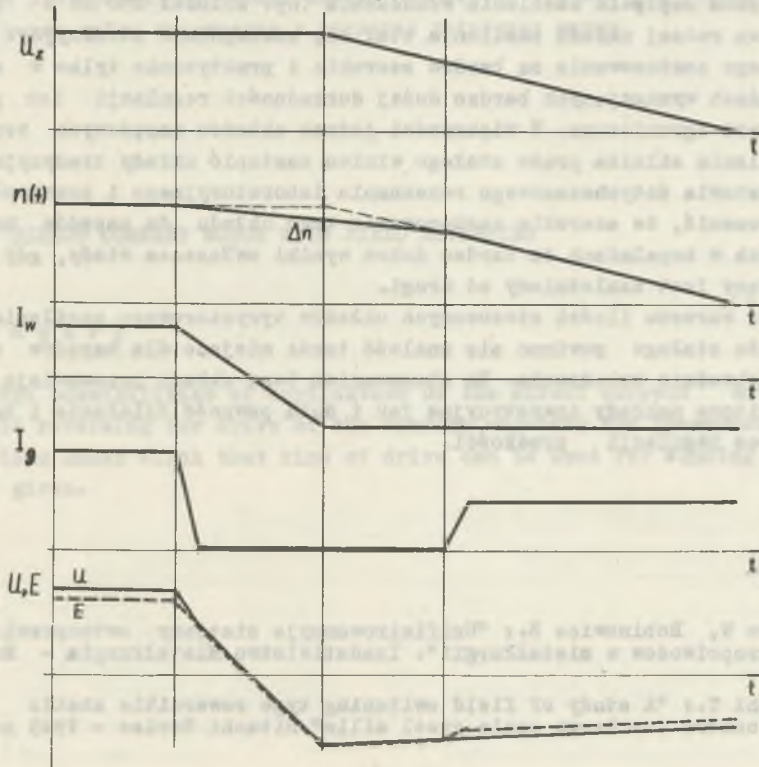
Schemat układu regulacji prędkości z przełączeniem prądu wzbudzenia w funkcji drogi przedstawia rys. 8.

W tym układzie impuls do rewersji momentu jest zadawany z zewnątrz, z układu pomiaru drogi. Dopiero po przełączeniu prądu wzbudzenia sygnał zadający zadaje pewne opóźnienie. Równocześnie z przełączeniem prądu wzbudzenia blokowany jest prąd w obwodzie głównym aż do chwili, gdy nastąpi zmiana znaku napięcia wyjściowego z regulatora prędkości. Realizowane jest to przez zamykanie bramki B1 w czasie hamowania układu.





Rys. 8



Rys. 9

Przebiegi sygnału zadającego, prędkości rzeczywistej, prądu i napięcia w obwodzie głównym, prądu wzbudzenia przedstawia rys. 9.

Taki układ regulacji zapewnia znacznie lepszy przebieg prędkości rzeczywistej, nie występują w tym przypadku żadne przeregulowania opóźnienia zadanego. W układzie tym konieczne jest stosowanie dodatkowych obwodów za bezpieczających, które przełączają prąd wzbudzenia wtedy, gdy do śledzenia sygnału zadającego prędkość nie jest wymagana rewersja momentu. Ten rodzaj układu regulacji jest szczególnie przydatny wtedy, gdy sygnał zadający prędkość jest uzależniony od drogi.

## 7. Wnioski

Układ napędowy z rewersją momentu w obwodzie wzbudzenia jest coraz częściej stosowany i rozpowszechnia się wraz ze wzrostem ilości instalowanych w przemyśle napędów tyrystorowych.

Układy opracowane przez firmy Hitachi, czy ASEA weszły do produkcji seryjnej i wypierają tradycyjne układy maszynowe, czy nawet układy tyrystorowe z rewersją momentu w obwodzie twornika. Wraz z pojawieniem się maszyn o niskim napięciu zasilania wzbudzenia (np. silniki 250 kW o  $U_{wz} = 28$  V) ten rodzaj układu zasilania stał się szczególnie atrakcyjny. Możliwości jego zastosowania są bardzo szerokie i praktycznie tylko w szybkich układach wymagających bardzo dużej dokładności regulacji ich przydatność jest ograniczona. W większości jednak układów napędowych ten rodzaj zasilania silnika prądu stałego winien zastąpić układy tradycyjne.

Na podstawie dotychczasowego rozeznania laboratoryjnego i przemysłowego można ocenić, że szerokie zastosowanie tego układu do napędów maszyn wyciągowych w kopalniach da bardzo dobre wyniki zwłaszcza wtedy, gdy sygnał zadający jest uzależniony od drogi.

W miarę wzrostu ilości stosowanych układów tyrystorowego zasilania silników prądu stałego powinno się znaleźć także miejsce dla napędów z rewersją w obwodzie wzbudzenia. Za stosowaniem tego układu przemawiają zarówno obniżone nakłady inwestycyjne jak i duża pewność działania i bardzo duży zakres regulacji prędkości.

## LITERATURA

- [1] Garnow W, Robinowicz B.: "Unificirowannyje sistemy awtouprawlenia elektropriwodow w mietałżurgii". Izdatielstwo Mietałżurgia - Moskwa 1971.
- [2] Konishi T.: "A study of field switching type rewerrible static Leonard contrd for large scale steel mills" Hitachi Review - 1969 nr 1.

- [3] Praca zbiorowa: "Les vaviateurs de vitesse pour moteur a courant continu" L'electricien 1971 nr 2126.
- [4] Kołodziej H.: "Impulsowe sterowanie nawrotu silnika prądu stałego przez zmianę kierunku działania strumienia wzbudzenia. Praca dyplomowa Politechnika Śląska Wydział Elektryczny 1973.

Przyjęto do druku w grudniu 1973 r.

РЕВЕРСИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С РЕВЕРСИРОВАНИЕМ МОМЕНТА В КОНТУРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Резюме

В статье представлена возможность использования системы управления электродвигателем постоянного тока с реверсированием момента в контуре возбуждения для привода подъемных машин. Определены условия при которых этот привод может найти применение в приводах подъемных машин.

THE DIRECT CURRENT MOTOR WITH FIELD REVERSING

Summary

The possibilities of application of the direct current motor with field reversing for drive of the winding machines are presented. The conditions under which that kind of drive can be used for winding machines are given.

№	Symboliczny	Opisowa
1	Figura	rysunek
2	Wykresy	rysunki
3	Formuły	zapisy matematyczne
4	Wykresy charakterystyk	rysunki charakterystyk
5	Opisowa i obliczeniowa	opisowa i obliczeniowa
6	Wzrostki	rysunki pomocnicze