ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1970

Seria: ELEKTRYKA z. 27 Nr kol. 274

WŁADYSŁAW PASZEK, WŁADYSŁAW MIZIA, ALEKSANDER ŻYWIEC, JERZY SIWIŃSKI, JERZY ZYGMUNT, FRANCISZEK SZCZUCKI, RYSZARD SZYDŁO

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

ZASTOSOWANIE TYRYSTORÓW W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. Omówiono dotychczasowe prace Katedry Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej w dziedzinie zastosowania tyrystorów w układach regulacji maszyn elektrycznych i transformatorów. Podano schematy blokowe, zasady działania oraz przedstawiono podstawowe własności układów: regulacji wzbudzenia generatorów synchronicznych, pulsowej regulacji prędkości obrotowej silników trakcyjnych prądu stałego, regulacji zasilania elektrofiltrów, regulacji prostowników sterowanych przeznaczonych do ładowania baterii akumulatorowych, regulacji momentu i prędkości obrotowej nawrotnego napędu z oboowzbudnym silnikiem prądu stałego, regulacji maszyn wyciągowych, statycznych bezpośrednich i pośrednich przemienników częstotliwości przeznaczonych do zasilania silników asynchronicznych. Uzupełnieniem treści artykułu jest wykaz publikacji dotyczących prac Katedry w omawianej dziedzinie.

1. Wstęp

Ważnym problemem regulacji maszyn elektrycznych jest zagadnienie udoskonalenia sposobów regulacji napięcia, prądu i prędkości obrotowej, przy czym wchodzi w rachubę zarówno regulacja na stałą wartość zadaną, regulacja programowa bądź regulacja nadążna. Prace Katedry Maszyn Elektrycznych dotyczyły

w tej bardzo ciekawej dziedzinie techniki zarówno optymalizacji wymiarowej jak i funkcjonalnej projektowanych układów regulacji z uwzględnieniem rozwijającej się techniki nowoczesnych elementów regulacji oraz z uwzględnieniem coraz większego wyzyskania materiałów aktywnych maszyn elektrycznych podlegających procesowi regulacji.

W skład układu regulacji, w którym obiektem regulowanym jest maszyna elektryczna: generator bądź silnik wchodzi kaskada wzmocnienia, której ostatnim stopniem jest wzmacniacz wykonawczy. Działalność Katedry Maszyn Elektrycznych w ciągu minionego dwudziestolecia podążała za światowym trendem rozwoju coraz doskonalszych wzmacniaczy wykonawczych i posiada poważny udział w opracowaniu krajowych wzmacniaczy produkcji seryjnej przeznaczonych do regulacji i sterowania maszyn elektrycznych. Po okresie rozwijania wirujących wzmacniaczy elektromaszynowych, punkt ciężkości działalności Katedry przesunął się do konstrukcji statycznych wzmacniaczy transduktorowych, a bezpośrednio po pojawieniu się terystorów na rynku krajowym główny wysiłek Katedry skierowany był do wyzyskania zminiaturyzowanych wzmacniaczy mocy: wzmacniaczy półprzewodnikowych.

Zakres zastosowania tyrystorów w maszynach elektrycznych staje się coraz szerszy. Małe wymiary wzmacniaczy tyrystorowych umożliwiają ich wkomponowanie do wspólnego gabarytu maszyny wirującej bądź transformatora tak, że tworzą często wraz z maszyną wspólną całość konstrukcyjną. Zastosowanie tyrystorów w maszynach elektrycznych umożliwia dokonanie poważnego skoku w udoskonaleniu i miniaturyzacji układów regulacji maszyn elektrycznych. Tyrystor jako sterowany zawór elektryczny wprowadza jednak nowe problemy do konstrukcji maszyn elektrycznych spowodowane przez konsekwencje odkształcenia krzywej napięcia i prądu twornika maszyny, charakterystyczne dla

układów prostownikowych. Wysiłek Katedry skierowany był przeto zarówno w kierunku poszukiwań i rozwoju coraz pewniejszych w działaniu układów sterowania tyrystorów jak i w kierunku dostosowania konstrukcji maszyn i transformatorów do warunków pracy określonych przez tyrystory.

W pracach Katedry partycypowali w dużym stopniu doktoranci z przemysłu, którzy korzystali i w dalszym ciągu korzystają z pomocy swoich jednostek macierzystych żywotnie zainteresowanych w rozwoju nowoczesnych układów regulacji. W dziedzinie zastosowania tyrystorów w maszynach elektrycznych Katedra współpracuje od lat z szeregiem instytucji zainteresowanych produkcją układów tyrystorowych (Fabryka Aparatów Elektrycznych "Apena", Zakłady Wytwórcze Maszyn Elektrycznych "Dolmel", Biuro Projektów Hutniczych "Biprohut", Instytut Automatyki Systemów Energetycznych, Zakłady Konstrukcyjno-Mechanizacyjne Przemysłu Węglowego, Bielewska Fabryka Prostowników, Przedsiębiorstwo Montażu Urządzeń Elektrycznych Przemysłu Węglowego, Zakład Wytwórczy Sprzętu Sieciowego "Belos").

Niniejszy artykuł stanowi przegląd najważniejszych prac Katedry z dziedziny zastosowania tyrystorów.

2. Generatory synchroniczne

Przyjęcie określonego typu źródła wzbudzenia generatora synchronicznego rzutuje na rozwiązanie jego układu regulacji, uwzględniając, że temu układowi przypada zespół zadań: utrzymanie poziomu napięcia w określonym punkcie sieci, zapewnienie prawidłowego rozpływu mocy biernej współpracujących jednostek prądotwórczych, efektywne zwiększenie stabilności statycznej i dynamicznej przesyłu energii.

Z uwagi na zmniejszenie kosztów jednostkowych oraz powiększenie sprawności bloku kocioł-turbina-generator, zachodzi ko-

nieczność instalowania turbogeneratorów o coraz większej mocy znamionowej. Ze względów wytrzymałości mechanicznej ograniczone są wymiary geometryczne wirników i w konsekwencji droga do zwiększenia mocy znamionowej turbogeneratora prowadzi przez zwiększenie gęstości prądowej i przez odpowiednie uintensywnienie chłodzenia uzwojeń (przejście z chłodzenia pośredniego do bezpośredniego wodorem i ostatnio wodą). Konsekwencją wzrostu mocy znamionowej turbogeneratorów jest silny wzrost mocy wzbudzenia.

Przy tak dużych mocach i prądach znamionowych prądnice prądu stałego jako wzbudnice turbogeneratorów mogą być skonstruowane tylko jako maszyny wolnobieżne ze względu na warunki komutacji, co przy założeniu pełnej niezawodności ruchowej źródła wzbudzenia w przypadkach zwarcia generatora powoduje skomplikowanie konstrukcji zespołu (np. przekładnie napędzane z wału turbogeneratora, bądź napęd asynchroniczny z kołem zamachowym).

Niezawodnym źródłem wzbudzenia generatorów dużej mocy jest wzbudnica (prądnica) synchroniczna osadzona na wspólnym wale turbogeneratora, której prąd twornika po wyprostowaniu w prostowniku krzemowym, zasila uzwojenie wzbudzenia turbogeneratora. Coraz większe zastosowanie znajdują zagranicą (USA, NRF, Francja) krzemowe prostowniki wirujące z uwagi na kłopotliwe zbieranie prądu rzędu kilku kA przez pierścienie ślizgowe. Duża niezawodność diod krzemowych, rozwój ich konstrukcji w kierunku większych prądów przewodzenia, łatwość łączenia równoległego, wytrzymałość na siły odśrodkowe oraz dobre warunki chłodzenia wirujących elementów powodują, że zalety takiego rozwiązania układu wzbudzenia przeważają nad niektórymi jego wadami.

Do wad tego rozwiązania należy:

a) jednokierunkowość napięcia wzbudzenia, która powoduje mniejszą stromość napięcia wzbudzenia przy regulacji w dół niż w górę,

b) niemożliwość pospiesznego odwzbudzania generatora przy ujemnym napięciu wzbudzenia, tak jak przy przełączeniu uzwojenia wzbudzenia na rezystancję gaszącą,

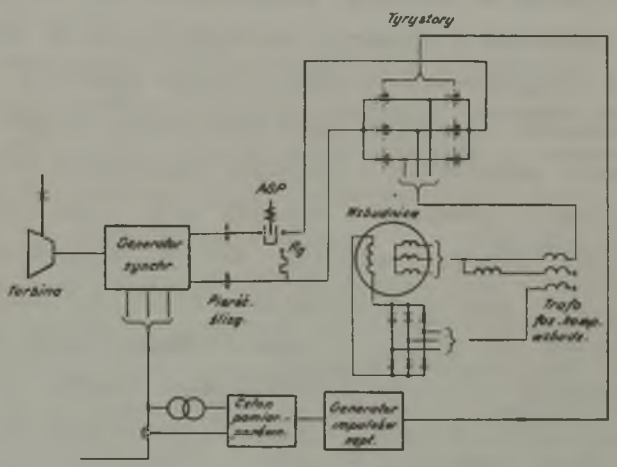
c) niemożliwość wymiany uszkodzonej diody w czasie ruchu wirnika, co rekompensuje się przez zwiększenie liczby równolegle połączonych diod wirujących dla otrzymania zapasu prądu wzbudzenia na wypadek uszkodzenia diody.

Zjawiska rekombinacji półprzewodnika diody po okresie przewodzenia powodują powstawanie przepięć w kierunku zaporowym. Przy pomocy układów tłumiących RC bocznikujących diody można ograniczyć przepięcia do wartości niegroźnych dla diody. Diody są najbardziej narażone w kierunku zaporowym prądem wyrównawczym przeciwnej biegunowości przekraczającym wartości ustalonego prądu wzbudzenia poprzedzającym zaburzenie. Prądy wyrównawcze w uzwojeniu wzbudzenia o kierunku przeciwnym do normalnego prądu wzbudzenia powstają w wirniku przy pracy asynchronicznej generatora bądź przy poślizgu wirnika w przypadku nagłych obciążeń, przy nagłym odłączeniu indukcyjnej mocy biernej bądź przyłączeń obciążenia pojemnościowego, przy załączaniu do sieci sztywnej w stanie niewzbudzonym oraz w przypadku zwarć niesymetrycznych. W szczególności jednoczesna koincydencja różnych przyczyn może spowodować przepięcie na diodach.Przy silnych obwodach tłumiących wirnika, przepięcia działające na mostek prostowniczy nie przekraczają wartości dopuszczalnej nowoczesnych diod. Jeśli zachodzi konieczność ograniczenia przepięcia można zbocznikować uzwojenia wzbudzenia rezystancją, która jednakże powoduje niekorzystne powiększenie poboru mocy

ze wzbudnicy i jest kłopotliwa w montażu przy prostownikach wirujących. Korzystne są rezystancje bocznikujące o charakterystyce zależnej napięciowo.

Największe przeciążenia prądowe zachodzą przy zwarciu 3-fazowym w połączeniu z forsowaniem wzbudzenia. Przeciążenia te muszą być wkalkulowane przy doborze liczby równoległych diod prostownika.

Sterowanie wzbudnicy synchronicznej odbywa się poprzez wzmacniacze transduktorowe bądź tyrystorowe. Inercję regulatora determinuje stała czasowa wzbudnicy, która mieści się przeważnie w granicach 0,4 ... 1,5 s. Zmniejszenie inercji regulatora o kilka rzędów otrzymuje się w przypadku zasilania uzwojenia wzbudzenia generatora z półprzewodnikowych prostowników sterowanych - tyrystorów (rys. 1). Wpływ tyrystorowej regulacji wzbu-



Rys. 1. Układ regulacji wzbudzenia generatora synchronicznego z tyrystorowym członem wykonawczym i samowzbudną wzbudnicą prądu przemiennego

dzenia na utrzymanie napięcia twornika generatora podlegającego częstemu nagłemu obciążeniu o przebiegu stochastycznym (np. obciążenie wnoszone przez piece łukowe) jest nieporównywalnie efektywniejszy niż przy wzbudnicach elektromaszynowych dzięki praktycznie bezinercyjnemu wysterowaniu napięcia wzbudzenia (występuje praktycznie tylko czas martwy prostownika sterowanego rzędu połowy okresu napięcia zasilania prostownika).

Wzbudnice tyrystorowe uważa się za unowocześnienie źródła wzbudzenia prostowników rtęciowych, w których zastąpiono kłopotliwe jedno- bądź wielonaczyniowe prostowniki rtęciowe sterowanymi prostownikami półprzewodnikowymi (większa niezawodność tyrystorów, nie trzeba kłopotliwego wyposażenia pomocniczego jak np. zasilania anod wzbudzenia, ogrzewania naczyń prostowniczych itp.). Obecny stan techniki tyrystorów dużej mocy umożliwia ich zastosowanie jako źródeł wzbudzenia generatorów największych mocy (przez łączenie równoległe tyrystorów można otrzymać dowolnie duże prądy znamionowe, układy tłumiące RC chronią je od przepięć, bezpieczniki topikowe od lawinowego uszkodzenia przy zwarciu jednego tyrystora). Możliwość pracy inwertowej umożliwia rewersję napięcia wyprostowanego i umożliwia zarówno otrzymanie dużej stromości napięcia wzbudzenia w obu kierunkach wysterowania jak i pospieszne odwzbudzania generatora z odzyskiem energii. Przez przeciwrównoległe łączenie tyrystorów można uzyskać rewersyjność prądu wzbudzenia (własność pożądana przy pospiesznym odwzbudzaniu).

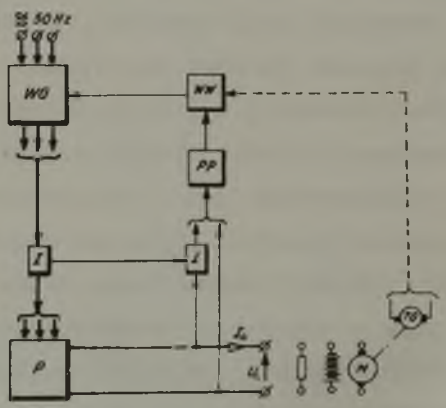
Modelowe układy regulacji wzbudzenia generatorów małej mocy za pomocą tyrystorów wykonane w laboratorium Katedry Maszyn Elektrycznych wykazały pełną ich przydatność praktyczną. W toku są badania zjawisk przepięciowych w anormalnych warunkach pracy generatorów. Prace Katedry nawiązują również do interesujących prac badawczych Instytutu Energetyki w Gdańsku oraz Instytutu Automatyki Systemów Energetycznych w dziedzinie zasto-

sowań tyrystorów do regulacji wzbudzenia generatorów synchronicznych.

3. Źródła prądu stałego

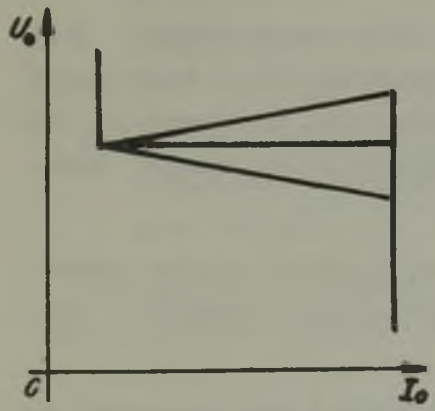
Prostownik wyposażony w sterowane zawory tyrystorowe zastępuje sterowaną prądnicę prądu stałego. Zalety eksploatacyjne takiego rozwiązania, złożonego z zasilacza statycznego nie zawierającego elementów stykowych zamiast prądnicy z komutatorem są oczywiste. Wskaźniki ekonomiczne (sprawność, współczynnik mocy pobieranej z sieci zasilającej), które można uzyskać w takim układzie, są również korzystniejsze niż w przypadku przetwornicy elektromaszynowej - silnik asynchroniczny - prądnica prądu stałego.

Schemat blokowy regulacji prostownika sterowanego podano na rys. 2. Układ zawiera: układ prostowniczy P, wzmacniacz mocy WG, wzmacniacz wstępny WW, człon pomiarowo-porównawczy PP, czło-



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji prostownika sterowanego przeznaczonego do zasilania odbiorników rezystancyjnych, bądź do ładowania baterii akumulatorowej, bądź do zasilania twornika silnika prądu stałego. Przewidziano alternatywne sprzężenie napięciowe lub prędkościowe (oznaczenia podzespołów podano w tekście).

ny zapewniające odcinanie minimalne, maksymalne i kompaundację członu pomiarowego I. Układ taki może zapewnić charakterystykę napięciowo-prądową podaną na rys. 3. Zawiera ono część stabilizacji prądu minimalnego i maksymalnego oraz część stabilizacji napięcia. Nachylenie charakterystyki stabilizacji napięcia może być zmieniane za pomocą kompaundacji 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 rezystancji linii łączącej zasilacz z odbiornikiem. Układy regulacji oparte na powyższym schemacie blokowym umożliwiają nastawianie w dużym zakresie poziomu stabilizowanych wielkości.



Rys. 3. Trójstrefowa zewnętrzna charakterystyka napięciowo-prądowa z możliwością zmiany nachylenia strefy stabilizacji napięcia

W bezstykowych układach regulacji prostowników sterowanych mogą mieć zastosowanie w członie wykonawczym diody krzemowe, germanowe lub selenowe, sterowane za pomocą transduktorów, bądź też tyrystory. Układ regulacji prostowników sterowanych może się różnić rodzajem członu wykonawczego. Transduktory są sterowane przez wzmacniacze o działaniu ciągłym; tyrystory są sterowane z impulsowych układów zapłonowych. Pozostałe człony układu regulacji: człon pomiarowo-porównawczy oraz człony odcinania prądu są w zasadzie identyczne.

Wzmacniacze wstępne, człony zapłonowe, człony pomiarowo-porównawcze, człony odcinań prądowych mogą być wykonane na ele-

mentach magnetycznych bądź półprzewodnikowych. Korzyści płynące z zastosowania elementów magnetycznych lub półprzewodnikowych można ocenić biorąc pod uwagę następujące czynniki:

a) elementy półprzewodnikowe są w zasadzie mniejsze i lżejsze niż odpowiadające im elementy magnetyczne, ale konieczność stosowania do nich transformatorów dopasowujących lub zasilających osłabia tę zaletę;

b) trwałość elementów magnetycznych jest w zasadzie większa niż półprzewodnikowych, ale elementy magnetyczne z reguły współpracują z półprzewodnikowymi i dlatego np. trwałość wzmacniacza amplistatowego i tranzystorowego są podobne;

c) szybkość działania wzmacniaczy półprzewodnikowych jest większa niż wzmacniaczy magnetycznych, ale konieczność stosowania filtrów w układach opartych na elementach półprzewodnikowych prowadzi do osłabienia tej zalety układów półprzewodnikowych;

d) w elementach magnetycznych można prościej sumować sygnały sterujące i oddzielać je galwanicznie aniżeli w elementach półprzewodnikowych;

e) we wzmacniaczach magnetycznych łatwiej jest dopasować rezystancję wejściową i wyjściową do wartości optymalnej (przez odpowiednie uzwojenie rdzeni) niż we wzmacniaczach półprzewodnikowych;

f) wpływ zmian temperatury jest większy na właściwości wzmacniaczy półprzewodnikowych, zwłaszcza w przypadkach wstępnych wzmacniaczy tranzystorowych opartych na elementach germanowych;

g) wpływ zmian częstotliwości sieci zasilającej na właściwości układu jest większy w przypadku wzmacniaczy magnetycznych.

Parametry diod i tyrystorów dużej mocy dobiera się dla warunków znamionowych prostownika sterowanego i chroni się je przed trwałym zniszczeniem przez specjalne układy zabezpieczające.

Zabezpieczenie przed przeciążeniami prądowymi realizuje się przez zastosowanie:

a) urządzeń wyłączających prostownik lub usuwających przyczynę wzrostu prądu (szybko działające wyłączniki automatyczne i bezpieczniki topikowe po stronie zasilania i obciążenia oraz szeregowo z zaworami układu prostowniczego, układy gaszące impulsy układu zapłonowego powodujące zatykanie tyrystorów);

b) urządzeń ograniczających prąd i jego szybkość narastania (oporność wewnętrzna transformatora zasilającego, dodatkowa indukcyjność w obwodzie prądu stałego).

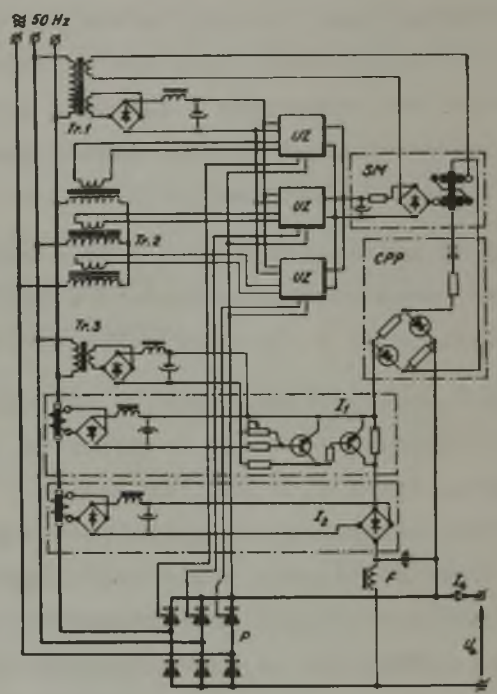
Ochronę przed przepięciami uzyskuje się włączając na zawory lub wyjście prostownika głównego rezystancję, układ szeregowy RC, diodę Zenera, tranzystor lub iskiernik.

Na przestrzeni ubiegłych lat opracowano w Katedrze Maszyn Elektrycznych przy współpracy z Bielawską Fabryką Prostowników kilka układów prostownikowych przeznaczonych do produkcji seryjnej opartych pierwotnie na wzmacniaczach transduktorowych, a z chwilą pojawienia się na rynku krajowym tyrystorów - opartych na tyrystorach.

Rys. 4 przedstawia schemat układu o zasilaniu trójfazowym przy zastosowaniu w prostowniku 3 diod niesterowanych i 3 tyrystorów (układu nierewersyjnego). Układ jest przeznaczony do

trójstrefowej stabilizacji tyrystorowej napięcia, prądu minimalnego i prądu maksymalnego prostownika o danych:

napięcie zasilania	3 x 500V lub 3 x 380 V
częstotliwość zasilania	50 Hz
moc znamionowa	40 kW
dokładność stabilizacji napięcia	± 2% przy wahaniach napięcia zasilania ± 10% i zmianach prądu obciążenia w granicach 20 ... 180 A.



Rys. 4. Schemat ideowy trójstrefowego tyrystorowego układu regulacji napięcia i prądu prostownika trójfazowego

P - trójfazowy nierewersyjny mostek prostowniczy, F - filtr wygładzający, CPP - człon pomiarowo-porównawczy, SM - sumator magnetyczny, UZ - układ zapłonowy tyrystorów, I1 - układ odcinania prądu minimalnego, I2 - układ odcinania prądu maksymalnego Tr1, Tr2, Tr3 - transformatory pomocnicze

Do dziedziny regulacji napięcia wyprostowanego trzeba zaliczyć również problem regulacji napięcia zasilania odpylaczy elektrostatycznych (elektrofiltrów). Elektrofiltry są najpowszechniej stosowanym urządzeniem do wychwytywania pyłów i innych zanieczyszczeń z gazów odlotowych kotłów energetycznych lub innych urządzeń technologicznych.

W polu elektrostatycznym ziarna pyłu ulegają polaryzacji elektrycznej, to znaczy w ziarnie pyłu następuje przemieszczenie ładunków elektrycznych przy czym ładunki dodatnie zwrócone są w kierunku ujemnej elektrody ulotowej. Przy napięciu między elektrodami przekraczającym napięcie ulotu, następuje emisja elektronów z elektrody ujemnej, które łącząc się z cząstkami gazu powodują powstanie jonów ujemnych poruszających się w polu międzyelektrodowym. Przy zderzeniach z obojętnymi cząstkami gazu następuje zjawisko jonizacji oraz co jest w tym przypadku najistotniejsze, zderzenie jonów ujemnych z ziarnami spolaryzowanego pyłu, powodując po zneutralizowaniu dodatniego ładunku polaryzacyjnego ujemne naładowanie ziarna. Ziarna pyłu unoszone przez strugę gazu w przestrzeni międzyelektrodowej podlegają działaniu pola elektrycznego i przemieszczają się w kierunku elektrody dodatniej zbiorczej, gdzie po oddaniu swego ujemnego ładunku osadzają się tworząc warstwę pyłu przeznaczonego do usunięcia z filtru po swobodnym, bądź wymuszonym przez strzepywacze elektrod, odpadnięciu do lejów zbiorczych komór elektrofiltrów.

W celu uzyskania możliwie dużej prędkości migracji ziaren pyłu i odpowiednio dużej sprawności elektrofiltru celowe jest powiększenie napięcia zasilania komory do wartości zbliżonej do granicy wytrzymałości elektrycznej komory. Oczywiście po przekroczeniu granicy wytrzymałości następuje wyładowanie łukowe w komorze, czemu towarzyszy zanik napięcia w przestrzeni

międzyelektrodowej i utrata zdolności odpylania odpylacza elektrostatycznego.

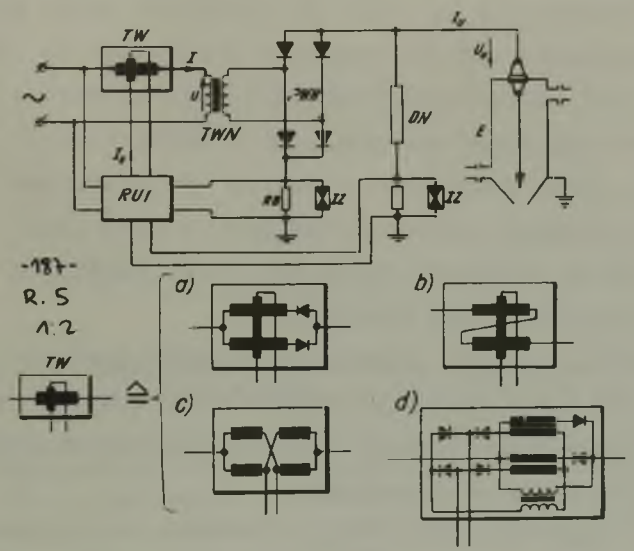
Dzięki wprowadzeniu nowoczesnych układów regulujących w zespołach zasilających napięcie międzyelektrodowe elektrofiltru może podążać automatycznie za zmnieniającą się w czasie eksploatacji wytrzymałością dielektryczną komory, tak że średnia sprawność elektrofiltru jest bliska wartości maksymalnej, którą można uzyskać przy określonych wymiarach komory. Regulacja odbywa się po stronie niskiego napięcia transformatora zasilającego prostownik wysokiego napięcia. W miejsce starych wirujących prostowników mechanicznych,są obecnie stosowane wysokosprawne prostowniki selenowe, bądź krzemowe o jeszcze większej sprawności, które w postaci stosów prostowniczych są umieszczone we wspólnej kadzi olejowej z transformatorem.

Jako szybkodziałające człony wykonawcze regulatorów i wzmacniacze wstępne są stosowane transduktory, tyrystory i wzmacniacze tranzystorowe. Dzięki zautomatyzowaniu regulacji napięcia sprawność odpylania powiększyła się o kilkanaście procent w porównaniu z przypadkiem zasilania bez automatycznej regulacji i aczkolwiek w dalszym ciągu sposób realizacji automatyzacji zasilania podlega procesowi rozwoju, główne źródła w kierunku powiększania sprawności odpylania znajdują się w optymalizacji geometrii elektrofiltrów.

Rys. 5 przedstawia schemat ideowy zespołu zasilającego elektrofiltr. Zmianę napięcia wyprostowanego elektrofiltru uzyskuje się przez dławienie napięcia sieci zasilającej za pomocą transduktora wykonawczego, który znajduje się w obwodzie pierwotnym transformatora wysokiego napięcia. Jako transduktory wykonawcze znalazły zastosowanie transduktory o sterowaniu mocowym jedno- i trójfazowe, amplistaty (a), transduktory bez sprzężenia zwrotnego (b,c) i transduktory o sterowaniu napięciowym (d).

Zadania stawiane układowi regulacji są następujące:

1. Utrzymanie napięcia pracy elektrofiltru na możliwie najwyższej wartości w pobliżu granicy wytrzymałości elektrycznej komory.
2. Ograniczenie prądu zwarcia.
3. Jak najszybsze gaszenie łuku powstałego w komorze na skutek przeskoku.



Rys. 5. Schemat ideowy zespołu zasilającego elektrofiltr

TW - transduktorowy wzmacniacz wykonawczy, RUI - regulator napięcia i prądu elektrofiltru, TWN - transformator wysokiego napięcia, PWN - prostownik wysokiego napięcia, E - elektrofiltr, RB - bocznik pomiaru prądu elektrofiltru, DN - dzielnik rezystancyjny pomiaru napięcia elektrofiltru, IZ - iskiernik zabezpieczający, I_u, U_u - prąd ulotu i napięcie ulotu

Są stosowane powszechnie dwie zasady rozwiązania regulacji zasilania elektrofiltrów: zasada regulacji okresowej bądź regulacji ciągłej.

Układ regulacji okresowej polega na periodycznym próbkowaniu wytrzymałości elektrycznej komory. W tym celu następuje podwyższanie napięcia zasilania elektrofiltru aż do wystąpienia wyładowania łukowego. W chwili zwarcia następuje chwilowe wyłączenie (na czas 0,7 ... 1 s) zasilania elektrofiltru bądź chwilowe zmniejszenie do minimum wysterowania wzmacniacza wykonawczego (w czasie 0,2 ... 0,25 s) na skutek czego łuk gaśnie, po czym napięcie zostaje ponownie przyłożone do elektrofiltru przy nieco zmniejszonej wartości, pozostawiając nastawialny margines względem wytrzymałości dielektrycznej komory elektrofiltru. Okres próbkowania liczony od ostatniego zwarcia do chwili ponownej regulacji napięcia w górę jest również nastawialny. Układ regulacji okresowej można rozwiązać za pomocą elementów stykowych bądź bezstykowych.

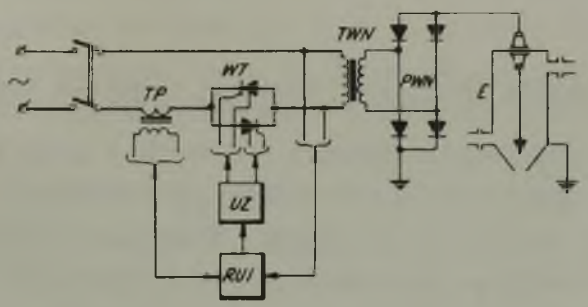
Układ regulacji ciągłej opiera się na wykorzystaniu przeskoków gasnących poprzedzających wyładowania łukowe, Układ nie dopuszcza do rozwinięcia pełnego wyładowania łukowego i bazuje na pomiarze przeskoków gasnących.

Obie zasady regulacji mają wady, pierwsza ze względu na nie wykorzystanie największego, możliwego w danych warunkach napięcia zasilania elektrofiltru, druga z uwagi na konieczność pracy w warunkach przeskoków gasnących, w czasie których występują chwilowe zaniki napięcia, kiedy nie występuje działanie odpylające. Układy regulacji ciągłej są z reguły układami bezstykowymi.

Z uwagi na większą sprawność energetyczną prostowniki wysokiego napięcia będą wyłącznie budowane ze stosów diod krzemowych. Jako diody krzemowe specjalnie predystynowane do pracy w warunkach zasilania elektrofiltrów są diody lawinowe typu

"avalanche", w których mniejsze kłopoty stwarza rozwiązanie układów ochronnych od przepięć i przetężeń szybkozmiennych.

Przy zastosowaniu tyrystorów o połączeniu przeciwsobnym (rys. 6) w miejsce transduktora wykonawczego otrzymuje się układ o inercji odpowiadającej połowie okresu napięcia sieci energetycznej. Wzmacniacze wstępne tworzące układ zapłonowy tyrystorów muszą być odpowiednio dostosowane do tyrystorowego wzmacniacza wykonawczego, natomiast funkcje regulacyjne pozostają niezmienione.



Rys. 6. Układ regulacji zespołu zasilającego elektrofiltr z tyrystorowym wzmacniaczem wykonawczym

WT - tyrystorowy wzmacniacz prądu przemiennego, UZ - układ zapłonowy tyrystorów, RUI - regulator napięcia i prądu elektrofiltru, TP - przekładnik prądowy, TWN - transformator wysokiego napięcia, PWN - prostownik wysokiego napięcia, E - elektrofiltr

Zarówno układ regulacji okresowej jak i układ regulacji ciągłej są obarczone wadami, które powodują zmniejszenie sprawności w porównaniu z największą możliwą sprawnością elektrofiltru w warunkach przepływu określonej mieszaniny pyłowo-gazowej. W opracowaniu jest układ optymalizujący skuteczność odpylania przy wykorzystaniu pomiaru i regulacji ekstremalnej mocy

ulotu odpowiedzialnej za sprawność odpylania. Układ regulacji ekstremalnej musi spełniać dodatkowe nadrzędne funkcje gaszenia prądów zwarciowych i ograniczenia prądów ulotu.

Katedra Maszyn Elektrycznych współpracuje od kilkunastu lat z Zakładem Wytwórczym Sprzętu Sieciowego "Belos", jedynym producentem zespołów zasilających elektrofiltry zarówno w dziedzinie optymalizacji konstrukcji transformatorów i wzmacniaczy wykonawczych jak i układu regulacji. Tyrystorowy układ modelowy wykonany w Fabryce Belos wykazuje bardzo dobre własności regulacyjne.

4. Układy regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego

W układach regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego znajdują zastosowanie wzmacniacze tyrystorowe o własnej lub naturalnej komutacji tyrystorów. Wzmacniacze prądu stałego o własnej komutacji są wyposażone w układ wyłączania tyrystorów w którym chwila wyłączenia może być regulowana. We wzmacniaczach o komutacji naturalnej wyłączenie tyrystorów następuje na skutek zmiany biegunowości napięcia anodowego. Zmianę biegunowości napięcia anodowego uzyskuje się w sposób naturalny przy zasilaniu wzmacniacza z sieci prądu przemiennego. Jeżeli wzmacniacz zasilany jest z sieci prądu stałego komutację zapewnia przełącznik. Najczęściej wzmacniacze o komutacji własnej zasilane są z sieci prądu stałego, natomiast wzmacniacze o komutacji naturalnej z sieci prądu przemiennego.

4.1. Układ regulacji prędkości obrotowej silnika szeregowego prądu stałego

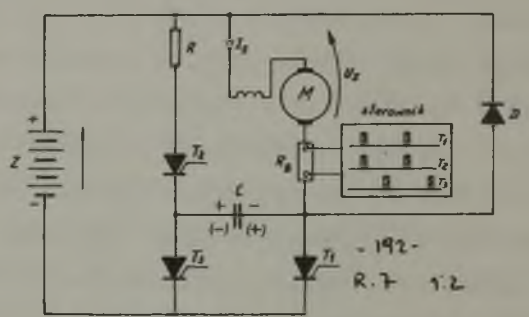
Od czasu wprowadzenia trakcji elektrycznej w podziemiach kopalń układy sterowania dołowych elektrowozów akumulatorowych i przewodowych praktycznie nie ulegały żadnym zmianom. W elek-

trowozach akumulatorowych rozruch i regulację prędkości dokonywano przez zmianę połączeń ogniw w baterii, bądź przez zmianę dodatkowej rezystancji w obwodzie głównym silników trakcyjnych, natomiast w elektrowozach przewodowych tylko przez zmianę dodatkowej rezystancji. W obydwu przypadkach regulacja jest skokowa i wymaga stosowania elementów łączeniowych, które są obarczone efektami wyładowań łukowych. Ponadto przy regulacji za pomocą włączania dodatkowej rezystancji w obwodzie głównym silników trakcyjnych znaczna ilość energii tracona jest na ciepło, co w przypadku elektrowozów akumulatorowych skraca efektywny czas wykorzystania baterii. Zastosowanie zamiast dotychczasowych rozwiązań, tyrystorowych układów do sterowania elektrowozów, eliminuje wyżej podane wady, a ponadto ze względu na małe moce potrzebne do sterowania tyrystorów istnieje możliwość automatyzacji rozruchu i regulacji prędkości elektrowozu.

Przy współpracy Katedry Maszyn Elektrycznych z Zakładami Konstrukcyjno-Mechanizacyjnymi Przemysłu Węglowego w Gliwicach opracowano dwa układy sterowania elektrowozów dołowych, które zostały sprawdzone laboratoryjnie i ruchowo w podziemiach kopalń i które są obecnie w Chorzowskiej Wytwórni Konstrukcji Stalowych "Konstal" wdrażane do produkcji przemysłowej. Jeden z nich, to układ pulsowego sterowania, dostosowany do elektrowozów akumulatorowych (rys. 7), natomiast drugi, to układ sterowania przez zmianę kąta opóźnienia zapłonu, który jest dostososany do elektrowozów przewodowych zasilanych z sieci prądu przemiennego (rys. 11). Obydwa układy mają tę wspólną cechę że regulacja odbywa się w funkcji prądu obciążenia silników, co stanowi korzystne właściwości trakcyjne, a jednocześnie stanowi zabezpieczenie silników trakcyjnych przed przeciążeniem.

Idea pulsowego sterowania napięcia zasilania silnika polega na okresowym załączaniu i wyłączaniu źródła zasilania do obwo-

du głównego. Rolę łącznika spełnia tyrystor T_1. Przy wyłączeniu źródła zasilania prąd w obwodzie twornika z indukcyjnością szeregowego uzwojenia wzbudzenia zamyka się przez diodę D bocznikującą silnik. Tyrystor T_2 i T_3 oraz kondensator C wraz z opornikiem R tworzą obwód gaszący. Podając impuls zapłonowy na bramkę tyrystora T_1, powoduje się zamknięcie obwodu silnika i przepływ prądu w tworniku. Równocześnie z zapłonem tyrystora T_1 jest podawany impuls zapłonowy na tyrystor T_2, poprzez który ładowany jest kondensator C do napięcia źródła zasilania.



Rys. 7. Tyrystorowy układ pulsowego zasilania silnika trakcyjnego

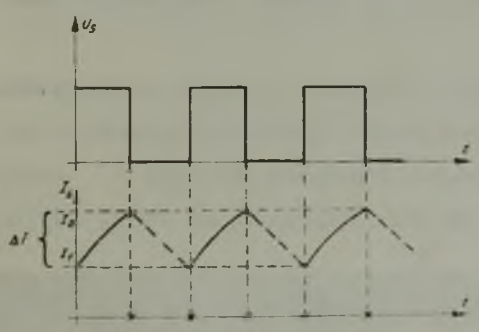
M - silnik szeregowy prądu stałego, Z - źródło napięcia stałego, T_1 - tyrystor główny (załączający i wyłączający źródło), T_2 T_3 - tyrystory gaszące, R - rezystancja obwodu gaszącego, C - kondensator obwodu gaszącego, D - dioda bocznikująca, RB - bocznik pomiaru prądu silnika

Po osiągnięciu w tworniku prądu I_2 (rys. 8), zostaje podany impuls odblokowujący tyrystor T_3, poprzez który nastąpi rozładowanie kondensatora C, a następnie naładowanie do biegunowości przeciwnej, oznaczonej w nawiasach na rys. 7.

W wyniku zmiany znaku napięcia między anodą i katodą tyrystora T_1 podczas rozładowania kondensatora, następuje zablokowanie tyrystora T_1 i przerwa w obwodzie zasilania twornika.

Prąd przepływający przez twornik po zablokowaniu tyrystora T_1, maleje wykładniczo na skutek indukcyjności obwodu twornika. Zmieniając stosunek czasu zasilania twornika ze źródła prądu stałego do czasu przerwy zasilania otrzymuje się zmianę średniego napięcia zasilania i przez to efekt zmian zewnętrznych charakterystyk mechanicznych silnika.

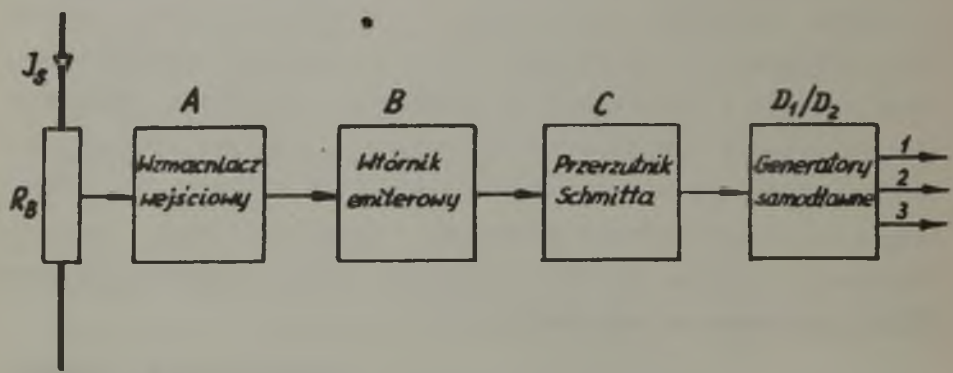
Do układu przedstawionego na rys. 7 wprowadzono człon pomiarowo-porównawczy, porównujący prąd obciążenia, przepływający przez bocznik z nastawioną na sterowniku wartością odniesienia. Załączanie i wyłączanie tyrystora T_1 odbywa się przy kolejnych granicznych wartościach prądu I_1 i I_2 (rys. 8). Ustalająca się częstotliwość przełączeń zależy od zmian momentu obciążenia silnika, stałych czasowych obwodu i nastawienie przedziału prądowego na sterowniku $\Delta i = I_2 - I_1$.



Rys. 8. Czasowe wykresy zmian napięcia U_s i prądu I_s silnika szeregowego przy sterowaniu pulsowym

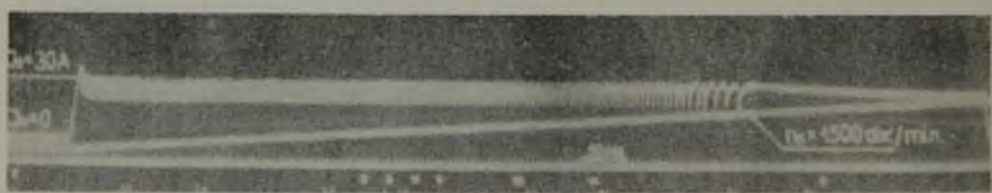
Do sterowania tyrystorów w układzie przedstawionym na rys. 7 służy elektroniczny sterownik, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 9. Sygnałem sterującym dostarczanym na wejście sterownika jest spadek napięcia na boczniku R_B włączonym w obwód silnika. Sygnał ten po wzmocnieniu na stopniu "A" jest podany przez wtórnik emiterowy "B" do przerzutnika "C". Przerzutnik wytwarza na swych wyjściach impulsy napięciowe o kształcie zbliżonym do prostokątnego. Impulsy te występujące naprzemian są podawane poprzez układ różniczkujący na generatory D_1 i D_2.

Generator D_1 na wyjściu 1, 2 daje impulsy bramkowe służące do odblokowania tyrystorów T_1 i T_2 przy prądzie I_1, natomiast generator D_2 na wyjściu 3 daje impulsy bramkowe do odblokowania tyrystora T_3, przy prądzie I_2. Rozruch i regulacja prędkości elektrowozu po nastawieniu granicznych wartości prądu przebiega samoczynnie.



Rys. 9. Schemat blokowy sterownika dla układu regulacji z rys.7

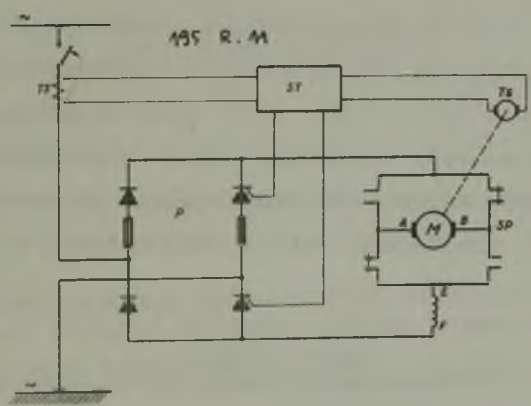
Rys. 10 przedstawia oscylogram rozruchu silnika szeregowego przy sterowaniu pulsowym. Częstotliwość cykli załączania i wyłączania napięcia zasilania podczas rozruchu silnika o mocy, 2,6 kW, U_n = 72 V i n_n = 1500 obr/min wynosiła od 250 ÷ 20 Hz.



Rys. 10. Oscylogram rozruchu silnika trakcyjnego przy zasilaniu pulsowym w układzie z rys. 7

Oszczędność energii wynikająca z wprowadzenia pulsowego sterowania silników trakcyjnych w elektrowozach dołowych jest pokaźna i waha się od 25 ÷ 40% ogólnej energii pobieranej przez elektrowozy.

Ideowy schemat układu sterowania przez zmianę kąta zapłonu jest przedstawiony na rys. 11. Zastosowano podstawowy układ prostownika P z dwoma tyrystorami. Układ przedstawiony na rys. 11 łączy zalety wynikające z pozostawienia na elektrowozie szeregowych silników trakcyjnych prądu stałego z zaletami, wynikającymi z zasilania sieci trakcyjnej prądem przemiennym. Rozruch i regulacja prędkości elektrowozu z układem .erowania jest dokonywana bezstopniowo i bez strat energetycznych, przez zmianę opóźnienia kąta zapłonu tyrystorów. Zmieniając kąt zapłonu tyrystorów w zestawie prostowniczym, uzyskuje się zmianę średniej wartości napięcia wyprostowanego na zaciskach silnika trakcyjnego i w efekcie zmianę prędkości elektrowozu.



Rys. 11. Schemat układu sterowania silnika szeregowego prądu stałego przez zmianę kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów

P - diodowo-tyrystorowy mostek prostowniczy, M - silnik szeregowy prądu stałego, ST - sterownik, TS - przekładnik prądowy, TG - tachoprądnica, SP - styczniki przełączające biegunowość napięcia twornika

Do sterowania tyrystorów w zestawie prostowniczym P służy elektroniczny sterownik ST wytwarzający impulsy zapłonowe. Wprowadzenie w obwód potencjometru R_B dodatkowego sygnału prądowego z przekładnika TS, wartości zadanej prądu, sygnału prędkościowego prądniczki tachometrycznej TG i wartości zadanej prędkości, pozwala na dowolne nastawienie górnej granicy obciążenie silnika trakcyjnego oraz jego prędkości obrotowej i uzyskanie całej rodziny charakterystyk mechanicznych zawartych pomiędzy wielkościami zadanymi.

W ten sposób zapewniony jest rozruch i jazda elektrowozu przy zachowaniu najkorzystniejszych charakterystyk trakcyjnych bez udziału maszynisty. Do zmiany kierunku jazdy oraz przejścia na hamowanie przeciwprądem elektrowozu służy styczniko-przerywnik SP, który umożliwia przełączenie uzwojenia twornika w silniku trakcyjnym. Hamowanie przeciwprądem odbywa się przy płynnie regulowanej wartości przeciwnapięcia.

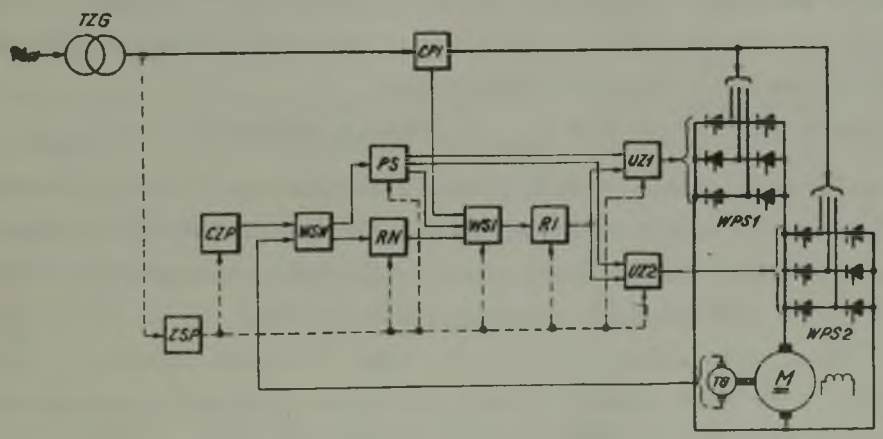
Tyrystorowe układy sterowania oprócz rozwiązań modelowych, zastosowane zostały do konkretnych elektrowozów dołowych. Układ pulsowego sterowania, zastosowano w elektrowozie akumulatorowym typu Ldag o mocy 11 kW, który jest w próbnej eksploatacji na kop. "Brzeszcze", natomiast układ sterowania przez zmianę opóźnienia kąta zapłonu na elektrowozie przewodowym typu Ld 10 o mocy 34 kW, znajdującym się w eksploatacji w kop. "Komuna Paryska".

4.2. Układ regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego ze wzbudzeniem obcym

Znane są bardzo dobre własności regulacyjne silnika prądu stałego o wzbudzeniu obcym zasilanego z prądnicy Leonarda i wyposażonego w sprzężenia zwrotne kształtujące charakterystyki zewnętrzne silnika. Z uwagi na konieczność dwukrotnego prze-

twarzania energii elektrycznej na mechaniczną i odwrotnie wskaźniki ekonomiczne zespołu Leonarda nie są jednak zadowalające. Wprowadzając w miejsce prądnicy Leonarda tyrystorowy prostownik sterowany o znacznie większej sprawności z możliwością rewersji kierunku napięcia wyjściowego i z możliwością rewersji kierunku przepływu energii (przy prądnicowym hamowaniu silnika), otrzymuje się ekonomiczny statyczny układ zasilania silnika o bardzo dobrych własnościach regulacyjnych.

Biorąc pod uwagę potrzeby przemysłu opracowano w Katedrze Maszyn Elektrycznych przy współpracy z Fabryką Aparatów Elektrycznych "Apena" prototypowe układy zasilania silników prądu stałego przeznaczone do produkcji seryjnej. Schemat blokowy takiego układu przedstawiono na rys. 12. Układ zapewnia sta-



Rys. 12. Schemat blokowy tyrystorowego układu regulacji prędkości obrotowej i prądu twornika silnika prądu stałego o wzbudzeniu obcym
(oznaczenia podzespołów układu podano w tekście)

bilizację prędkości obrotowej silnika z dokładnością ± 1% przy czym poziom stabilizowanej prędkości może być nastawiany w zakresie od zera do prędkości znamionowej dla obu kierunków wirowania silnika. Odcięcie prądowe jest nastawialne w granicach

0,8 ÷ 2 prądu znamionowego silnika. Układ napędowy posiada bardzo korzystne wskaźniki regulacyjne w stanach nieustalonych przy dużej sprawności. Ważną zaletą układu jest możliwość pracy hamulcowej ze wzrotem energii do sieci.

Silnik prądu stałego M jest zasilany poprzez transformator z trójfazowej sieci napięcia przemiennego z tyrystorowych wzmacniaczy pełnosterownych WPS1 - WPS2 pracujących w układzie przeciwrównoległym. W układzie regulacji zastosowano dwie pętle sprzężenia zwrotnego:

- ujemne sprzężenie prędkościowe
- ujemne sprzężenie prądowe

Sprzężenie prędkościowe zapewnia stabilizację prędkości obrotowej silnika. Sprzężenie prądowe wyzyskano do odcięcia prądowego po przekroczeniu nastawialnej wartości zadanej. Układ spełnia zatem dwie funkcje regulacyjne:
funkcję podstawową $n = n_{zad}$ i funkcję nadrzędną $I \leqslant I_{zad}$.

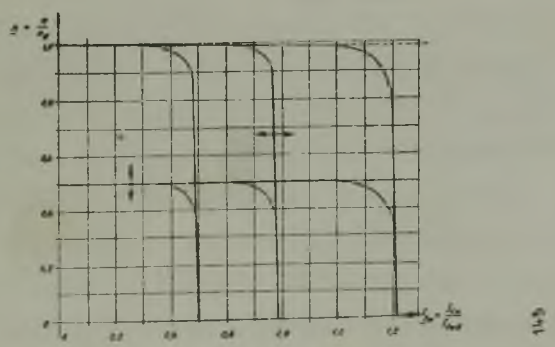
W celu zrealizowania tych funkcji zastosowano w układzie tranzystorowych wzmacniaczy wstępnych aktywne korektory liniowe o nastawialnych własnościach regulacyjnych proporcjonalno-całkujących z nastawialnym pułapem wysterowania.

Na wejście układu regulacji (rys. 12 węzeł sumacyjny prędkości WSN) jest podany sygnał prędkości zadanej z członu zadającego CZP oraz napięcie tachoprądnicy TG jako sygnał regulowanej prędkości obrotowej silnika. W członie WSN następuje porównanie prędkości obrotowej zadanej z rzeczywistą, a błąd regulacji jest podany do korektora (regulatora) prędkości RN. Wielkość wyjściowa korektora RN jest sygnałem wartości zadanej prądu odcięcia. Jeśli prąd twornika przekracza zadaną wartość prądu odcięcia, następuje w węźle sumacyjnym prądu WSI porównanie sygnału wartości zadanej prądu odcięcia z sygnałem prądu twornika otrzymanym w członie pomiaru CPI. Jeśli prąd tworni-

ka jest mniejszy od prądu odcięcia, korektor RI jest sterowany tylko błędem regulacji prędkości obrotowej. W zależności od znaku błędu regulacji korektor steruje układ zapłonowy bądź UZ1 bądź też UZ2 powodując zmianę kąta zapłonu tyrystorów prostownika a tym samym zmianę napięcia zasilania twornika silnika w kierunku zmniejszenia błędu regulacji.

W układzie regulacji zastosowano bezstykowy przełącznik sterujący PS, który zapewnia wzajemną blokadę prostowników tyrystorowych zabezpieczając przed równoczesnym wysterowaniem obu wzmacniaczy WPS1 i WPS2. Przełącznik ten steruje ponadto węzeł sumacyjny WSI powodując zmianę biegunowości sygnału prądu twornika przy zmianie kierunku wirowania silnika i zapewnia w ten sposób niezmienność znaku sprzężenia prądowego. Przełącznik jest sterowany uchybem regulacji prędkości obrotowej.

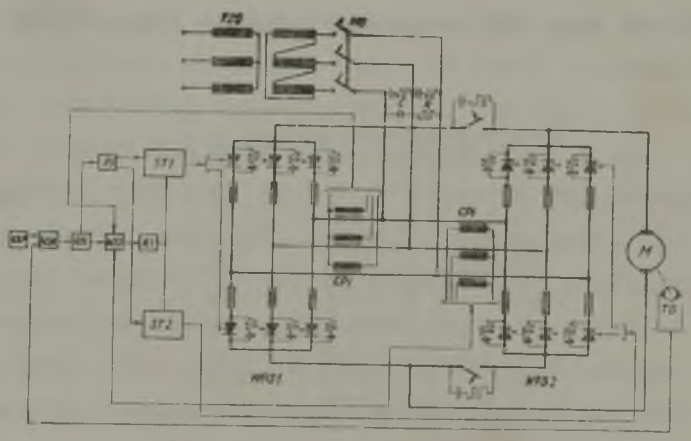
Opisany układ jest produkowany seryjnie w Fabryce Aparatów Elektrycznych "Apena". Układy seryjne są przystosowane do zasilania silników o znamionowym napięciu twornika 220V bądź 440V i o mocy znamionowej do 100 kW z trójfazowej sieci prądu przemiennego 380V, 50Hz. Rys. 13 przedstawia zmierzone charakterystyki zewnętrzne silnika prądu stałego zasilanego z tyrystorowego układu typu TZP produkcji F.A.E. - "Apena".



Rys. 13. Charakterystyki zewnętrzne silnika prądu stałego o wzbudzeniu obcym zasilanego z układu wg rys. 12

Od szeregu lat czynione były próby zastąpienia wirujących przetwornic maszynowych zespołu Leonarda maszyn wyciągowych w górnictwie przez statyczne układy prostownicze. Wprowadzone zagranicą prostowniki rtęciowe nie znalazły szerszego zastosowania z uwagi na niepewny w eksploatacji układ zapłonowy i układ wzbudzenia prostownika, oraz z uwagi na skłonność do zapłonów wstecznych przy głębokim wysterowaniu. Rozwój tyrystorów stworzył dopiero nowe możliwości budowy nowoczesnych układów zasilania maszyn wyciągowych.

Zachęceni dobrymi wynikami eksploatacyjnymi tyrystorowego układu zasilania silnika o wzbudzeniu obcym Katedra Maszyn Elektrycznych i Zakłady Konstrukcyjno-Mechanizacyjne Przemysłu Węglowego przystąpiły do opracowania tyrystorowego układu zasilania stałoprądowego napędu maszyn wyciągowych. W wyniku prac wspólnie prowadzonych od r. 1967 wykonano tyrystorowy układ do zasilania i sterowania maszyny wyciągowej o mocy 500 kW dla Kopalni "Lenin", którego przekazanie do eksploatacji jest przewidziane w 1970 r. Schemat ideowy układu jest przedstawiony na rys. 14. Funkcje regulacyjne korektorów RN i RI w prędkościo-



Rys. 14. Schemat tyrystorowego układu zasilania i regulacji stałoprądowego napędu maszyny wyciągowej
(oznaczenie podzespołów układu jak dla rys. 12)

wym i prądowym sprzężeniu zwrotnym są analogiczne jak w schemacie ideowym na rys. 12. Wyłącznik szybki WS odcina tor silnoprądowy twornika silnika napędowego od źródła zasilania. Prędkość zadana jest programowana przez aparat krzywkowy. W toku są prace zmierzające do zastąpienia aparatu krzywkowego generatorem funkcji zadającej.

5. Tyrystorowe przemienniki częstotliwości do zasilania silników prądu przemiennego

Rozwój układów przetwarzających przeznaczonych dla napędów z silnikami prądu stałego, stworzył podstawę do badań nad możliwością tyrystorowego zasilania silników asynchronicznych. Zastosowanie w napędach silnika asynchronicznego umożliwia stworzenie układu napędowego, który nie wymaga wysoko wykwalifikowanej obsługi i z uwagi na nie występowanie komutatota może pracować bezpiecznie w pomieszczeniach zagrożonych atmosferą wybuchową, w zanurzeniu, a także w ośrodkach aktywnych chemicznie i promieniotwórczo. Dzięki nowoczesnym układom sterowania można uzyskać własności regulacyjne silników asynchronicznych podobne do tych jakie uzyskuje się w przypadku zastosowania silników prądu stałego.

Podstawowy i najbardziej ekonomiczny sposób ciągłej regulacji prędkości obrotowej silnika asynchronicznego uzyskuje się przy zmianie częstotliwości napięcia zasilającego. Jest to tzw. częstotliwościowe sterowanie prędkości obrotowej. Do zasilania silnika asynchronicznego napięciem o regulowanej częstotliwości mogą być zastosowane przetwornice statyczne, zwane przemiennikami częstotliwości. Przemienniki statyczne dzieli się na bezpośrednie i pośrednie. Przemienniki bezpośrednie są zasilane z sieci przemysłowej i przetwarzają napięcie tej sieci na napięcie o częstotliwości obniżonej, bez uprzedniej zamiany na na-

pięcie stałe. Przemienniki pośrednie zawierają falowniki przemieniające napięcie stałe na napięcie przemienne. Napięcie stałe, w przemienniku pośrednim, jest wyprostowanym napięciem sieci przemysłowej.

5.1. Bezpośredni przemiennik częstotliwości

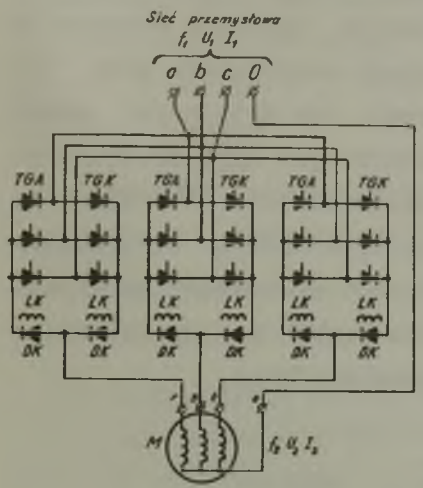
Tyrystorowy bezpośredni przemiennik częstotliwości jest zbudowany przy wyzyskaniu trójfazowego układu prostownika rewersyjnego, który może pracować bądź w charakterze prostownika bądź inwertora dla obu kierunków przepływu prądu obciążenia.

Jeżeli odpowiednio skonstruowany układ sterowania będzie powodować zmianę opóźnienia zapłonu w zakresie $\pm \frac{\pi}{2}$, względem kąta początkowego $\frac{\pi}{2}$, na wyjściu uzyska się pełną rewersję średniej wartości napięcia wyprostowanego. Aby ograniczyć zwarciowy prąd wyrównawczy między grupą anodową i katodową układ sterowania musi zapewnić analogiczną zmianę napięcia wyprostowanego grupy anodowej i katodowej prostownika. Zmiana kątów opóźnienia w poszczególnych grupach prostowników umożliwia zmianę średniej wartości napięcia wyprostowanego według funkcji sinusoidalnej. Częstotliwość z jaką będzie powtarzać się zmiana kątów zapłonu w obu grupach prostowników, określa częstotliwość napięcia wyjściowego.

Przy rezystancyjnym obciążeniu przemiennika obie grupy prostowników pracują jako prostowniki. Obciążenie impedancyjne sprawia, że prąd i napięcie na wyjściu przemiennika są przesunięte w fazie o kąt obciążenia φ_o. W przypadku tym, poszczególne grupy prostowników pracują jako prostowniki, gdy funkcje napięcia i prądu na wyjściu mają ten sam znak. Gdy znaki tych funkcji są przeciwne, układ pracuje jako inwertor.

Trójfazowy tyrystorowy przemiennik częstotliwości zawiera w części siłowej identyczne trzy układy prostowników sterowa-

nych dających łącznie z przewodem zerowym sieci zasilającej, układ zasilania silnika asynchronicznego (rys. 15). Na rysunku 15 nie zaznaczono bezpieczników ultraszybkich, zabudowanych w szereg z każdym tyrystorem i ochrony tyrystorów przed przepięciami. Stosowanie dławików LK w obwodzie grupy anodowej i katodowej prostownika, w celu ograniczenia prądu wyrównawczego, jest kłopotliwe. Powoduje zwiększenie strat w układzie na skutek rezystancji wewnętrznej dławików i ponadto wprowadza reaktancję wewnętrzną przemiennika, która sumuje się z reaktancją odbiornika. Można obejść się bez kłopotliwych dławików wyrównawczych przy wybiorczym cyklicznym eliminowaniu impulsów zapłonowych tej grupy prostowników, która aktualnie nie przewodzi prądu obciążenia. Blokada impulsów załonowych jest sterowana prądem przewodzącej grupy prostowników. Każda faza przemiennika zawiera sześć tyrystorów i dwie diody DK spełniające rolę boczników, z których jest pobierany sygnał napięciowy, pojawiający się w czasie przepływu prądu przez daną grupę prostowników.

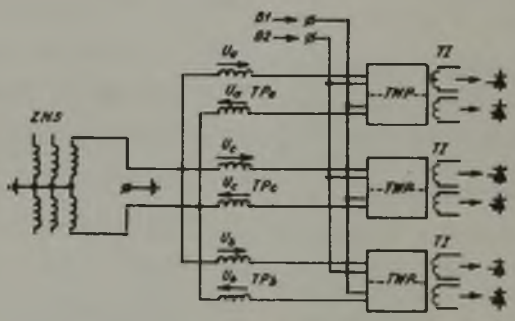


Rys. 15. Część siłowa trójfazowego tyrystorowego bezpośredniego przemiennika częstotliwości zasilającego stojan silnika asynchronicznego

M - trójfazowy silnik asynchroniczny, TGA - tyrystory grupy anodowej prostownika pełnosterownego, TGK - tyrystory grupy katodowej prostownika pełnosterownego, LK - dławiki ograniczające prąd wyrównawczy, DK - diody prostownicze

Schemat ideowy układu sterowania jednej fazy przemiennika przedstawia rys. 16. Każdy z tyrystorów posiada oddzielny układ zapłonowy z transformatorem impulsowym na wyjściu. Do układu

sterowania doprowadza się trójfazowe napięcie synchronizujące z sieci zasilającej o częstotliwości kątowe ω_1 oraz przemienne napięcie sterujące o częstotliwości kątowej ω, która zadaje wartość napięcia wyjściowego i jego częstotliwość oraz sygnał z układu blokującego pracę jednej z grup prostowników w trakcie pracy drugiej. Układ sterowania wykazuje praktycznie pomijalne opóźnienie. Źródłem napięcia sterującego może być trójfazowy generator maszynowy (selsyn), lub trójfazowy generator statyczny. Wadą generatorów maszynowych jest trudność uzyskania napięć w zakresie małych częstotliwości zbliżonych do zera, oraz ich budowa złożona z dwóch mikromaszyn wirujących. Wad tych nie posiada generator statyczny. Zbudowano trójfazowy generator statyczny, który wytwarza napięcie o kształcie trapezowym zbliżonym do przebiegu sinusoidalnego.



Rys. 16. Schemat ideowy układu sterowania tyrystorów jednej fazy przemiennika z rys. 15

ZNS - człon zadający wartość i częstotliwość napięcia wyjściowego przemiennika, TI - uzwojenie transformatorów wyjściowych wzmacniacza TWP, B1,B2 - wejścia sygnału blokującego impulsy TWP - transformatorowy wzmacniacz przerzutnikowy, TPa, TPb,TPc uzwojenie wtórne transformatorów pomocniczych zasilanych z sieci przemysłowej, U_a, U_b, U_c - napięcia faz a,b,c uzwojeń wtórnych transformatorów pomocniczych

Mimo utrzymania średnich wartości napięcia w obu grupach tyrystorów na tym samym poziomie, pojawiają się przemienne prądy wyrównawcze w rewersyjnym układzie prostownika, ponieważ chwilowe wartości w obu grupach nie są jednakowe. Prądy te można ograniczyć przez włączenie dławików lub zlikwidować całkowicie przez wprowadzenie układu blokującego wygaszającego impulsy zapłonowe alternatywnie grupy anodowej bądź katodowej. Układ blokujący powinien:

a) blokować impulsy w obydwu grupach prostowników gdy przemiennik nie jest wysterowany,

b) uniemożliwić równoczesną pracę obu grup prostowników zapobiegając zwarciu w sieci zasilającej,

c) umożliwić pracę tej grupie prostowników, która aktualnie przewodzi prąd zarówno w charakterze prostowniczym jak i inwertorowym,

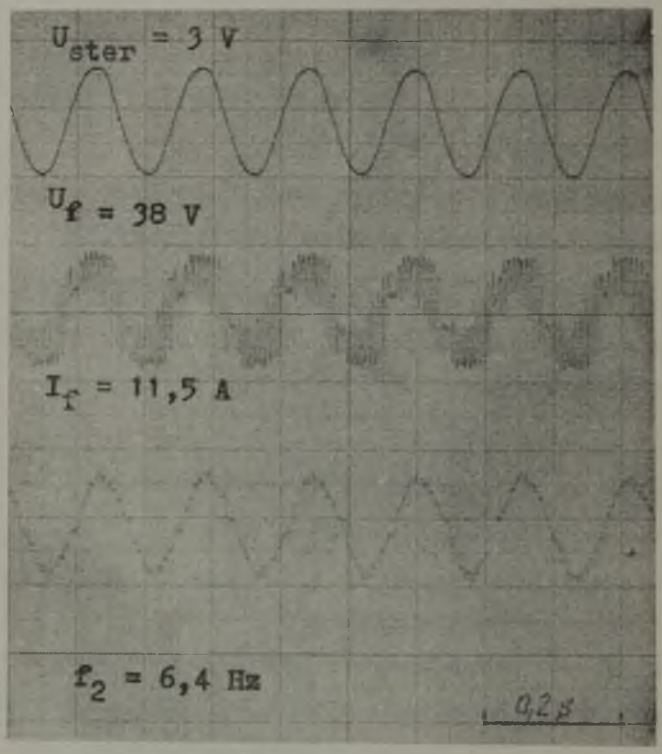
d) umożliwić odzyskanie zdolności zaporowej przez tyrystory tej grupy prostowników, która zakończyła pracę, zanim pojawią się impulsy w drugiej grupie.

Powyższe wymagania spełnia blokujący człon logiczny, zastosowany w opracowanym układzie napędowym.

Urządzenie modelowe zostało zbudowane na tyrystorach, których średni prąd obciążenia wynosi 25A. Umożliwia to trwałe obciążenia przemiennika prądem równym około 40A. Do obciążenia przemiennika zastosowano silnik asynchroniczny zwarty 7,5 kW, U_{fN} = 220 V, I_{fN} = 18 A. Rys. 17 przedstawia przebiegi napięcia sterującego oraz napięcia i prądu jednej fazy silnika przy obciążeniu.

Zbudowany przemiennik pozwala na płynną zmianę częstotliwości wyjściowej od zera do około 40% częstotliwości przemysłowej. W pobliżu górnego zakresu częstotliwości krzywa średniego napięcia wyjściowego różni się od przebiegu sinusoidalnego.

Podwyższenie górnej granicy zakresu zmian częstotliwości można otrzymać przez zwiększenie liczby faz zasilania przemiennika z sieci przemysłowej. Maleje wówczas stopień wyzyskania tyrystorów, który jest największy w układzie trójfazowym. Hamowanie silnika odbywa się z odzyskiem energii.



Rys. 17. Przebiegi napięcia sterującego U_{ster} oraz napięcia U_f i prądu I_f jednej fazy silnika przy obciążeniu, zasilanego z bezpośredniego przemiennika częstotliwości

Można uzyskać stałą zmianę prędkości obrotowej odpowiadającą stałemu poślizgowi bezwzględnemu, przy przejściu od biegu jałowego do obciążenia znamionowym momentem w całym zakresie zmian częstotliwości.

Przy zasilaniu silnika z przemiennika występują dodatkowe straty w silniku na skutek odkształcenia przebiegów prądu i napięcia. Przy optymalizacji wymiarów geometrycznych maszyn asynchronicznych zasilanych z przemiennika uwzględnia się ten wzrost strat dodatkowych. Mniejsze straty dodatkowe otrzymuje się przy zasilaniu 6-fazowym.

Za pomocą sprzężeń zwrotnych obejmujących silnik asynchroniczny i przemiennik częstotliwości można kształtować charakterystykę zewnętrzną M = f(n) napędu. Ponieważ moment obrotowy silnika można przedstawić jako funkcję prądu stojana i poślizgu można wprowadzić jako wielkość wyjściową wyzyskaną do sprzężenia zwrotnego-prędkość obrotową silnika i prąd obciążenia. Jako wielkości wyjściowe sprzężenia stoją w przemienniku do dyspozycji częstotliwość i napięcie wyjściowe.

Układ przemiennika opracowany przez Katedrę Maszyn Elektrycznych przy współpracy z Biurem Projektów Hutniczych "Biprohut" jest przewidziany do produkcji seryjnej i będzie zasilał silniki asynchroniczne do napędu samotoków hutniczych o dużej globalnej mocy zainstalowanej (rzędu MW).

Przewiduje się, że przemiennik o nastawianej obniżonej częstotliwości do około 5 Hz będzie zasilał silniki asynchroniczne specjalnej konstrukcji o zwiększonym poślizgu krytycznym. Przewiduje się również zastosowanie bezpośredniego przemiennika częstotliwości do asynchronicznych napędów maszyn wyciągowych dla uzyskania małej prędkości dojazdowej w szybie.

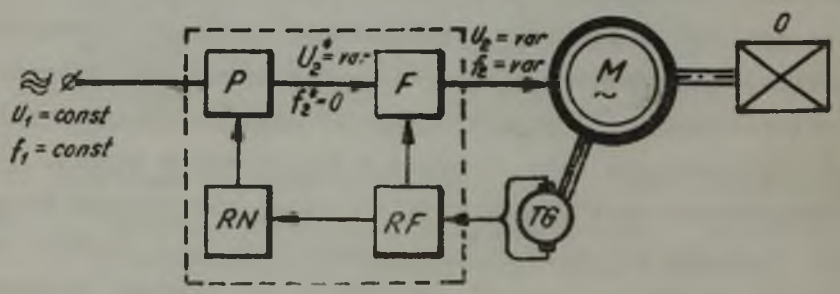
Bezpośredni przemiennik częstotliwości zastosowano do zasilania twornika silnika synchronicznego uzyskując bardzo dobre własności dynamiczne napędu. Wyzyskuje się rozruch frekwencyjny silnika przez zmianę częstotliwości statycznego generatora sterującego.

5.2. Pośredni przemiennik częstotliwości (falownik)

Ciągłą regulację prędkości obrotowej silników asynchronicznych klatkowych można uzyskać zmieniając częstotliwość źródła zasilania.

Tyrystorowe pośrednie przemienniki częstotliwości umożliwiają płynną regulację w szerokim zakresie częstotliwości i napięcia, wykazują dużą sprawność, niewystępowanie części ruchomych wirujących oraz stosunkowo dużą niezawodność. Statyczne tyrystorowe przemienniki częstotliwości znalazły zastosowanie w układach automatycznej regulacji prędkości obrotowej silników indukcyjnych.

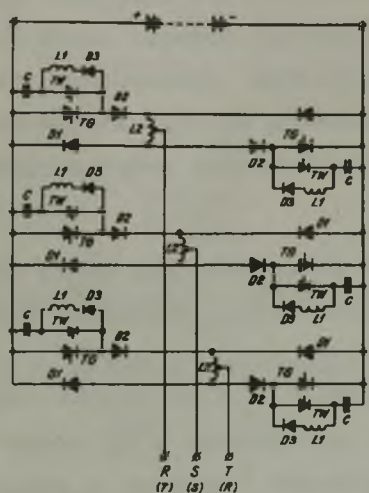
W układzie przedstawionym na rys. 18 zastosowano do wytwarzania prądu przemiennego falownik niezależny z wymuszonym komutacją i ze sterowaniem obcym. Prąd przemienny zostaje najpierw wyprostowany przez prostownik sterowany pełnookresowy P, po czym jest przetwarzany w falowniku niezależnym F. Układ sterowania RN prostownika P umożliwia zmiany napięcia wyjściowego w szerokim zakresie z możliwością regulacji w funkcji częstotliwości wyjściowej i przebiegu momentu silnika sterowanego.



Rys. 18. Schemat blokowy pośredniego przemiennika częstotliwości przeznaczonego do zasilania silnika asynchronicznego

M - silnik asynchroniczny, O - obciążenie silnika, F - falownik, P - prostownik, RN - regulator napięcia, RF - regulator częstotliwości, TG - tachoprądnica

Do zasilania silnika asynchronicznego zastosowano trójfazowy falownik F o sterowaniu niezależnym i o wygaszeniu indywidualnym. Schemat ideowy tego falownika przedstawiono na rys. 19. Układ zapewnia stabilną pracę przy zmianie prędkości obrotowej i momentu obciążenia. Każdemu tyrystorowi głównemu jest przyporządkowany układ gaszący, dzięki któremu moment załączenia i wyłączenia każdej fazy jest niezależny od załączenia następnych faz.



Rys. 19. Schemat ideowy falownika o sterowaniu niezależnym i o indywidualnym wygaszaniu tyrystorów

TG - tyrystor główny, TW - tyrystor wygaszający, D1 - dioda umożliwiająca przepływ mocy z odbiornika do źródła, D2 - dioda zaporowa, D3 - dioda komutacyjna, C - pojemność komutacyjna, L1 - dławik komutacyjny, L2 - dławik fazowy

Układ sterujący RF falownika został rozwiązany w oparciu o technikę analogowo-cyfrową. Układ został tak rozwiązany, że może być wykorzystany do sterowania falowników niezależnych o różnej konfiguracji poprzez wymianę niektórych podzespołów cha-

rakterystycznych dla współpracującego falownika. Układ sterujący falownik umożliwia:

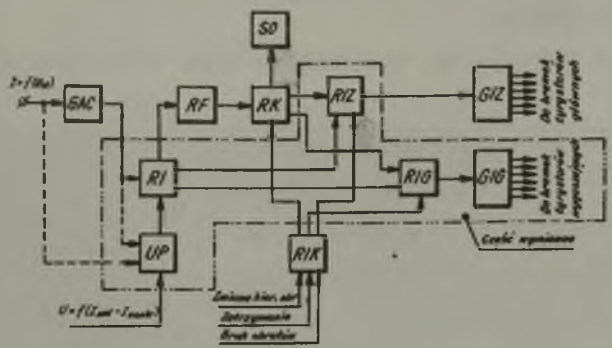
- pracę w układzie regulacji ręcznej lub automatycznej,
- płynną zmianę częstotliwości wyjściowej falownika do 100 Hz,
- zmianę kierunku obrotów silnika,
- wyłączanie napięcia wyjściowego falownika,
- ograniczenie skutecznej wartości prądu obciążenia falownika.

Schemat blokowy układu sterowania falownika niezależnego przedstawiono na rys. 20. Schemat elektryczny tego układu jest podzielony na dwie zasadnicze części: część stałą, przystosowaną do pracy z wszelkiego typu falownikami trójfazowymi oraz część wymienną przystosowaną do typu sterowanego falownika. Impulsy z generatora GAC przechodzą poprzez rozdzielacz impulsów RI i sterują:

- rozdzielacz impulsów gaszących RIG, który dalej steruje generator impulsów gaszących GIG i pośrednio bramki tyrystorów gaszących,
- rozdzielacz fazowy, RF,
- rozdzielacz impulsów zapłonowych RIZ, który z kolei steruje bramki tyrystorów głównych impulsami z generatora impulsów zapłonowych GIZ.

Regulacja napięcia wyjściowego falownika odbywa się w przyjętym układzie poprzez sterowanie impulsowe napięcia wyjściowego każdej z faz. Zastosowano w tym przypadku tzw. regulację z odcięciem, polegającą na wyłączeniu napięcia wyjściowego falownika z chwilą przekroczenia wartości zadanej prądu silnika. Zadanie to spełnia układ poziomowania UP, którego sygnały wyjściowe zsynchronizowane z rozdzielaczem impulsów RI powodują cykliczne wyłączanie i załączanie tyrystorów głównych.

Napięcie wyjściowe przemiennika jest odkształcone w szczególności przy zastosowaniu stałej wartości pojemności komutacyjnej. Kształt krzywej napięcia wyjściowego zależy od rodzaju odbiornika (R,L,C). Na rys. 21 przedstawiono przebiegi napięcia wyjściowego przemiennika przy obciążeniu rezystancyjnym oraz przy obciążeniu silnikiem indukcyjnym 10 kW.



Rys. 20. Schemat blokowy układu sterowania falownika niezależnego

RIK - rozdzielacz impulsów kierunkowych, RK - rozdzielacz kierunkowy, SO - sygnalizacja optyczna. Pozostałe oznaczenia podano w tekście

Wszystkie układy, zarówno sterujące prostownik oraz falownik niezależny zostały wykonane na tranzystorach. Widok szafy tyrystorowego przemiennika przedstawia rys. 22.

Omówiony układ tyrystorowej przetwornicy częstotliwości jest przewidziany do automatycznej regulacji prędkości silnika asynchronicznego. Układowi regulacji prędkości silnika asynchronicznego zasilanego z przemiennika częstotliwości można narzucić zadanie:

- płynnej regulacji częstotliwości wyjściowej falownika oraz napięcia zasilania silnika asynchronicznego

$$U_o = F(M_o, f_1, f_2, J),$$

gdzie:

U_o - napięcie zasilania silnika,

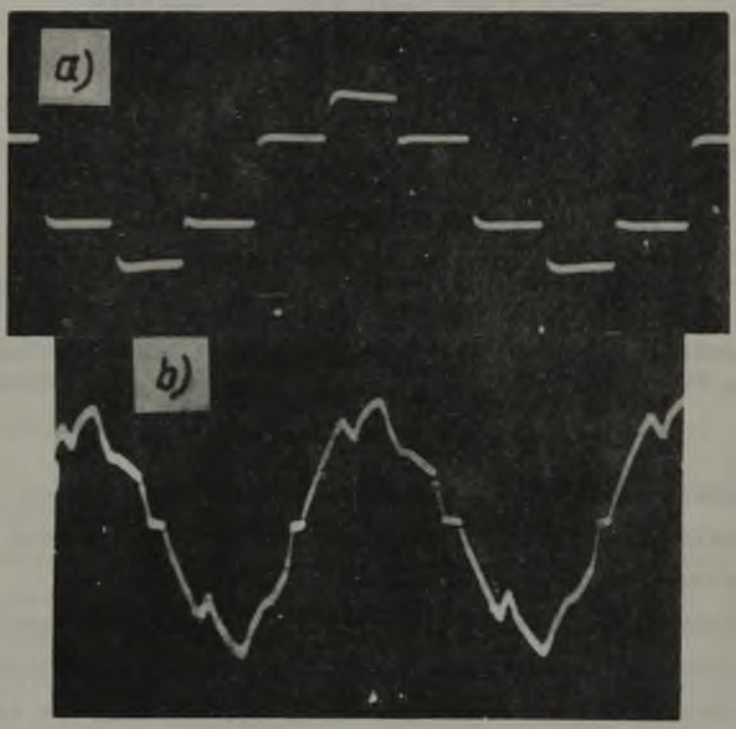
M_o - moment obciążenia,

f_1 - częstotliwość stojana,

f_2 - częstotliwość prądu wirnika,

J - moment bezwładności mas wirujących.

- stabilizacji częstotliwości i napięcie silnika niezależnie od zmian obciążenia,
- sterowania rozruchem, hamowaniem oraz nawrotem silnika.



Rys. 21. Oscylogram napięcia wyjściowego tyrystorowego pośredniego przemiennika częstotliwości obciążonego odbiornikiem rezystancyjnym - a), oraz zasilającego silnik asynchroniczny - b)

Rys. 22. Widok szafy pośredniego tyrystorowego przemiennika częstotliwości

Przy zmianach regulowanej prędkości obrotowej silników asynchronicznych można utrzymywać alternatywnie stałą wartość

a) stosunku napięcia zasilania silnika do częstotliwości

$$\frac{U_o}{f} = \text{const},$$

b) strumienia magnetycznego w szczelinie silnika ϕ = const,

c) prądu stojana.

Odpowiedni schemat regulacji zależy od przyjętej alternatywy sterowania w poszczególnych stanach pracy silnika.

Doświadczenia Katedry uzyskane na modelu przemiennika będą wyzyskane do budowy przemiennika dużej mocy zasilającego maszynę wyciągową w górnictwie.

LITERATURA

[1] Paszek W., Zygmunt J.: Podstawy teoretyczne tyrystorów i znaczenie ekonomiczne ich zastosowania w przemyśle. Gospodarka Paliwami i Energią nr 7, 8/1969.

[2] Smoliński K.: Optymalizacja przebiegów regulacyjnych układu fazowej kompoundacji wzbudzenia generatorów synchronicznych z dławikiem amplistatowym. Praca doktorska, Katedra Maszyn Elektrycznych Pol. Śl. 1968.

[3] Paszek W.: Perspektywy rozwojowe regulacji wzbudzenia generatorów synchronicznych. Przegląd Elektrotechniczny nr 10/1967.

[4] Paszek W.: Zastosowanie wzmacniaczy magnetycznych do układów regulacji napięcia. PWN - Komitet Elektrotechniki PAN W-wa 1967.

[5] Paszek W., Kubek J., Żywiec A., Mizia W.: Regulacja prędkości i napięcia w maszynach elektrycznych za pomocą tyrystorów. Przegląd Elektrotechniczny nr 8/1965.

[6] Drysz P., Nycz E., Paszek W.:-Model analogowy imitujący zjawiska zachodzące podczas działania komory elektrofiltru. Ochrona Powietrza, nr 2/69.

[7] Paszek W., Drysz P., Nycz E.: Wybór optymalnego zasilania prostownikowego elektrofiltrów. Gospodarka Paliwami i Energią (w druku).

[8] Drysz P., Nycz E.; Wytyczne doboru zespołów zasilających elektrofiltry. Ochrona Powietrza nr 4/1967.

[9] Paszek W., Szczuki F.: Tyrystorowy układ rozruchu i regulacji prędkości obrotowej silnika trakcyjnego. Prace IV Krajowej Konferencji Automatyki, Kraków, tom 7, 1967.

[10] Paszek W., Szczuki F.: Tyrystorowe układy sterowania elektrowozów dołowych. Gospodarka Paliwami i Energią,nr 10/11, 1969.

[11] Paszek W., Żywiec A, Mizia W., Szczuki F.: Tyrystorowy układ zasilania silnika prądu stałego o wzbudzeniu obcym. Gospodarka Paliwami i Energią (w druku).

[12] Kubek J., Żywiec A., Mizia W.: Tyrystorowy napęd silnika prądu stałego. Prace IV Kraj. Konferencji Automatyki.Kraków, tom 7/1967.

[13] Paszek W., Zygmunt J., Siwiński J.: Tyrystorowy bezpośredni przemiennik częstotliwości do zasilania silnika asynchronicznego. Gospodarka Paliwami i Energią (w druku).

[14] Zygmunt J.: Statyczny przemiennik częstotliwości do zasilania silnika asynchronicznego napięciem o zmniejszonej i regulowanej częstotliwości. Przegląd Elektrotechniczny nr 8/1965.

[15] Zygmunt J.: Regulacja prędkości obrotowej silnika bezkomutatorowego prądu zmiennego za pomocą prostowników sterowanych. Praca doktorska, Katedra Maszyn Elektrycznych Pol.Śl. 1964.

ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Р е з ю м е

Рассмотрено труды, выполненные до настоящего времени Кафедрой Электрических Машин при Силезском Политехническом Институте в области применения тиристоров в системах регулирования электрических машин и трансформаторов. Указано схемы, принципы действия, а также приведены основные свойства систем: регулирования возбуждения синхронных генераторов, импульсного регулирования скорости вращения тяговых двигателей постоянного тока, регулирования питания электрофильтров, регулирования управляемых выпрямителей, предназначенных для зарядки аккумуляторных батарей, регулирования момента и скорости вращения реверсивного привода с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, регулирования подъемных установок, статических прямо и косвенно действующих преобразователей частоты, предназначенных для питания асинхронных двигателей.

Пополнением содержания статьи является список публикаций трудов Кафедры в рассматриваемой области.

APPLICATION OF THYRYSTORS IN ELECTRIC MACHINES

S u m m a r y

The previous eleborations of Electric Machines Department of Politechnika Śląska, in the field of application of thyrystors in control systems of electrical machines and transformers were discussed. The block diagrams were given, principles of operation and basic properties of the following systems were shown: control of synchronous generator excitation, pulsate control of speed of d.c. traction motors, control of rectifiers for storage batteries, control of torque and speed of reversible drive with separately excited d.c. motor, hoisting machines control and static frequency convertors for supply of asynchronous motors. The report is completed by the list of publications on above discussed subject.