

# APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

## Stanowisko do badania hamulca tarczowego i taśmowego

*JERZY NACHIMOWICZ, MIKOŁAJ PLEWA*

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA BUDOWY I EKSPLOATACJI MASZYN

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono stanowisko przeznaczone do badania procesu hamowania układu napędowego za pomocą hamulca tarczowego i taśmowego. Prezentowane stanowisko pozwala badać wpływ rodzaju materiału cięgien, siły docisku cięgna do bębna i kąta opasania cięgna na skuteczność hamowania hamulca taśmowego, a także wpływ siły docisku tarczy na przebieg hamowania hamulca tarczowego. Przeprowadzone próby testowe potwierdziły dużą przydatność prezentowanego urządzenia zarówno w dydaktyce jak i badaniach naukowych.

### A stand for testing the disk brake and the band brake

### ABSTRACT

This paper presents a construction of test apparatus for testing the disk brake and the band brake. Presented stand permits to estimate influence of band's materials, a band tension, an angle of wrap for band brake and influence the pressure of disk for the disk brake on effectiveness of braking. The multiple tests confirmed the usefulness of this stand in both case teaching and research.

## 1. WPROWADZENIE

Niezawodność pracy maszyny roboczej w dużej mierze zależy od właściwego ustalenia parametrów pracy elementów składowych układu napędowego takich jak sprzęgło czy hamulec. Na szczególną uwagę zasługuje poznanie zachowania się tych podzespołów w zakresie pracy niestabilnej tj. przy włączaniu, hamowaniu, przeciążeniu układu. Zagadnieniami tymi zajmują się, zarówno od strony teoretycznej jak i praktycznej, laboratoria naukowe i przemysłowe. Badania teoretyczne w tym zakresie wymagają doświadczalnej ich weryfikacji. Do przeprowadzenia takiej weryfikacji niezbędne są stanowiska badawcze pozwalające stworzyć warunki identyczne lub zbliżone do występujących w trakcie eksploatacji układów napędowych. Opisy niektórych tego typu istniejących urządzeń można znaleźć w specjalistycznej literaturze, np. [1, 2], lub na stronach internetowych ośrodków badawczych [3-5]. Wszystkie analizowane konstrukcje nie spełniły jednak oczekiwań badawczych autorów niniejszego opracowania, a ponadto były stosunkowo drogie. Pojawiła się potrzeba opracowania nowego, prostego i względnie taniego stanowiska badawczego. Przedstawione w niniejszej publikacji stanowisko badawcze zostało opracowane i wykonane w Politechnice Białostockiej w latach 2006÷2008. Niektóre rozwiązania konstrukcyjne urządzenia zgłoszono do opatentowania jako wzór użytkowy [6].

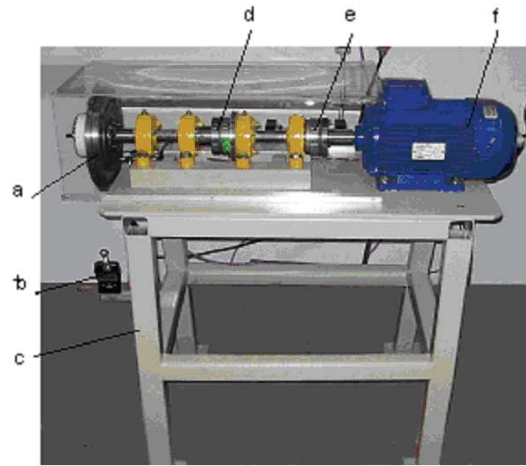
Główne założenia przyjęte przy opracowywaniu stanowiska badawczego:

- konstrukcja układu napędowego powinna zawierać: sprzęgło, przynajmniej jeden hamulec i odbiornik mocy (element o cechach charakterystycznych dla maszyny roboczej),
- obsługa stanowiska ma być łatwa, a wyniki przeprowadzanych pomiarów rejestrowane i dostępne w postaci wystarczającej do przeprowadzenia jakościowej analizy badań,
- konstrukcja stanowiska powinna pozwalać na przeprowadzanie zarówno ćwiczeń dydaktycznych (wersja uproszczona), jak i badań naukowych.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE

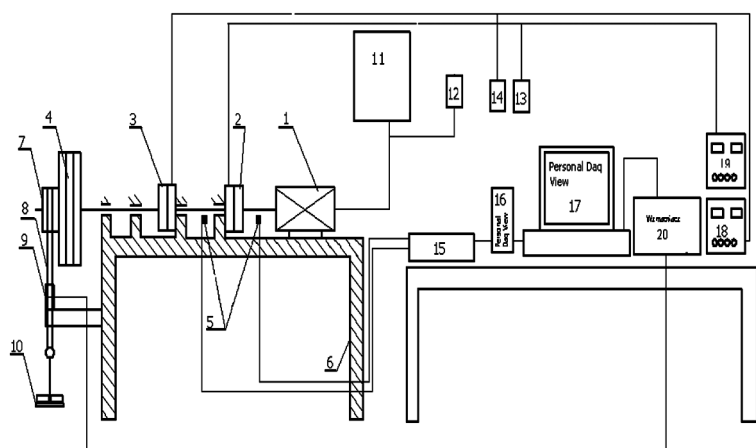
Ogólny widok stanowiska badawczego pokazano na Rysunku 1, a jego schemat z aparaturą kontrolno-pomiarową i sterującą na Rysunku 2.

Stanowisko badawcze (Rys. 2) jest układem napędowym składającym się z elektryczne-



**Rysunek 1.** Stanowisko badawcze – widok ogólny:  
a – koło zamachowe z hamulcem taśmowym,  
b – siłomierz, c – rama, d – hamulec tarczowy,  
e – sprzęgło, f – silnik elektryczny

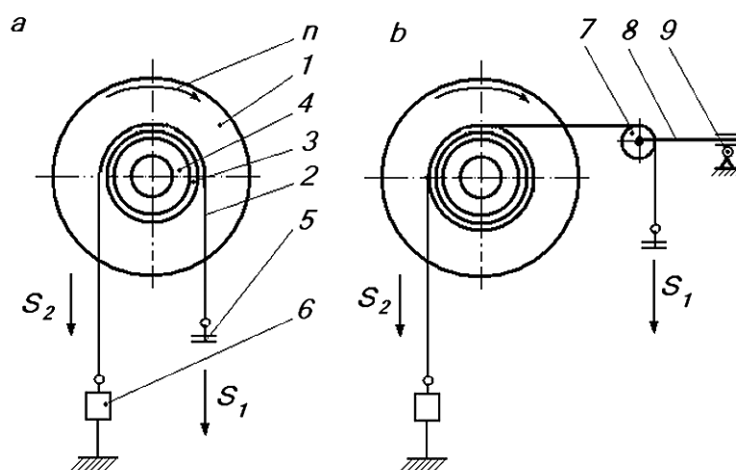
go silnika napędowego (1) i wału biernego z kołem zamachowym (4) o dużym masowym momencie bezwładności, stanowiącym maszynę roboczą. Na wale umieszczone są dwa hamulce: tarczowy (3) i taśmowy (7). Silnik (1) i wał są sprzęgnięte ze sobą za pomocą elektromagnetycznego sprzęgła tarczowego (2). Do napędu układu wykorzystano silnik elektryczny Sg100L-2 o mocy 3kW i znamionowej prędkości obrotowej  $n=2905\text{min}^{-1}$  (dane wg [7]). Do zmiany prędkości obrotowej silnika zastosowano urządzenie ACS350 (tzw. falownik), zmieniające częstotliwość prądu zasilającego silnik. Jako hamulec tarczowy zastosowano elektromagnetyczny hamulec typu ESM5-20-24 f-my Fumo [8].



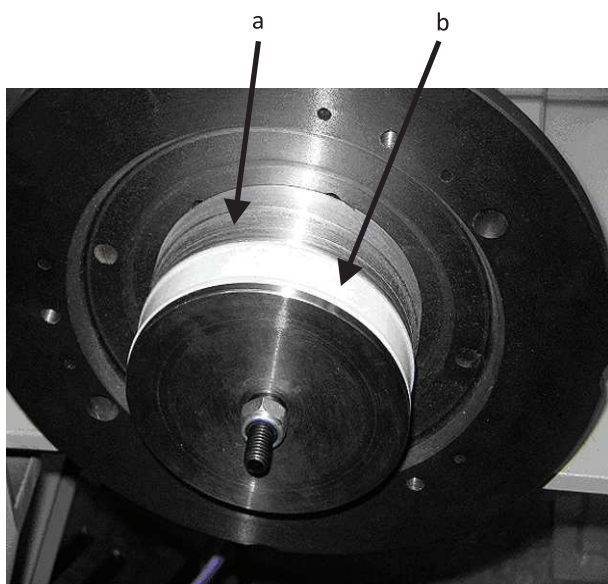
**Rysunek 2.** Schemat stanowiska badawczego, 1 – silnik elektryczny, 2 – tarczowe sprzęgło cierne, 3 – hamulec tarczowy, 4 – koło zamachowe, 5 – czujniki prędkości obrotowej (tachometry), 6 – rama, 7 – hamulec taśmowy, 8 – ciągnio hamulca taśmowego, 9 – siłomierz, 10 – szalka z obciążnikami 11 – napęd ACS 350, 12 – panel sterowania silnikiem, 13 – panel sterowania sprzęgłem, 14 – panel sterowania hamulcem tarczowym, 15 – skrzynka przekaźnikowa, 16 – moduł Personal Daqs, 17 – komputer PC, 18 – zasilacz hamulca tarczowego, 19 – zasilacz sprzęgła, 20 – wzmacniacz tensometryczny

Hamulec taśmowy jest konstrukcją zaprojektowaną specjalnie dla potrzeb stanowiska badawczego. Podstawowe elementy tego hamulca pokazano na Rysunkach 3, 4 i 5. W konstrukcji hamulca taśmowego przewidziano możliwość zmiany kąta opasania cięgna wiotkiego (prowadnica (8) i rolka (7) – Rys. 5). Hamulec taśmowy wyposażono ponadto w siłomierz (6) służący do pomiaru siły w biernej części cięgna. Zastosowanie wymiennych pierścieni na bębnie hamulca pozwoliło badać wpływ różnych par ciernych na przebieg hamowania układu napędowego. Zestawienie par ciernych dotychczas wykorzystywanych w badaniach przedstawiono w Tabeli 1. Podsumowując należy stwierdzić, że konstrukcja hamulca pozwala na:

- badanie wpływu różnych par ciernych na przebieg hamowania układu napędowego,



**Rysunek 5.** Ułożenie cięgna w hamulcu taśmowym przy kącie opasania a) –  $\varphi=\pi$ , b) –  $\varphi=\pi/2$ ; 1 – koło zamachowe, 2 – cięgno wiotkie (taśma), 3 – wymienny pierścień hamulca (aluminium, poliamid), 4 – bęben hamulca, 5 – szalka z obciążnikami, 6 – siłomierz, 7 – rolka, 8 – prowadnica, 9 – korpus ramy,  $S_1$  – siła w cięgnie czynnym (obciążenie szalką i ciężarkami),  $S_2$  – siła w cięgnie biernym rejestrowana przez siłomierz,  $n$  – prędkość obrotowa wału



**Rysunek 3.** Bęben hamulca taśmowego:  
a – pierścień aluminiowy, b – pierścień poliamidowy



**Rysunek 4.** Siłomierz zamontowany na ramie

**Tabela 1.** Zestawienie badanych par ciernych

Taśma \ Pierścień	Skóra	Stal	Mosiądz
aluminium	al-sk	al-st	al-mos
poliamid	pol-sk	pol-st	pol-mos

- analizę wpływu kąta opasania cięgna na skuteczność hamowania,
- ocenę rzeczywistych sił obciążających cięgno i bęben hamulca.

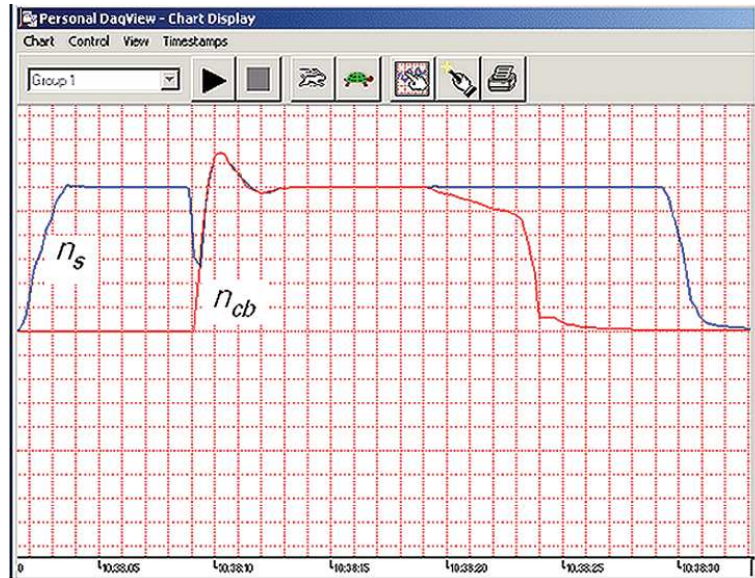
### 3. STEROWANIE UKŁADEM NAPĘDOWYM, POMIAR I REJESTRACJA WYNIKÓW

- Opracowując układ sterowania przyjęto, że:
- obsługa stanowiska powinna odbywać się z pulpitu sterowniczego lub za pomocą pilotów (zminimalizowanie zagrożeń związanych z ruchem obrotowym elementów),
  - wszystkie wielkości mierzone powinny być rejestrowane automatycznie i zapisywane w pamięci komputera,
  - dostęp do uzyskanych wyników powinien być łatwy i czytelny.

Układ sterowania z zastosowaną aparaturą kontrolno-pomiarową i sterującą uwidocznił na Rysunku 2. Sterowanie poszczególnymi podzespołami układu napędowego odbywa się za pomocą paneli sterujących (12), (13), (14). Do zmiany parametrów pracy sprzęgła i hamulca tarczowego wykorzystywane są

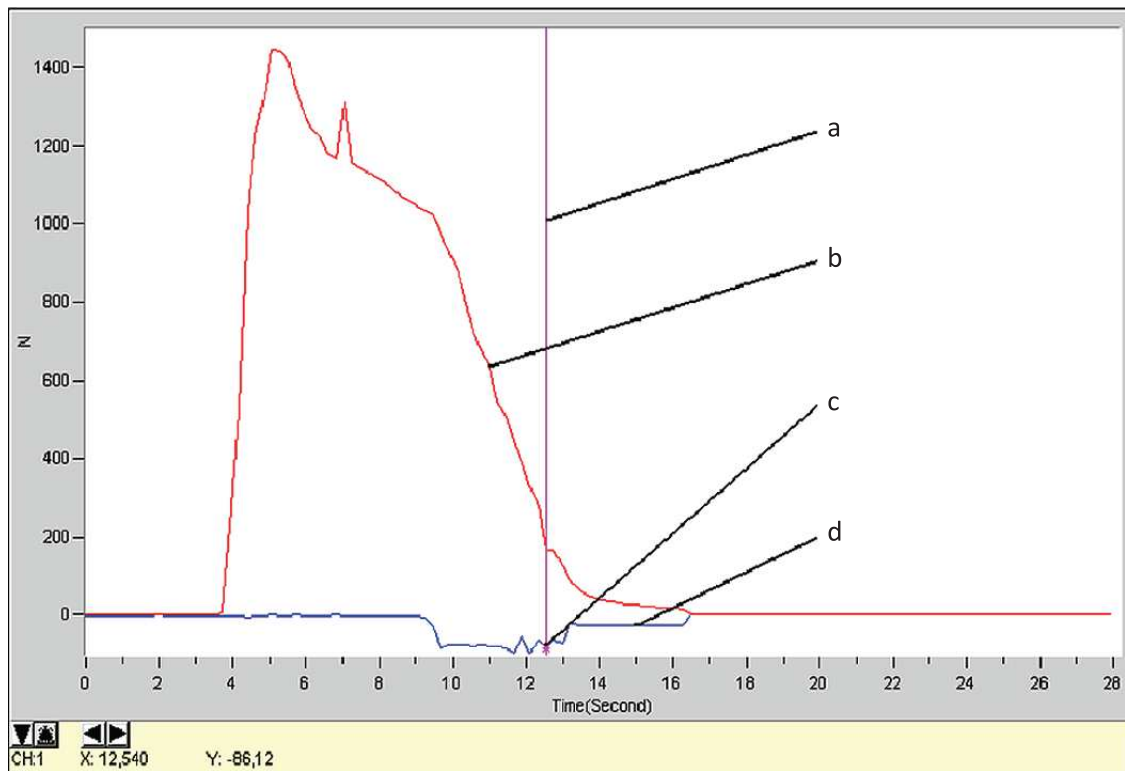


zasilacze (18) i (19). Do pomiaru bieżących wartości prędkości obrotowych członu biernego i czynnego zastosowano czujniki prędkości (5). Sygnały z tych czujników, po odpowiednim przetworzeniu, są rejestrowane w pamięci komputera i wizualizowane na ekranie monitora. W układzie sterowania, zbierania i przesyłania danych wykorzystano urządzenie Personal Daqs 55 firmy lotech, Inc służące do komunikacji układu napędowego z komputerem klasy PC. Urządzenie to współpracuje z oprogramowaniem Personal DaqView i lotech`s Windows. Przykładowy wykres uzyskany dla jednej z prób pokazano na Rysunku 6. Wykres ten przedstawia cały cykl pracy układu napędowego obejmujący: włączenie silnika, włączenie sprzęgła, stabilizację obrotów członu czynnego i biernego, wyłączenie sprzęgła, hamowanie ruchu członu biernego oporami łożysk, hamowanie ruchu członu biernego hamulcem tarczowym, wyłączenie silnika. Do dokładnego ustalenia przebiegu wybranego rodzaju pracy układu napędowego wykorzystywane są odpowiednie aplikacje programu Personal DaqView. Przykład takiej aplikacji wykorzystywanej do ustalenia, dla wybranego czasu hamowania, prędkości



**Rysunek 6.** Wykres zmian prędkości obrotowej układu napędowego przy jego włączeniu, wyłączeniu i hamowaniu generowanego przez program Personal DaqView:  
 $n_s$  – prędkość silnika,  $n_{cb}$  – prędkość członu biernego

obrotowej  $n$  członu biernego lub siły  $S_2$  w cięgnię biernym pokazano na Rysunku 7. W lewym dolnym rogu podane są wartości bieżące czasu (współrzędna  $X=t=12,54s$ ) i (współrzędna  $Y=S_2=86,12N$ ) odpowiadające bieżącemu położeniu punktu na wykresie siły.



**Rysunek 7.** Jedna z aplikacji programu Personal DaqView (eZ-Post View) – przykładowy wykres zmian prędkości wału biernego przy hamowaniu hamulcem taśmowym z parą cierną al-st i  $S_2=15[N]$ :  
 a – znacznik do ustalania współrzędnych dowolnego punktu na wykresie,  
 b –  $n$  prędkość członu biernego w  $min^{-1}$ , c – punkt wykresu, którego współrzędne podano w lewym dolnym rogu, d – siła w cięgnię biernym ( $S_2$ )

#### 4. PRÓBY TESTOWE STANOWISKA BADAWCZEGO

Wstępny program prób testowych obejmował:

- badania wpływu siły docisku tarczy na skuteczność hamowania hamulca tarczowego,
- badania wpływu siły docisku taśmy do bębna i materiałów par ciernych (taśma - bęben) na skuteczność hamowania hamulca taśmowego.

Próby testowe przeprowadzono przy prędkości obrotowej silnika  $n_s = 1200$  obr/min. Przyjęto, że napięcie zasilające elektromagnes hamulca tarczowego wyniesie  $U = 2 \div 6$  V. Do badań hamulca taśmowego użyto 6 rodzajów par ciernych (Tab. 1). Przyjęto ponadto, że kąt opasania cięgna  $\varphi = \pi$ , a obciążenie  $Q$  taśmy w każdej próbie testowej będzie jednakowe i równe: 15, 25, 35 [N]. Na podstawie dodatkowych badań ustalono, że  $I_b$  członu biernego układu napędowego wynosi:  $I_b = 800$  [kgcm<sup>2</sup>].

#### 5. ANALIZA WYNIKÓW PRÓB TESTOWYCH

Analizy pracy układu napędowego można dokonać wykorzystując dynamiczne równanie ruchu obrotowego, które dla członu biernego, w przypadku włączenia sprzęgła, przyjmie postać (1), a w przypadku hamowania postać (2):

$$I_b \varepsilon_{wl} + M_{hl} = M_{ts}, \quad (1)$$

$$I_b \varepsilon_h = M_{hl} + M_{hhe} + M_{hht}, \quad (2)$$

gdzie:

- $I_b$  – masowy moment bezwładności członu biernego [kgm<sup>2</sup>],
- $\varepsilon_h$  – opóźnienie kątohamowania członu biernego [1/s<sup>2</sup>],
- $\varepsilon_{wl}$  – przyspieszenie kątohamowania członu biernego przy włączaniu sprzęgła [1/s<sup>2</sup>],
- $M_{ts}$  – moment tarcia na sprzęgle [Nm],
- $M_{hl}$  – moment oporu w łożyskach [Nm],
- $M_{hhe}$  – moment hamowania hamulca tarczowego [Nm],
- $M_{hht}$  – moment hamowania hamulca taśmowego [Nm].

Występujące we wzorach (1) i (2) opóźnienie  $\varepsilon_h$  i przyspieszenie  $\varepsilon_{wl}$  można wyznaczyć w oparciu o wyniki pomiarów prędkości silnika  $n_s$  i członu biernego  $n_{cb}$ , uzyskane w trakcie próby.

Aby ocenić przydatność prezentowanego stanowiska badawczego do badania procesu hamowania układu napędowego za pomocą hamulca tarczowego i taśmowego, wykonano szereg prób testowych pozwalających przeanalizować wpływ wybranych parametrów eksploatacyjnych ( $U$ ,  $Q$ , rodzaj materiału pary cierniej) na  $M_{hhe}$  i  $M_{hht}$ . Wyniki analizy przedstawiono na wykresach (Rys. 8, 9).

#### 6. PODSTAWOWE PARAMETRY TECHNICZNE STANOWISKA

Główne podzespoły układu napędowego:

- silnik elektryczny typ Sg100L-2 o mocy 3kW i  $n = 2905$  min<sup>-1</sup>,
- przetwornik częstotliwości ACS350,
- elektromagnetyczne sprzęgło tarczowe typ ESM3-20-25-24,
- elektromagnetyczny hamulec tarczowy typ ESM5-20-24,
- hamulec taśmowy z wymiennymi bębniem i taśmą oraz zmiennym kątem opasania  $\varphi = \frac{\pi}{2} \div \frac{3\pi}{2}$ .

Główna aparatura kontrolno-pomiarowa i sterująca:

- wzmacniacz tensometryczny z siłomierzem,
- czujniki prędkości wału biernego i czynnego,
- moduł pomiarowy Personal Daq/55",
- komputer klasy PC rejestrujący przebiegi prędkości obrotowej wału biernego i czynnego układu napędowego oraz siłę w ciągnięciu biernym hamulca taśmowego.

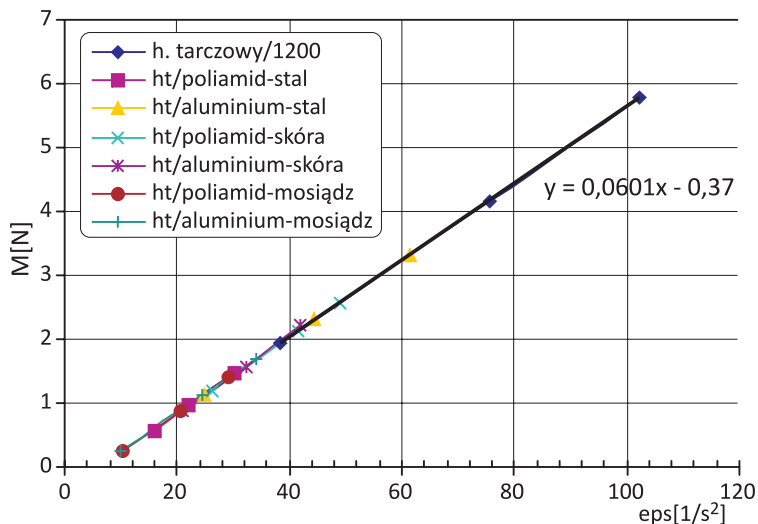
Zakres realizowanych badań:

- badanie wpływu napięcia zasilającego elektromagnes hamulca na przebieg hamowania układu napędowego przy różnych prędkościach obrotowych wału biernego,
- badanie wpływu siły naciągu taśmy hamulca taśmowego, kąta opasania oraz rodzaju pary cierniej (wymienność pierścienia bębna - wymienna taśma) na przebieg hamowania układu napędowego przy różnych prędkościach obrotowych wału biernego,
- badanie wpływu napięcia zasilającego elektromagnes sprzęgła na przebieg włączania układu napędowego przy różnych prędkościach obrotowych wału czynnego,
- badanie przebiegu hamowania układu napędowego przy programowanej pracy hamulca tarczowego (opcjonalnie).

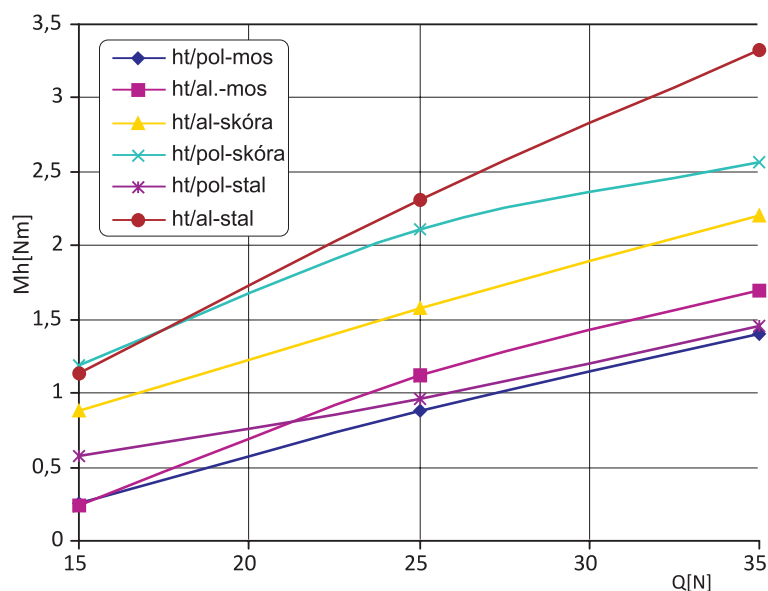
#### 7. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane stanowisko badawcze jest przeznaczone do badania wybranych podzespołów takich jak sprzęgło, hamulec, w niestabilnych warunkach pracy układu napędowego (włączanie, hamowanie). Zakres możliwych do przeprowadzenia badań obejmuje:

- badanie przebiegu włączania elektromagnetycznego sprzęgła tarczowego przy różnych prędkościach obrotowych silnika i różnych siłach docisku tarczy sprzęgła,



**Rysunek 8.** Wpływ opóźnienia hamowania na moment hamowania hamulca tarczowego i taśmowego przy różnych parach ciernych



**Rysunek 9.** Wpływ obciążenia i materiałów par ciernych na moment hamowania hamulca taśmowego

– badanie przebiegu hamowania układu napędowego za pomocą hamulca tarczowego,

– badanie wpływu różnych materiałów par ciernych, kąta opasania, siły docisku taśmy do bębna na przebieg hamowania hamulca taśmowego.

Zastosowanie siłomierza do pomiaru i rejestracji siły w biernej części taśmy pozwoliło uzyskać pełniejszą analizę zjawisk tribologicznych zachodzących na styku taśma-bęben.

Przeprowadzone na omawianym stanowisku badawczym, próby testowe charakteryzowały się dużą powtarzalnością wyników pomiarów, a zastosowana aparatura pomiarowa i rejestracyjna pozwoliła na pełną wizualizację przebiegu pracy układu napędowego. O poprawności pracy badanych hamulców może świadczyć liniowa zależność  $M_h$  od  $\epsilon_h$ , dla hamulca tarczowego i taśmowego, pokazana na Rysunku 8. Zastosowanie w układzie napędowym stanowiska, hamulca taśmowego własnej konstrukcji pozwoliło ocenić wpływ rodzaju materiału pary cierniej na skuteczność hamowania (Rys. 9). Obszerniejsze wyniki badań wykonanych na prezentowanym stanowisku zamieszczono w pracy [9].

## LITERATURA

- [1] Rogoziński T.: Laboratorium Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 1977.
- [2] Porębska M., Warszński M.: Laboratorium Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wyd. Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 1995.
- [3] <http://www.itee.radom.pl/>.
- [4] <http://www.bosmal.com.pl/>.
- [5] <http://www.ikem.pwr.wroc.pl/pkmit>.
- [6] Nachimowicz J., Plewa M.: Urządzenie do badania sprzęgła i hamulców, Zgłoszenie wzoru użytkowego nr 117800 z dn.24.10.2008.
- [7] Katalog Silników Elektrycznych FME INDUKTA SA, Bielsko Biała 2002.
- [8] <http://www.fumo.com.pl/>.
- [9] Nachimowicz J., Plewa M.: Badanie wpływu wybranych parametrów eksploatacyjnych na skuteczność hamowania hamulca tarczowego i taśmowego, Acta Mechanica et Automatica vol. 3 no.2, Białystok 2009, 55-59.