dr inż. Marian Kaluba
mgr inż. Michał Maluśkiewicz
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR"

Koncepcje układów elektropneumatycznych pośredniczących w sterowaniu pneumatycznymi hamulcami pojazdów szynowych

W artykule przedstawiono koncepcje układów elektropneumatycznych, które mogą znaleźć w przyszłości powszechne zastosowanie w sterowaniu pneumatycznymi hamulcami lokomotyw, przyszłościowych zespołów trakcyjnych i zespołów na duże prędkości.

1. Wprowadzenie.

Tradycyjny sposób sterowania hamulcami w taborze kolejowym polega na stosowaniu układów pneumatycznych. Zasilanie i sterowanie tych układów odbywa się poprzez tak zwany przewód główny pociągu. Aktualnie we wszystkich lokomotywach eksploatowanych przez PKP sterowanie hamulcem odbywa się poprzez sygnały pneumatyczne generowane przez mechanika pneumatycznym zaworem maszynisty.

Elektryczne sterowanie hamulcami w tych pojazdach odbywa się jedynie za pomocą układów czuwaka, SHP (samoczynne hamowanie pociągów) lub Radiostop (radiowe, zdalne awaryjne hamowanie pociągów). Układy te są z punktu widzenia automatycznego sterowania prymitywne, gdyż umożliwiają jedynie uruchomienie hamowania awaryjnego (nagłego). Nie umożliwiają one służbowego, ciągłego prowadzenia pociągu tzn. nie spełniają funkcji, które realizowane są na drodze

manualnej przez mechanika. Nie umożliwiają one również zdalnego lub mikroprocesorowego prowadzenia pociągów (np. w systemie KHP na PKP lub w systemie „Linienzugbeeinflussung" stosowanym na kolejach Deutsche Bundesbahn).

W zespołach trakcyjnych, w których stosowany jest hamulec elektropneumatyczny typu bezpośredniego (bezpośrednie napełnienie cylindrów hamulcowych ze zbiornika pomocniczego) rozdzielono funkcje zasilania (pneumatycznego) hamulców wagonów i sterowania (elektrycznego) hamulcem. Układ ten wykorzystujący czasowe zasilenie prostych zaworów elektropneumatycznych w celu napełnienia cylindrów hamulcowych nie zapewnia wystarczającej dokładności oraz nie nadaje się do mikroprocesorowego sterowania hamulcami pociągu.

Rozwój układów sterowania hamulcami wiąże się z szerokim wykorzystywaniem w tych układach sygnałów elektrycznych. Wyposażenie pojazdu trakcyjnego w układ sterowania, w którym wszystkie funkcje hamulców inicjowane są sygnałami elektrycznymi umożliwia:

- zastosowanie mikroprocesorowego sterownika do sterowania hamowaniem pociągu,
- zastosowanie w pracach manewrowych pociągu zdalnego sterowania jazdą i hamowaniem za pośrednictwem sygnałów przesyłanych drogą radiową,
- prowadzenie i nadzór ruchu pociągu na szlaku poprzez nowoczesne systemy zdalnego, automatycznego prowadzenia pociągów
- zastosowanie w pojeździe rozwiniętych układów diagnostycznych hamulca.

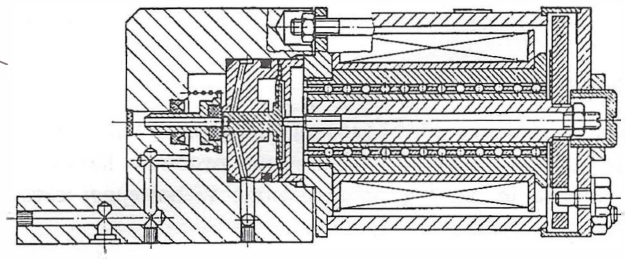
Aby w przyszłości możliwe stało się wdrażanie w pojazdach nowoczesnych układów sterowania hamulcem pneumatycznym trzeba dysponować przetwornikami pneumatyczno-elektrycznymi do pomiaru ciśnień, oraz przetwornikami elektryczno-pneumatycznymi do generowania na drodze elektrycznej wymaganych ciśnień i ich przebiegów. O ile czujniki pomiarowe ciśnień są powszechnie znane i stosowane w technikach pomiarowych (czujniki piezoelektryczne czy tensometryczne), o tyle przetworniki elektryczno-pneumatyczne (zwane przetwornikami prąd - ciśnienie) szczególnie w rozwiązaniach trakcyjnych nie są powszechnie znane i stosowane w Polsce. Rola tych przetworników w sterowaniu układami pneumatycznymi hamulca jest kluczowa a rodzaj przetwornika i jego parametry mają szczególnie istotne znaczenie w układach pneumatycznych hamulca sterowanych sygnałami elektrycznymi. W niniejszym artykule przedstawiono koncepcje niektórych rozwiązań takich przetworników oraz ich zalety i wady.

2. Podział i rodzaje przetworników elektro-pneumatycznych.

Przetworniki elektro-pneumatyczne generują wymaganą wartość ciśnienia niezbędnego do sterowania układem pneumatycznym hamulca na sygnał elektryczny. Ze względu na rodzaj sygnału elektrycznego przetworniki dzielimy na analogowe (sygnał analogowy napięciowy lub prądowy) lub cyfrowe (elektryczne sygnały binarne). Ze względu na realizowaną funkcję wszystkie przetworniki mają za zadanie zamienić sygnał elektryczny na określoną wartość ciśnienia. Najczęściej wymaga się liniowej zależności pomiędzy tymi wielkościami, przy czym musi być utrzymana zadawalająca powtarzalność, mała histereza urządzenia, krótki czas zwłoki i właściwe nadążanie sygnału pneumatycznego za elektrycznym.

2.1. Przetworniki elektropneumatyczne analogowe.

Zasada działania przetworników analogowych opiera się na równowadze siły powstałej w obwodzie elektromagnetycznym i siły pneumatycznego oddziaływania. Najczęściej przetwornik taki składa się z relatywnie dużej cewki i obwodu magnetycznego oraz zaworka trójdrogowego (napełnienie, równowaga - szczelność, opróżnianie) połączonego z powierzchnią czynną na którą działa ciśnienie obwodu pneumatycznego (rys. 1).W celu zapewnienia wystarczającej dokładności i powtarzalności przetwarzania sygnału prądowego na ciśnieniowy w takim przetworniku należy budować układ magnetyczny generujący relatywnie duże siły, które mogą być porównywane z wytworzonymi siłami pneumatycznymi, istotnie większymi od oporów ruchu i sprężyny zaworka, co prowadzi do dużych mas bezwładności takiego urządzenia i co za tym idzie do dużej zwłoki w działaniu i powolnym nadążaniu sygnału pneumatycznego za elektrycznym.

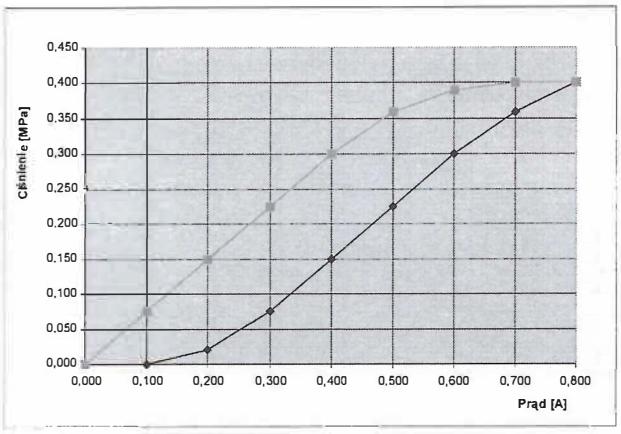


Rys.1 Przetwornik analogowy prąd – ciśnienie

W trakcie eksploatacji obserwuje się poza tym zmiany niektórych parametrów takiego urządzenia np. ze względu na zanieczyszczania lub stan smarowania.

Zaletą tego układu jest jedynie relatywnie prosta budowa. Wadą jest duża histereza (rys. 2) nieliniowość (na początku zakresu - opory i na końcu zakresu - nasycenie obwodu magnetycznego) oraz duża masa a co za tym idzie duża bezwładność urządzenia.

W celu poprawy działania wyżej przedstawionego przetwornika rozbudować można jego układ o czujnik pomiarowy ciśnienia i układ automatycznej regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym wraz z regulatorem PID (proporcjonalno całkująco-różniczkującym). Niekiedy w celu uwolnienia mechanicznych oporów ruchu stosuje się obwód z pulsującym prądem. Wówczas obwód elektromagnetyczny może być dużo mniejszy (wytwarzać dużo mniejsze siły). Zaletą takiego układu jest większa dokładność i powtarzalność oraz mniejszy czas zwłoki. Wadą jest istotne rozbudowanie układu (wysoki koszt przetwornika) oraz założona niewielka nieszczelność układu, która w układach trakcyjnych pojazdów nie jest mile widziana (straty sprężonego powietrza i energii).



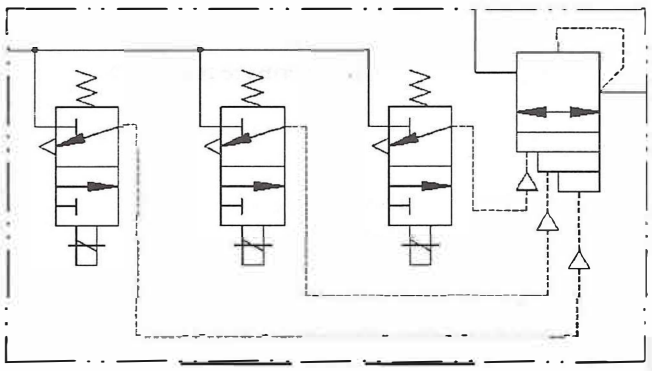
Rys.2 Charakterystyka przetwornika analogowego prąd – ciśnienie

W celu opracowania prostego przetwornika o dużej powtarzalności i dokładności działania oraz małej bezwładności w IPS - Tabor opracowano koncepcję przetwornika, którego obwód magnetyczny oparto na magnesie stałym. Niewielka cewka o bardzo małej masie zawieszona została praktycznie bez tarcia w szczelinie o stałym natężeniu strumienia magnetycznego. Zaworek trójdrogowy wraz z pneumatycznie czynną powierzchnią został zredukowany do jednego elementu zawieszonego aerodynamicznie w celu zminimalizowania oporów ruchu części pneumatycznej przetwornika.

Przewiduje się że zaletami tego przetwornika będzie prostota budowy, wysoka dokładność i powtarzalność oraz bardzo mała bezwładność (mała stała czasowa oraz dobre nadążanie sygnału pneumatycznego. za elektrycznym). Wadą przetwornika może okazać się założona niewielka „nieszczelność" niezbędna do wytworzenia aerodynamicznego zawieszenia zaworka z pneumatyczną powierzchnią czynną. Przewidziane w najbliższej przyszłości w IPS próby i badania pozwolą na zidentyfikowanie zakładanych parametrów przetwornika.

2.2. Przetworniki elektropneumatyczne cyfrowe.

Zasada działania przetworników elektropneumatycznych cyfrowych polega na zamianie elektrycznego sygnału binarnego na ściśle określoną wartość ciśnienia. W praktyce stosowane mogą być przetworniki sterowane dwoma, trzema lub czterema sygnałami binarnymi. Na rys.3 przedstawiono schemat budowy przetwornika elektropneumatycznego cyfrowego sterowanego trzema sygnałami binarnymi.



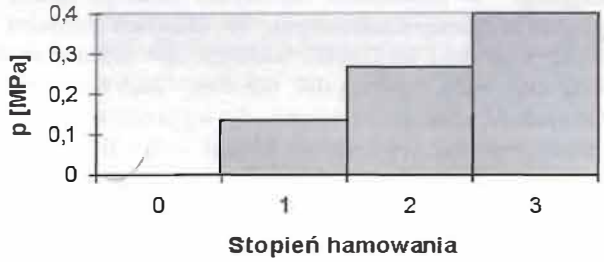
Rys.3 Schemat budowy przetwornika binarnego trzy-zaworkowego

Każdy z zaworów elektropneumatycznych doprowadza sprężone powietrze o stałej wartości ciśnienia do innej powierzchni czynnej przetwornika. Powierzchnie te dla przetwornika dwu-sygnałowego są w stosunku 1:2, dla trzy-sygnałowego w stosunku 1:2:4, a dla cztero-sygnałowego w stosunku 1:2:4:8.

Przetwornik sterowany dwoma elektrycznymi sygnałami binarnymi umożliwia uzyskanie czterech ściśle określanych poziomów ciśnień wynikających z kombinacji sygnałów binarnych. Na rys.4 przedstawiono charakterystykę takiego przetwornika.

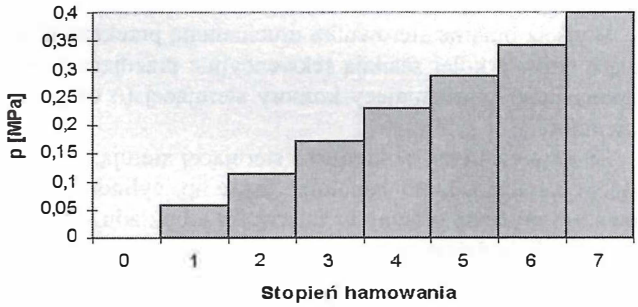
Przetwornik sterowany trzema sygnałami binarnymi umożliwia uzyskanie ośmiu poziomów ciśnień (rys. 5) a przetwornik sterowany czterema sygnałami binarnymi 16 poziomów ciśnień (rys. 6). Zaletą tego rodzaju przetworników jest prostota urządzenia, bardzo dobra powtarzalność, bardzo niewielki czas zwłoki oraz łatwość w diagnozowaniu. Wadą jest konieczność zasilania zaworów elektropneumatycznych określoną wartością ciśnienia oraz uzyskiwanie z przetwornika jedynie ściśle określonych wartości ciśnień. Ta ostatnia wada w niektórych zastosowaniach np. dla ściśle wymaganego stopniowania hamowania może okazać się zaletą.

W przypadku konieczności precyzyjnego sterowania stosując przetworniki sterowane czterema sygnałami binarnymi, można uzyskać zadawalającą dokładność i płynność sterowania pneumatycznego. Na przykład dla maksymalnego ciśnienia sterowania 0,4 MPa można uzyskać rozdzielczość pneumatyczną w sterowaniu binarnym ok. 0,027 MPa co w większości przypadków jest wielkością całkowicie wystarczającą.



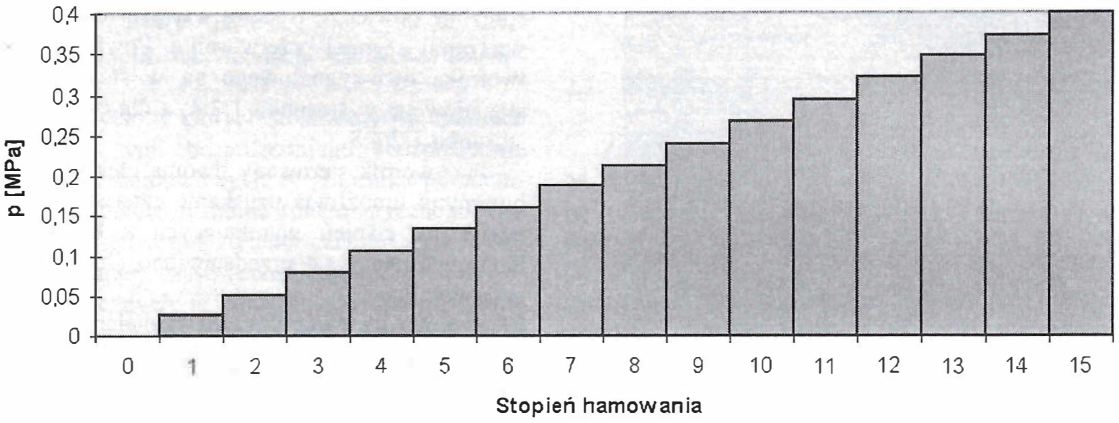
Zawór 1	0	x	0	x
Zawór 2	0	0	x	x
0- zawór wyłączony x- zawór załączony				

Rys.4 Charakterystyka przetwornika binarnego dwu-zaworkowego



Zawór 1	0	x	0	x	0	x	0	x
Zawor 2	0	0	x	x	0	0	x	x
Zawor 3	0	0	0	0	x	x	x	x
0- zawór wyłączony x- zawór załączony								

Rys.5 Charakterystyka przetwornika binarnego trzy-zaworkowego



Zawór 1	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x
Zawór 2	0	0	x	x	0	0	x	x	0	0	x	x	0	0	x	x
Zawór 3	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0	0	x	x	x	x
Zawór 4	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x
0- zawór wyłączony x- zawór załączony																

Rys.6 Charakterystyka przetwornika binarnego cztero-zaworkowego

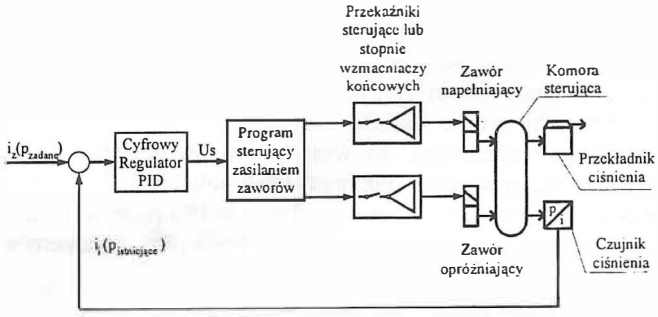
2.3. Przetwornik elektropneumatyczny analogowy sterowany binarnie lub analogowo - binarnie.

Koncepcję tego typu przetwornika sterowanego binarnie rokującego w przyszłości największe nadzieje oparto na sterowaniu mikroprocesorowym. W układach hamulca w których tego typu sterowanie zostanie zastosowane można będzie bez trudu wykorzystać istniejący sterownik wraz z odpowiednim oprogramowaniem do wygenerowania odpowiedniej wartości ciśnienia w funkcji czasu przy pomocy dwu typowych zaworów elektropneumatycznych (napełniającego i opróżniającego). Taki układ umożliwi przy pomocy jedynie dwu elektrycznych sygnałów binarnych o zmiennym czasie trwania uzyskanie (wygenerowanie) praktycznie analogowego sygnału pneumatycznego.

Schemat takiego przetwornika pokazano na rys. 7. Przetwornik składa się z cyfrowego regulatora PID i odpowiedniego programu sterującego zasilaniem zaworów elektropneumatycznych (wpisanego na stałe do pamięci procesora sterującego).

Wyjścia binarne sterownika uruchamiają przekaźniki sterujące, które z kolei zasilają sekwencyjnie pracujące zawory napełniający i opróżniający komory sterującej (o określonej pojemności).

Zmiany ciśnienia w komorze sterującej sterują przekładnikiem ciśnienia, który napełniać może np. cylindry hamulcowe lub przewód główny w zależności od układu w którym przetwornik będzie pracować.



Rys. 7. Schemat ideowy przetwornika elektropneumatycznego analogowego sterowanego binarnie

Analogowy algorytm regulatora PID przyjmujący postać [1]:

$$U_s(t) = K_p\left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t \varepsilon(\tau)\,d\tau + T_d\frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right]$$

gdzie:

$U_s(t)$ - napięcie sterujące regulatora

$K_p = \frac{1}{x_p}$ - współczynnik wzmocnienia

$\varepsilon(t)$ - uchyb regulacji

T_i - czas całkowania

T_d - czas różniczkowania

t - czas

τ - czas, zmienna pomocnicza

zostanie odpowiednio zmodyfikowany tak by mógł współpracować ze specyficznymi programami sterującymi zasilaniem zaworów elektropneumatycznych, zapewniając krótkie czasy zwłoczne i nadążność układu pneumatycznego za elektrycznym sygnałem sterującym dla założonych przebiegów ciśnień w funkcji czasu.

Zaletą układu będzie jego prosta budowa, liniowość charakterystyki, duża dokładność działania, praktycznie brak histerezy oraz dobre nadążanie sygnału pneumatycznego za elektrycznym. Wadą układu będzie konieczność stosowania sterownika mikroprocesorowego. Jednakże w przypadku istnienia już na pojeździe trakcyjnym sterownika niezbędnego z innych powodów (np. do sterowania trakcją, do diagnostyki itp.) co ostatnio staje się praktycznie konieczne, układ przedstawionego przetwornika będzie z punktu widzenia ekonomicznego i technicznego bardzo uzasadniony.

Przewiduje się, że rozdzielczość pneumatyczna przedstawionego układu będzie lepsza niż 0,015 MPa. W niektórych szczególnych przypadkach , w których wymagana byłaby większa dokładność działania, przewiduje się zastosowanie w miejsce typowych zaworów elektropneumatycznych zawory elektropneumatyczne tzw. proporcjonalne (o zmiennym wydatku przepływu w funkcji napięcia zasilania), oraz w miejsce przekaźników sterujących zastosowanie wzmacniaczy sterowanych napięciem z wyjść analogowych sterownika wg odpowiednio zmodyfikowanego programu sterującego. Układ logiczny sterowania tak zmodyfikowanego przetwornika praktycznie pozostanie bez zmian (rys. 6).

Przewidziane w najbliższym czasie w IPS próby i badania pozwolą na opracowanie sterujących programów komputerowych (cyfrowy PID i programy sterujące zasilaniem zaworów napełniającego i opróżniającego), dobór współczynnika wzmocnieniem (k_p) członu proporcjonalnego, czasów całkowania i różniczkowania (T_i , T_D) regulatora PID, oraz zidentyfikowanie parametrów przetwornika.

3. Podsumowanie.

W przyszłościowych nowoczesnych układach sterujących hamulcem pneumatycznym pojazdów szynowych przetworniki elektropneumatyczne generujące na sygnał elektryczny odpowiednią wartość ciśnienia będą miały kluczowe znaczenie. Prace nad tego typu przetwornikami mają podstawowe znaczenie w aspekcie prac rozwojowych nad przyszłościowymi układami hamulcowymi, gdyż bez tych urządzeń nie można sobie wyobrazić zdalnego sterowania hamowaniem pociągów (KHP) oraz sterowania mikroprocesorowego wszelkich pojazdów trakcyjnych (automatyczna jazda i hamowanie).

Istnieje więc pilna potrzeba prowadzenia prac koncepcyjno-rozwojowych nad trakcyjnymi przetwornikami elektropneumatycznymi. Prace te należy prowadzić nad różnego rodzajami przetworników, gdyż rodzaj zastosowanego przetwornika może w przyszłych układach zależeć od sposobu sterowania i rodzaju sygnałów sterujących. układami hamulców. Może się okazać że dla specyficznych sposobów sterowania i warunków zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa, wymaganej redundancji i diagnostyki układu, korzystny będzie ściśle określony przetwornik elektropneumatyczny.

Opisane koncepcje przetworników elektropneumatycznych zostaną fizycznie zrealizowane i przebadane w IPS - TABOR w ramach prac badawczo-rozwojowych prowadzonych na zlecenie KBN (projekt badawczy nr 9T 12C 01018 prowadzony przez autora).

Literatura

[1] *Stokłosa J.:Elektryczne regulatory przemysłowe. Skrypt Politechniki Poznańskiej nr 1320. Wyd. P.P., Poznań 1989*