

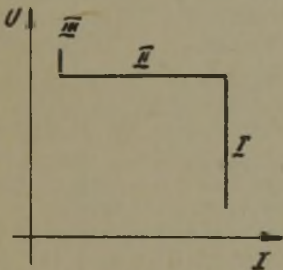
WŁADYSŁAW PASZEK, JERZY KUBEK, JERZY HICKIEWICZ  
ALEKSANDER ŻYWIĘC, WŁADYSŁAW MIZIA  
Katedra Maszyn Elektrycznych

REGULACJA PRĘDKOŚCI I NAPIĘCIA  
W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH  
PRZY POMOCY TRANSDUKTORÓW

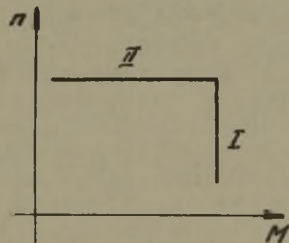
Streszczenie. Przedstawione układy stabilizacji i regulacji napięcia, prądu, prędkości obrotowej i momentu zawierają półprzewodnikowe prostowniki sterowane przy pomocy transduktorów. Układy te łączy prócz członu wykonawczego (prostownika sterowanego) podobne rozwiązanie kaskady wzmocnienia regulatora i strefowość regulacji alternatywnej wielkości wyjściowej.

1. Charakterystyki zewnętrzne układów stabilizacji z prostownikami sterowanymi

Bezstykowe układy regulacji, zawierające prostowniki sterowane można wykorzystać do stabilizacji prądu i napięcia wyprostowanego, bądź do stabilizacji prędkości obrotowej i momentu silnika elektrycznego.



Rys. 1. Trójstrefowa zewnętrzna charakterystyka napięciowo-prądowa



Rys. 2. Dwustrefowa mechaniczna charakterystyka zewnętrzna

Układy stabilizacji napięcia i prądu wyprostowanego umożliwiają kształtowanie charakterystyki zewnętrznej  $U=f(I)$ . Na

przykład w układach prostowniczych, przeznaczonych do pracy buforowej i służących do szybkiego ładowania baterii akumulatorowych pożądana jest charakterystyka zewnętrzna złożona z trzech stref: strefy odcinania prądu maksymalnego (I), strefy stabilizacji napięcia (II) i strefy odcinania prądu minimalnego (III). Charakterystyka ta jest podana na rys. 1.

Stabilizacja prądu w strefie odcinania prądowego ma na celu szybkie poawaryjne ładowanie baterii akumulatorowej przy prądzie maksymalnie dopuszczalnym. W strefie środkowej charakterystyki zewnętrznej stabilizacja ma na celu utrzymanie baterii w stanie naładowanym w czasie pracy buforowej. Powiększenie dokładności stabilizacji napięcia w tym zakresie zwiększa czas pracy baterii akumulatorowej. Stabilizacja prądu w strefie odcinania prądu minimalnego ma na celu skrócenie ostatniej fazy ładowania baterii przez ładowanie jej przy stałym prądzie i rosnącym napięciu.

W dużej liczbie układów napędowych zachodzi potrzeba utrzymania stałej prędkości obrotowej oraz ograniczenia momentu obrotowego. Rysunek 2 przedstawia typową pożądaną mechaniczną charakterystykę zewnętrzną. Przy zastosowaniu w układzie silnika elektrycznego, zasilanego z prostowników sterowanych, można otrzymać taką charakterystykę napędu. Najprościej otrzymuje się mechaniczną charakterystykę zewnętrzną napędu o przebiegu pokazanym na rys. 2 przy zastosowaniu silników prądu stałego. W silniku obcowzbudnym prądu stałego obowiązują zależności:

$$n = c_n \cdot E \approx c_u \cdot U_{tw}$$

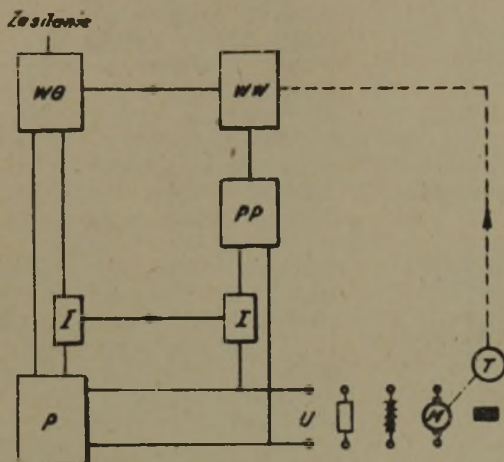
$$M = c_m \Phi \cdot I_{tw} \approx c_I \cdot I_{tw}$$

Przy stałym strumieniu wzbudzenia ( $\Phi$ ), prędkość obrotowa ( $n$ ) jest proporcjonalna do napięcia twornika ( $U_{tw}$ ), jeśli pominąć spadki napięcia w obwodzie twornika silnika oraz oddziaływanie twornika. Moment obrotowy jest proporcjonalny do prądu twornika ( $I_{tw}$ ), jeśli pominąć oddziaływanie twornika. Poprzednio

wspomniany układ prostownika, wyposażony w układ stabilizacji napięcia, przystosowany jest do zasilania twornika silnika obcowzbudnego, jeśli usunie się trzecią strefą jego charakterystyki zewnętrznej. W strefie stabilizacji napięcia otrzymuje się lekko opadającą mechaniczną charakterystykę zewnętrzną silnika obcowzbudnego na skutek wpływu oporności wewnętrznej obwodu głównego silnika. Zmianę nachylenia charakterystyki można uzyskać uzależniając charakterystykę wyjściową członu pomiarowo-porównawczego od prądu obciążenia przez tzw. compoundację członu pomiarowego.

Dokładność stabilizacji prędkości obrotowej można zwiększyć, wprowadzając zamiast compoundacji członu pomiarowo-porównawczego tachometryczne sprzężenie zwrotne, które zamienia układ regulacji napięcia na układ regulacji prędkości obrotowej. Tachometryczne sprzężenie zwrotne zmniejsza, bądź eliminuje przy

odpowiednim wzmocnieniu błędy stabilizacji prędkości spowodowane przez dowolne zakłócenia (wpływ zmian: obciążenia silnika, napięcia zasilania, spadków napięcia na oporności wewnętrznej silnika itp.). Odcinanie prądowe prostownika spełnia zadanie ogranicznika maksymalnego momentu obrotowego silnika.



Rys. 3. Schemat blokowy układu regulacji prostownika sterowanego, obciążonego opornością czynną, bądź przeznaczonego do ładowania baterii akumulatorowej, bądź też zasilającego twornik obcowzbudnego silnika prądu stałego

Prostownik sterowany zastępuje w układzie regulacji prędkości sterowaną prądnicę zespołu Leonarda. Zalety eksploatacyjne takiego rozwiązania, złożonego z zasilacza statycznego nie zawierającego elementów stykowych w miejsce prądnicy z komutatorem, są oczywiste. Wskaźniki ekonomiczne (sprawność, współczynnik mocy pobieranej z sieci zasilającej), które można uzyskać w takim układzie, są również korzystniejsze niż w przypadku przetwornicy elektromaszynowej - silnik asynchroniczny prądnicą zespołu Leonarda.

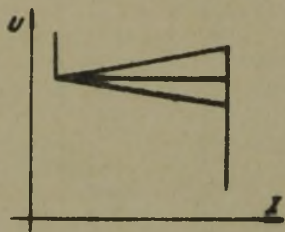
Schemat blokowy prostownika sterowanego jest podany na rys. 3. Układ zawiera wzmacniacz mocy (WG), wzmacniacz wstępny (WW), człon pomiarowo-porównawczy (PP), człon zapewniający odcinanie minimalne, maksymalne i kompondację członu pomiarowego (I).

Układ taki może zapewnić charakterystykę napięciowo-prądową podaną na rys. 4. Zawiera ona część stabilizacji prądu minimalnego i maksymalnego oraz stabilizacji napięcia. Nachylenie charakterystyki stabilizacji napięcia może być zmieniane przy pomocy kompondacji członu pomiarowo-porównawczego. Zmiany nachylenia charakterystyki zewnętrznej prostowników są konieczne w przypadku pracy równoległej kilku prostowników wyposażonych



w układy regulacyjne, bądź w przypadku potrzeby kompensacji oporności linii łączącej zasilacz z odbiornikiem.

Układy regulacji oparte na powyższym schemacie blokowym mogą mieć nastawiany w dużym zakresie poziom stabilizowanych wielkości. W bezstykowych układach regulacji prostowników sterowanych zastosowano w członie wykonawczym diody krzemowe, germanowe, selenowe, sterowane przy pomocy transduktorów, bądź alternatywnie tyrystory (tyratrony półprzewodnikowe).



Rys. 4. Trójstrefowa zewnętrzna charakterystyka napięciowo-prądowa z możliwością zmiany nachylenia strefy stabilizacji napięcia

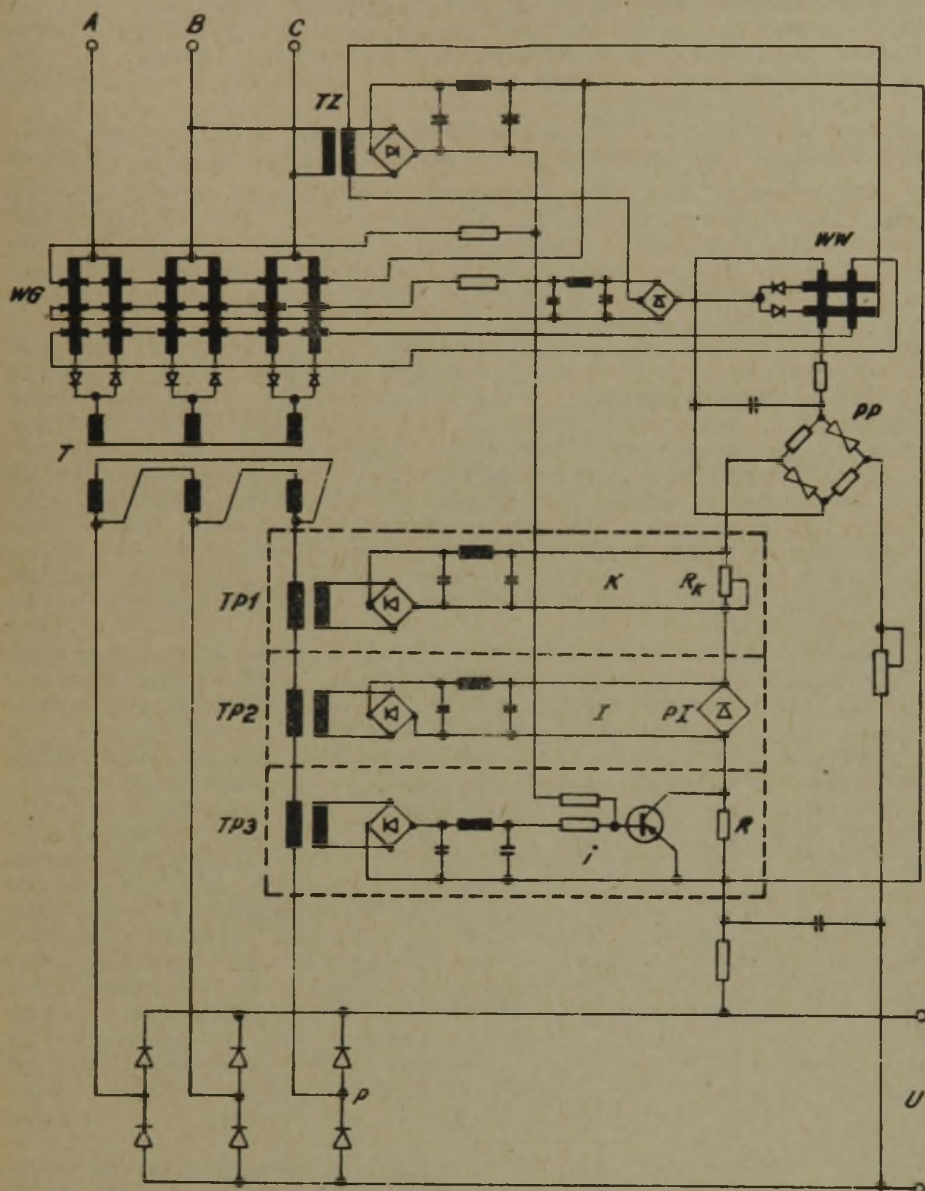
Przedstawione układy regulacji prostowników sterowanych są układami o bardzo dużym wzmocnieniu układu otwartego, które bądź wykazują mały zapas stabilności (silne przeregulowania, długie czasy wytlumienia oscylacji), bądź są niestabilne; w szczególności, jeśli zastosowane są w układzie człony o niepomijalnej inercji (transduktory, filtry). W celu ustabilizowania przebiegów regulacyjnych zastosowane są nastawialne podatne sprzężenia zwrotne, które pozwalają osiągnąć szeroki zakres zmian charakteru przebiegów regulacyjnych (przebiegi aperiodyczne, oscylacyjne o praktycznie jednym przeregulowaniu itp.).

kres zmian charakteru przebiegów regulacyjnych (przebiegi aperiodyczne, oscylacyjne o praktycznie jednym przeregulowaniu itp.).

## 2. Układ stabilizacji i regulacji z zastosowaniem prostowników sterowanych przy pomocy transduktorów

Schemat układu jest podany na rys. 5. Układ składa się z prostownika głównego (P), transformatora dopasowującego (T), transformatora głównego (WG), transduktora wstępnego (WW), członu pomiarowo-porównawczego (PP), kompondacji członu pomiarowo-porównawczego (K), członu odcięcia maksymalnego prądu obciążenia (i), transformatora pomocniczego (TZ), służącego do zasilania wzmacniacza wstępnego oraz zasilającego obwody polaryzacyjne. Zastosowane w układzie wzmacniacze transduktorowe mają układ amplitastatu z wydzielnymi prostownikami samonasylenia.

Działanie układu jest następujące: jakakolwiek zmiana napięcia zasilającego mostek pomiarowo-porównawczy powoduje powstanie odchyłki zbieranej z przekątnej mostka, która wysterozuje kaskadę wzmacniaczy magnetycznych. W zależności od wysterozowania kaskady zmienia się napięcie na uzwojeniach roboczych wzmacniacza głównego oraz napięcie wyprostowane prostownika głównego. W zakresie strefy stabilizacji napięcia charakterystyki zewnętrznej prostownika  $U(I)$  spadki napięć na członach kompondacji i odcięcia prądu obciążenia nie ulegają zmianom. Wobec tego zmiany napięcia wyprostowanego są proporcjonalne do zmian napięcia zasilającego mostek pomiarowo-porównawczy. Przy



Rys. 5. Trójstrefowy układ regulacji prostownika sterowanego za pomocą transduktorów



dużym wzmocnieniu otwartego układu regulacji napięcie wyprostowane zachowuje stałą wartość niezależnie od zakłóceń wprowadzonych do układu; w pierwszym rzędzie przez zmiany prądu obciążenia oraz przez zmiany napięcia i częstotliwości zasilającej sieci energetycznej.

Działanie komponentacji członu pomiarowego jest następujące. Spadek napięcia na oporze  $R_k$ , proporcjonalny do prądu obciążenia,

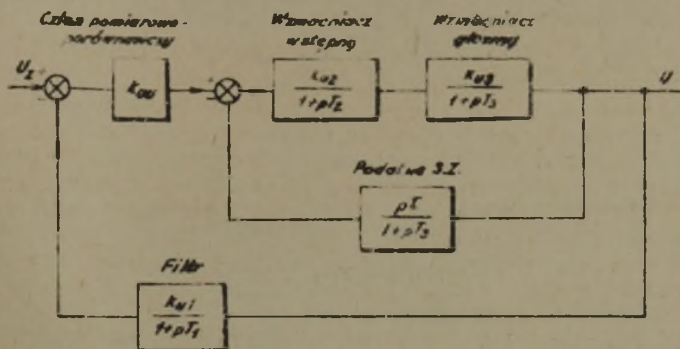
może dodawać się lub odejmować od napięcia zasilającego mostek. Napięcie wyprostowane, złożone z sumy lub różnicy napięcia stabilizowanego i spadku napięcia proporcjonalnego do prądu, zmienia się w funkcji prądu obciążenia. Nachylenie charakterystyki zewnętrznej w strefie stabilizacji napięcia może być zatem dowolnie nastawione.

Działanie członu odcinania prądu maksymalnego jest następujące: wyprostowany prąd transformatora prądowego TP2 płynie przez jednocześnie komutujące wszystkie cztery gałęzie prostownika (PI), jeśli jego wartość nie przekracza prądu zasilania mostka pomiarowo-porównawczego. Przy przekroczeniu tej wartości prąd zamyka się przez obwód mostka pomiarowo-porównawczego. Ze wzrostem prądu obciążenia prostownika głównego rośnie napięcie pochodzące od transformatora prądowego (TP2). Wobec tego napięcie wyprostowane ulega zmniejszeniu przez działanie układu regulacji, który ustala napięcie zasilania członu pomiarowo-porównawczego z dokładnością określoną przez pętlę obiegu regulacji.

Działanie członu odcinania minimalnego prądu obciążenia jest następujące: przy dużym prądzie obciążenia prąd transformatora prądowego TP3 wytwarza ujemny potencjał proporcjonalny do prądu obciążenia na bazie tranzystora, wskutek czego opornik R jest zwarty przez obwód emiter-kolektor tranzystora. Na bazę tranzystora przyłożone jest jednocześnie dodatnie stałe napięcie zbierane z pomocniczego obwodu prądu stałego, które określa nastawialną granicę między strefą stabilizacji minimalnego prądu obciążenia i strefą stabilizacji napięcia charakterystyki zewnętrznej układu. Jeśli przeważa dodatnie napięcie polaryzujące, wtedy na oporniku R pojawia się napięcie w obwodzie członu pomiarowo-porównawczego. W tej strefie prądu minimalnego charakterystyki zewnętrznej prostownika układ regulacji, utrzymując stałość napięcia zasilania mostka pomiarowo-porównawczego, uzależnia napięcie wyjściowe prostownika od prądu obciążenia. Przy odpowiednio dużym wzmocnieniu wzmacniacza tranzystorowego można uzyskać pionową charakterystykę zewnętrzną w zakresie stabilizacji prądu minimalnego. Rozwiązanie członu odcinania prądu minimalnego można oprzeć również o układy transduktorowe.

Uproszczony schemat strukturalny układu podany jest na rys. 6. Wzmacniacze transduktorowe potraktowano w przybliżeniu jako elementy inercyjne pierwszego rzędu. W schemacie uwzględniono istnienie tylko jednego filtra, mającego na celu filtrowanie napięcia, którym jest zasilany mostek pomiarowo-porównawczy. Uwzględniono dodatnie sprzężenie zwrotne uzyskane przez połączenie uzwojeń sterujących obu wzmacniaczy: głównego i wstęp-

nego, dzięki czemu pochodna składowej stałej strumienia wzmacniacza głównego podana jest na wejście wzmacniacza wstępnego.



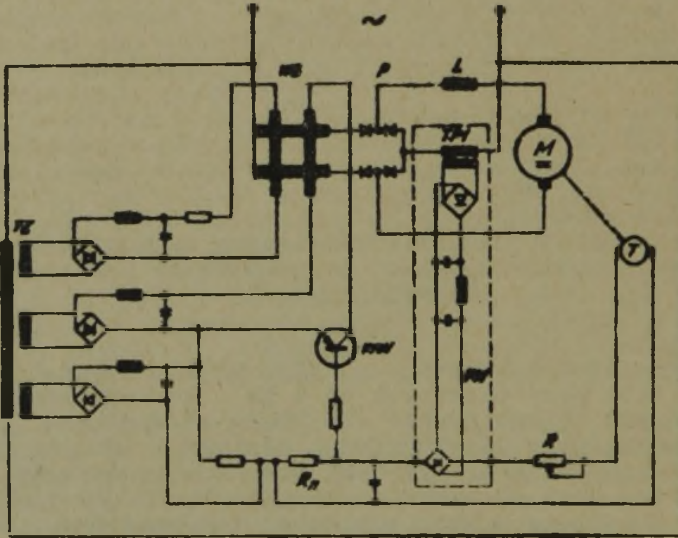
Rys. 6. Uproszczony schemat strukturalny układu regulacji prostownika sterowanego za pomocą transduktorów dla strefy stabilizacji napięcia

Układy powyższe wykonywane są jako układy jednofazowe, bądź trójfazowe (dla mocy większych od 1 kW). Moc znamionowa wzmacniaczy głównych zależy przede wszystkim od wartości prądu odcinania maksymalnego od głębokości odcinania (często nieistotne jest obniżanie charakterystyki zewnętrznej do zera w pierwszej strefie) oraz od zakresu zmian napięcia zasilania. Moc znamionowa elementów członu pomiarowo-porównawczego zależy z jednej strony od mocy potrzebnej do wysterowania wzmacniacza wstępnego, z drugiej zaś strony od wartości dopuszczalnego uchybu układu regulacji. W członach pomiarowo-porównawczych można zastosować zarówno elektryczne, jak i magnetyczne porównanie wielkości zadanej i wielkości regulowanej. Wartość zadana może być proporcjonalna do napięcia zasilającej sieci energetycznej, gdy nie chodzi o uniezależnienie wielkości zadanej od zmian napięcia sieci zasilającej (często stosowane w układach stabilizacji prędkości obrotowej z możliwością zmiany poziomu stabilizowanej prędkości obrotowej w dużym zakresie), bądź uzyskana za pośrednictwem nieliniowych elementów elektrycznych lub magnetycznych, jeśli pożądaną jest uniezależnienie jej od zmian częstotliwości i napięcia zasilającej sieci energetycznej.

W przypadku zastosowania prostownika do zasilania obwodu głównego silnika prądu stałego, nie jest pożądana strefa odcinania minimalnego prądu obciążenia. Układ przedstawiony na rys. 5, bez członu odcięcia minimalnego prądu obciążenia, przewidziany jest do zasilania obcowzbudnego silnika prądu stałego. Przy mniejszej mocy silnika stosowane są układy jednofazowe. Transformator zasilający, służący do dopasowania napięcia sieci energetycznej do znamionowego napięcia twornika silnika,



może być zastąpiony autotransformatorem. W przypadku natomiast zbliżonych wartości napięcia sieci zasilającej do napięcia znamionowego silnika (z uwzględnieniem współczynników wyprostowania oraz spadków napięcia na reaktancji resztkowej transformatora i prostownikach w kierunku przewodzenia) może być zbyteczny.



Rys. 7. Układ regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego prądu stałego z ogranicznikiem momentu

Na rysunku 7 przedstawiono układ regulacji prędkości obrotowej z odcięciem prądowym ze sprzężeniem tachometrycznym, w którym uzyskano dużą dokładność w strefie stabilizacji prędkości obrotowej mechanicznej charakterystyki zewnętrznej.

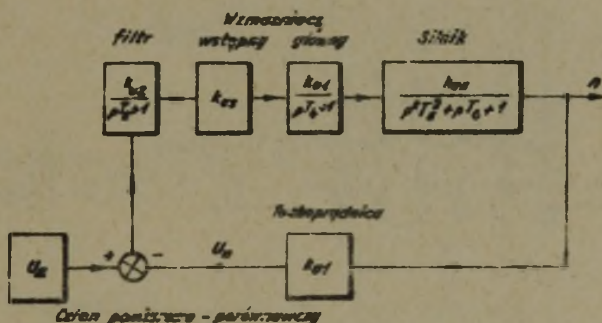
Układ zawiera: dławik wygładzający (L), prostownik główny (P), wzmacniacz magnetyczny główny (WG), wstępny wzmacniacz tranzystorowy (WV), tachoprądniczkę (T), ogranicznik momentu (TZ), transformator pomocniczy (TZ). Napięcie tachoprądniczki porównywane jest z napięciem zadany. Sygnał błędny wysterowuje kaskadę wzmacniacza tranzystorowego i magnetycznego. Zastosowanie tachoprądniczki i wzmacniaczy o dużych wzmocnieniach zapewnia dużą dokładność stabilizacji prędkości. Poziomą stabilizowaną prędkości obrotowej może być nastawiany w granicach od zera do znamionowej prędkości silnika wykonawczego za pomocą opornika nastawczego (R).

Działania ogranicznika momentu obrotowego jest w tym układzie podobne do działania ozłonu odcinania prądowego w układzie poprzednim.



Dławik wygładzający w obwodzie twornika wpływa korzystnie na własności komutacyjne silnika. Badania wykazały, że strefa beziskrowej komutacji zwęża się przy zasilaniu twornika napięciem tętniącym. W dużej liczbie praktycznych przypadków zastosowania tego rodzaju układów stwierdzono poprawną komutację silnika bez zastosowania dławika wygładzającego, w szczególności jeśli strefa ciemnej komutacji maszyny przy obciążeniu prądem wygładzonym obejmuje z dużym zapasem zakres prądu znamionowego twornika.

Wadą przedstawionego układu regulacji prędkości obrotowej silnika i napięcia wyprostowanego przy pomocy prostowników sterowanych transduktorami jest niemożliwość realizacji pracy inwertorowej z odzyskaniem energii. W związku z tym hamowanie generatorowe, które wykorzystuje się w dwumaszynowym zespole Leonarda nie jest tu możliwe. Zakres zastosowań takiego typu zasilania silników prądu stałego jest przeto ograniczony do przypadków, w których silnik jest trwale obciążony odpowiednio dużym statycznym momentem mechanicznym. Jeśli zależy na uintensywnieniu hamowania zachodzi konieczność przełączenia obwodu silnika na oporność obciążenia w okresie hamowania dynamicznego. Układ ten nie zapewnia również bezstykowej zmiany biegunowości napięcia zasilającego.

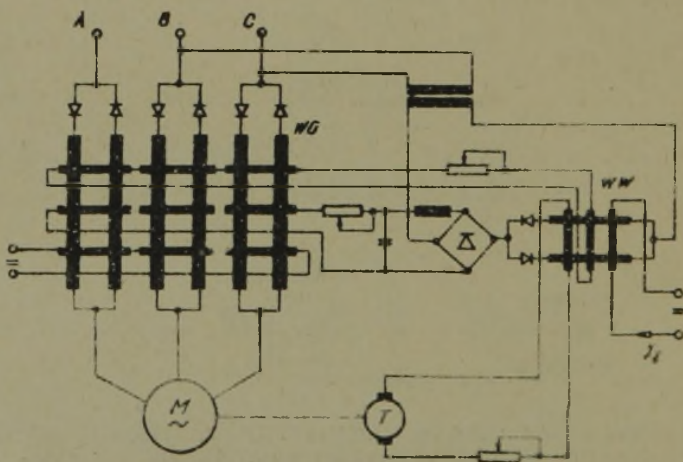


Rys. 8. Uproszczony schemat strukturalny układu regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego prądu stałego dla strefy stabilizacji prędkości

Rysunek 8 przedstawia uproszczony schemat strukturalny układu regulacji dla strefy stabilizacji prędkości obrotowej mechanicznej charakterystyki zewnętrznej. Silnik obcowzbudny przedstawiono jako człon inercyjny drugiego rzędu. Jeśli nie jest zastosowany dławik wygładzający w obwodzie twornika, silnik można aproksymować członem inercyjnym pierwszego rzędu.

### 3. Regulacja i stabilizacja prędkości obrotowej silników asynchronicznych przy pomocy transduktorów

Najbardziej rozpowszechnionym typem silnika, stosowanym w napędzie elektrycznym, jest trójfazowy silnik asynchroniczny. Prostota konstrukcji i związany z nią niski koszt inwestycyjny, duża pewność ruchowa i łatwość obsługi dają bowiem pierwszeństwo silnikom asynchronicznym przed innymi typami silników. Dotychczas pierwszeństwo to nie dotyczyło jednak napędowych układów regulacyjnych, w których wymaga się regulacji (np. regulacja programowa) i stabilizacji prędkości obrotowej. Realizacja takich układów, w oparciu o silnik asynchroniczny, związana jest z dużymi trudnościami wynikającymi z właściwości tego silnika i prowadzi zwykle do zmniejszenia sprawności silnika. Obecnie stosowane układy regulacji prędkości obrotowej silników asynchronicznych przy pomocy transduktorów wypierają w wielu układach napędowych układy regulacji oparte na silnikach prądu stałego.

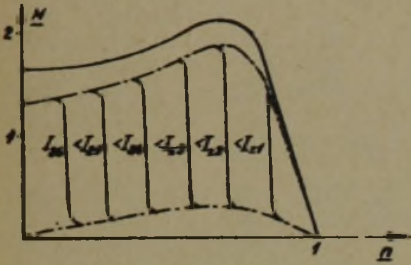


Rys. 9. Schemat układu regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej silnika asynchronicznego

Zasada działania wynika ze schematu przedstawionego na rys. 9. W obwód stojana silnika asynchronicznego włączone są uzwojenia robocze trzech transduktorów o układzie amplistatu (WG). Transduktory te posiadają uzwojenie polaryzacyjne oraz dwa uzwojenia sterowania. Pierwsze przyłączone jest do wyjścia wzmacniacza wstępnego (WW), natomiast drugie wspólnie z jednym z uzwojeń sterujących wzmacniacza wstępnego tworzy podatne



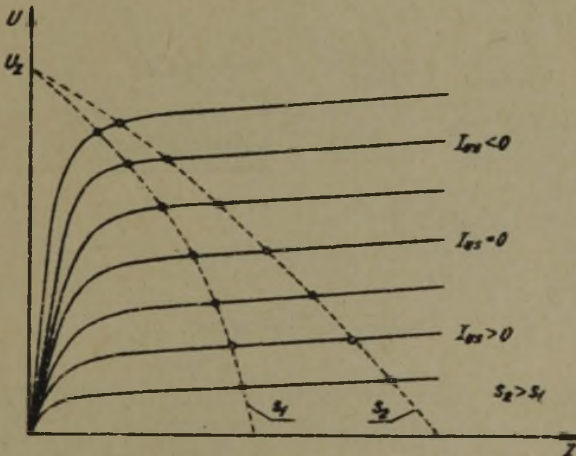
sprężenie zwrotne. Wzmacniacz wstępny sterowany jest różnicą przepływów: przepływu zadanego ( $I_z$ ) oraz przepływu proporcjonalnego do prędkości obrotowej silnika uzyskiwanego z tachoprądnicy. Zrealizowany w ten sposób układ umożliwia ciągłą regulację prędkości obrotowej silnika w przedziale od prędkości znamionowej do zera poprzez zmianę prądu wartości zadanej  $I_z$ .



Rys. 10. Zakresy kształtowania charakterystyk mechanicznych układu

mentu obciążenia (rys. 10). Zakres zawężenia zależy od własności magnetycznych rdzeni wzmacniaczy. Wartość strat wydzielanych w obwodzie wirnika silnika asynchronicznego rośnie ze wzrostem poślizgu, a zatem praca układu przy szerokim zakresie

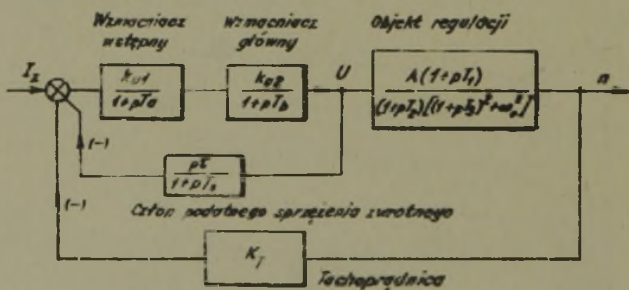
Zasada regulacji prędkości obrotowej silnika, przy zmianach momentu obciążenia, sprowadza się do zmiany reaktancji uzwojeń roboczych transduktorów włączonych w obwód stojana. Reaktancje te są ograniczone od góry i dołu, i dlatego napięcie na silniku ( $U$ ) nigdy nie będzie równe zero, ani też napięciu sieci. Z tego powodu otrzymuje się zwężenie zakresu regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej silnika przy zmianach mo-



Rys. 11. Charakterystyki napięciowo-prądowe amplistatu i charakterystyki obciążenia dla różnych poślizgów silnika

zmian prędkości obrotowej jest możliwa przy odpowiednim przewymiarowaniu silnika pod względem mocy. Przewymiarowanie silnika jest mniejsze, jeśli układ przeznaczony jest do pracy przerywanej lub jeśli moment obciążenia silnika jest typu wentylatorowego. Mimo tych niedogodności układ jest szeroko stosowany i staje się typowym napędem w zakresie mocy (0,2+20) kW, dzięki swym korzystnym właściwościom eksploatacyjnym i regulacyjnym. Zbudowany jest on z elementów statycznych bezstykowych i dlatego odznacza się dużą pewnością ruchową oraz wymaga minimalnej konserwacji. Ponadto umożliwia stosunkowo łatwe i dokładne nastawienie żądanej regulowanej prędkości obrotowej i nadaje się do zastosowania regulacji programowej. Z powodu małych momentów zamachowych silników asynchronicznych i dużego momentu rozruchowego w układzie tym uzyskuje się niewielkie czasy rozruchu.

Dla przybliżonych obliczeń charakterystyk statycznych układu pomija się wpływ zniekształcenia krzywej prądu zasilania silnika, spowodowanego przez dławiki wzmacniaczy transduktorowych i przyjmuje się, że transduktory stanowią elementy liniowe o sterowanej reaktancji, włączone w szereg do uzwojeń stojana silnika. W rzeczywistości stwierdza się, że w zakresie obciążenia silnika większego od około  $0,1 M_N$ , prąd zasilania jest praktycznie sinusoidalnie zmienny. Punkty pracy ustalonej silnika dla zadanego poślizgu ( $s$ ), określającego impedancję silnika, otrzymuje się jako punkty przecięcia charakterystyk napięciowo-prądowych amplistatu (rys. 11) i charakterystyk impedancji silnika. Przy określonym poślizgu, napięcie wyjściowe transduktorów podawane na silnik zależy od prądu sterującego transduktorów głównych i wyznacza moment obrotowy silnika.



Rys. 12. Przybliżony schemat strukturalny układu regulacji silnika asynchronicznego

Analiza własności dynamicznych układu regulacji jest bardziej skomplikowana aniżeli w przypadku silnika prądu stałego, na skutek nieliniowości równań określających elektromagnetycz-



ny i elektromechaniczny stan nieustalony. Przy stałym momencie obciążenia  $M_m$  transmitancja obiektu regulowanego jest określona wzorem przybliżonym

$$K(p) = \frac{\Delta n(p)}{\Delta u(p)} = \frac{A(1 + p T_1)}{(1 + p T_2) [(1 + p T_3)^2 + \omega_0^2]}$$

Przybliżony schemat strukturalny układu regulacji, będący podstawą do szacunkowego doboru stabilizującego podatnego sprzężenia zwrotnego, podano na rys. 12.

Omawiany układ regulacji prędkości obrotowej nie jest układem nawrotnym. Układ nawrotny można uzyskać przy równoległym zasilaniu silnika z dwóch trójfazowych układów amplistatowych o przeciwnej kolejności faz. Układ sterowania wystawia wtedy alternatywnie jeden z przeciwsobnych układów zasilania silnika. Duże zastosowanie znalazły przedstawione powyżej układy lub układy podobne w napędach obrabiarek.

#### 4. Dane układów opracowanych w Katedrze Maszyn Elektrycznych

W Katedrze Maszyn Elektrycznych opracowano, zbadano laboratoryjnie i wykonano dokumentację układów z prostownikami sterowanymi. Między innymi opracowano:

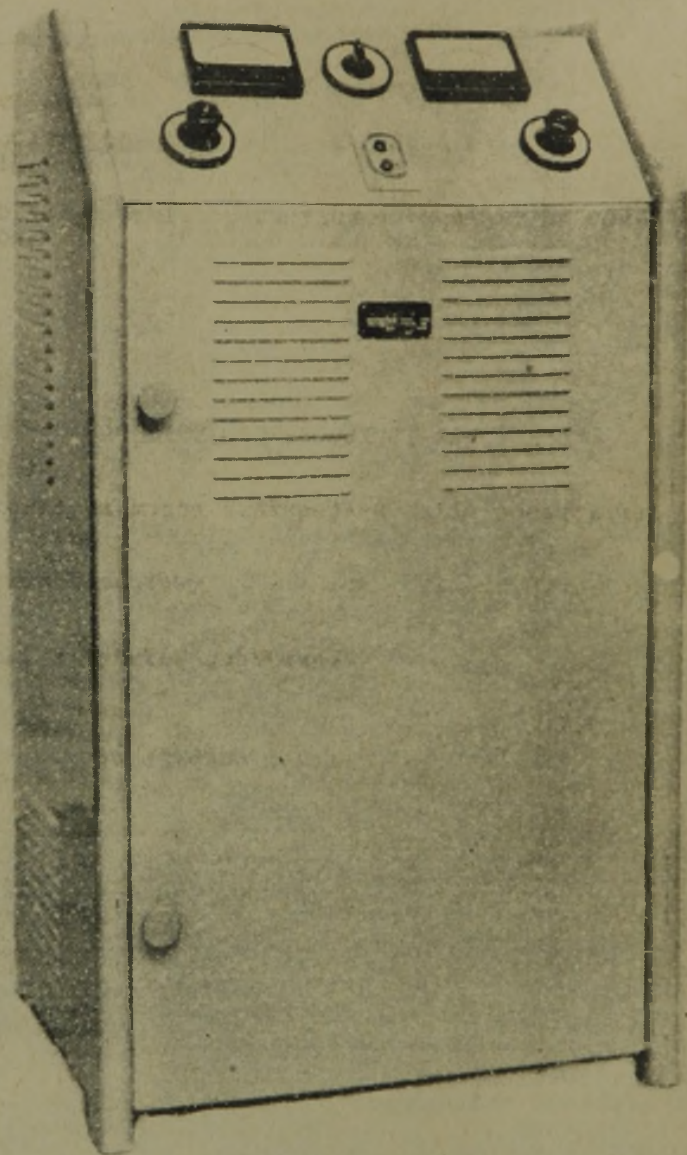
a) Produkowany przez BFP układ dwustrefowej stabilizacji transduktorowej napięcia i prądu maksymalnego prostownika typu PSA-3-120/20-35 o danych znamionowych:

- napięcie zasilania 3 x 220 V lub 3 x 380 V,
- częstotliwość zasilania 50 Hz,
- moc znamionowa 3,6 kW,
- napięcie wyjściowe 120 V,
- dokładność stabilizacji napięcia  $\pm 2,5\%$  przy wahaniach napięcia sieci zasilającej  $\pm 10\%$  i zmianach prądu obciążenia w granicach od 2 A do 20 A.

Na rys. 13 podano zdjęcie powyższego prostownika.

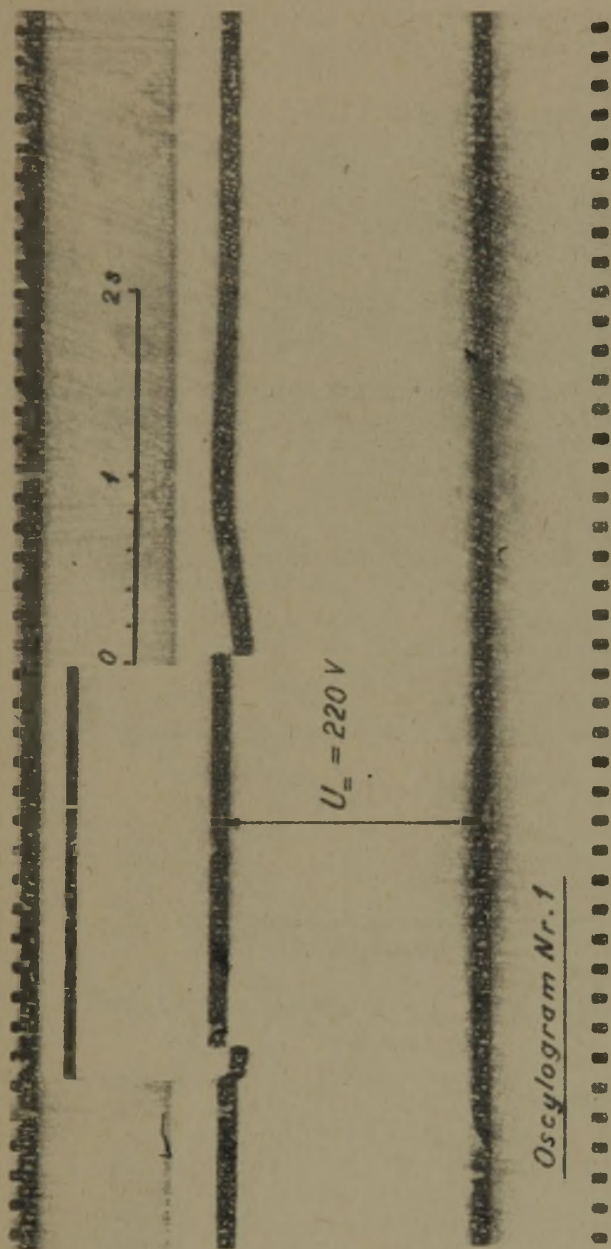
b) Produkowany przez BFP układ dwustrefowej stabilizacji transduktorowej napięcia i prądu maksymalnego prostownika typu PSA-3-220/90-160 o danych znamionowych:

- napięcie zasilania 3 x 380 V,
- częstotliwość zasilania 50 Hz,
- moc znamionowa 35,2 kW
- napięcie wyjściowe 220 V,
- dokładność stabilizacji napięcia  $\pm 2\%$  przy wahaniach napięcia sieci zasilającej w zakresie od  $+10\%$  do  $-15\%$  i częstotliwości zasilania  $\pm 2\%$  oraz zmianach prądu obciążenia w granicach od 0 do 160 A.



Rys. 13. Fotografia prostownika typu PSA-3-120/20-35





Rys. 14. Przebieg napięcia wyprostowanego po załączeniu obciążenia 160 A pro-  
stownika typu PSA-3-220/90-160

Na rys. 14 podano oscylogram przebiegu napięcia wyprostowanego powyższego prostownika po załączeniu prądu obciążenia 160 A. Aperiodyczny przebieg napięcia ustala się po czasie około 1 sek.

c) Przeznaczony do produkcji w BFP układ trójstrefowej stabilizacji transduktorowo-tranzystorowej napięcia, prądu minimalnego i prądu maksymalnego prostownika o danych:

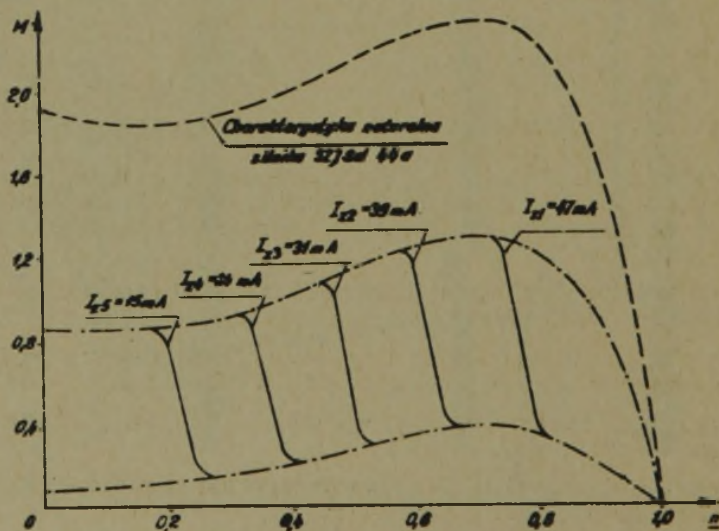
- napięcie zasilania  $3 \times 380 \text{ V}$ ,
- częstotliwość zasilania  $50 \text{ Hz}$ ,
- moc znamionowa  $2,2 \text{ kW}$ ,
- napięcie wyjściowe  $220 \text{ V}$ ,
- dokładność stabilizacji napięcia  $\pm 2\%$  przy wahanach napięcia sieci zasilającej  $\pm 10\%$  i zmianach prądu obciążenia w granicach od  $1,5 \text{ A}$  do  $10 \text{ A}$ .

d) Stosowany przez RAFAMET do napędu obrabiarek układ stabilizacji prędkości obrotowej przez transduktorową stabilizację napięcia twornika obcowzbudnego silnika prądu stałego o danych:  $2,2 \text{ kW}$ ,  $220 \text{ V}$ . Dokładność stabilizacji prędkości obrotowej  $\pm 3\%$ .

e) Stosowany przez RAFAMET do napędu obrabiarek układ regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej trójfazowego silnika asynchronicznego typu SZJS d 44a o danych:

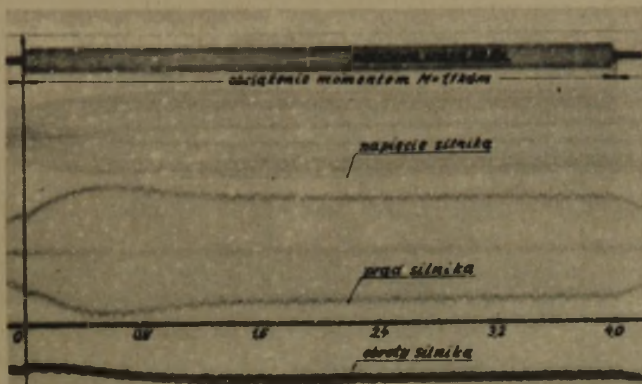
- napięcie zasilania  $3 \times 500 \text{ V}$ ,
- częstotliwość zasilania  $50 \text{ Hz}$ ,
- moc znamionowa  $1,7 \text{ kW}$ ,
- prędkość znamionowa  $1420 \text{ obr/min}$ .

Zewnętrzne charakterystyki mechaniczne układu podano na rys.15.



Rys. 15. Zewnętrzne mechaniczne charakterystyki układu

Przebiegi napięcia, prądu oraz prędkości obrotowej silnika przy skokowym załączeniu momentu obciążenia na silnik biegnący jałowo zilustrowano oscylogramami podanymi na rys. 16.



Rys. 16. Przebiegi napięcia, prądu i prędkości obrotowej silnika przy skokowym załączeniu momentu obciążenia

Rękopis złożono w Redakcji w grudniu 1965 r.

#### LITERATURA

- [1] Regulacja prędkości i napięcia w maszynach elektrycznych przy pomocy transduktorów.  
W. Paszek, J. Kubek, J. Hiokiewicz, A. Żywiec, W. Mizia  
Materiały konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Napędów Elektrycznych, Warszawa 23-25 września 1965 r. (na prawach rękopisu).
- [2] Alger F., Ku Y.: Speed Control of Induction Motor using Saturable Reactors. Electrical Eng. Vol. 76, 1957.
- [3] Awien O.I., Domanicki S.M.: Bezstykowe organy wykonawcze w automatyce przemysłowej. WNT, 1962 (tłum. z ros.).
- [4] Gabler M., Haszkowec I., Tomanek E.: Wzmacniacze magnetyczne. PWN, 1959.
- [5] Kafka W., Doell W.: Der durch Magnetverstärker gesteuerte Asynchronmotor. ETZ-A, Bd.78, H.24, 11, 12.



- [6] Lipman R.A., Niegnewickiej I.B.: Bystrodiejstwuzszyje magnitnyje i magnitno połuprowodnikowyje usiliteli. Gose-nergoizdat. 1960.
- [7] Paszek W.: Wzmacniacze elektromaszynowe i transduktorowe. (skrypt) 1963.
- [8] Paszek W.: Człony pomiarowo-porównawcze układów regulacji napięcia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka", 1963.
- [9] Paszek W.: Regulacja napięcia prądnic prądu stałego przy pomocy transduktorów. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka".
- [10] Rosenblat M.A.: Magnitnyje usiliteli. Sowjetskoje radio, 1960.
- [11] Sokołow M., Kapuncow D.: Regulirujemyj asinchronnyj elektropriwod kranowych mechanizmow s drosieliami nasyszozenija. Elektrichestwo, 11, 1959.
- [12] Storm G.F.: Magnitnyje usiliteli (tłum. z angielskiego). Izdatielstwo innostranoj literatury, 1957.
- [13] Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN 1960.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН  
С ПОМОЩЬЮ ТРАНДУКТОРОВ

Р е з ю м е

Представлены схемы стабилизации и регулировки напряжения, тока, скорости вращения и момента, которые содержат полупроводниковые выпрямители управляемые транзисторами. Для этих схем кроме исполнительного звена (управляемого выпрямителя) общим является решение усилительного каскада регулятора а также полосная регулировка выходной величины.

SPEED AND VOLTAGE REGULATION OF ELECTRICAL  
MACHINES WITH TRANSDUCTORS

S u m m a r y

System of stabilization and control of voltage, current, speed and torque including semi - conductor transducer-controlled rectifiers are presented.

These systems have except control unit (controlled rectifier) similar design of cascade - amplifier of regulator and output quantity regulation zones.