

Wiesław GABRYŚ, Eugeniusz KAŁUŻA, Zdzisław KONOPKA

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

IMPULSOWA REGULACJA WZBUDZENIA SZEREGOWYCH SILNIKÓW TRAKCYJNYCH PRĄDU STAŁEGO LOKOMOTYW ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano zagraniczne rozwiązania układów napędowych lokomotyw elektrycznych z zastosowaniem regulacji impulsowej wzbudzenia silników trakcyjnych. Przeprowadzono analizę tych układów oraz wyciągnięto wnioski dotyczące ich właściwości.

1. Wstęp

Wprowadzenie na PKP dużych szybkości jazdy pociągów stało się problemem szczególnej wagi, ze względu na konieczność zwiększenia zarówno szybkości podróży, jak i podnoszenia szybkości dostaw w przewozach towarowych. Projektowanie wzrostu szybkości na PKP wiąże się ściśle z potrzebą modernizacji taboru, w szczególności napędów trakcyjnych, co wymaga nowych rozwiązań układów regulacyjnych. W zagranicznych rozwiązaniach tych układów rysuje się wyraźna tendencja stosowania układów przekształtnikowych, zbudowanych na bazie półprzewodnikowych prostowników sterowanych, zarówno podczas rozruchu i hamowania, jak również podczas regulacji prędkości obrotowej silników metodą osłabiania wzbudzenia.

W miarę rozwoju układów energoelektronicznych należy się liczyć również z dynamicznym rozwojem krajowych rozwiązań układów regulacji impulsowej w napędach trakcyjnych, które niewątpliwie zastąpią układy tradycyjne. Oprócz korzyści energetycznych wynikających z zastosowania układów regulacji impulsowej, na uwagę zasługuje znaczne poprawienie parametrów dynamicznych oraz warunków pracy napędów trakcyjnych.

W przypadku regulacji prędkości obrotowej silników metodą osłabiania wzbudzenia, impulsowa regulacja wzbudzenia umożliwia:

- a) regulację prędkości przy stałej wartości prądu obciążenia odpowiadającej mocy ciągłej silników, a nawet przy prądzie rozruchowym. Powoduje to znaczne powiększenie momentu dynamicznego, a zatem powiększenie przyspieszeń;

- b) obniżenie granicy minimalnych wartości osłabienia wzbudzenia, a zatem podniesienie granicy prędkości ustalonych. W klasycznych układach, gdzie osłabienie wzbudzenia realizowane jest przez bocznikowanie, przy silnym odwzbudzeniu, wzrostowi prądu obciążenia towarzyszy wzrost reakcji twornika i w konsekwencji wzrost napięcia międzywycinkowego komutatora. Przy zbyt gwałtownych skokach prądu może to być przyczyną łuku na komutatorze. Układ regulacji impulsowej można tak zaprojektować, aby wzrostowi momentu obciążenia towarzyszył przede wszystkim wzrost strumienia wzbudzenia;
- c) oddziaływanie na równomierność obciążenia poszczególnych silników poprzez zmianę szerokości impulsów przewodzenia;
- d) uproszczenie układu regulacji wzbudzenia prądnicy głównej w lokomotywie spalinowo-elektrycznej. W lokomotywach tych, w celu ograniczenia skoku prądu podczas bocznikowania uzwojenia wzbudzenia silnika, bezpośrednio przed bocznikowaniem następuje obniżenie wartości prądu wzbudzenia prądnicy głównej, a następnie ponowny powrót do poprzedniej jego wartości. Powoduje to z jednej strony znaczną komplikację układu regulacyjnego, a z drugiej strony ograniczenie mocy podczas bocznikowania. Problem ten nie występuje w przypadku impulsowej regulacji wzbudzenia silników, gdyż regulacja odbywa się w sposób płynny.

W związku z podanymi zaletami impulsowej regulacji wzbudzenia silników trakcyjnych należy spodziewać się wzrostu rangi tego zagadnienia oraz konkretnych rozwiązań układów w taborze PKP.

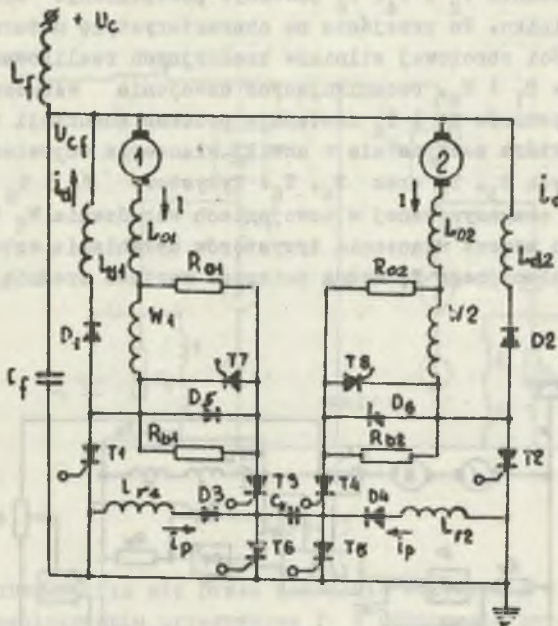
2. Przegląd rozwiązań zagranicznych

W zagranicznych rozwiązaniach układów regulacyjnych, w przypadku lokomotyw zasilanych z sieci trakcyjnej, regulacja impulsowa wzbudzenia silników stosowana jest z reguły łącznie z płynną regulacją napięcia zasilającego, bądź też w układach pracy hamulcowej silników. Na temat impulsowej regulacji wzbudzenia silników trakcyjnych lokomotyw spalinowo-elektrycznych informacje są dość skąpe.

Przedstawione i opisane w dalszej części układy dotyczące regulacji impulsowej wzbudzenia wyłącznie silników szeregowych prądu stałego, a więc przypadku, gdy impulsator znajduje się w obwodzie głównym silnika i cyklicznie bocznikuje lub też włącza do pracy uzwojenie wzbudzenia.

2.1. Układy rozruchowe i regulacji prędkości obrotowej przy pracy pociągowej lokomotywy

Przykład układu realizującego bezoporowy rozruch pojazdu, z zastosowaniem regulatora impulsowego do płynnej zmiany napięcia zasilającego, oraz

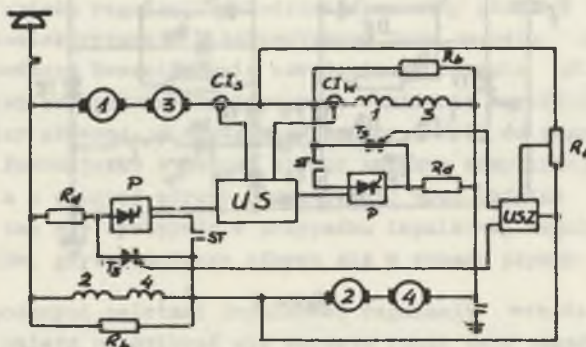


Rys. 1

poła magnetycznego silników przedstawiono na rys. 1 [2,3]. Układ zawiera takie elementy jak: filtr wejściowy L_f , C_f ; przerywacz dwutorowy ($T_1 - T_6$, C_k , L_{r1} , L_{r2} , D_3 , D_4); dławiki L_{d1} , L_{d2} ; diody bocznikujące D_1 i D_2 ; dławiki ograniczające pulsację prądu silników L_{01} i L_{02} ; tyrystory w obwodzie wzbudzenia silników T_7 i T_8 ; diody D_5 i D_6 ; oraz oporności R_{01} , R_{02} , R_{b1} , R_{b2} bocznikujące uzwojenia wzbudzenia. Wspólny węzeł komutacyjny $T_3 - T_6$, C_k służy jednocześnie do wyłączenia tyrystorów głównych T_1 i T_2 regulatora napięcia, oraz tyrystorów T_7 i T_8 służących do osłabienia wzbudzenia. Dławiki L_{d1} i L_{d2} w obwodach diod bocznikujących D_1 i D_2 zapewniają dodatkowe ładowanie kondensatora komutacyjnego C_k oraz ograniczają prąd I_d płynący przez diody D_1 i D_2 podczas otwierania tyrystorów głównych.

Na początku rozruchu włączają się kolejno tylko tyrystory T_3 , T_5 oraz T_4 , T_6 , powodując przeładowanie kondensatora C_k przez silnik. Regulacja w tym okresie odbywa się metodą modulacji częstotliwości impulsowania. Następnie z taką samą częstotliwością włączają się kolejno tyrystory T_1 i T_2 i następuje przejście na regulację metodą modulacji szerokości impulsów. Blokowanie tyrystora T_1 następuje w momencie zadziałania tyrystorów T_3 i T_5 , a blokowanie tyrystora T_2 w momencie zadziałania tyrystorów T_4 i T_6 . Wzrost przesunięcia w czasie pomiędzy otwarciem tyrystorów T_1 i T_2 ,

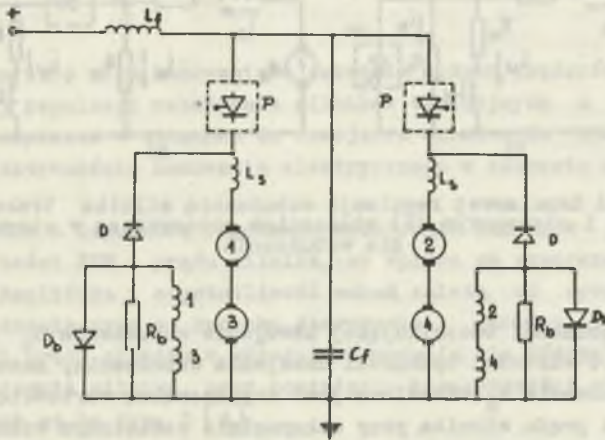
T_5 oraz odpowiednio T_2 i T_4 , T_6 powoduje powiększenie średniej wartości napięcia na silniku. Po przejściu na charakterystykę naturalną dalsza regulacja prędkości obrotowej silników trakcyjnych realizowana jest włączaniem tyrystorów T_7 i T_8 , bocznikujących uzwojenia wzbudzenia silników. Blokowanie tyrystorów T_7 i T_8 następuje podczas komutacji tyrystorów głównych T_1 i T_2 , która zaczyna się w chwili włączenia odpowiednich tyrystorów komutacyjnych T_3 , T_5 oraz T_4 , T_6 . Tyrystory T_7 i T_8 wyłączane są dzięki energii zmagazynowanej w uzwojeniach wzbudzenia W_1 i W_2 . Tym sposobem, zmieniając moment włączenia tyrystorów osłabienia wzbudzenia w zakresie okresu regulacyjnego T , można zmieniać wartość średnią prądu wzbudzenia.



Rys. 2

Na rys. 2 przedstawiono schemat ideowy obwodu elektrycznego wagonu silnikowego metra, w którym zastosowano regulację pola magnetycznego silników trakcyjnych metodą cyklicznego bocznikowania uzwojenia wzbudzenia przerywaczem tyrystorowym "P" [4]. Minimalny współczynnik osłabienia wzbudzenia przy pełnym przewodzeniu przerywacza, określony jest opornością dodatkową R_d . Rejestracji wartości prądu silnika I_B i prądu wzbudzenia I_W dokonuje się za pomocą czujników CI_B oraz CI_W . Układ impulsowej regulacji wzbudzenia posiada poza tym tyrystorowe zabezpieczenie przed nadmiernym wzrostem napięcia na silnikach. Sterowanie tyrystorów odbywa się w układzie sterującym US metodą modulacji szerokości impulsów przewodzenia przerywacza P.

Układ realizujący przy pomocy jednego przerywacza tyrystorowego początkowo płynną regulację napięcia zasilającego, a następnie w miarę wzrostu średniej wartości napięcia - osłabienie wzbudzenia silników, przedstawiony jest na rys. 3 [5].



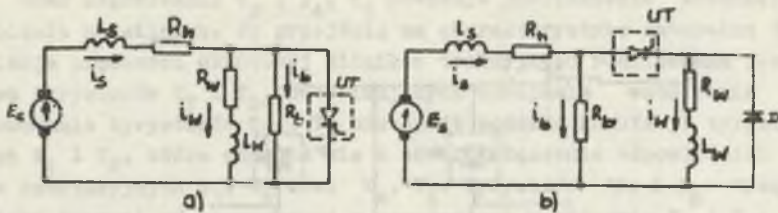
Rys. 3

Prąd silnika zamyka się przez uzwojenie wzbudzenia w półokresie odpowiadającym zablokowaniu przerywacza P. W półokresie przewodzenia przerywacza prąd w obwodzie wzbudzenia zamyka się przez diodę bocznikującą D_b . Prąd wzbudzenia wzrasta więc w czasie równym $(1-\beta)T$ (β - współczynnik wypełnienia, T - okres impulsowania), a jednocześnie gromadzi się w uzwojeniu energia elektromagnetyczna rozładowana w czasie βT . Wartość średniego prądu wzbudzenia maleje w miarę wzrostu współczynnika β , przy czym zależność współczynnika osłabienia wzbudzenia od współczynnika β jest nieliniowa. Przy praktycznej realizacji omawianego układu uzwojenia wzbudzenia silników bocznikowane są dodatkowo opornością R_b , którą dobiera się tak aby na początku rozruchu osłabienie wzbudzenia nie występowało i zapoczątkowane było dopiero wówczas, gdy napięcie na silnikach osiągnie wartość $0,8 U_N$. Gdy współczynnik wypełnienia β będzie maksymalny, osłabienie wzbudzenia będzie również maksymalne.

2.2. Układy hamowania elektrycznego z zastosowaniem impulsowej regulacji wzbudzenia szeregowych silników trakcyjnych prądu stałego

Przeprowadźmy na wstępie analizę porównawczą układów impulsowej regulacji wzbudzenia silników trakcyjnych przy równoległym i szeregowym włączeniu przerywacza tyrystorowego w stosunku do uzwojenia wzbudzenia. Porównanie dotyczy wartości sił hamujących w zakresie dużych prędkości obrotowych oraz amplitudy i częstotliwości SEM i prądu silnika przy różnych sposobach regulacji.

Schematy układów regulacji impulsowej wzbudzenia silników w układzie hamowania przedstawione są na rys. 4a i 4b [4].



Rys. 4. Układ impulsowej regulacji wzbudzenia silnika trakcyjnego z równoległym (a) i szeregowym (b) włączeniem przerywacza w stosunku do uzwojenia wzbudzenia

Wartość oporności bocznikującej uzwojenie wzbudzenia R_b dobiera się o rząd wyższą od wartości oporności uzwojenia wzbudzenia, natomiast wartość oporności hamowania R_h określona jest dopuszczalną wartością siły elektromotorycznej i prądu wirnika przy maksymalnie osłabionym wzbudzeniu silnika, przy czym:

$$R_h' = \frac{E_{smin}}{I_{smin}} - R_w \alpha_{min}$$

jest większa od

$$R_h'' = \frac{E_{smin}}{I_{smin}} - R_b (1 - \alpha_{min})$$

gdzie:

R_h' - oporność hamowania w układzie z rys. 4a,

R_h'' - oporność hamowania w układzie z rys. 4b,

I_{smin} , E_{smin} - prąd i SEM przy maksymalnie osłabionym wzbudzeniu

$\alpha = \frac{I_w}{I_s}$ - współczynnik osłabienia wzbudzenia.

Prędkość obrotowa silnika, przy której prąd wzbudzenia osiąga wartość maksymalną, wyraża się wzorem

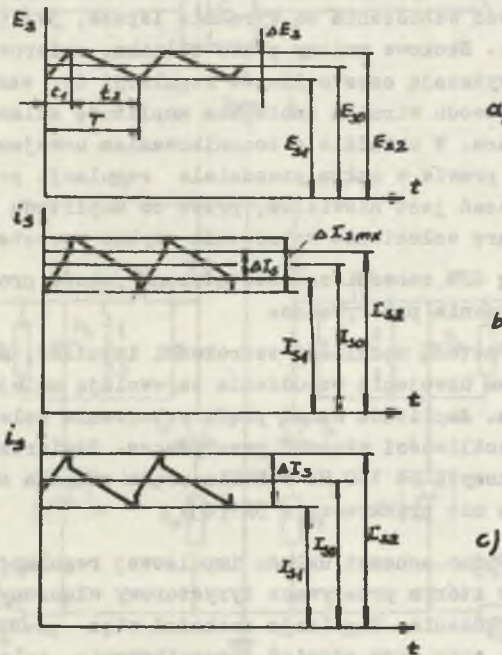
$$n = \frac{I_{smx} R_h + I_{wmx} \frac{R_w R_b}{R_w + R_b}}{C \Phi}$$

Tak więc prędkość początkowa hamowania przy wzbudzeniu maksymalnym dla szeregowego włączenia przerywacza rys. 4b jest mniejsza niż przy włączeniu równoległym rys. 4a. Gdyby w układzie szeregowym dobrać wartość $R_h'' = R_h'$, wówczas zmniejszy się wartość prądu przy maksymalnym osłabieniu wzbudzenia.

$$I_{s\min} = \frac{E_{s\min}}{R_h + R_b(1-\alpha_{\min})} < \frac{E_{s\min}}{R_h'' + R_b(1-\alpha_{\min})},$$

a więc zmniejszy się siła hamowania w zakresie dużych prędkości. Zatem system impulsowej regulacji wzbudzenia silników trakcyjnych z równoległym włączeniem przerywacza w stosunku do uzwojenia wzbudzenia charakteryzuje się większą efektywnością hamowania elektrycznego w zakresie dużych prędkości.

Wadami układów z impulsową regulacją wzbudzenia silników trakcyjnych są wahania wartości SEM i prądu silnika, co wpływa na pogorszenie komutacji silników. Amplituda i częstotliwość wahań zależą od sposobu regulacji prądu wzbudzenia oraz od sposobu sterowania układem tyrystorowym. Przebiegi SEM i prądu silnika w układzie hamowania dla różnych sposobów regulacji wzbudzenia silnika, przy pominięciu indukcyjności obwodu wirnika przedstawione są na rys. 5 [4].



Rys. 5. Przebiegi zmian SEM (a) i prądu silnika przy impulsowej regulacji wzbudzenia silników w układzie o równoległym (b) i szeregowym (c) włączeniu przerywacza w stosunku do uzwojenia wzbudzenia

W układzie bocznikowania uzwojenia wzbudzenia przerywaczem tyrystorowym prąd silnika w momencie załączania przerywacza (chwila t_1) początkowo gwałtownie wzrasta, po czym - wskutek zmniejszania się SEM, spowodowanego

obniżaniem się prądu wzbudzenia - powoli maleje (przedział t_2). W półokresie blokowania przerywacza prąd początkowo raptownie maleje, a następnie wskutek wzrostu SEM, spowodowanego wzrostem prądu wzbudzenia, zaczyna powoli rosnać (rys. 5b).

W układach z szeregowym włączeniem przerywacza w obwód wzbudzenia silnika, skokowe zmiany prądu silnika w chwili komutacji, posiadają kierunek taki sam jak zmiany SEM (rys. 5c).

Siła elektromotoryczna w układzie impulsowej regulacji wzbudzenia, nie posiada skokowych zmian swojej wartości (rys. 5a).

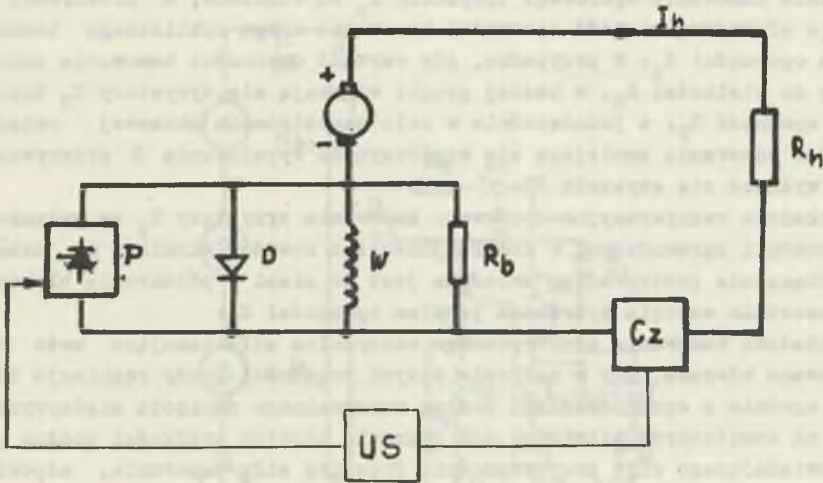
Badania przeprowadzone na konkretnym układzie regulacyjnym [4,6] mające na celu określenie zależności zmian amplitudy i częstotliwości SEM oraz prądu silnika od stopnia osłabienia wzbudzenia przy różnych sposobach jego regulacji (rys. 4a i 4b), oraz różnych metodach sterowania tyrystorami (częstotliwościowe podług prądu lub SEM, ewentualnie przez modulację szerokości impulsów przewodzenia) wykazały, że:

1. Układy ze sterowaniem podług prądu silnika i z szeregowym włączeniem przerywacza w obwód wzbudzenia są wyraźnie lepsze, jeśli chodzi o jakość procesu regulacji. Skokowe zmiany prądu silnika, skierowane zgodnie ze zmianami SEM, podwyższają częstotliwość regulacji do wartości, przy których indukcyjność obwodu wirnika zmniejsza amplitudę zmian prądu silnika praktycznie do zera. W układzie z bocznikowaniem uzwojenia wzbudzenia przez przerywacz, prawie w całym przedziale regulacji prądu wzbudzenia częstotliwość włączeń jest niewielka, przez co amplituda pulsacji SEM i prądu silnika, w miarę osłabienia wzbudzenia szybko wzrasta.

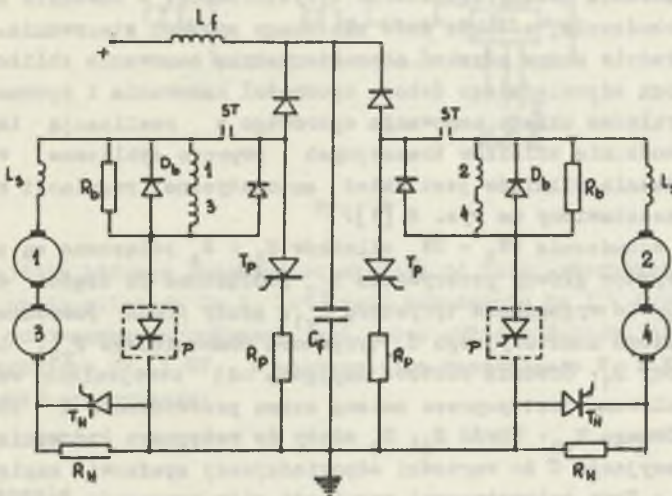
2. Regulacja podług SEM zabezpiecza dostateczną jakość procesu przy dowolnym sposobie podłączenia przerywacza.

3. Przy sterowaniu metodą modulacji szerokości impulsów, układy z cyklicznym bocznikowaniem uzwojenia wzbudzenia zapewniają mniejszą amplitudę wahań prądu silnika. Amplituda wahań prądu wzbudzenia zależy również w tym przypadku od częstotliwości włączeń przerywacza. Stwierdzono, że przy częstotliwościach większych od 160 Hz wahania prądu silnika są minimalne, a dla prądu wzbudzenia nie przekraczają 5% [6].

Na rys. 6 przedstawiono schemat układu impulsowej regulacji wzbudzenia silnika szeregowego, w którym przerywacz tyrystorowy włączony jest równolegle do uzwojenia wzbudzenia. Regulacja zachodzi więc przez cykliczne włączenie przerywacza, przy czym stopień zbocznikowania zależy od czasu włączenia przerywacza [6]. Przerywacz sterowany jest tu układem logicznym zbudowanym na tranzystorach. Prąd silnika mierzony jest za pomocą czujników magnetycznych. Regulacja odbywa się ze stałą częstotliwością zadaną przez układ sterowania US drogą modulacji szerokości impulsów. Opornik R_D poprawia warunki komutacji silnika oraz zmniejsza wielkość przepięć w uzwojeniu wzbudzenia przy blokowaniu przerywacza.



Rys. 6



Rys. 7

Przykład układu regulacyjnego z cyklicznym włączeniem uzwojenia wzbudzenia przedstawiono na rys. 7. Przerwywacz zostaje włączony w szereg z uzwojeniem wzbudzenia przez zamknięcie stycznika ST i zmiana współczynnika wypełnienia β wpływa na regulację strumienia magnetycznego silników[5].

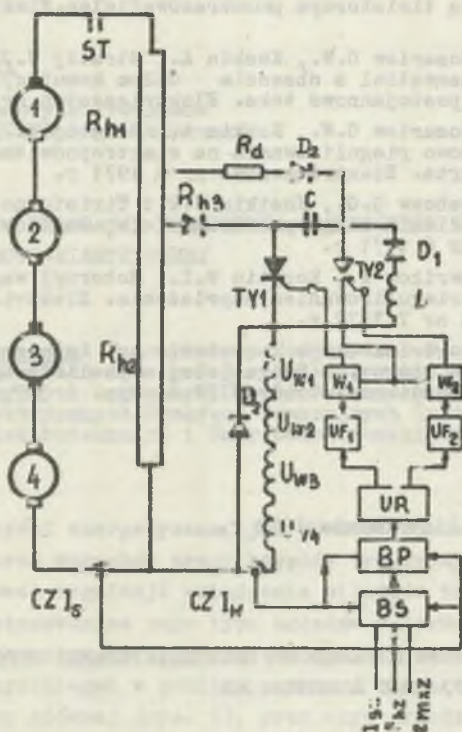
Układ może realizować hamowanie oporowe i rekuperacyjne. Oporność hamowania podzielona jest na dwie części: regulowaną R_p i nieregulowaną R_H . W układzie hamowania oporowego tyrystory T_p są włączone, a przerywacz P reguluje efektywną wartość oporności hamowania drogą cyklicznego bocznikowania oporności R_p . W przypadku, gdy wartość oporności hamowania zmniejszy się do wielkości R_H , w każdej grupie włączają się tyrystory T_H bocznikujące oporność R_H , a jednocześnie w celu zapobieżenia skokowej zmianie oporności hamowania zmniejsza się współczynnik wypełnienia δ przerywacza P oraz wyłącza się stycznik ST .

W układzie rekuperacyjno-oporowego hamowania tyrystory T_p są wyłączone. Część energii zgromadzonej w indukcyjnościach obwodów wirników w czasie stanu włączenia przerywacza, zwracana jest do sieci w półokresie blokowania. Pozostała energia wytracana jest na oporności R_H .

W układach hamowania elektrycznego maksymalna siła hamująca może być realizowana wówczas, gdy w zakresie dużych prędkości jazdy regulacja odbywa się zgodnie z ograniczeniami podług maksymalnego napięcia międzywycinkowego na komutatorze silników, a w zakresie niskich prędkości podług prądu odpowiadającego sile przyczepności. Przebieg siły hamowania, odpowiadający jej wartościom maksymalnym w funkcji prędkości obrotowej, można uzyskać regulując równocześnie wartość oporności hamowania oraz współczynnik osłabienia wzbudzenia. Praktyczna realizacja takiej charakterystyki wymaga zastosowania dwóch regulatorów tyrystorowych: w obwodzie silnika i w obwodzie wzbudzenia, a także dość złożonego systemu sterowania. W przedstawionym układzie można uzyskać charakterystykę hamowania zbliżoną do optymalnej, drogą odpowiedniego doboru oporności hamowania i oporności R_b .

Innym przykładem układu hamowania oporowego z realizacją impulsowej regulacji wzbudzenia silników trakcyjnych poprzez cykliczne włączanie uzwojeń wzbudzenia silników jest układ automatycznej regulacji hamowania oporowego przedstawiony na rys. 8 [1].

Uzwojenia wzbudzenia $UW_1 - UW_4$ silników $S_1 - S_4$ połączone są szeregowo i poprzez tyrystor główny przerywacza T_{y1} podłączone do części oporności hamowania R_{H2} . Do wygaszenia tyrystora T_{y1} , służy obwód pomocniczy złożony z kondensatora komutacyjnego C , tyrystora pomocniczego T_{y2} , indukcyjności L i diody D_1 . Średnia wartość napięcia na uzwojeniach wzbudzenia silników regulowana jest poprzez zmianę czasu przewodzenia i blokowania tyrystora głównego T_{y1} . Obwód R_1, D_2 służy do wstępnego ładowania kondensatora komutacyjnego C do wartości odpowiadającej spadkowi napięcia na oporności R_{H3} . Przy automatycznej regulacji siły hamowania dla zmieniającej się prędkości jazdy układ sterowania winien podawać impulsy bramkowe na tyrystory w zależności od narzuconych charakterystyk hamowania oraz dopuszczalnego zakresu zmian prądu silnika i prądu wzbudzenia. Niezbędny zakres zmian prądu wzbudzenia, zależny od wymaganego zakresu zmian prądu silnika, kształtowany jest w bloku sterującym BS . Porównanie wartości rzeczywistej wielkości sterowanej z zadaną odbywa się w bloku porównawczym



Rys. 8

BP, na wejście którego podawane są sygnały od bloku sterującego BS oraz z czujnika prądu silników Cz I_B lub prądu wzbudzenia Cz I_W . Sygnał wyjściowy bloku porównawczego podawany jest przez układ różniczkujący UR na dwa układy formujące UF_1 i UF_2 , a następnie na wzmacniacze W_1 i W_2 sterujące tyristorami przerywacza.

3. Zakończenie

Przeprowadzona analiza porównawcza ma na celu przedstawienie korzystnych i niekorzystnych aspektów impulsowej regulacji wzbudzenia silników szeregowych prądu stałego i stanowi punkt wyjścia do rozważań nad koncepcją własnego układu regulacyjnego.

LITERATURA

- [1] Dorosz W.P., Docenko A.P.: Reastatnoje termożenie elektriczeskowo podwiżnowo sostawa s tiristornym priobrazowatielem. Elektrotehnika nr 2, 1969 r.
- [2] Efriemow I.S., Kosariw G.W., Koskin A., Stratij W.J.: Tiristornyj impulsnyj priobrazowatiel s obščim użłom komutacji dla elektropodwiżnowo sostawa postojannowo toka. Elektrichestwo nr 6 1971 r.
- [3] Efriemow I.S., Kosariw G.W., Koskin A., Stratij W.J.: Primienie tiristorno-impulsnowo riegulirowania na elektropodwiżnom sostawie gorodskowo transporta. Elektrichestwo nr 6 1971 r.
- [4] Homenko A.I., Riabcew G.G., Kostkin W.P.: Tiristorno impulsnoje regulirowanie wozbuźdienia tiagowych dwigatelej wagonow metropolitienia. Elektrichestwo nr 6 1971 r.
- [5] Hwastow B.C., Gawriłow I., Kopytin W.I.: Motornyj wagon metropolitienia s impulsnym riegulirowaniem napriażenia. Elektrieskaja i Tiepłowoznaja Tiaga nr 7 1972 r.
- [6] Riabcew G.G.: Elektrieskoje tormożenie pri impulsnom riegulirowani magnitnowo potoka tiagowych dwigatelej s pasliedowatielnym wkluczeniem obmotki wozbuźdienia. Trudy MIIT-a, wyp. 327, Izd. Transport Moskwa 1972 r.

Przyjęto do druku w listopadzie 1973 r.

ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ТЯГОВЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭЛЕКТРОВЗОВ

Р е з ю м е

В статье проанализировано зарубежные приводные системы электровозов в применении импульсного регулирования возбуждения тяговых двигателей приведен анализ систем, а также выводы относительно их свойств.

PULSE CONTROL INDUCE CIRCUIT SERIES MOTORS OF LOCOMOTIVE ELECTROMOTION

S u m m a r y

The foreign solutions of locomotive electromotion with pulse control induce circuit traction motors are reviewed in the paper. The arrangements of locomotive electromotion are analysed and conclusions regarding their properties drawn.