

WYZNACZANIE MOMENTU HAMUJĄCEGO I KINETYCZNEGO WSPÓLCZYNNIKA TARCIA DLA HAMULCA KLOCKOWEGO I TAŚMOWEGO

4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest analiza wpływu konstrukcji hamulca na jego moment hamujący oraz wyznaczenie efektywnych współczynników tarcia kinetycznego dla okładzin oębna hamulca współpracującego z elementami wykonanymi z dwóch różnych materiałów.

4.2. Wprowadzenie

Efektywność pracy hamulca taśmowego czy dźwigniowego zależy przede wszystkim od jego konstrukcji, a także od właściwości materiałów z jakich wykonane są elementy cierne. Podstawową miarą właściwości materiałów użytych przy budowie hamulca jest w takich przypadkach kinetyczny współczynnik tarcia.

Wyznaczenie współczynnika tarcia na drodze teoretycznej nie jest możliwe; jedynym źródłem informacji mogą być dane otrzymane na podstawie pomiarów doświadczalnych.

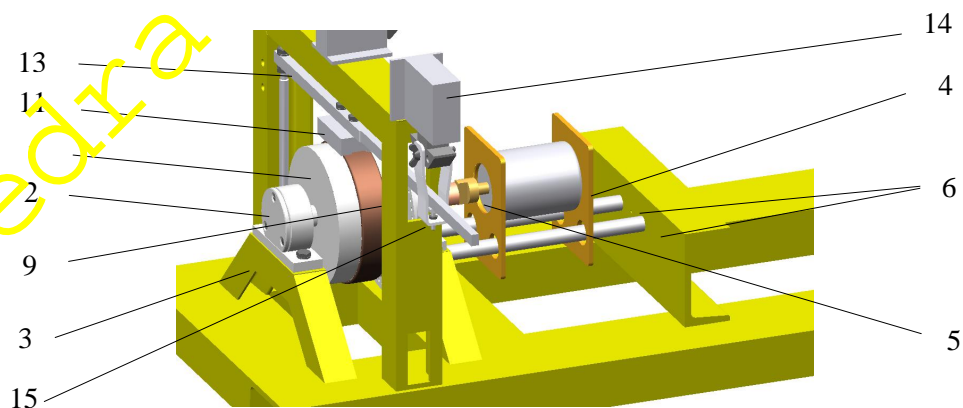
Główny element stanowiska badawczego stanowi bęben, który jest rozpędzany przy pomocy silnika elektrycznego, a następnie hamowany przy użyciu klocka lub za pomocą taśmy. Współczynniki tarcia kinetycznego są zatem wyznaczone dla dwóch różnych typów hamulca: klockowego i taśmowego, w których okładzina bębna współpracuje ze stalowym klockiem lub z mosiężną taśmą.

Pomiar współczynnika tarcia odbywa się na drodze pośredniej poprzez pomiar początkowej prędkości kątowej bębna oraz drogi kątowej bębna przebytej w czasie hamowania.

4.3. Opis części mechanicznej stanowiska badawczego

Widok stanowiska badawczego z hamulcem klockowym jest pokazany na rys. 4.1, natomiast na rys. 4.2 jest widoczne stanowisko wyposażone w hamulec taśmowy.

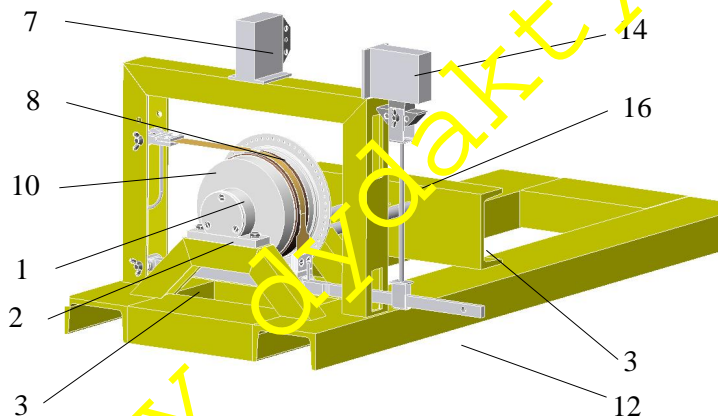
Bęben (1) o poziomej osi obrotu z okładziną (9) jest podparty w łożyskach kulkowych (2) których obudowy są przymocowane do ramy (3). Bęben może być napędzany silnikiem (4) prądu stałego poprzez sprzęgło (5). Zesprzęglenie układu następuje w wyniku przesunięcia silnika na prowadnicach (6). Zrealizowano to przy użyciu siłownika elektromagnetycznego (7). Rozłączenie sprzęgła następuje po wyłączeniu luzownika dzięki sprężynom odsuwającym silnik po prowadnicach (6).



Rys. 4.1. Widok hamulca klockowego

Dźwignia hamulca (13) wraz z klockiem (11) jest unoszona przez silownik elektromagnetyczny (14) za pośrednictwem krótkiego łącznika (15) (rys. 4.1).

Do bębna jest zamocowana tarcza (8) mająca 60 otworów rozmieszczonych równomiernie na jej odwodzie (rys. 4.2). Na ramie umocowany jest czujnik optyczny (17) przekazujący sygnał do dwóch mierników uniwersalnych, umożliwiających pomiar prędkości kątowej i drogi kątowej bębna.



Rys. 4.2. Widok hamulca taśmowego

W przypadku hamulca taśmowego, dźwignia hamulca (12), do której mocuje się taśmę (10), jest unoszona przez luzownik (14) z wykorzystaniem długiego łącznika (16) (rys. 4.2).

Zarówno silnik, jak i obydwa silowniki są podłączone do tego samego zasilacza prądu stałego.

4.4. Opis aparatury pomiarowej

Głównym elementem linii pomiarowej jest czujnik optyczny, który przekazuje impulsy generowane przy ruchu bębna przez otwory w tarczy (8). Impulsy z czujnika optycznego przekazywane są do dwóch mierników.

Do pomiaru prędkości obrotowej użyto częstotściomierza PFL-30. Częstotściomierz rejestruje liczbę otworów przechodzących przez linię optyczną czujnika w czasie pierwszej sekundy od otwarcia bramki miernika.

Przy pomiarze drogi kątowej bębna zastosowano licznik uniwersalny KZ-2025. Miernik drogi kątowej sumuje liczbę impulsów generowanych przez czujnik optyczny w czasie trwania ruchu, poczynając od momentu otwarcia bramki licznika.

Oba mierniki są włączane jednym przyciskiem sterującym „P1”, który otwiera bramki mierników.

4.5. Podstawowe zależności teoretyczne

4.5.1. Wyznaczenie momentu oporu bębna w łożyskach

Moment oporów łożysk (M_{op}) można wyznaczyć nadając bębnowi pewną prędkość kątową (w_0) i mierząc przebytą przez niego drogę kątową (j_k) do momentu zatrzymania się.

Wykorzystując twierdzenie o przyroście energii kinetycznej układu

$$E_k - E_0 = L_{0-k}, \quad (4.1)$$

i zakładając, że moment oporów (M_{op}) jest stały w trakcie ruchu, otrzymuje się:

$$0 - \frac{J_z w_0^2}{2} = -M_{op} j_k, \quad (4.2)$$

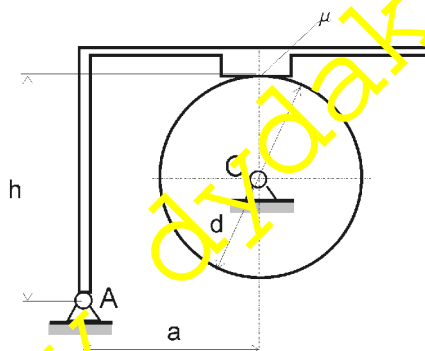
gdzie: J_z [kg m²] – moment bezwładności bębna względem osi obrotu,

w_0 [rad/s] – początkowa prędkość kątowa,

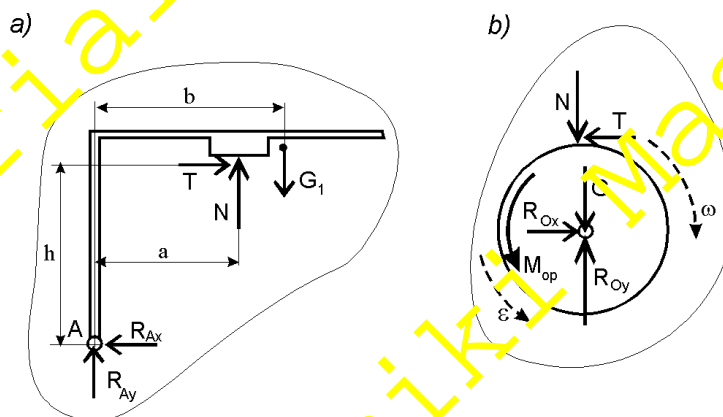
j_k [rad] – droga kątowna bębna – mierzona od chwili zarejestrowania wartości początkowej prędkości kątowej (w_0) do chwili zatrzymania bębna.

4.5.2. Wyznaczenie momentu hamującego dla hamulca klockowego

Schemat obliczeniowy hamulca przedstawiono na (rys. 4.3), natomiast siły działające na dźwignię i bęben hamulcowy są pokazane na rys. 4.4.



Rys. 4.3 Model hamulca klockowego



Rys. 4.4. Obciążenia działające na dźwignię i bęben dla hamulca klockowego (ruch bębna w prawo)

Równania opisujące zachowanie się dźwigni z klockiem hamulcowym oraz bębna – dla ruchu bębna **w prawo** – mają postać:

- równanie równowagi dźwigni (rys. 4.4a)

$$Na - G_1 b - Th = 0, \quad (4.3)$$

- równanie ruchu bębna (rys. 4.4b)

$$J_z e = M_{op} + T \frac{d}{2}. \quad (4.4)$$

Podstawiając (4.3) do (4.4) i wykorzystując zależność $T = m_k N$, otrzymuje się – dla obrotów bębna **w prawo** – równanie ruchu bębna w postaci

$$J_z e = M_{op} + \frac{G_1 b m_k d}{2(a - m_k h)} \quad (4.5)$$

lub

$$J_z \frac{d^2 j}{dt^2} = M_{op} + \frac{G_1 b m_k d}{2(a - m_k h)}. \quad (4.6)$$

Zakładając, że opory łożysk i moment hamujący nie zależą od prędkości kątowej bębna, to znaczy przyjmując $M_{op} = const$ oraz $m_k = const$, można znaleźć rozwiązanie analityczne równania (4.6). Przy takich założeniach równanie (4.6) jest równaniem różniczkowym drugiego rzędu o stałych współczynnikach

Postępując w analogiczny sposób można określić równanie ruchu bębna

– dla obrotów bębna **w lewo** – jako

$$J_z \dot{e} = M_{op} + \frac{G_1 b m_k d}{2(a + m_k h)}. \quad (4.7)$$

Całkowity **moment hamujący bęben** (prawa strona równania (4.5) lub (4.7)) wynosi:

– dla obrotów bębna **w prawo**

$$M_{(p)} = M_{op} + \frac{G_1 b m_k d}{2(a - m_k h)}, \quad (4.8)$$

– dla obrotów bębna **w lewo**

$$M_{(l)} = M_{op} + \frac{G_1 b m_k d}{2(a + m_k h)}. \quad (4.9)$$

4.5.3. Wyznaczenie kinetycznego współczynnika tarcia dla hamulca klockowego

Zależność pomiędzy kątem obrotu (j) a współczynnikiem tarcia (m_k) można otrzymać w prostszy sposób jeśli wykorzystamy twierdzenie o przeliczeniu energii kinetycznej układu. Przy założeniu niezmienności momentu hamującego otrzymuje się:

$$\frac{J_z w_0^2}{2} = -M_{(p)} j_k \quad \text{oraz} \quad -\frac{J_z w_0^2}{2} = -M_{(l)} j_k, \quad (4.10)$$

stąd efektywny współczynnik tarcia kinetycznego dla hamulca klockowego określają zależności:

– dla obrotów bębna **w prawo**

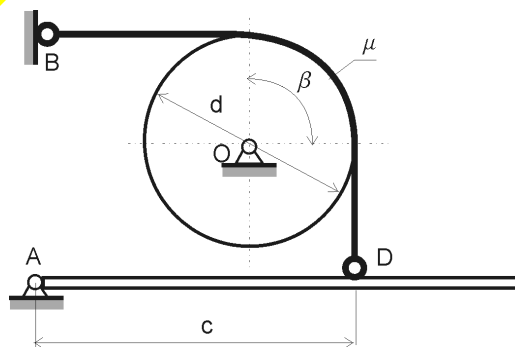
$$m_{k(p)} = \frac{a(w_0^2 J_z - 2M_{op} j_k)}{h w_0^2 J_z + (b d G_1 - 2h M_{op}) j_k}, \quad (4.11)$$

– dla obrotów bębna **w lewo**

$$m_{k(l)} = \frac{a(w_0^2 J_z - 2M_{op} j_k)}{-h w_0^2 J_z + (b d G_1 + 2h M_{op}) j_k}. \quad (4.12)$$

4.5.4. Wyznaczenie momentu hamującego dla hamulca taśmowego

Schemat obliczeniowy hamulca przedstawiono na rys 4.5.



Rys. 4.5. Model obliczeniowy hamulca taśmowego

Równania opisujące zachowanie się dźwigni oraz bębna dla hamulca taśmowego (przy ruchu bębna **w prawo**) mają postać:

- równanie ruchu bębna (por. rys. 4.6a)

$$J_x \epsilon = M_{op} + S_1 \frac{d}{2} - S_2 \frac{d}{2}, \quad (4.13)$$

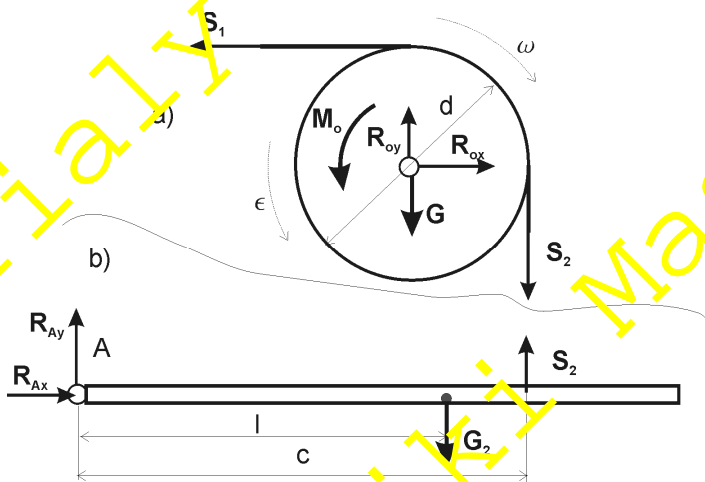
- wzór Eulera dla tarcia cięgien o krążek ($a = \frac{p}{2}$ zgodnie z. rys. 4.5)

$$S_1 = S_2 e^{m_k \frac{p}{2}}, \quad (4.14)$$

- równanie równowagi dźwigni (por. rys. 4.6b)

$$S_2 c - G_2 l = 0. \quad (4.15)$$

Z równania równowagi dźwigni oraz wzoru Eulera, otrzymamy moment hamujący bęben.



Rys. 4.6. Obciążenia działające na dźwignię i bęben dla hamulca taśmowego (dla ruchu bębna w prawo)

Na podstawie równań (4.13) – (4.15) można wyznaczyć **całkowity moment hamujący bęben** (wynikający z oporów w łożyskach i sił tarcia pomiędzy bębniem a taśmą). Jest on równy:

- dla obrotów **w prawo**

$$M_{(p)} = G_2 \frac{ld}{2c} (e^{m_k a} - 1) + M_{op} \quad (4.16)$$

oraz

- dla obrotów bębna **w lewo**

$$M_{(l)} = G_2 \frac{ld}{2c} (1 - e^{-m_k a}) + M_{op}. \quad (4.17)$$

4.5.5. Wyznaczenie kinetycznego współczynnika tarcia dla hamulca taśmowego

Korzystając z twierdzenia o zmianie energii kinetycznej (przy założeniu jak poprzednio, że moment hamujący jest stały) wyznaczmy efektywny współczynnik tarcia kinetycznego:

- dla obrotów bębna **w prawo**

$$m_{k(p)} = \frac{1}{a} \ln \left| 1 + \frac{2c}{G_2 dl} (M_p - M_o) \right|, \quad (4.18)$$

- dla obrotów bębna w lewo

$$m_{k(t)} = \frac{1}{a} \ln \left| \frac{1}{1 - \frac{2c}{G_2 dl} (M_1 - M_o)} \right|. \quad (4.19)$$

4.6. Przebieg pomiarów

Uruchomić program komputerowy wspomagający ćwiczenie. Następnie przystąpić do wyznaczania kinetycznego momentu oporu ruchu bębna. Po wykonaniu czynności opisanych w punkcie 4.6.1 należy przejść do badania hamulca klockowego, jak opisano w punkcie 4.6.2 oraz hamulca taśmowego wg punktu 4.6.3.

4.6.1. Wyznaczanie kinetycznego momentu oporu łożysk

Pomiar momentu oporu łożysk jest dokonywany drogą pośrednią poprzez pomiar początkowej prędkości kątowej (ω_0), a następnie drogi kątowej (θ_k) przebytej przez bęben do chwili zatrzymania się. Przy wyznaczaniu momentu oporu łożysk (M_{op}) należy wykonać następujące czynności:

1. Wymontować dźwignię hamulca, aby umożliwić swobodne obracanie się bębna.
2. Włączyć zasilacz czujnika optycznego (przycisk na lewym boku stołu) i obydwaj mierniki (zalecana nastawa miernika PFL 30 wynosi $-1s$).
3. Zakręcić ręką bęben, a następnie przyciskiem "P1" uruchomić pomiar (otwarcie ramek mierników, a tym samym rozpoczęcie zliczania następuje w momencie zwolnienia przycisku "P1").
4. Odczytać wskazania mierników (po zatrzymaniu się bębna).

Uwaga: wskazania miernika prędkości początkowej powinny mieścić się w zakresie od **100** do **150 Hz**.

5. Zapisać wyniki pomiarów w tabeli 4.1.
6. Pomiar wykonać trzykrotnie dla obrotów bębna w lewo i trzykrotnie dla obrotów w prawo. Wprowadzić dane otrzymane z pomiarów do programu komputerowego, a uzyskane wyniki obliczeń zanotować w tabeli 4.1.

4.6.2. Wyznaczenie momentu hamującego i współczynnika tarcia dla hamulca klockowego

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

1. Zmienić nastawę miernika PFL 30 z $1s$ na $100ms$, a następnie zakręcić bęben, nacisnąć i zwolnić przycisk „P1” i odczytać wskazanie miernika (zwrócić uwagę na jednostkę).
2. Założyć dźwignię z klockiem hamulcowym i odpowiedni łącznik. Ustawić łącznik pionowo i skrócić go ze zworką luzownika.
3. Sprawdzić czy przy wyłączonym luzowniku łącznik nie podtrzymuje dźwigni.
4. Poprzez obrót bębna ustawić tarcze sprzęgła w pozycji umożliwiającej jego włączenie (dla pewności ucisnąć pionowy pręt w kierunku do bębna).
5. Włączyć zasilacz silnika, ustawić przełącznik "P3" (prawy przedni róg stołu) w pozycji **L** (obroty silnika w lewo).
6. Nacisnąć i trzymać wciśnięty przycisk "P2" włączający obydwaj luzowniki. Zakręcić lekko bęben w *lewo* i następnie przycisnąć i również przytrzymać przycisk "P4" uruchamiający silnik.
7. Oba przyciski ("P2" i "P4") trzymać wciśnięte około **20 sekund**, celem nadania bębnowi odpowiedniej szybkości wirowania.
8. Po tym czasie zwolnić jednocześnie obydwaj przyciski ("P2" i "P4") i natychmiast nacisnąć i zwolnić przycisk "P1" (upewnić się czy miał miejsce „reset” mierników).

9. Obserwować zachowanie się dźwigni hamulca w trakcie hamowania.
10. Po zatrzymaniu się bębna odczytać wskazania mierników i zanotować je w tabeli 4.2.
Uwaga: wskazania miernika prędkości początkowej muszą się zawierać od 1 do 1 kHz natomiast miernika drogi kątowej powinny mieścić się w zakresie od 3500 do 20 000 imp.
11. Pomiary wykonać trzykrotnie.
12. Ustawić przełącznik "P3" w pozycji P (obroty silnika w prawo) i wykonać ponownie czynności opisane w punktach od 6 (tym razem bęben należy zakręcić w prawo) do 11.
13. Po zakończeniu pomiarów *wyłączyć zasilacz silnika* i wprowadzić dane otrzymane z pomiarów do programu komputerowego, a uzyskane wyniki obliczeń zanotować w tabeli 4.2.

4.6.3. Wyznaczenie momentu hamującego i współczynnika tarcia dla hamulca taśmowego

1. Sprawdzić czy zasilacz silnika jest wyłączony.
2. Wymontować dźwignię z klockiem hamulcowym oraz łącznik luzownika.
3. Zamocować dźwignię i taśmę hamulcową oraz odpowiedni łącznik.
4. Łącznik ustawić pionowo (sprawdzić czy nie podtrzymuje on dźwigni), i skrócić go ze zworką luzownika.
5. Dalszy przebieg ćwiczenia jest taki sam, jak opisano poprzednio dla hamulca klockowego (punkty 2 – 12); wyniki pomiarów zanotować w tabeli 4.3.
6. Wprowadzić do programu komputerowego dane otrzymane z pomiarów, a uzyskane wyniki obliczeń zanotować w tabeli 4.3.

Po zakończeniu wszystkich pomiarów wyłączyć zasilacz silnika i czujnika obrotów jak również obydwie mierniki. Wyłączyć komputer oraz uporządkować stoisko pomiarowe.

4.7. Opracowanie wyników i sprawozdanie

4.7.1. Obliczenia pomocnicze

Zasadnicze obliczenia przeprowadzane są z użyciem programu komputerowego. Do obliczeń przyjmowane są następujące dane

- dla bębna:

$$J_z = 0,0150 \text{ kg m}^2, \quad d = 146 \text{ mm}$$

- dla hamulca klockowego:

$$G_1 = 9,50 \text{ N}, \quad a = 167 \text{ mm}, \quad b = 205 \text{ mm}, \quad h = 170 \text{ mm}$$

- dla hamulca taśmowego:

$$G_2 = 9,14 \text{ N}, \quad c = 247 \text{ mm}, \quad l = 208 \text{ mm}.$$

Na podstawie uzyskanych wyników należy obliczyć wartości średnie momentów hamujących dla obrotów w prawo i w lewo dla obydwu hamulców. Następnie określić relacje względne tych wartości.

4.7.2. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy podać:

- a) temat i cel ćwiczenia,
- b) zestawienie wyników pomiarów i obliczeń w tabelach 4.1 – 4.3,
- c) obliczenia wartości średnich momentów hamujących oraz ich relacji względnych,
- d) obserwacje i wnioski.

4.8. Pytania sprawdzające

1. W jaki sposób można wyprowadzić wzór Eulera dotyczący tarcia ciągłego?
2. Sformułuj twierdzenie Koeniga dotyczące energii kinetycznej układu materialnego.

3. Wyjaśnić różnicę pomiędzy współczynnikiem tarcia spoczynkowego, a współczynnikiem tarcia kinetycznego?
4. W jaki sposób można określić moment oporów ruchu wirującego bębna? Jakie wielkości należy pomierzyć?

Tabela 4.1. Wyników pomiarów i obliczeń momentu oporu łożysk

Nr	Kierunek obrotów	Prędkość początkowa (miernik PFL-30)		Droga kątowna (miernik KZ 2025)		Moment oporu łożysk M_{oi}	Wartość średnia momentu oporu łożysk $M_o = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 M_{oi}$
		k_0	ω_0	k	j		
--	---	[Hz]	[rad/s]	[imp]	[rad]	[N m]	[N m]
1	w lewo						
2							
3							
4	w prawo						
5							
6							

Tabela 4.2. Wyników pomiarów i obliczeń dla hamulca klockowego

Nr	Kierunek obrotów	Prędkość początkowa (miernik PFL-30)		Droga kątowna (miernik KZ 2025)		Moment hamujący $M_{(l)}$ albo $M_{(p)}$	Współczynnik tarcia $m_{k(l)}$ albo $m_{k(p)}$	Wartość średnia m dla obrotów w lewo i w prawo
		k_0	ω_0	k	j			
--	---	[Hz]	[rad/s]	[imp]	[rad]	[N m]	---	---
1	w lewo							
2								
3								
4	w prawo							
5								
6								

Tabela 4.3. Wyniki pomiarów i obliczeń dla hamulca taśmowego

Nr	Kierunek obrotów	Prędkość początkowa (miernik PFL-30)		Droga kątowna (miernik KZ 2025)		Moment hamujący $M_{(l)}$ albo $M_{(p)}$	Współczynnik tarcia $m_{k(l)}$ albo $m_{k(p)}$	Wartość średnia m dla obrotów w lewo i w prawo
		k_0	ω_0	k	j			
--	---	[Hz]	[rad/s]	[imp]	[rad]	[N m]	---	---
1	w lewo							
2								
3								
4	w prawo							
5								
6								