

Nowoczesne przekształtnikowe układy napędowe prądu stałego maszyn wyciągowych z cyfrowym układem sterowania i zabezpieczeń

W artykule zostanie omówiony cyfrowy układ sterowania i zabezpieczeń przekształtników przeznaczonych do zasilania przekształtnikowych układów napędowych maszyn wyciągowych z silnikami prądu stałego. W artykule przedstawiono zagadnienia związane ze sterowaniem przekształtnika w oparciu o algorytmy sterowania 12-pulsowego sekwencyjnego oraz równoczesnego. Ponadto zostanie omówiony system sterowania maszyn wyciągowych dwusilnikowych największych mocy pracujących w układzie Punga oraz w układzie z dwoma obwodami głównymi, opracowany w ITI EMAG.

1. WPROWADZENIE

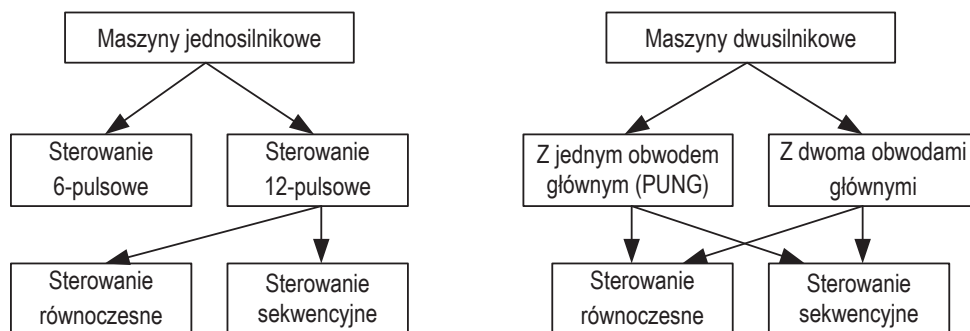
Jednym z najważniejszych obiektów w kopalniach głębinowych węgla kamiennego jest maszyna wyciągowa służąca do transportu szybowego. Podstawowym zadaniem technologicznym tego transportu w kopalniach jest podnoszenie urobku, opuszczanie i podnoszenie materiałów, maszyn i urządzeń oraz transport ludzi. Do wykonywania tych zadań służy maszyna wyciągowa. Do napędu maszyn wyciągowych stosuje się wszystkie podstawowe rodzaje silników elektrycznych: silniki prądu stałego i silniki prądu zmiennego – synchroniczne i asynchroniczne [1]. W instalacjach wyciągowych stosuje się następujące rodzaje układów napędowych:

- układ Leonarda,
- napęd asynchroniczny z regulacją rezystorową,
- tyrystorowy napęd prądu stałego (przekształtnikowy),
- napęd asynchroniczny w układzie kaskady tyrystorowej,
- napęd asynchroniczny z przemiennikiem częstotliwości,
- napęd cyklokonwertorowy z silnikiem synchronicznym lub asynchronicznym.

Największe krajowe maszyny wyciągowe napędzane są silnikami prądu stałego, które w maszynach sprzed kilkudziesięciu lat pracują w układzie Leonarda.

Maszyny te, zarówno ze względu na stan techniczny, jak i na niską sprawność, są obecnie modernizowane, a w ich układach napędowych stosowane są przekształtniki tyrystorowe prądu stałego.

W ITI EMAG opracowano nowoczesny układ sterowania i kontroli, pozwalający na sterowanie układami przekształtnikowymi typu TR-4 w różnych konfiguracjach. Układy te można podzielić ze względu na ilość zastosowanych silników napędowych (jeden lub dwa), ze względu na konfigurację przekształtnika (6-pulsowe, 12-pulsowe) oraz ze względu na sposób sterowania (sterowanie sekwencyjne lub równoczesne). Napędy przekształtnikowe prądu stałego posiadają większość zalet układów Leonarda, a ponadto mają wyższą sprawność. Wymagania stawiane przed nowoczesnym układem sterowania i kontroli zawierają między innymi: możliwość regulacji prędkości obrotowej w pełnym zakresie, tj. od $n=0$ do $n=n_N$, pracy czterokwadrantowej, tzn. pracy silnikowej i hamulcowej w obydwu kierunkach, wysokiej dynamiki napędu, możliwości bardzo wolnej jazdy w czasie prac szybowych, rewizji liny lub szybu, możliwości automatyzacji całego procesu transportu pionowego (załadunek, jazda maszyny i wyładunek urobku). Ponadto układ sterowania powinien zapewniać precyzyjną realizację zadanego diagramu prędkości jazdy oraz bardzo szeroki zakres monitorowania i kontroli wszystkich wielkości i parametrów istotnych w pracy napędu.



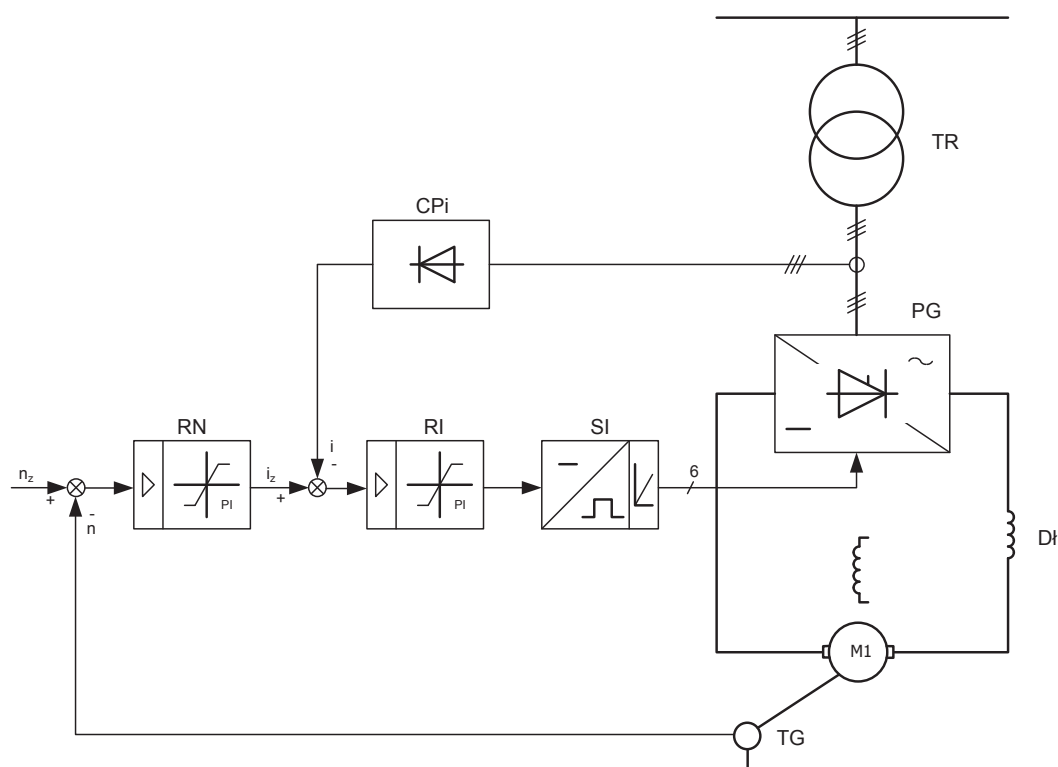
Rys. 1. Podział układów napędowych maszyn wyciągowych prądu stałego zasilanych z przekształtnika tyrystorowego

W napędach maszyn wyciągowych, w których silnik prądu stałego jest zasilany z przekształtnika tyrystorowego, prędkość obrotowa jest regulowana poprzez zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika. Napędy maszyn wyciągowych są napędami nawrotnymi, w związku z czym powinny umożliwiać pracę czterokwadrantową, tzn. pracę silnikową w obydwu kierunkach wirowania i pracę prądnicową (hamowanie), z oddawaniem energii elektrycznej do sieci zasilającej. Wymaganie to, czyli tzw. rewersja może być zrealizowane przez zmianę kierunku prądu w obwodzie głównym, bądź zmianę kierunku prądu w obwodzie wzbudzenia. Zmiana kierunku prądu w obwodzie głównym wymaga zastosowania podwójnej ilości przekształtników głównych, w związku z czym jest to układ kosztowny i rzadko stosowany. W układach zasilających silniki maszyn wyciągowych najczęściej stosowane są rozwiązania, w których zmiana kierunku wirowania silnika jest uzyskiwana przez zmianę kierunku prądu w obwodzie wzbudzenia silnika. Obwód twornika jest przyłączony do przekształtnika jednokierunkowego i prąd w tym obwodzie nie zmienia kierunku, natomiast obwód wzbudzenia jest zasilany z układu nawrotnego, przeciwnoległego. Dlatego istotnym jest, aby układ sterowania przekształtnika głównego zapewniał współpracę z przekształtnikiem wzbudzenia. Wszystkie te cele stawiają wysokie wymagania dla układu sterowania i kontroli przekształtnika. W dalszych punktach artykułu przedstawiono struktury układów regulacji maszyn wyciągowych, możliwe do zrealizowania w układzie opracowanym w ITI EMAG.

2. UKŁADY MASZYN WYCIĄGOWYCH JEDNOSILNIKOWYCH

Maszyny wyciągowe jednosilnikowe to najczęściej występujące instalacje w polskim górnictwie. Występują one w konfiguracjach 6-pulsowych lub 12-

pulsowych. Układ siłowy maszyn 6-pulsowych składa się z jednego przekształtnika (lub dwóch przy wymaganej większej obciążalności prądowej), który jest zasilany z transformatora dwuuzwojeniowego. W obwodzie głównym, zabezpieczonym wyłącznikiem szybkim znajduje się poza przekształtnikiem silnik napędowy. Układ 12-pulsowy można uzyskać przez szeregowe połączenie dwóch prostowników 6-pulsowych. Prostowniki te należy zasilić z dwóch transformatorów dwuuzwojeniowych (lub jednego transformatora trójuzwojeniowego) o różnych grupach połączeń (np. Yy0, Yd11), tak aby przesunięcie fazowe między napięciami uzwojeń wtórnych wynosiło 30° . Prostownik 6-pulsowy obciąża sieć zasilającą prądem o przebiegu niesinusoidalnym, co powoduje, że pojawiają się w nim wyższe harmoniczne od 5-tej włącznie. W celu zmniejszenia oddziaływania przekształtnika tyrystorowego na sieć zasilającą, stosuje się układy 12-pulsowe. W napędach prostownikowych stosuje się dynamiczną korekcję szeregową, polegającą na tworzeniu pętli sprzężeń zwrotnych, wzajemnie podporządkowanych przez wielkości zadające każdej pętli. Na podstawie stałych czasowych obejmowanych sprzężeniem obwodów, określa się szybkość działania poszczególnych pętli sprzężeń zwrotnych, a następnie podporządkowuje się obwody szybciej działające obwodom, które działają wolniej [1]. Podstawową konfigurację napędu prostownikowego maszyny z automatyczną regulacją daje zastosowanie dwóch sprzężeń zwrotnych, od prędkości i od prądu twornika. Pętla prądowa zapewnia kontrolę prądu twornika, w szczególności poprzez ograniczenie maksymalnej wartości sygnału zadającego prąd i pozwala na ustawienie dopuszczalnej wartości momentu w stanach dynamicznych, kształtując w ten sposób moment dynamiczny, a więc również przyspieszenie lub opóźnienie w ruchu obrotowym. Pętla prędkościowa kontroluje rzeczywistą wielkość prędkości. Pętla prądowa jest podporządkowana pętli prędkościowej, ponieważ napędy z silnikiem prądu stałego charakteryzują się większą



RN – regulator prędkości, RI – regulator prądu, SI – sterownik impulsów wyzwalających, CPi – przetwornik pomiaru prądu, TG – prądnica tachometryczna, PG – przekształtnik tyrystorowy główny, TR – transformator, Df – dławik

Rys. 2. Schemat strukturalny układu regulacji maszyny jednosilnikowej

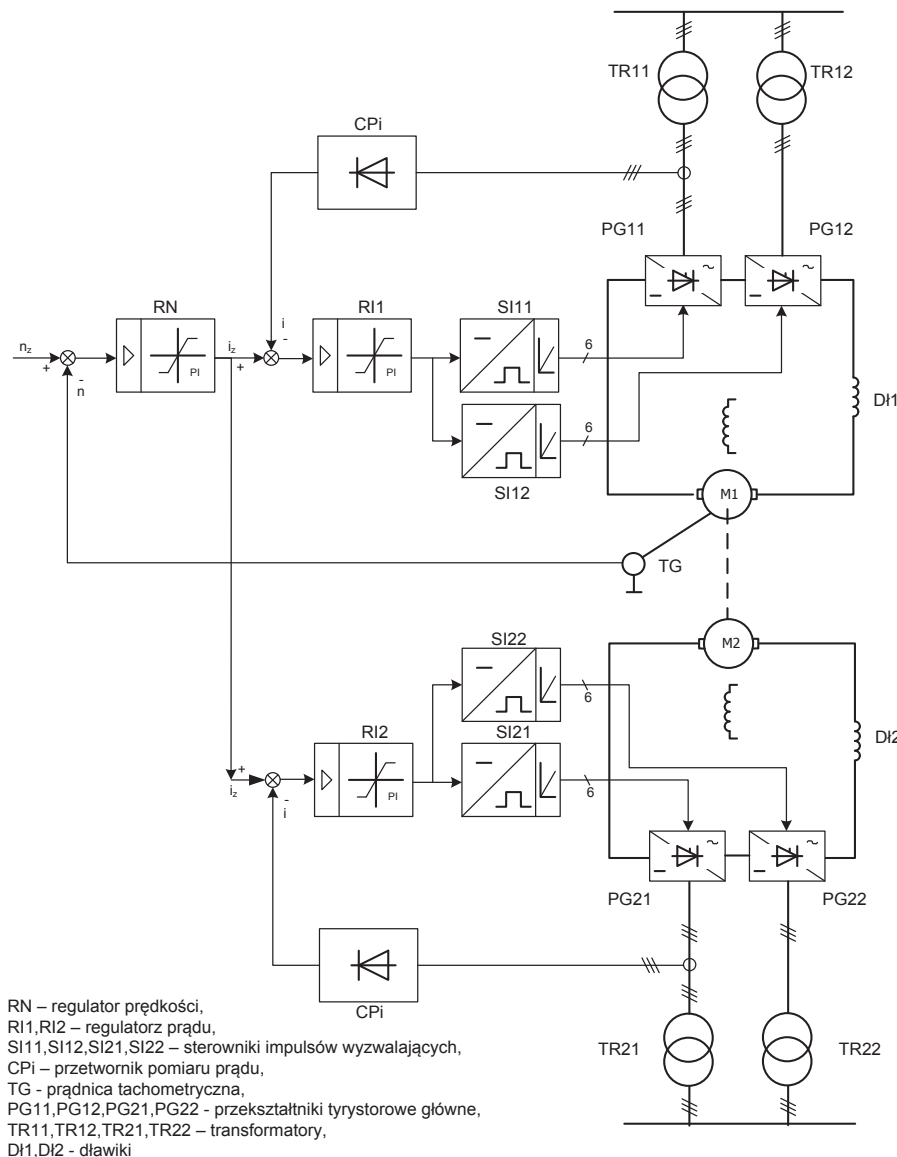
szybkością działania w obwodzie twornika, od dynamiki ruchu obrotowego, na co przede wszystkim mają wpływ moment bezwładności silnika i duże momenty bezwładności urządzenia napędzanego. Jest to szczególnie widoczne w napędach maszyn wyciągowych, gdzie stała czasowa elektromechaniczna jest większa od stałej czasowej elektromagnetycznej o co najmniej jeden rząd.

Na rys. 2 została przedstawiona struktura układu sterowania maszyny jednosilnikowej 6-pulsowej. Układ składa się z regulatora prędkości (RN), regulatora prądu (RI) oraz sterownika impulsów (SI). W przypadku maszyny 12-pulsowej w układzie sterowania znajduje się dodatkowy sterownik impulsów (SI), sterujący tyrystorami drugiego mostka. Istnieją dwa sposoby sterowania przekształtników 12-pulsowych. Sterowanie jednoczesne, w którym obydwa przekształtniki są sterowane tak samo (równocześnie), a przesunięcie pomiędzy fazami impulsów obydwu prostowników jest stałe i wynosi 30° i sterowanie sekwencyjne, w którym zmienia się kąt wysterowania najpierw jednego przekształtnika, a następnie drugiego. W drugim przypadku, prąd w obwodzie głównym zmienia płynnie charakter pomiędzy dwunastopulsowym, a sześciopulsowym. Sterowanie równoczesne zapewnia pracę dwunastopulsową w całym zakresie sterowania, lecz nie daje moż-

liwości ograniczenia mocy bierniej pobieranej przez układ napędowy. Sterowanie sekwencyjne pozwala ograniczyć pobieraną moc bierną, lecz w pewnych punktach pracy przyjmuje niekorzystny charakter sześciopulsowy.

3. UKŁADY MASZYN WYCIĄGOWYCH DWUSILNIKOWYCH

Maszyny wyciągowe największych mocy (pracujące w polskim górnictwie) są napędzane dwoma silnikami. Największe silniki, które dotychczas zostały zastosowane w maszynach wyciągowych produkcji krajowej („Zgoda”) to silniki typu PW-106 o mocy 3600 kW i prędkości 70 obr/min. Silniki te znalazły zastosowanie do napędu maszyn wyciągowych o udźwigu masy użytecznej dochodzącym do 30 Mg i maksymalnej prędkości jazdy ustalonej równej 20 m/s. Maszyna taka jest napędzana dwoma silnikami usytuowanymi z obu stron koła pędnego. W maszynach wyciągowych dwusilnikowych zasilanych z przekształtników tyrystorowych stosuje się dwie konfiguracje obwodu głównego prądowego: układ z dwoma niezależnymi obwodami głównymi oraz układ z jednym wspólnym obwodem głównym



Rys. 3. Schemat strukturalny układu regulacji maszyny dwusilnikowej z dwoma obwodami głównymi

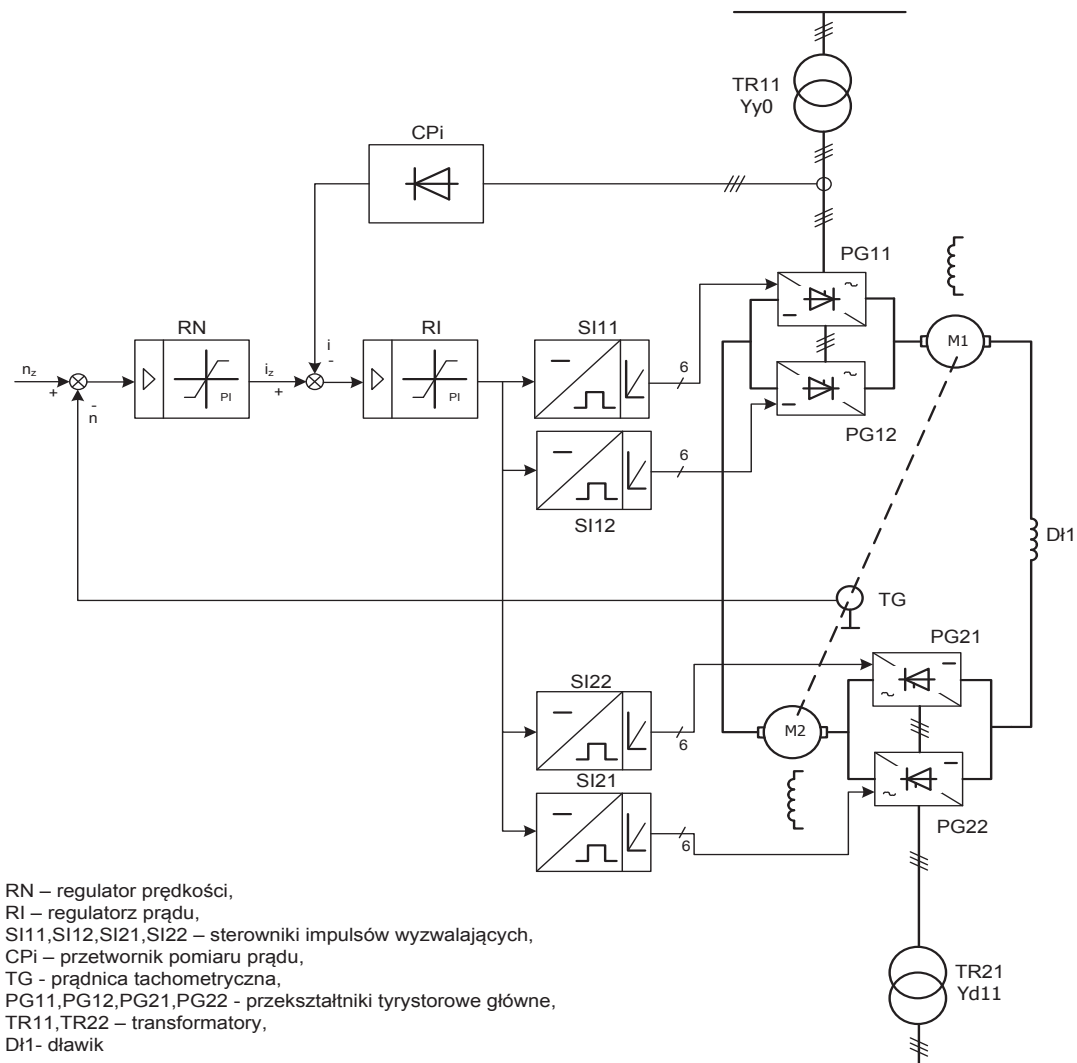
(układ Punga). Ze względu na duże oddziaływanie maszyn dwusilnikowych na sieć oraz zwiększony pobór mocy biernej przekształtniki do zasilania silników maszyn dwusilnikowych stosuje się wyłącznie układy 12-pulsowe.

3.1. Maszyna dwusilnikowa z dwoma obwodami głównymi

Maszyna dwusilnikowa z dwoma niezależnymi obwodami głównymi prądowymi złożona jest z dwóch układów 12-pulsowych. Każdy z dwóch pracujących na wspólny wał i napędzających koło pędne maszyny silników ma własny obwód główny, w skład którego wchodzi dwa połączone szeregowo prostowniki, tworząc układ 12-pulsowy. W odróżnieniu od układu z jednym silnikiem, układ sterowania maszyny dwusilnikowej złożony jest z jednego nadrzędnego regu-

latora prędkości RN i dwóch niezależnych regulatorów prądu RI1 i RI2 oraz czterech niezależnych sterowników impulsów (SI11, SI12, SI21, SI22). Schemat strukturalny napędu prostownikowego maszyny dwusilnikowej z dwoma obwodami głównymi przedstawia rys. 3.

W układzie tym pętla prędkościowego sprzężenia zwrotnego jest nadrzędna w stosunku do dwóch niezależnych pętli prądowych. Sygnał prędkości rzeczywistej (z tachoprądnicy lub impulsatora), równy prędkości obu silników, jest dołączony poprzez węzeł sumujący do wejścia regulatora prędkości RN (typu PI). Wypracowany sygnał regulatora prędkości (moment zadany) jest doprowadzony do dwóch niezależnych węzłów sumujących dwóch pętli prądowych, kontrolujących prądy tworników każdego silnika. Wyjście z regulatora prędkości posiada programowalne ograniczenie, pozwalające ograniczyć prąd –



Rys. 4. Schemat strukturalny układu regulacji maszyny dwusilnikowej z jednym obwodem głównym (układ Punga)

(moment) zadany silników. Oba regulatory prądu RI1, RI2 mają zadaną zawsze taką samą wartość prądu. Jest to warunek niezbędny, aby silniki rozwijały identyczny moment napędowy, a co za tym idzie równomiernie się obciążały. Wyjścia z regulatorów prądu (kąt wysterowania tyrystorów) są doprowadzone do sterowników impulsów (SI11, SI12 oraz SI21, SI22). Cyfrowa wartość kąta wysterowania jest następnie przetwarzana przez sterownik impulsów na impulsy wyzwalające poszczególne tyrystory w mostkach przekształtników.

3.2. Maszyna dwusilnikowa z jednym obwodem prądowym (układ Punga)

Układ Punga umożliwia pracę silników wyciągowych na wspólny wał, a jeden obwód główny zapewnia równowagę momentów elektrycznych rozwijanych przez każdy z silników zarówno w stanie ustalonym, jak i w przejściowych stanach dynamicznych (ten sam prąd w obwodach tworników i taki sam prąd w obwodach wzbudzenia).

Dodatkowo, w żadnym z punktów obwodu głównego napięcie nie przekracza wartości nominalnej maszyn elektrycznych, skonfigurowanych do wspólnej pracy. Obwód główny jest złożony z naprzemiennie, szeregowo połączonych silników i przekształtników. Przekształtniki są zasilane z transformatorów dwuuzwojeniowych, posiadających różne grupy połączeń (np. Yy0, Yd11). Zmianę kierunku obrotów uzyskuje się przez zmianę kierunku prądu w obwodach wzbudzenia silników (za pomocą nawrotnych przekształtników wzbudzenia). Układ sterowania maszyny dwusilnikowej z jednym obwodem głównym złożony jest z jednego nadrzędnego regulatora prędkości RN, jednego regulatora prądu RI1 oraz dwóch niezależnych sterowników impulsów SI1, SI2.

Schemat strukturalny napędu prostownikowego maszyny dwusilnikowej z jednym obwodem głównym przedstawia rys. 4. W układzie tym występuje tylko jedna pętla prądowa sprzężenia zwrotnego,

która jest podporządkowana pętli prędkościowej Sygnał prędkości rzeczywistej (z tachoprądnicy lub impulsatora), równy prędkości obu silników, jest dołączony poprzez węzeł sumujący do wejścia regulatora prędkości RN (typu PI). Wyjście regulatora prędkości jest doprowadzone (podobnie jak w układach z jednym silnikiem) do węzła sumującego tylko jednej pętli prądowej, kontrolującej prądy tworników silników (jest to możliwe dzięki szeregowemu połączeniu silników). Wyjście z regulatora prędkości posiada programowane ograniczenie, pozwalające ograniczyć prąd (moment) zadany silników. Wypracowany sygnał z regulatora prądu RI (kął wysterowania tyrystorów) jest doprowadzony do sterowników impulsów (SI11,SI12, SI21,SI22). Cyfrowa wartość kąta wysterowania jest następnie przetwarzana przez sterownik impulsów na impulsy wyzwalające poszczególne tyrystory w mostkach przekształtników.

4. UKŁAD STEROWANIA I ZABEZPIECZEŃ PRZEKSZTAŁTNIKA

Przekształtnik TR-4 produkcji ITI EMAG składa się z dwóch równolegle połączonych mostków tyrystorowych, co pozwala uzyskiwać obciążalność prądową ciągłą wynoszącą 4 kA. Możliwość równoległego łączenia przekształtników pozwala na uzyskanie obciążalności prądowej zapewniającej zasilanie praktycznie każdej maszyny wyciągowej (z silnikiem prądu stałego) występującej w polskim górnictwie. Aby sprostać wymaganiom stawianym układowi sterowania, opracowano specjalizowany sterownik mikroprocesorowy. Sterownik posiada budowę modułową, co umożliwia łatwe dostosowanie jego struktury do odpowiedniej konfiguracji maszyny wyciągowej. Zastosowanie szybkiego procesora sygnałowego (DSP) w module bazowym zapewniło odpowiednią moc obliczeniową, pozwalającą na sterowanie i zabezpieczenie przekształtnika w konfiguracjach jedno- lub dwusilnikowych. Ze względów bezpieczeństwa w układzie sterowania i zabezpieczeń zastosowano dwa sterowniki mikroprocesorowe. Jeden sterownik realizuje sterowanie przekształtnikowym układem napędowym, drugi natomiast odpowiada za jego zabezpieczenie.

Główne zadania realizowane przez sterownik odpowiedzialny za sterowanie przekształtnikiem to:

- realizacja regulatora prędkości,
- realizacja regulatora prądu,
- sterowanie wyzwalaniem tyrystorów,

- współpraca z regulatorem wzbudzenia,
- współpraca z cyfrowym regulatorem jazdy.

W celu ochrony przekształtnika układ kontroli (wykonywany przez osobny sterownik mikroprocesorowy) realizuje następujące zabezpieczenia:

4.1. Kontrola temperatur modułów tyrystorowych

Przekształtnik TR-4 złożony jest z sześciu modułów dwutyristorowych. Każdy z modułów posiada układ kontroli temperatury radiatora. Przekroczenie dopuszczalnej temperatury jest sygnalizowane ze wskazaniem na konkretny moduł dwutyristorowy.

4.2. Kontrola stanów bezpieczników tyrystorów

Każdy tyrystor znajdujący się w mostku przekształtnika jest chroniony bezpiecznikiem szybkim. Bezpieczniki są wyposażone w sygnalizatory i mikrołączniki, dzięki którym można jednoznacznie zidentyfikować uszkodzony bezpiecznik.

4.3. Kontrola prądu maksymalnego tyrystora

Mikroprocesorowy układ zabezpieczeń kontroluje prąd płynący przez poszczególne grupy tyrystorów mostków przekształtnika. Każde przekroczenie dopuszczalnego maksymalnego prądu tyrystora jest wykrywane i sygnalizowane, ze wskazaniem na konkretny mostek oraz grupę (anodowa lub katodowa), w której nastąpiło przetężenie.

4.4. Kontrola nierównomiernego rozplywu prądu

Ponieważ pojedynczy przekształtnik TR-4 złożony jest z dwóch równolegle połączonych mostków tyrystorowych, dlatego istotnym jest, aby poszczególne grupy tyrystorów obciążały się równomiernie. Układ kontroli przekształtnika na podstawie zmierzonego prądu analizuje rozplyw prądu we wszystkich grupach tyrystorów mostków przekształtnika. W przypadku pojawienia się nierównomiernego rozplywu prądu, zdarzenie to jest sygnalizowane, ze wskazaniem na mostek oraz grupę, w której wystąpiła nieprawidłowość.

4.5. Kontrola składowej 50 Hz prądu

Na podstawie mierzonego prądu, układ kontroli sprawdza równomierność obciążenia poszczególnych faz przekształtnika. W przypadku wystąpienia nie-

równomierności (pojawienie się składowej 50 Hz prądu) zdarzenie to jest sygnalizowane.

Pojawienie się wymienionych stanów awaryjnych powoduje pobudzenie odpowiednich przełączników awarii, których styki znajdują się w obwodach blokad i sygnalizacji maszyny wyciągowej. Dodatkowo istnieje możliwość komunikacji sterownika kontroli z cyfrowym regulatorem jazdy, poprzez cyfrową transmisję danych.

5. PODSUMOWANIE

Opisane zasady sterowania zostały zaimplementowane w nowoczesnym układzie sterowania produkowanym przez ITI EMAG. Wszystkie funkcje układu regulacji i sterowania zostały zrealizowane w pełni cyfrowo i zostały zawarte w jednym specjalizowanym sterowniku mikroprocesorowym, co znacznie uprościło układ regulacji i podniosło jego niezawod-

ność. Wydzielenie osobnego sterownika mikroprocesorowego realizującego funkcję zabezpieczeń pozwoliło uniezależnić układ sterowania od układu zabezpieczeń, co zwiększyło niezawodność pracy przekształtnika. Zastosowane rozwiązania pozwalają na integrację cyfrowego układu sterowania silnika maszyny wyciągowej z nowoczesnymi cyfrowymi regulatorami jazdy. Opisany układ sterowania i kontroli w połączeniu z przekształtnikiem TR-4 umożliwia sterowanie większości krajowych maszyn wyciągowych.

Literatura

1. *Szklarski L., Zarudzki J.*: Elektryczne maszyny wyciągowe. PWN, Warszawa 1998.
2. *Kalus M., Skoczkowski T.*: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
3. *Piróg S.*: Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.

Recenzent: dr inż. Zygmunt Szymański

