

## Nowoczesne bezwładnościowe stanowisko do badań hamulców pojazdów szynowych

*Przedstawiono opis układu sterowania i założenia części mechanicznej nowoczesnego stanowiska do badań par ciernych hamulców pojazdów szynowych, które umożliwi nie tylko badania własności tribologicznych pary czarnej, ale również ocenę ekonomiczną przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych dla konkretnego pojazdu i konkretnej linii, na której przewidziana będzie jego eksploatacja.*

*Dotychczasowe stanowiska, tak jak stanowisko bezwładnościowe w IPS-Tabor, wyposażone są w wiele mas bezwładnościowych, dzięki którym można zamodelować ściśle określoną masę pojazdu. Nowoczesne stanowiska bezwładnościowe umożliwiają (dzięki odpowiednim układom pomiarowym i zaawansowanej energoelektronice) symulowanie masy hamowanej silnikiem napędowym. Powoduje to z jednej strony ograniczenie ilości mas do jednej (ograniczenia wielkości części mechanicznej stanowiska), a z drugiej strony zrealizowanie przejazdu teoretycznego na dowolnym i zmiennym pochyleniu z możliwością realizowania przejazdów o dowolnym przebiegu prędkości w funkcji czasu lub przebytej drogi.*

### 1. Wstęp

Badania poligonowe pojazdów szynowych należą do badań bardzo kosztownych. W celu ograniczenia kosztów rozwoju układów konstrukcyjnych pojazdu wiele badań wykonuje się na stanowiskach badawczych. Dla układów hamulcowych pojazdów szynowych buduje się stanowiska w skali 1:1, zapewniające właściwe modelowanie badanych procesów. Do takich stanowisk należą stanowiska do badań układów mechanicznych (długotrwałych badań elementów mechanicznych hamulca), układów pneumatycznych (sterujących i zasilających hamulec pneumatyczny), oraz stanowiska bezwładnościowe (do badań układów rozpraszających energię podczas procesu hamowania).

W przypadku rozwoju tarcz hamulcowych, okładzin ciernych i wstawek hamulcowych z nowych materiałów ciernych nieodzowne staje się prowadzenie badań najpierw na stanowisku bezwładnościowym, na którym można zasymulować nie tylko hamowania ekstremalne do zatrzymania z prędkości maksymalnej, czy hamowania ze stałą mocą symulujące zjazd pojazdu na pochyleniu, ale również dowolne przejazdy teoretyczne i rzeczywiste na wybranym szlaku kolejowym. Podobne stanowiska są już eksploatowane przez DB, SNCF i CNTK w Warszawie.

### 2. Ogólna koncepcja stanowiska

W celu zminimalizowania oporów własnych stanowiska, powinno ono zostać wyposażone jedynie w jedną masę bezwładności stanowiącą całość z wałem, łożyskowanym na dwu łożyskach tocznych. Układ napędowy stanowiska (silnik + energoelektronika zasilająca i sterująca silnikiem) umożliwi dodatkowo symulację bezwładności (powiększenie lub jej pomniejszenie) w zakresie momentu, który będzie mógł być rozwinięty przez silnik, sterowany energoelektroniką poprzez układ mikroprocesorowy.

Ze względu na duży zakres wymaganych momentów bezwładności dla modelowanych mas pojazdów tj. od około  $250 \text{ kgm}^2$  do około  $3500 \text{ kgm}^2$ , mimo założonej symulacji bezwładności, istnieje konieczność wyposażenia stanowiska w dwie dodatkowe masy bezwładności, ale bez własnego łożyskowania, montowane do masy podstawowej. Spowodowane jest to ograniczoną wartością momentu rozwijanego

przez optymalnie dobrany (ze względu na jego moc) układ napędowy. Moc silnika zostanie dobrana tak, by zrealizować można było wszystkie wymagane przepisami międzynarodowymi próby długotrwałe (ze stałą mocą) i równocześnie zapewnić w maksymalnym stopniu właściwą ekonomiczność prowadzenia badań (minimalizacja mocy zainstalowanej). Z w/podanych warunków wynika konieczność wyposażenia stanowiska w dwie dodatkowe masy bezwładności, które zostaną mocowane w miarę potrzeby do podstawowej masy łożyskowanej na wale, co nie spowoduje zwiększenia w istotny sposób ani oporów własnych, ani kosztów wykonania części mechanicznej stanowiska. Dobór mas bezwładności zostanie tak dokonany, by z jednej strony możliwe było wykonywanie znacznej części badań wymaganych przepisami międzynarodowymi bez symulacji masy, a z drugiej strony by możliwe było symulowanie wielkości mas i prędkości stosowanych dzisiaj i w przyszłości.

Na stanowisku będzie możliwe symulowanie hamowań z prędkości maksymalnej 350 km/h dla pojazdów z kołami o średnicy 0,89 m i masie od około 1,5 do 15 ton (przypadającej na koło lub jeden układ hamulca np. tarczę) z całkowitym momentem hamowania około 11 kNm.

Zgodnie z aktualnymi wymaganiami stanowisko będzie wyposażone w układ spryskiwania powierzchni ciernych (do symulacji hamowań na mokro), oraz w układ wentylatorów, symulujących prędkość powietrza pod pojazdem w czasie hamowania.

Stanowisko spełni wymagania dla stanowisk badawczych typu A,B,C i D wg karty UIC 541-4 [1].

Dodatkowo do awaryjnego zatrzymania wału stanowiska zabudowany zostanie hamulec awaryjny pomiędzy silnikiem a masą bezwładności.

### 3. Układ napędowy

#### 3.1 Silnik

Do napędu stanowiska przewiduje się zastosowanie silnika szeregowo-bocznikowego na prąd stały, którego parametry będą następujące:

- napięcie znamionowe 450 do 500 V,
- prędkość maksymalna 2100 obr/min,
- moc godzinna silnika 350 do 400 kW,

- moment rozwijany przy prędkości 2100 obr/min około 1400 Nm.,
- przeciążalność silnika w pracy krótkotrwałej (1 min) około 2,5 ,
- możliwość napędzania i hamowania stanowiska z w/w momentem,
- zasilanie silnika układem energoelektronicznym (np. chopper GTO).

### 3.2 Zasilanie silnika i układ energoelektroniki sterowany pomiarami momentów i prędkości obrotowej

Zasilanie choppera GTO odbywać się będzie poprzez prostownik 3\*380 V o mocy godzinnej minimum 350 kW i mocy chwilowej (1 minutowej) 700 do 800 kW (w każdej gałęzi przewidywany maksymalny prąd zmienny godzinny około 650 A, chwilowy około 1450 A).

Parametry choppera GTO:

- napięcie robocze 500 V,
- prąd godzinny 800 A,
- prąd 1 minutowy 1800 A.

Chopper GTO musi umożliwiać płynne sterowanie prędkością obrotową i wartością realizowanego momentu silnika. Obie wartości będą mierzone na stanowisku odrębnymi, specjalnymi miernikami na bieżąco, co około 5 ms i dzięki sterowaniu mikroprocesorowemu służyć będą do regulacji prądu twornika silnika cyfrowym regulatorem PID poprzez chopper GTO (również co 5 ms).

Układ będzie działał w pracy przerywanej około 20% z mocą 1 minutową, a z mocą godzinną w pracy dorywczej.

Układ napędowy nie może wytwarzać zakłóceń elektrycznych i elektromagnetycznych zaburzających pracę torów pomiarowych stanowiska takich jak:

- mostki tensometryczne do pomiaru sił,
- przetworniki piezoelektryczne do pomiaru ciśnień,
- termopary do pomiaru temperatur.

### 4. Symulacja masy bezwładności poprzez napęd silnikiem, sterowanym pomiarami momentów i prędkości obrotowej

Symulowany moment bezwładności ( $I_{sym}$ ) będzie realizowany przez moment napędowy silnika współdziałający z załączoną masą o momencie bezwładności  $I_{masy}$ . W przypadku zadanego za dużego momentu bezwładności ( $I_{zad}$ ) względem załączonej masy bezwładności, silnik będzie napędzał z określonym (obliczonym) momentem załączoną aktualnie masę bezwładności ( $I_{masy}$ ). W przypadku zadanego mniejszego momentu bezwładności ( $I_{zad}$ ) od aktualnie załączonej masy o momencie bezwładności  $I_{masy}$  silnik będzie ją hamował z określonym na drodze obliczeniowej momentem. Tak więc można zapisać:

$$I_{zad} = I_{masy} + I_{sym} \quad (1)$$

$$I_{sym} = I_{zad} - I_{masy} \quad (2)$$

Ponieważ ogólnie moment hamowania:

$$M = I \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (3)$$

to  $M_{chwilowy} = I \Delta\omega$  w jednostce czasu próbkowania.

Zatem z dwu poniższych równań

$$I_{zad} = \frac{M_{Ham}}{\Delta\omega} \quad (4)$$

$$I_{sym} = \frac{M_{sym}}{\Delta\omega} \quad (5)$$

gdzie:  $M_{Ham}$  – chwilowy moment hamowania wytworzony przez badany układ hamulcowy,

$M_{sym}$  – chwilowy moment napędzający (+) lub podhamowujący (-) symulujący  $I_{sym}$ ,

i równania (2) można wyznaczyć chwilową wartość momentu, jaki musi zrealizować silnik napędowy:

$$M_{sym} = M_{Ham} \cdot \frac{I_{sym}}{I_{zad}} \quad (6)$$

$$M_{sym} = M_{Ham} \cdot \frac{I_{zad} - I_{masy}}{I_{zad}} \quad (7)$$

Chwilowy moment symulowany jest więc jedynie funkcją chwilowego momentu hamowania, wytworzonego przez badany układ hamulcowy.

Aby zapewnić właściwą dokładność symulacji musi być równocześnie cały czas w każdym kroku próbkowania kontrolowana aktualna prędkość obrotowa wału pomiarowego stanowiska na zgodność z zależnością:

$$I_{zad} = \frac{\int M_{Ham} dt}{\omega_{pocz} - \omega_{chwil}} \quad (8)$$

to jest

$$\omega_{chwilwymag} = \omega_{pocz} - \int \frac{M_{Ham}}{I_{zad}} \cdot dt \quad (9)$$

gdzie:  $\omega_{chwilwymag}$  -wymagana chwilowa prędkość kątowa wału stanowiska.

W razie odchylenia od tej wartości należy tak korygować  $M_{sym}$ , aby w kolejnych krokach czasowych uzyskać :

$$\omega_{chwil} = \omega_{chwil wymag}$$

W celu zapewnienia właściwej dokładności symulacji, próbkowanie powinno odbywać się z częstotliwością ok. 200 Hz a prędkość powinna być mierzona czujnikiem z co najmniej 500 impulsami na obrót wału.

Chwilowa realizowana wartość  $m_{zad}$  ( masy zadanej przypadającej na obiekt badany) wynikająca ze wzoru (8) i zależności  $I=mr^2$  tj wartość

$$m_{zad} = \frac{\int M_{Ham} dt}{R_K^2 (\omega_{pocz} - \omega_{chwil})} \quad (10)$$

(gdzie  $R_K$  - promień koła pojazdu) dla każdego czasu  $t$ , to znaczy w każdym kroku czasowym próbkowania pomiarów, powinna być również obliczana i wyświetlana.

Wartość  $m_{real\ chwil}$  należy określać również z zależności energetycznych (z pomiaru siły hamowania  $F_h$ , drogi hamowania  $S$  i prędkości symulowanego pojazdu  $v$ , z częstotliwością większą lub równą 60 Hz i czujnikiem do pomiaru prędkości z 500 impulsami na obrót) wg zależności:

$$m_{realchwil} = \frac{2r_h}{R_K} \cdot \frac{(F_{h(i)} + F_{h(i+1)})}{2} \cdot \frac{(S_{(i+1)} - S_{(i)})}{(v_{(n)}^2 - v_{(n+1)}^2)} \quad (11)$$

gdzie:  $r_h$  – promień hamowania,

oraz dla całego przebiegu hamowania (dla drogi hamowania  $S_2$  realizowanej ze stałym naciskiem pary ciernej):

$$m_{real} = \frac{1}{S_2} \int_0^{S_2} m_{realchwil} ds = \frac{2 \cdot r_h \cdot S_2}{R_K \cdot v_2^2 \cdot S_2} \cdot \int_0^{S_2} F_h ds = \frac{2 \cdot r_h}{R_K \cdot v_2^2} \cdot \int_0^{S_2} F_h ds \quad (12)$$

Proces właściwej symulacji masy pojazdu powinien być kontrolowany poprzez ocenę dokładności symulacji. Dla prędkości mniejszej niż 40km/h (dla koła 0,89m) dokładność symulacji masy musi wynosić  $\pm 2\%$  (98-102%), a dla prędkości większej niż 40km/h  $\pm 1\%$  (99-101%)[2]. Dokładność symulacji określa zależność:

$$\frac{m_{realchwil} - m_{zad}}{m_{zad}} \cdot 100[\%] \quad (13)$$

### 5. Charakterystyka zewnętrzna stanowiska bezwładnościowego z częściową symulacją masy przez silnik

Dla oceny przydatności bezwładnościowego stanowiska z częściową symulacją masy przez silnik napędzający stanowisko, należy przedstawić charakterystykę zewnętrzną stanowiska określającą wartość momentu hamowania  $M_{Ham}$ , realizowanego przez obiekt badany w funkcji wartości zadanej momentu bezwładności  $I_{zad}$  lub masy zadanej  $m_{zad}$ .

Parametrem tej charakterystyki będą wartości załączanych momentów bezwładności  $I_{masy}$ , oraz maksymalny moment  $M_{sym}$ , jaki może rozwinąć w krótkim czasie układ napędowy w pracy silnikowej lub podczas hamowania silnikiem.

Wartość maksymalnego momentu hamującego  $M_{ham}$ , możliwego do zrealizowania na stanowisku z symulacją masy bezwładności, wyniesie dla pracy silnikowej:

$$M_{Ham} = f(I_{zad}) = M_{sym} \frac{I_{zad}}{I_{zad} - I_{masy}} \quad (14)$$

a dla hamowania silnikiem:

$$M_{Ham} = f(I_{zad}) = M_{sym} \frac{I_{zad}}{I_{masy} - I_{zad}} \quad (15)$$

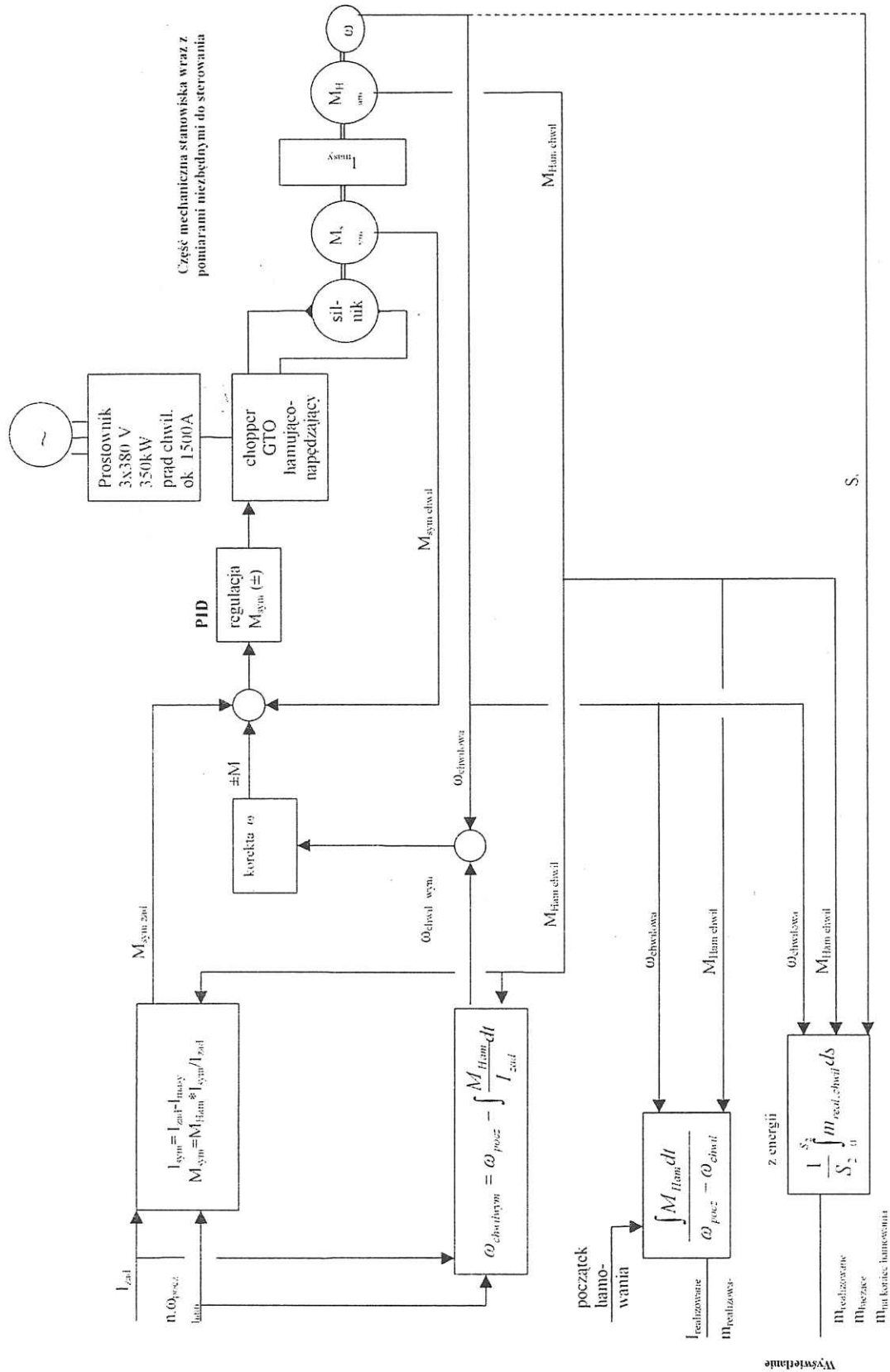
Na podstawie wymagań UIC (aktualnie obowiązujących programów badań)[1] i przeliczonych charakterystyk wyliczono następujące momenty bezwładności mas części mechanicznej stanowiska:

$$\begin{aligned} I_0 &= 396 \text{ kgm}^2, \\ I_1 &= 396 \text{ kgm}^2, \\ I_2 &= 1089 \text{ kgm}^2. \end{aligned}$$

Dzięki możliwości łączenia tych mas bezwładności w dowolnej kombinacji uzyskuje się następujące momenty bezwładności:

$$\begin{aligned} I &= I_0 = 396 \text{ kgm}^2, \\ I' &= I_0 + I_1 = 792 \text{ kgm}^2, \\ I'' &= I_0 + I_2 = 1485 \text{ kgm}^2, \\ I''' &= I_0 + I_1 + I_2 = 1881 \text{ kgm}^2. \end{aligned}$$

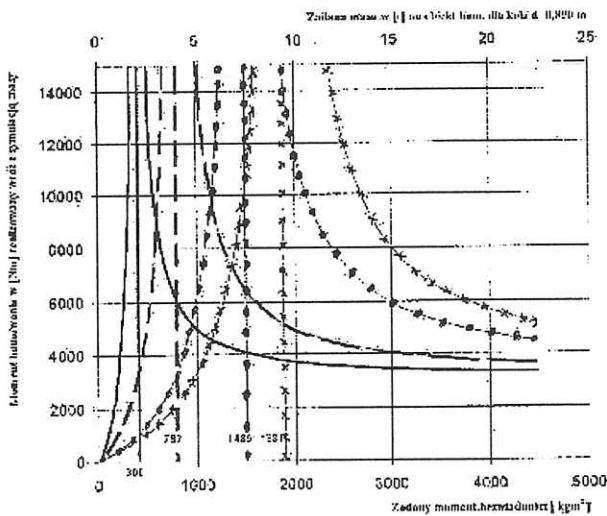
Koncepcję układu sterowania i regulacji stanowiska z symulacją masy i odczytywaniem (wyświetlaniem) wartości masy symulowanej przedstawiono na schemacie pokazanym na rys.1.



Część mechaniczna stanowiska wraz z pomiarami niezbędnymi do sterowania

Rys.1 Układ sterowania i symulacji masy bezwładności na stanowisku do badań hamulców

Dla koła pojazdu o średnicy 0,89 m wyżej wymienione momenty bezwładności mas odpowiadają następującym masom pojazdu przypadającym na obiekt badany (tarczę lub koło): 2 t, 4 t, 7,5 t i 9,5 t.



Rys. 2 Maksymalne momenty hamowania na stanowisku bezwładnościowym z symulacją masy [dla momentu 3000 Nm rozwijanego przez silnik podczas napędzania i podhamowywania czterech różnych mas bezwładności].

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę zewnętrzną stanowiska wyznaczoną wg zależności (14) i (15) dla wyżej dobranych momentów bezwładności mas i maksymalnego momentu rozwijanego przez silnik wynoszącego 3000 Nm zarówno podczas pracy silnikowej jak i podczas hamowania silnikiem. Uzyskiwanie tak dużych momentów z silnika o mocy około 350 kW i prędkości 2100 obr/min powoduje jego ponad dwukrotne przeciążenie. Charakterystyki wyznaczono dla  $M_{Ham\ max} = 15\ kNm$  ( w praktyce np. dla taboru kolejowego maksymalne wartości momentu hamującego dla wagonów mogą wynosić około 7 kNm i dla lokomotyw około 11 kNm).

Obszarem pracy stanowiska są parametry leżące poniżej krzywych określających na rysunku 2 wartości maksymalnego momentu hamującego  $M_{ham}$  możliwego do zrealizowa-

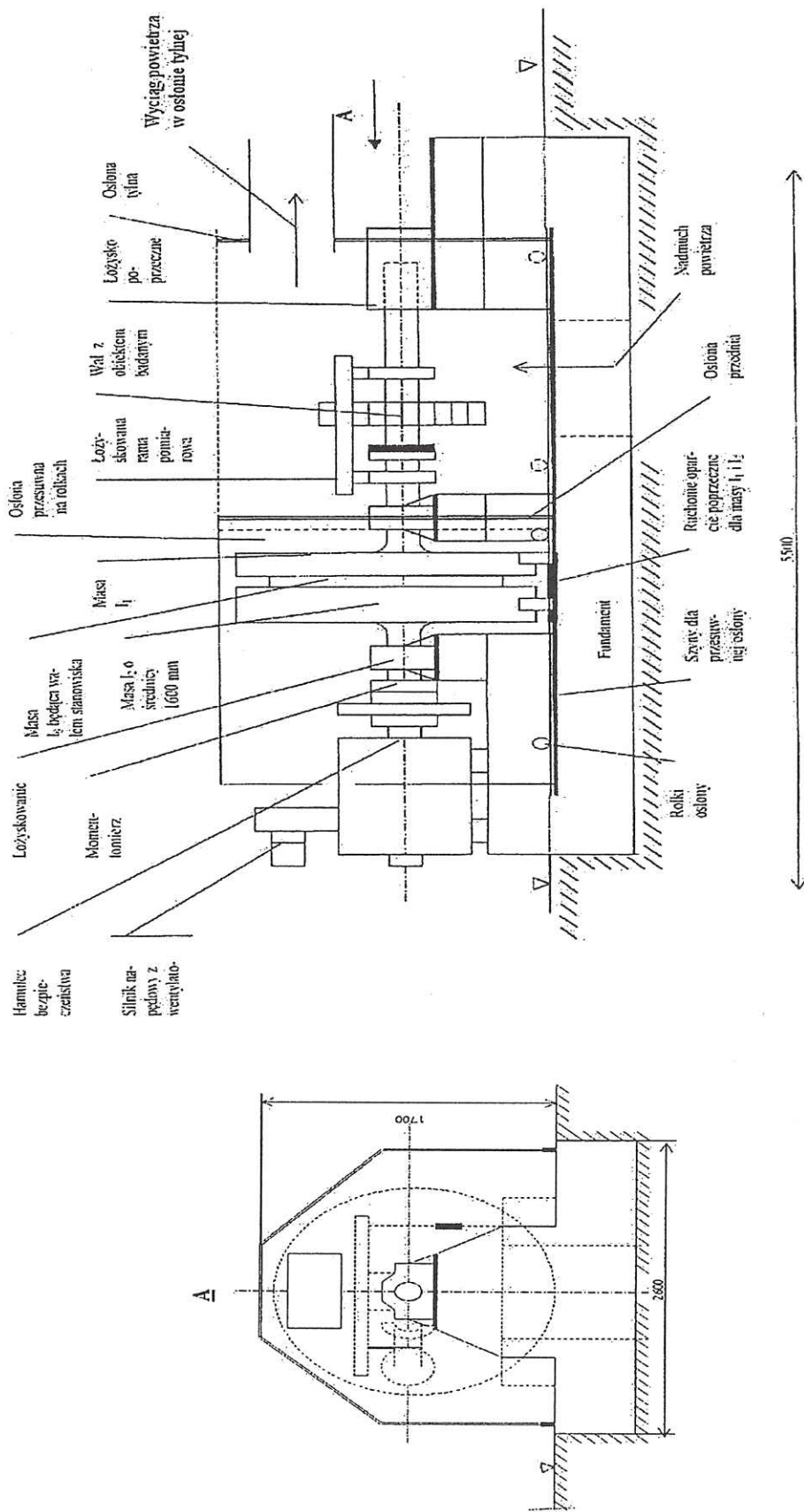
nia na stanowisku z przyjętymi masami i z silnikową symulacją masy bezwładności. Oznacza to, że na stanowisku będzie możliwe zasymulowanie dowolnego momentu bezwładności podczas hamowania i rozruchu, o ile realizowany moment hamowania  $M_{ham}$  lub rozruchu nie przekroczy wartości ograniczonych tymi krzywymi.

## 6. Układ ogólny części mechanicznej stanowiska

Na rysunku 3 przedstawiono układ ogólny części mechanicznej stanowiska bezwładnościowego do badań hamulców.

Część pomiarowa o wymiarach  $\Phi\ 2000 \times 1300\ mm$ , składa się z pół-wału, na którym możliwe będzie zamontowanie jednego lub dwu obiektów do badań (tarcz lub kół), wraz z mechanizmami wywierającymi nacisk na parę cierną. Maksymalna średnica badanego obiektu wyniesie około 1300 mm a długość wału około 1300 mm. W części pomiarowej zlokalizowana będzie rama pomiarowa do pomiaru momentu hamowania ( $M_{Ham}$ ), oraz wlot powietrza chłodzącego badany obiekt. Wylot powietrza usytuowany będzie w tylnej ścianie osłonowej. Mechanizmy wywierające nacisk na parę cierną zamocowane będą na ramie pomiarowej. Część pomiarowa w czasie badań będzie zamykana osłoną na rolkach, przesuwaną po szynach zamocowanych na fundamencie.

Stanowisko będzie wyposażone w dwa wentylatory: nawiewny i wyciągowy. Wentylatory posiadać będą płynną regulację prędkości obrotowej w zależności od zapotrzebowania tj. od wymaganej prędkości powietrza w części pomiarowej (uzależnionej od symulowanej na stanowisku prędkości – zgodnie z wymaganiami odpowiednich programów badań [1]). Sterowanie prędkością obrotową wentylatorów napędzanych silnikami trójfazowymi odbywać się będzie poprzez regulację częstotliwości i napięcia (falownikami przemysłowymi). Wydatek wentylatora wyciągowego zawsze będzie o około 10% większy od wentylatora nawiewnego. Przewiduje się, że maksymalny wydatek wentylatorów będzie wynosił ok. 850 m<sup>3</sup>/min powietrza (symulacja prędkości 150 km/h, co odpowiada 42 m/s powietrza dla przekroju dolotowego ok. 1/3 m<sup>2</sup> – 800x300mm). Pobór i wydmuch powietrza nastąpi z czerpni chronionych przed deszczem z poza hali badawczej. Zalecane byłoby również zainstalowanie cyklonów do oddzielenia części stałych (produktów zużycia wydzielonych podczas badań) z wydmuchiwanego powietrza.



Rys.3 Układ ogólny części mechanicznej stanowiska bezwładnościowego

Część badawcza z obiektami badanymi podczas badań będzie zamknięta osłoną stalową na rolkach, przesuwaną po szynach zamocowanych na fundamencie. Nie będzie możliwa bezpośrednia obserwacja obiektów badanych i zjawisk występujących podczas hamowań. Do obserwacji badanych obiektów (tarczy, koła, okładziny, wstawki) zastosowana zostanie barwna kamera zamocowana w przestrzeni badawczej chroniona przed pyłem, oraz mikrofon do rejestracji obrazu i efektów akustycznych (np. na dysku twardym komputera wraz z wynikami badań).

Zgodnie z wymaganiami UIC [1,2] dla tego typu stanowisk, zostanie ono wyposażone w spryskiwacze do symulowania hamowań „na mokro” z płynną regulacją natężenia przepływu wody do 50 l/h. Celowym będzie wyposażenie układu spryskiwania w chłodziarkę do wody o temperaturze bliskiej 0°C.

Parametry hamowania będą regulowane w sposób ciągły zgodnie z wymaganiami programów badań w zakresie:

- hamowania do zatrzymania ze stałą siłą nacisku okładzin lub wstawki,
- hamowania ze stałą mocą dla zadanej prędkości,
- hamowania ze stałym momentem hamowania (ze stałym opóźnieniem),
- hamowania programowalne symulujące przejazd teoretyczny po konkretnej trasie (jazda po spadkach lub wzniesieniu o zadanym zmiennym pochyleniu) wg

zadanego programu (rozruch z określonym przyspieszeniem, jazda, hamowanie z określonym opóźnieniem lub ze stałym naciskiem pary ciernej, lub wg zadanego przebiegu prędkości, postój),

- badania współczynnika tarcia pary ciernej na postoju. Zakres pomiarów, regulacji i dokładności pomiarów na stanowisku przedstawiono w tabeli 1.

Względną dokładność pomiarów w tabeli podano dla wartości maksymalnych.

Do pomiaru i symulacji momentu bezwładności zostanie użyty momentomierz pomiędzy silnikiem a masami bezwładności  $M_{sym}$ , czujnik prędkości obrotowej  $n$ , oraz czujnik do pomiaru momentu hamowania  $M_{Ham}$ .

Programowo zostanie stworzona możliwość kalibrowania wszystkich torów pomiarowych w kilku przedziałach w ramach wartości mierzonych.

Temperatury mierzone będą termoparami płaszczowymi o średnicy 1 lub 1,5 mm osadzonymi w obiektach badanych na wymaganej głębokości pod powierzchnią tarcia.

Pomiar i regulacja wydatku wody zostanie dokonana rotametrami i dyszami z płynną regulacją wydatku.

Pomiar wydatku powietrza dokonany zostanie czujnikiem ciśnieniowym na kryzie pomiarowej lub poprzez pomiar ciśnienia dynamicznego.

Zakres i dokładność pomiarów na stanowisku

Tabela 1

Lp	Wielkość mierzona		Jednostka	Zakres wartości		Względna dokładność pomiaru [%]	Uwagi
				min	max		
1	Moment bezwładności	I	kgm <sup>2</sup>	250 dla $M_{Ham} = 10$ kNm	2700 $M_{Ham} = 10$ kNm	±2 $v < 40$ km/h ±1 $v > 40$ km/h	dla $M_{sym} = 3,0$ kNm
					3700 $M_{Ham} = 6$ kNm		
2	Prędkość obrotowa	n	obr/min	50	2100	±0,2	czujnik min 500 imp/obr
3	Siła nacisku	N	kN	2	2x 30	±1	h. tarczowy
					2x 60	±1	
4	Moment hamowania	$M_{Ham}$	kNm	0,2	12	±1	
5	Moment symul.	$M_{sym}$	kNm	0,05	4	±0,5	
6	Temperatura	Θ	°C	0	800	±1	
7	Wydatek wody		l/h	5	50	±2	
8	Prędkość powietrza w obszarze badanym		km/h	20	150	±2	

## Literatura

- [1] Karta UIC 541-3 VE Hamulec tarczowy i okładziny hamulcowe; Ogólne warunki dopuszczenia okładzin hamulcowych. 5. Wydanie, kwiecień 2002.
- [2] Raport: ERRI B 126/RP 18, Problemes de freinage; Exigences requises des bancs de freinage pour l'homologation internationale des materiaux de frottement. Edycja II, styczeń 2000r.