

## Urządzenia pośredniczące w mikroprocesorowym sterowaniu nowoczesnych układów pneumatycznych hamulca

*W artykule przedstawiono kilka rodzajów przetworników elektro-pneumatycznych opracowanych i wykonanych w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR (IPS), ich wyniki badań stanowiskowych, oraz perspektywy zastosowania w układach pneumatycznych hamulca pneumatycznego nowej generacji. Praca realizowana jest w ramach projektu badawczego KBN Nr 9T12C01018.*

### 1. WPROWADZENIE

Tradycyjnym sposobem sterowania hamulcami w taborze kolejowym są układy pneumatyczne. Zasilanie i sterowanie tych układów odbywa się poprzez tak zwany przewód główny pociągu. Aktualnie w prawie 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 np. w systemie „Linienzugbeeinflussung” stosowanym na kolejach Deutsche Bundesbahn).

Poza tym w zespołach trakcyjnych, stosowany jest hamulec elektropneumatyczny typu bezpośredniego (bezpośrednie napełnienie cylindrów hamulcowych ze zbiornika pomocniczego). 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 wykorzystaniem 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 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.

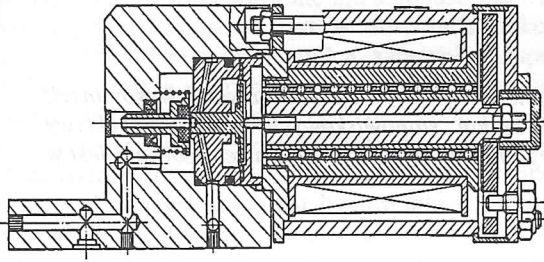
### 2. PODZIAŁ I RODZAJE PRZETWORNIKÓW ELEKTRO-PNEUMATYCZNYCH

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

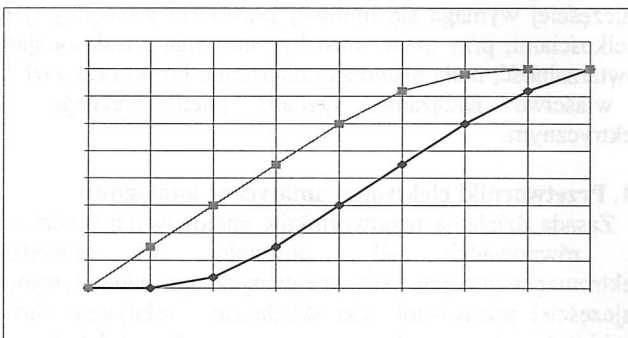
Zasada działania przetworników analogowych opiera się na równowadze siły powstałej w obwodzie elektromagnetycznym i siły pneumatycznego oddziaływania. Najczęściej przetwornik taki składa się z relatywnie dużej cewki i obwodu magnetycznego oraz zaworka trójdrogowego (napełnienie, równowaga - szczelność, 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 z nieruchomą cewką.

W trakcie eksploatacji obserwuje się poza tym zmiany niektórych parametrów takiego urządzenia np. ze względu na zanieczyszczenia 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 nieco mniejszy. Zaletą takiego układu jest większa dokładność i powtarzalność oraz mniejszy czas zwłoki. Wadą jest istotne rozbudowanie układu (wysoki koszt przetwornika) oraz założona niewielka szczelność układu, która w układach trakcyjnych pojazdów nie jest mile widziana ( straty sprężonego powietrza i energii). W celu opracowania prostego przetwornika o lepszej powtarzalności i dokładności działania oraz małej bezwładności w IPS - Tabor opracowano koncepcję przetwornika, którego obwód magnetyczny oparto na magnesie stałym z ruchomą cewką.



Rys. 2. Charakterystyka przetwornika analogowego prąd – ciśnienie.

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

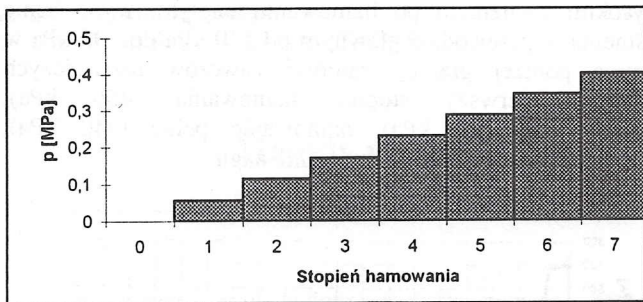
jednego elementu zawieszony aerodynamicznie w celu zminimalizowania oporów ruchu części pneumatycznej przetwornika. Zaletami tego przetwornika jest prosta budowa, dobra dokładność i powtarzalność oraz mała bezwładność (mała stała czasowa oraz dobre nadążanie sygnału pneumatycznego, za elektrycznym). Wadą przetwornika jest „nieszczelność” niezbędna do wytworzenia aerodynamicznego zawieszenia zaworka z pneumatyczną powierzchnią czynną.

## 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. Każdy z zaworów elektropneumatycznych doprowadza sprężone powietrze o stałej wartości ciśnienia do innej powierzchni czynnej przetwornika. Powierzchnie te dla przetwornika dwusygnałowego 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 trzema sygnałami binarnymi umożliwia uzyskanie ośmiu poziomów ciśnień (rys. 3). Zaletą tego rodzaju przetworników jest prostota urządzenia, bardzo dobra powtarzalność, niewielki czas zwłoki oraz łatwość w diagnozowaniu. Wadą jest uzyskiwanie z przetwornika jedynie ściśle określonych wartości ciśnień. W niektórych zastosowaniach np. dla ściśle wymaganego stopniowania hamowania wada ta może okazać się zaletą. W przypadku konieczności precyzyjnego sterowania stosując przetworniki sterowane czterema sygnałami binarnymi, można uzyskać zadawalającą dokładność i płynność sterowania pneumatycznego (16 poziomów ciśnień). 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.

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

Koncepcję tego typu przetwornika sterowanego analogowo dwoma zaworami elektropneumatycznymi, 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 zmodyfikowanych zaworów elektropneumatycznych (napełniającego i opróżniającego). Taki układ umożliwi przy pomocy jedynie dwu elektrycznych sygnałów analogowych generowanych przez sterownik uzyskanie dokładnego analogowego sygnału pneumatycznego. Schemat takiego przetwornika pokazano na rys. 4. Przetwornik składa się z dwu zaworów elektropneumatycznych, cyfrowego regulatora PID i odpowiedniego programu sterującego zasilaniem tych zaworów (wpisanego na stałe do pamięci procesora sterującego). Zmiany ciśnienia w komorze sterującej sterują przekładnikiem ciśnienia, który może napełniać np. cylindry hamulcowe lub przewód główny w zależności od układu w którym przetwornik będzie pracować.



Rys. 3. Charakterystyka przetwornika binarnego trójzaworowego

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,

$K_p$  - współczynnik wzmocnienia,

$\varepsilon(t)$  - uchyb regulacji,

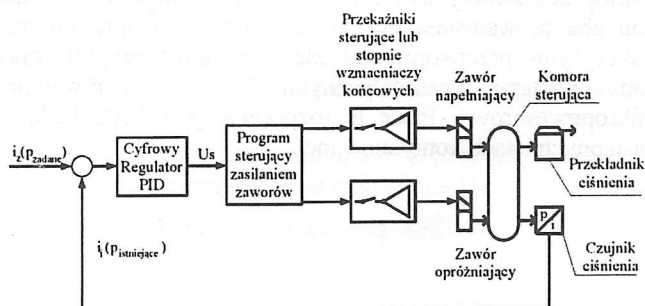
$T_i$  - czas całkowania,

$T_d$  - czas różniczkowania,

$t$  - czas,

$\tau$  - czas, zmienna pomocnicza,

został odpowiednio zmodyfikowany tak, by mógł współpracować ze specyficznymi programami sterującymi zasilaniem zaworów elektropneumatycznych, zapewniając krótkie czasy zwłoczne i dobre nadążanie realizowanej wartości ciśnienia za zadaniem sterującym przebiegów ciśnień w funkcji czasu. Zaletą układu jest jego prosta budowa, liniowość charakterystyki, duża dokładność działania, praktycznie brak histerezy oraz duże możliwości regulowania realizowanej wartości ciśnienia.



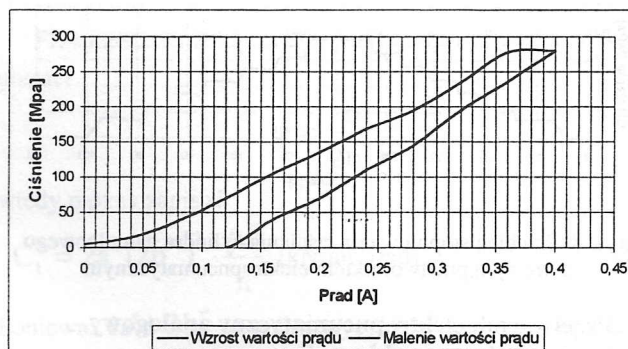
Rys. 4. Schemat ideowy przetwornika elektropneumatycznego analogowego sterowanego analogowo-binarnie.

### 3. WYNIKI BADAŃ

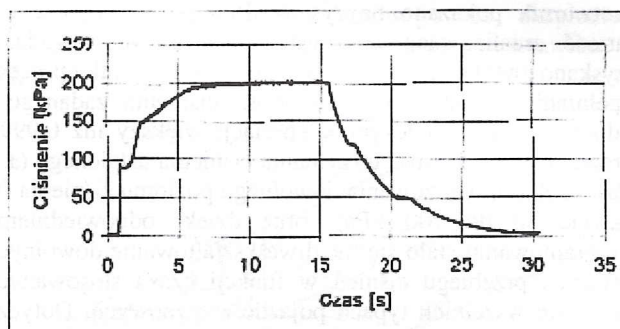
W bieżącym roku w IPS rozpoczęto próby i badania opracowanych i uruchomionych wcześniej przetworników. W tym celu opracowano specjalny program komputerowy do kształtowania dowolnych nieliniowych (np. wg zależności (7) podanej w pracy [2]) lub liniowych zadanych przebiegów ciśnień w funkcji czasu. Poniżej przedstawiono uzyskane dotąd wyniki [3].

### 3.1. Przetworniki elektropneumatyczne analogowe

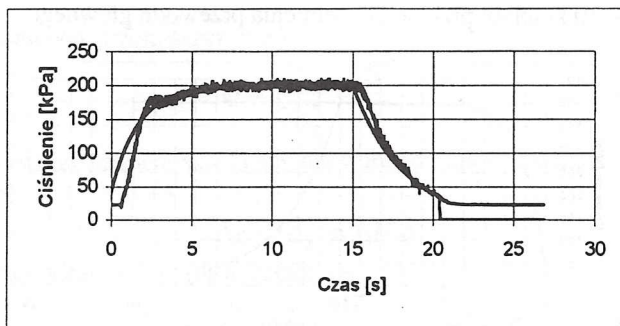
Zgodnie z oczekiwaniami przetwornik analogowy z nieruchomą cewką posiada znaczną histerezę. Charakterystykę statyczną przedstawiono na rys 5. Na rys.6 przedstawiono przebieg dynamiczny ciśnienia generowanego bez regulatora PID, gdyż ze względu na histerezę przetwornik ten nie nadaje się do szybkozmiennych przebiegów. Nieliniowa charakterystyka i histereza są powodem dużej zwłoki czasowej na początku procesu i niestabilnego wzrostu ciśnienia. Na rys. 7 przedstawiono napełnienie i luzowanie komory ciśnieniowej przez przetwornik analogowy z ruchomą cewką. Czas zwłoki jest zbyt duży a wartość ciśnienia ustalonego pulsuje ze znaczną częstotliwością.



Rys. 5. Charakterystyka statyczna przetwornika analogowego z nieruchomą cewką



Rys. 6. Przebieg dynamiczny ciśnienia z przetwornika analogowego z nieruchomą cewką dla czasu napełnienia 4 sekundy i czasu luzowania 8 sekund

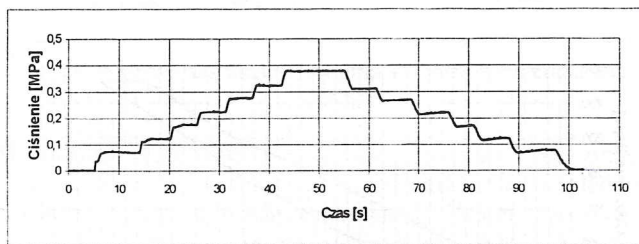


Rys. 7. Przebieg dynamiczny ciśnienia przetwornika analogowego z ruchomą cewką dla czasu napełnienia 5 sekund i czasu luzowania 5 sekund

Na rys. 7 przedstawiono napełnienie i luzowanie komory ciśnieniowej przez przetwornik analogowy z ruchomą cewką. Czas zwłoki jest zbyt duży a wartość ciśnienia ustalonego pulsuje ze znaczną częstotliwością.

### 3.2. Przetworniki elektropneumatyczne cyfrowe.

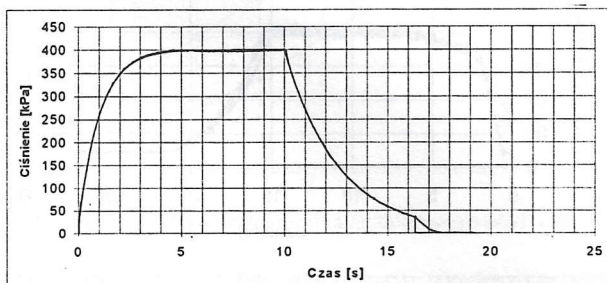
Ze względu na dobre własności cyfrowego przetwornika zbudowano do prób kompletną instalację sterującą hamulca pojazdu szynowego. Na rys. 8 przedstawiono uzyskaną charakterystykę stopniowania ciśnieniem cylindra (stopniowe hamowanie i luzowanie) w układzie sterującym złożonym z: manipulatora binarnego, dekodera, przetwornika cyfrowego elektropneumatycznego trójzaworowego, komory sterującej, przekładnika ciśnienia i cylindra hamulcowego.



Rys. 8. Przebieg stopniowania ciśnienia cylindra hamulcowego cyfrowym przetwornikiem elektropneumatycznym

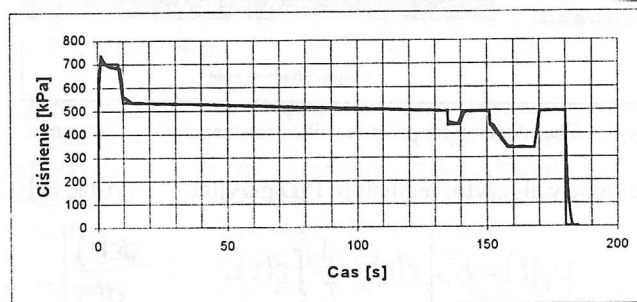
### 3.3. Przetwornik elektropneumatyczny analogowy sterowany analogowo - binarnie.

Przebadany przetwornik, którego schemat pokazano na rys 4 wykazał pełną przydatność do elektrycznego sterowania dowolnymi przebiegami ciśnień. Przykład dynamicznego przebiegu ciśnienia zadanego i zrealizowanego przez przetwornik pokazano na rys. 9. Praktycznie na rysunku wartość zrealizowana pokrywa się z wartością zadaną. Uzyskano zwłokę czasową 0,03 sekundy na początku procesu napełniania, bardzo dobrą zgodność ciśnienia zadanego i realizowanego (współczynnik korelacji większy niż 0,999), bardzo dużą dokładność utrzymania ciśnienia ustalonego ( $\pm 1$  kPa), zdolność realizowania dowolnego poziomu ciśnienia (w zakresie 50 do 700 kPa), oraz dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu stało się możliwe kształtowanie dowolnych krzywych przebiegu ciśnień w funkcji czasu stosowanych dzisiaj we wszelkich typach pojazdów szynowych. Dotyczy to przebiegów ciśnień w cylindrach hamulcowych oraz ciśnień w przewodzie głównym pociągu. Jako przykład przebiegu ciśnień realizowanych przez zawór maszynisty sterujący ciśnieniem w przewodzie głównym pociągu przy pomocy wyżej przedstawionego przetwornika, pokazano na rys. 10 kolejno: przebieg napełnienia przewodu głównego



Rys. 9. Przebieg ciśnień zadanego i zrealizowanego przez przetwornik elektropneumatyczny dwuzaworowy, sterowany analogowo - binarnie

wysokim ciśnieniem po hamowaniu nagłym, wyrównanie ciśnienia w przewodzie głównym od 540 kPa do 500 kPa w tempie poniżej granicy czułości zaworów rozrządzących pociągu, pierwszy stopień hamowania (450 kPa), wyluzowanie (500 kPa), hamowanie pełne (340 kPa), ponowne wyluzowanie i hamowanie nagłe.



Rys. 10. Przykładowy przebieg ciśnień zadanego i zrealizowanego przez przetwornik elektropneumatyczny dwuzaworowy, sterowany analogowo - binarnie dla układu sterującego hamulcem pociągu (zmiany ciśnienia w przewodzie głównym)

## 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), sterowania mikroprocesorowego wszelkich pojazdów trakcyjnych (automatyczna jazda i hamowanie), oraz diagnostyki mikroprocesorowej układów hamulca. Istnieje więc pilna potrzeba prowadzenia prac koncepcyjno-rozwojowych nad trakcyjnymi przetwornikami elektropneumatycznymi, oraz nad układami pneumatycznymi hamulca sterowanymi mikroprocesorowo. Prace te rozpoczęte przez IPS będą w następnych latach kontynuowane.

## Literatura

1. Stokłosa J.: *Elektryczne regulatory przemysłowe. Skrypt Politechniki Poznańskiej nr 1320. Wyd. P.P., Poznań 1989*
2. Włodzimierz Gąsowski, Marian Kaluba.: *Trybologiczne badania okładziny ciernej hamulca tarczowego pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe 1/1999.*
3. Kaluba M.: *Sprawozdanie z badań identyfikacyjnych przetworników elektro-pneumatycznych. SB-2184 IPS Poznań 2002.*