



Zakład Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechnika Warszawska

dr inż. Szymon Dowkontt

Laboratorium Podstaw Konstrukcji Maszyn

Instrukcja do ćwiczenia 5:

Badanie i obliczanie kąta skręcenia wału maszynowego

(rok II, semestr 4)

(do użytku wewnętrznego)

Ćwiczenie 5

Badanie i obliczanie kąta skręcenia wału maszynowego

5.1. Wstęp

Ważnym kryterium określającym przydatność projektowanego wału w określonym zastosowaniu jest sztywność wału na skręcanie. Jest to parametr, który zależy od kąta skręcenia wału i momentu skręcającego [1]:

$$k = \frac{M_s}{\varphi} \quad (5.1)$$

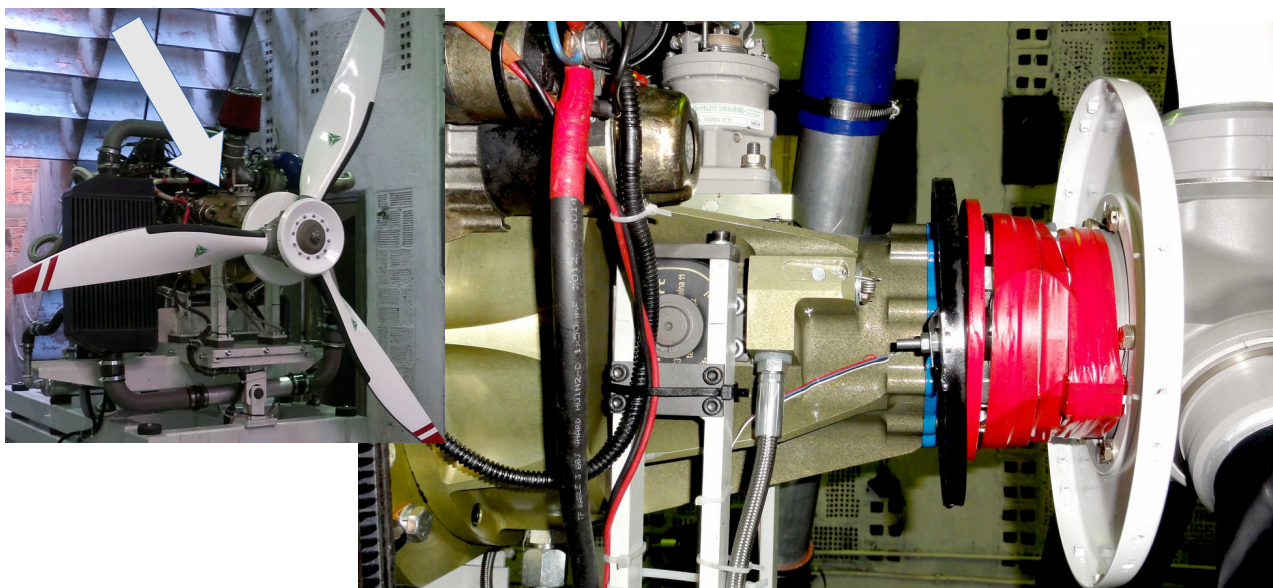
gdzie: k – sztywność skrętna [Nm/rad],
 M_s – moment skręcający [Nm],
 φ – kąt skręcenia [rad].

Wartość dopuszczalnego kąta skręcenia φ_{dop} zależy od funkcji wału w maszynie. Dla wałów maszynowych najczęściej przyjmuje się $\varphi \leq 0,25^\circ$, tj. $\varphi \leq 0,0044$ rad na 1 m długości wału. W przypadku wałków skrętnych, służących m. in. do łagodzenia nierównomierności momentu obrotowego, dopuszcza się $\varphi \leq 11^\circ$ i więcej [2].

5.2. Przedmiot i cel badań

Przedmiotem badań jest model wału śmigłowego silnika PZL-200 (rysunek 1). Model wału jest wykonany w skali 1:1. Technologia wykonania modelu odpowiada technologii wykonania wału – wał jest wykonany ze stali 40HM i ulepszany cieplnie do twardości 30HRC. Model został wykonany na etapie projektowania reduktora śmigłowego silnika w celach badawczych. Za pomocą tego modelu weryfikowano wyniki badań symulacyjnych kąta skręcenia i częstotliwości drgań skrętnych wału.

W ramach ćwiczenia studenci mają za zadanie wyznaczyć charakterystyki kąta skręcenia wału w funkcji momentu skręcającego wg uzyskanych danych pomiarowych oraz obliczeń analitycznych.



Rys. 1. Widok reduktora śmigłowego przedprototypowego silnika PZL-200. Reduktor z lewej strony jest przykręcony do bloku silnika. Z prawej strony do wału śmigłowego reduktora jest przykręcona piasta śmigła.

5.3. Wyznaczanie kąta skręcenia wału maszynowego

5.3.1. Obliczanie kąta skręcenia w przypadku prostego skręcania prętów i rur o przekroju okrągłym

Wiedząc, że sztywność skrętna i sztywność wału na skręcanie są sobie równe [1, 3]:

$$k = \frac{M_s}{\varphi} = \frac{GJ_0}{l} \quad (5.2)$$

gdzie: l – długość wału,

G – moduł sprężystości postaciowej (moduł Kirchhoffa):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.3)$$

E – moduł Younga,

ν – liczba Poissona,

J_0 – biegunowy moment bezwładności przekroju wału:

$$J_0 = \frac{\pi D^4}{32} \text{ dla wału pełnego, lub } J_0 = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32} \text{ dla wału drążonego.} \quad (5.4)$$

D – średnica zewnętrzna wału,

d – średnica wewnętrzna wału.

Możemy wyznaczyć kąt skręcenia wału φ :

$$\varphi = \frac{M_s l}{GJ_0} \quad (5.5)$$

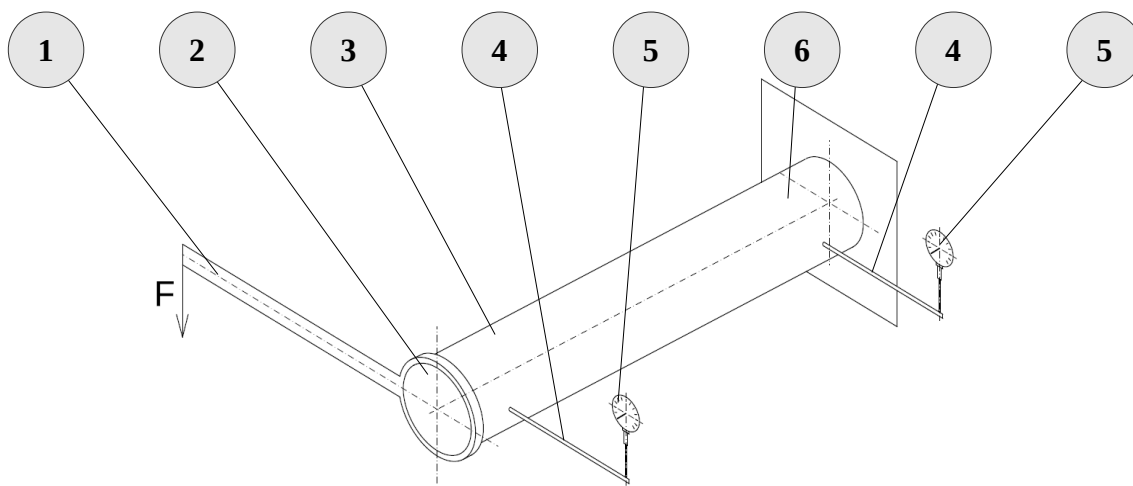
W wypadku wałów stopniowanych (o zmiennych średnicach zewnętrznej lub wewnętrznej), kąty skręcenia oblicza się oddzielnie dla poszczególnych odcinków wału, a następnie się je sumuje [2]:

$$\varphi_n = \frac{M_s}{G} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{J_{0i}} \quad (5.6)$$

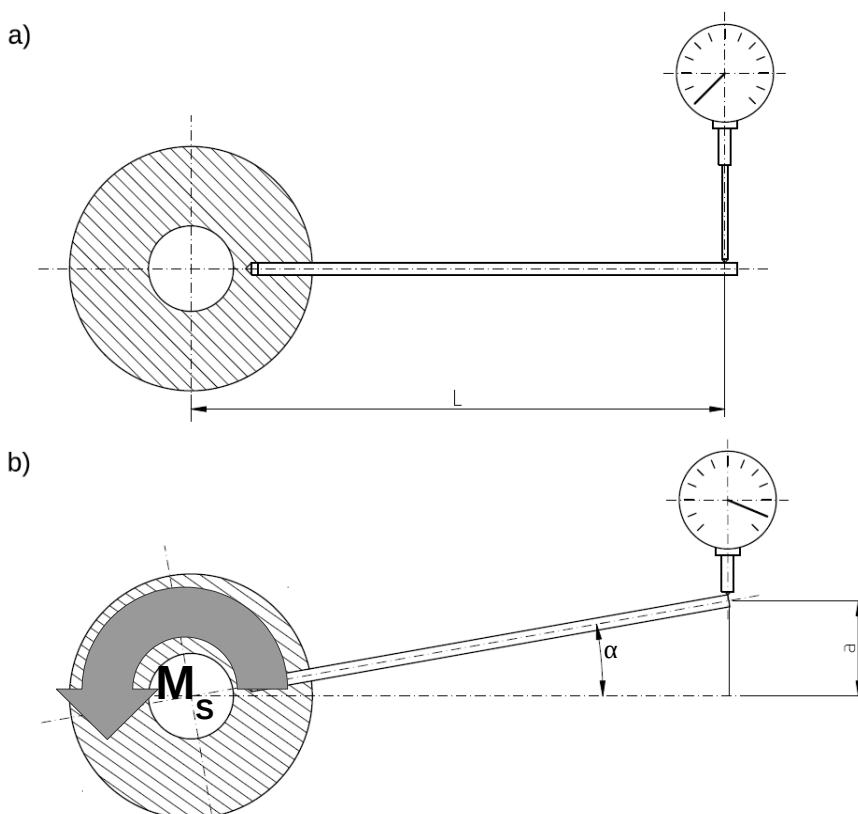
Należy pamiętać, że powyższe wzory dotyczą wałów pełnych i drążonych. W wypadku wałów cienkościennych (rur cienkościennych) kąt skręcenia będzie opisany innymi zależnościami. Zagadnienie to wykracza poza zakres tematyczny niniejszej instrukcji.

5.3.2. Wyznaczanie kąta skręcenia na podstawie pomiarów geometrycznych

Kąt skręcenia można wyznaczyć przy pomocy czujników zegarowych. Do badanego wału są zamocowane dodatkowe dodatkowe dźwignie. Przemieszczenia liniowe końców dźwigni są mierzone przy pomocy czujników zegarowych. Pierwszy czujnik, umieszczony blisko zamocowania wału, określa luz w jego zamocowaniu. Drugi czujnik, umieszczony blisko punktu przyłożenia obciążenia (momentu skręcającego), określa skręcenie wału. Na podstawie różnicy zmierzonych przez czujniki wartości, można obliczyć kąt skręcenia wału.



Rys. 2. Uproszczony schemat ideowy układu pomiarowego: 1-ramię z obciążeniem, 2-swobodny koniec wału, 3-wał, 4-dźwigenka, 5-czujnik zegarowy, 6-zamocowany koniec wału.



Rys. 3. Odchylenie dźwigni zamocowanej do wału, bez obciążenia (a) i pod wpływem obciążenia (b).

Jak pokazano na rysunku 3(b), dla bardzo małych kątów skręcenia α , prawdziwa jest zależność:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{a}{L} \quad (5.7)$$

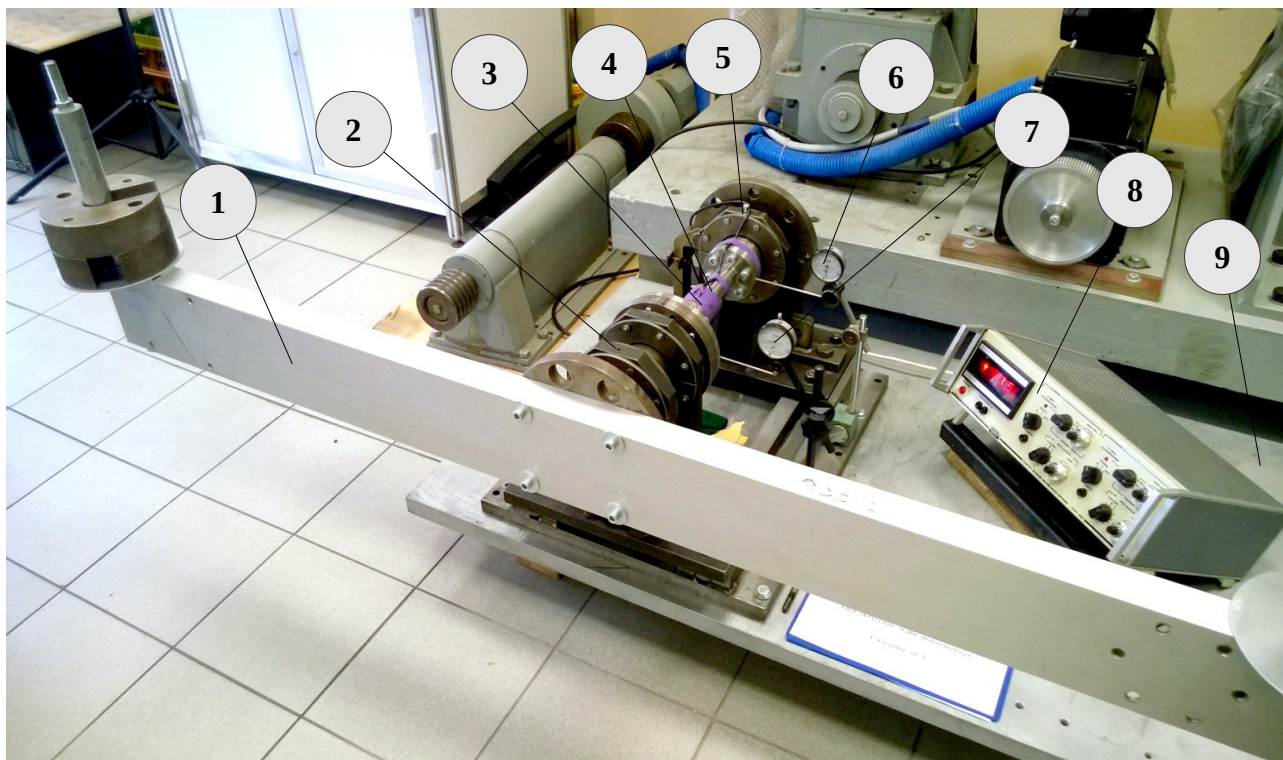
gdzie: a – wartość zmierzona czujnikiem zegarowym (różnica wskazań czujników na początku i końcu wału),
 L – odległość czujnika od środka wału.

Na podstawie tej zależności można wyznaczyć i obliczyć wartość kąta skręcenia wału α .

5.4. Stanowisko badawcze

5.4.1. Budowa stanowiska

Na rysunku 4 przedstawiono widok stanowiska do przeprowadzenia ćwiczenia. Stanowisko składa się z modelu wału, którego jeden koniec jest sztywno zamocowany, a drugi może się swobodnie obracać. Do tego końca wału jest zamocowane ramię, do którego są podwieszane obciążniki. Ramię to jest połączone z wałem przy pomocy sprzęgła przenoszącego tylko moment skręcający. Odształcenie wału (skręcenie) jest mierzone za pomocą dwóch czujników zegarowych. Na wale są również zamocowane tensometry mierzące pośrednio wartość momentu skręcającego poprzez miejscowy pomiar odkształceń wału.



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego. 1-ramię z obciążeniem, 2-sprzęgło, 3-badany wał, 4-układ tensometrów, 5-sztywne zamocowanie wału, 6-czujnik zegarowy I, 7-czujnik zegarowy II, 8-układ odczytu momentu skręcającego mierzonego przy pomocy tensometrów (mostek tensometryczny), 9-podstawa stanowiska.

Wartości odczytywane na wyświetlaczu miernika mostka tensometrycznego są w miliwoltach [mV]. Aby uzyskać wartości momentu skręcającego w niutonometrach [Nm] należy skorzystać z następującej zależności:

$$M_S [Nm] = k_M [Nm/mV] \cdot x [mV] \quad (5.8)$$

gdzie: M_S – moment skręcający w Nm,

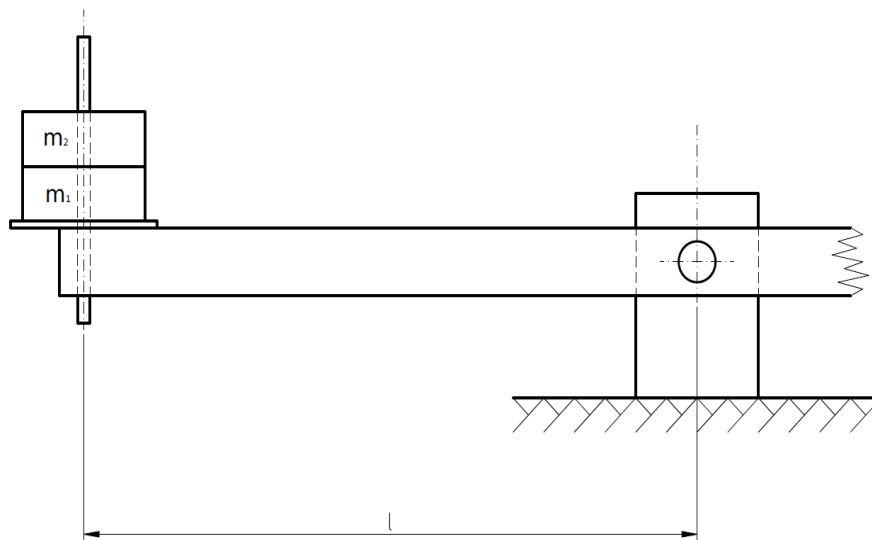
k_M – współczynnik kalibracyjny, zależny od typu, modelu i kalibracji użytego mostka tensometrycznego w Nm/mV,

x – wartość odczytana z miernika mostka tensometrycznego w mV.

Odległość czujników od środka wału (L we wzorze 5.7) w opisywanym stanowisku jest taka sama dla obydwu czujników i wynosi 178 mm.

5.4.2. Mechanizm obciążania wału

Na rysunku 5 przedstawiono uproszczony schemat obciążania wału. Moment skręcający wał jest uzyskiwany poprzez zawieszenie obciążników m na końcu belki. Elementy zawieszenia obciążników są rozmieszczone na obydwu końcach belki, symetrycznie względem obciążanego wału. Kąt nachylenia belki względem podłoża należy pominąć. Odległość l zawieszenia obciążników m od środka skręcane go wału podano poniżej.



Rys. 5. Uproszczony schemat ideowy obciążania wału (opis w tekście).

Poszczególne wartości parametrów wynoszą:

- Masa obciążników: $m \approx 8,6$ kg/szt. (dokł. masy nabito na obciążnikach)
- Długość belki: $l = 1,67$ m

Jak wspomniano w rozdziale 5.4.1, moment skręcający jest również mierzony poprzez układ elektroniczny wykorzystujący układ tensometrów przyklejonych do badanego wału.

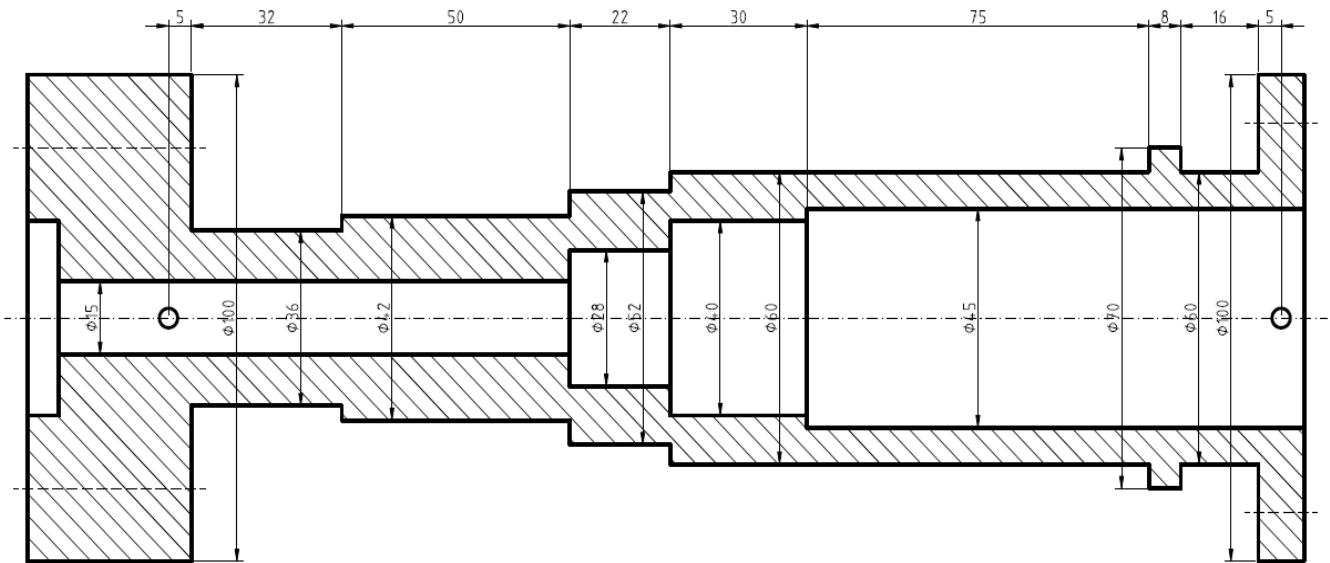
5.5. Sposób wykonania ćwiczenia

Mostek tensometryczny powinien być włączony około pół godziny przed rozpoczęciem badań. Mostek tensometryczny jest wytarowany (tzn. wskazuje 0) dla stanu, w którym wał nie jest obciążony. Nie należy zmieniać ustawień mostka.

Kolejność czynności przy wykonywaniu ćwiczenia:

- Odciążyć wał. Określić i zanotować bezwzględne wskazania czujników zegarowych dla nieobciążonego wału.
- Stopniowo obciążać badany wał, notując wartość momentu skręcającego oraz wskazania czujników zegarowych.
- Po osiągnięciu docelowego obciążenia, stopniowo odciążać wał, sprawdzając zanotowane wcześniej wartości.
- Po zakończeniu pomiarów obliczyć dla zadanych obciążeń (momentu skręcającego):
 - a/ kąt skręcenia wału wg zmierzonych czujnikami zegarowymi wartości, uwzględniając wstępne obciążenie wału ramieniem na którym są wieszane obciążniki.
 - b/ teoretyczny kąt skręcenia wału na podstawie wartości momentu skręcającego.
- Wyciągnąć wnioski, opracować sprawozdanie.

Do obliczeń teoretycznego kąta skręcenia wału należy wykorzystać poniższy, uproszczony model wału (rysunek 6):



Rys. 6. Uproszczony model wału do obliczeń (wymiary w mm).

5.6. Obowiązujący zakres wiadomości do zaliczenia ćwiczenia

1. Znajomość pojęcia momentu skręcającego.
2. Znajomość pojęcia kąta skręcenia wału.

5.7. Literatura

- [1] Mieczysław Chwiej: „Podstawy konstrukcji maszyn”, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982.
- [2] Andrzej Rutkowski: „Części maszyn”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne S.A., Warszawa 1986.
- [3] Zbigniew Dąbrowski, Mikołaj Maksymiuk: „Wały i osie”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984.

5.8. Wzór sprawozdania

Ćwiczenie 5: Badanie i obliczanie kąta skręcenia wału maszynowego

Data:

Zakład Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn PW

Grupa:

..... Zespół:

1. Skład zespołu:

- | | | |
|---------|----------|----------|
| 1. | 6. | 11. |
| 2. | 7. | 12. |
| 3. | 8. | 13. |
| 4. | 9. | 14. |
| 5. | 10. | 15. |

2. Wyniki pomiarów i obliczeń:

L.P.	Obciążenie	m [kg]	M_s [Nm]	Czujnik 1 [mm]	Czujnik 2 [mm]	Różnica [mm]	Kąt skr. [rad]	Kąt skr. [°]
1	-	0	0				-	-
2	2 obciążniki							
3	4 obciążniki							
4	5 obciążników							
5	6 obciążników							

3. Analityczne obliczenie kąta skręcenia wału dla momentu skręcającego $M_s = \dots$ [Nm]:

Nr odc.	l [mm]	D [mm]	d [mm]	J_0	G	Kąt skr. [rad]	Kąt skr. [°]
1	5	100	15				
2	32	37	15				
3	50	42	15				
4	22	52	28				
5	30	60	40				
6	75	60	45				
7	7	70	45				
8	17	60	45				
9	5	100	45				
Razem:							

4. Wnioski: