

**POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN**



**WYZNACZANIE CZASU ROZRUCHU UKŁADU NAPĘDOWEGO
MASZYNY ROBOCZEJ O DUŻYM MASOWYM MOMENCIE
BEZWŁADNOŚCI**

**ĆWICZENIE LABORATORYJNE NR 6
Z PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN**

Opracowali: dr inż. Wojciech **Majewski**
 mgr inż. Jerzy **Gliwiński**
 dr inż. Paweł **Romanowski**

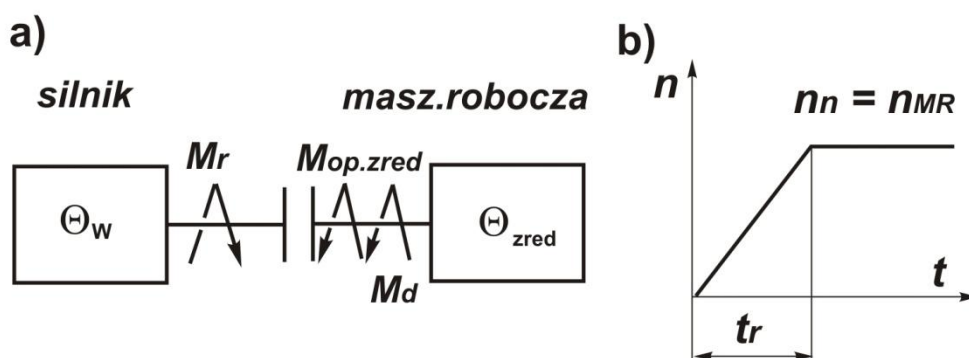
GDAŃSK 2007

Układ ten składa się z następujących zespołów:

1. Silnik elektryczny mSg90S-4 ($N_n=1,1$ kW; $n_n=1415$ obr/min; $\Theta_w=0,0032$ kgm²; $M_r/M_n=2,1$)
2. Przekładnia pasowa z pasem zębatym o przełożeniu $i=2$
3. Sprzęgło cierne Ruflex 01-1TF ($M_T=5 - 35$ Nm ; $n_{\max}=6600$ obr/min)
4. Koło zamachowe ($\Theta_k = 0,968$ kgm²)
5. Hamulec ($M_{op} = 3,7 - 9,4$ Nm)

3.1. Analityczne wyznaczenie czasu rozruchu dla przypadku sprzęgnięcia silnika z maszyną roboczą w sposób trwały (sprzęgnięcie bezpośrednie) – przypadek ogólny

W analizowanym przypadku bezpośredniego sprzęgnięcia członu napędzającego z członem napędzanym, którego model przedstawiono na rysunku 2a, czasy rozruchu obu członów będą takie same. W rozważaniach założono dużą sztywność skrętną układu oraz pominięto masowe momenty bezwładności wszystkich elementów układu będących w ruchu obrotowym za wyjątkiem koła zamachowego. Uznano, że ich wpływ na czas rozruchu jest znikomy w porównaniu z wpływem jaki wywiera na czas rozruchu masowy moment bezwładności koła.



Rysunek 2
Układ silnik-maszyna robocza ze sprzężeniem trwałym
a – model układu
b – wykres narastania prędkości członu czynnego i biernego

W rozważanym układzie napędowym zastosowano przekładnię o przełożeniu „i” zatem konieczne jest zredukowanie na wał silnika obracający się z prędkością n_n zarówno momentu oporowego M_{op} , jak również masowego moment bezwładności Θ_k koła zamachowego. Momenty te wynoszą odpowiednio:

$$M_{op.zred} = \frac{M_{op}}{i} \text{ [Nm]} \quad ; \quad \Theta_{k.zred} = \frac{\Theta_k}{i^2} \text{ [kgm}^2\text{]}$$

W czasie rozruchu moment rozruchowy M_r silnika musi pokonać moment oporowy $M_{op.zred}$ oraz moment dynamiczny M_d konieczny do rozpędzenia mas będących w ruchu obrotowym (Θ_w wirnika silnika oraz $\Theta_{k.zred}$ koła zamachowego).

Zatem:

$$M_r = M_d + M_{op.zred} = (\Theta_w + \Theta_{k.zred}) \varepsilon + M_{op.zred}$$

przy czym:

$$\varepsilon = \frac{\omega_n}{t_r} \left[\frac{1}{s^2} \right] ; \quad \omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \left[\frac{1}{s} \right]$$

zatem po przekształceniu zależności opisującej moment rozruchowy M_r , przyspieszenie kątowe ε wynosi:

$$\varepsilon = \frac{M_r - M_{op.zred}}{\Theta_w + \Theta_{k.zred}} = \frac{\omega_n}{t_r}$$

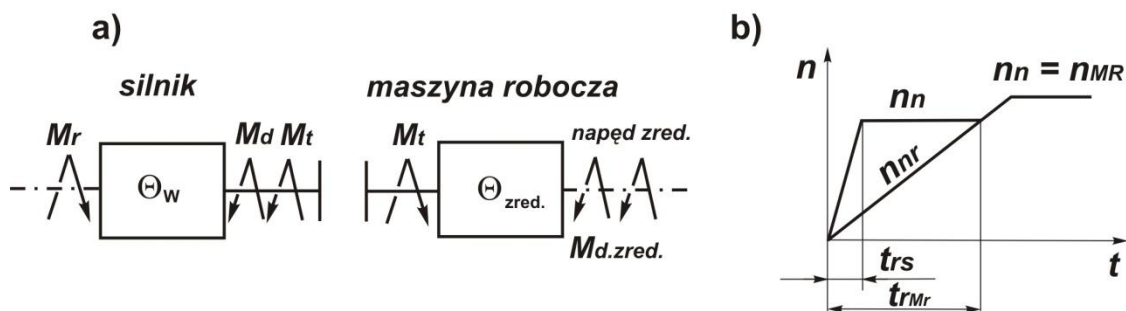
gdzie: moment rozruchowy $M_r = 2,1 M_n$ zaś moment nominalny $M_n = N_n / \omega_n$
Czas rozruchu całego układu opisuje zatem następująca zależność:

$$t_r = \frac{(\Theta_w + \Theta_{k.zred}) \cdot \omega_n}{M_r - M_{op.zred}} [s]$$

Narastanie prędkości obrotowej układu ze sprzężeniem trwałym przedstawiono na rysunku 2b

3.2. Analityczne wyznaczanie czasu rozruchu dla przypadku sprzęgnięcia silnika z maszyną roboczą poprzez sprzęgło rozruchowe będące sprzęgłem ciernym o stałym momencie tarcia M_T (sprzęgnięcie cierne wału koła zamachowego z kołem przekładni pasowej z pasem zębatym) – przypadek ogólny.

W analizowanym przypadku wykorzystania przy rozruchu sprzęgła ciernego, czasy rozruchu członu napędzającego (silnik) oraz członu napędzanego (wał zespołu koła zamachowego), czasy rozruchu ulegną zróżnicowaniu. Model układu przedstawiono na rysunku 3a. W rozważaniach przyjęto te same założenia upraszczające jak w punkcie 3.1.



Rysunek 3

Układ silnik-maszyna robocza ze sprzęgłem rozruchowym o stałym momencie tarcia

a – model układu

b – wykres narastania prędkości członu czynnego i biernego

Podobnie jak dla układu przedstawionego na rysunku 2, konieczne jest zredukowanie na wał silnika momentu oporowego M_{op} oraz masowego momentu bezwładności Θ_k koła zamachowego. Momenty te wynoszą odpowiednio:

$$M_{op.zred} = \frac{M_{op}}{i} \text{ [Nm]} \quad ; \quad \Theta_{k.zred} = \frac{\Theta_k}{i^2} \text{ [kgm}^2 \text{]}$$

Dla członu czynnego (silnika) przedstawionego na Rys.3a, momentem napędowym przy rozruchu jest moment rozruchowy M_r . Musi on pokonać opory w postaci momentu tarcia M_T na sprzęgle oraz momentu dynamicznego M_d koniecznego do rozpędzenia wirnika o masowym momencie bezwładności Θ_w :

$$M_r = M_T + M_d = M_T + \varepsilon \cdot \Theta_w$$

gdzie: $M_r = 2,1 M_n$; $M_n = N_n / \omega_n$,

stąd przyspieszenie kątowe ε wału silnika:

$$\varepsilon = \frac{\omega_n}{t_{rs}} = \frac{M_r - M_T}{\Theta_w} \text{ [1/s}^2 \text{]}$$

zaś czas rozruchu silnika t_{rs} wynosi:

$$t_{rs} = \frac{\Theta_w \cdot \omega_n}{M_r - M_T}$$

Dla członu biernego (zespół koła zamachowego) przedstawionego na Rys.3a, momentem napędowym przy rozruchu jest moment tarcia M_T na sprzęgle. Musi on zrównoważyć opory w postaci zredukowanych na wał silnika momentu oporowego $M_{op.zred}$ oraz momentu dynamicznego $M_{d.zred}$ koniecznego do rozpędzenia koła zamachowego o masowym momencie bezwładności Θ_k :

$$M_T = M_{op.zred} + M_{d.zred} = M_{op.zred} + \varepsilon \cdot \Theta_{k.zred}$$

Zatem przyspieszenie kątowe ε wynosi:

$$\varepsilon = \frac{\omega_n}{t_{rMR}} = \frac{M_T - M_{op.zred}}{\Theta_{k.zred}} \text{ [1/s}^2 \text{]}$$

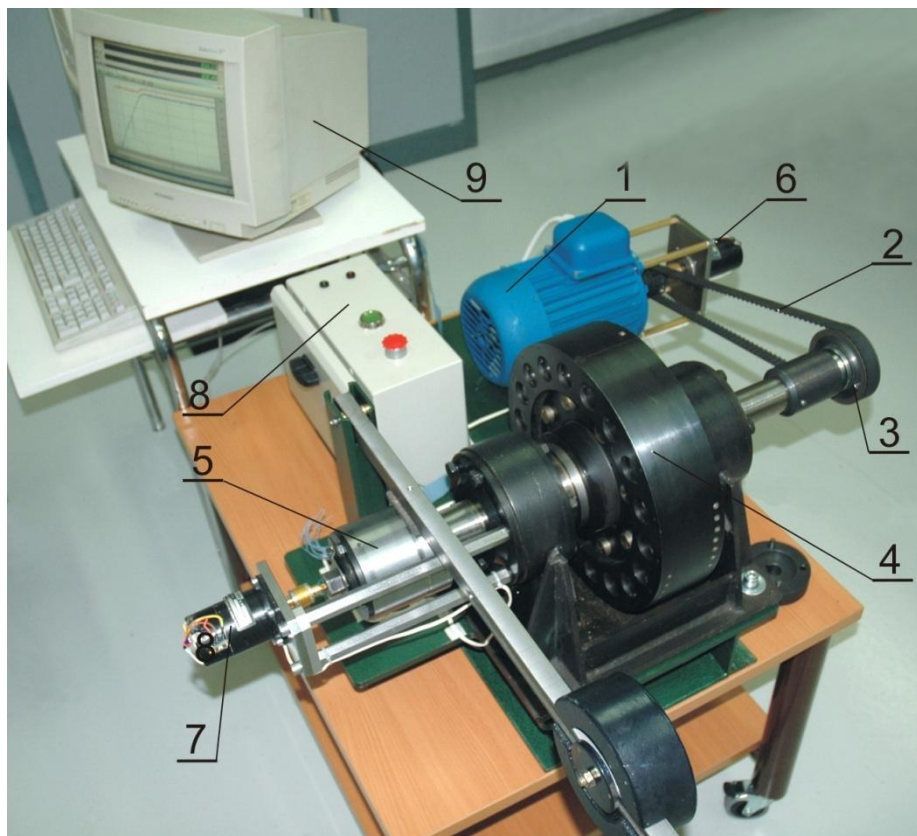
stąd czas rozruchu wału koła zamachowego opisuje zależność:

$$t_{rMR} = \frac{\Theta_{k.zred} \cdot \omega_n}{M_T - M_{op.zred}} \text{ [s]}$$

Narastanie prędkości obrotowej silnika oraz zespołu koła zamachowego w czasie rozruchu przedstawiono na rysunku 3b.

4. Doświadczalne wyznaczenie czasu rozruchu układu silnik-maszyna robocza

Stanowisko laboratoryjne MGR-1 przedstawione na fotografii 1 zbudowano na podstawie schematu kinematycznego zamieszczonego na rysunku 1.

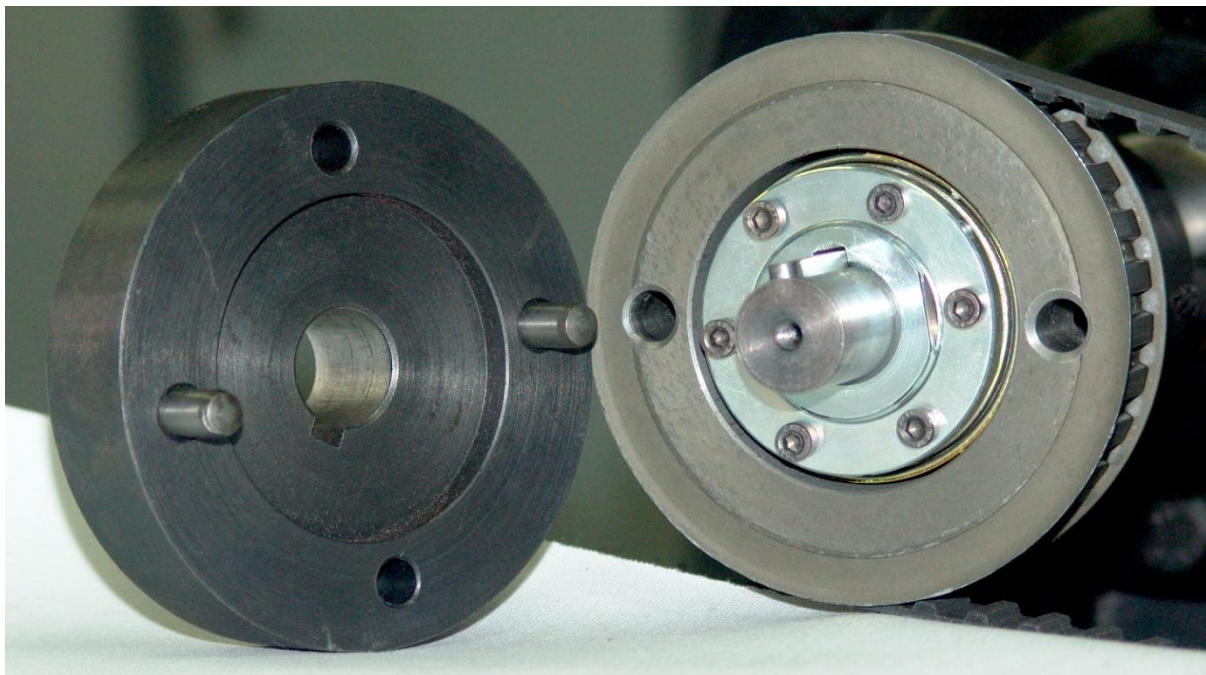


Fotografia 1

1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia pasowa z pasem zębatym, 3 – sprzęgło rozruchowe o stałym momencie tarcia, 4 – zespół koła zamachowego (maszyna robocza), 5 – hamulec, 6 – tachoprądnica do pomiaru prędkości obrotowej wału silnika, 7 – tachoprądnica do pomiaru prędkości obrotowej wału zespołu koła zamachowego, 8 – pulpit sterowniczy, 9 – komputer PC(rejestracja narastania prędkości członów czynnego i biernego)

Stanowisko to umożliwia doświadczalne zweryfikowanie wyznaczonych na drodze analitycznej czasów rozruchu silnika oraz maszyny roboczej. Rolę maszyny roboczej o dużym masowym momencie bezwładności pełni koło zamachowe (4), zaś rolę generatora obciążeń zewnętrznych w postaci momentu oporowego M_{op} pełni hamulec o regulowanym momencie tarcia.

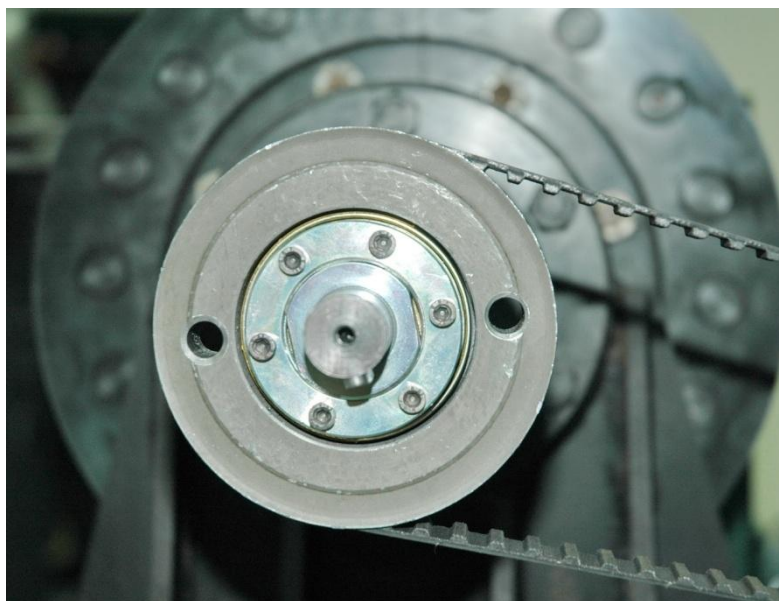
Na drodze analitycznej wyznaczono zależności opisujące czasy rozruchu dla dwóch przypadków: gdy silnik (1) jest sprzęgnięty w sposób trwały z wałem zespołu koła zamachowego (4) oraz gdy jest on sprzęgnięty przy użyciu sprzęgła rozruchowego o stałym momencie tarcia. W układzie rzeczywistym trwałe sprzęgnięcie członu czynnego (silnik) z biernym (wał zespołu koła zamachowego) zrealizowano modyfikując konstrukcję sprzęgła ciernego poprzez zainstalowanie specjalnej tarczy unieruchamiającej koło pasowe przekładni względem okładzin ciernych i tym samym eliminując poślizgi koła między okładzinami (fotografia 2). Bez tarczy blokującej poślizgi sprzęgło pracuje jako rozruchowe zaś po jej zainstalowaniu sprzęgło pracuje jako sztywne (tarczowe).



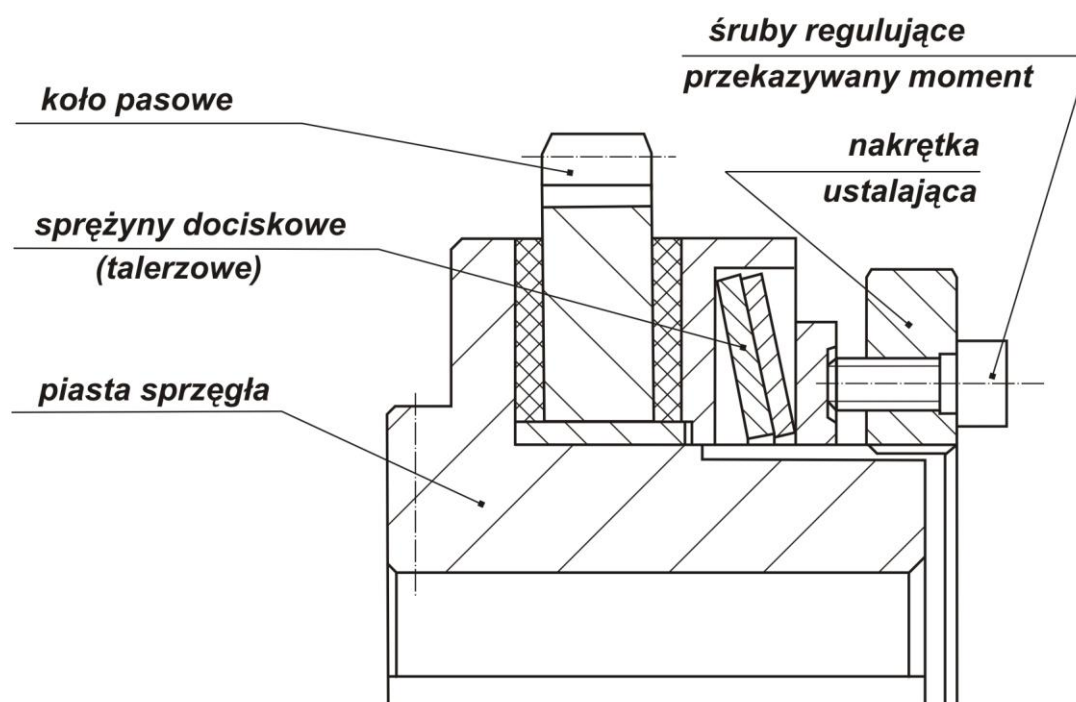
Fotografia 2
Tarcza blokująca poślizgi między kołem pasowym a okładzinami ciernymi sprzęgła

4.1. Regulacja przekazywanego przez sprzęgło momentu obrotowego (momentu tarcia)

Regulację momentu M_T należy przeprowadzić zgodnie z instrukcją producenta. Na fotografii 3 pokazano sprzęgło z zabudowanym kołem pasowym oraz nakrętką ustalającą, natomiast na rysunku 4 przedstawiono w przekroju sprzęgło z mechanizmem regulacji momentu.



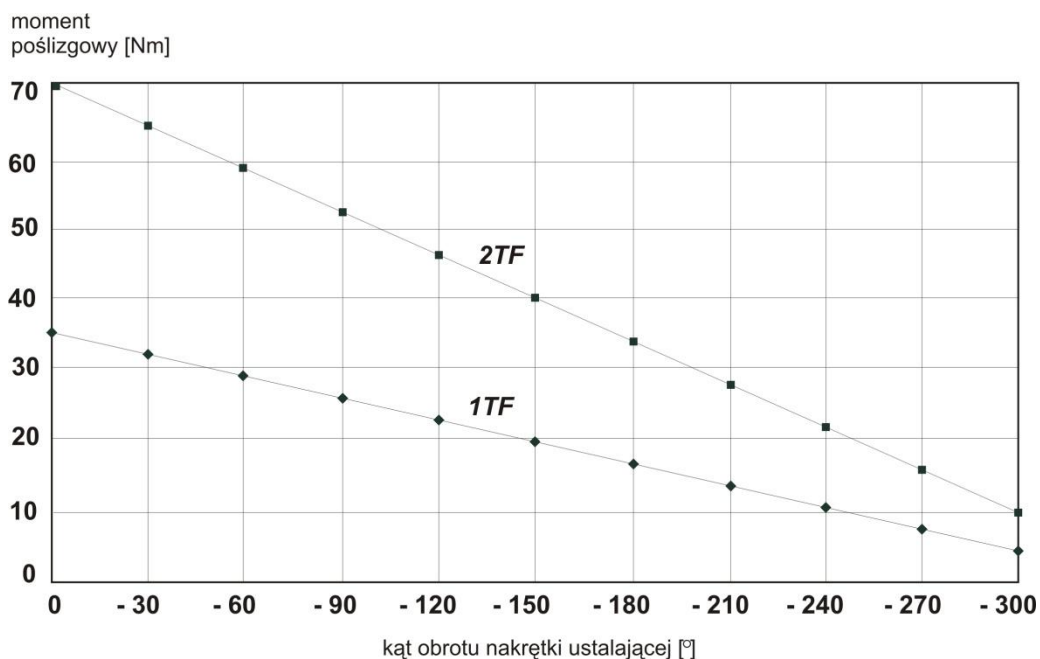
Fotografia 3
Widok sprzęgła od strony nakrętki ustalającej ze śrubami regulującymi ustawienie wymaganego momentu tarcia



Rysunek 4
Mechanizm regulacji przenoszonego przez sprzęgło momentu tarcia

Zgodnie z procedurą podaną przez producenta należy wykonać następujące czynności (rysunek 4):

- wykręcić śruby regulujące moment tarcia M_T do pozycji umożliwiającej swobodny obrót nakrętki ustalającej
- ręcznie dokręcić nakrętkę ustalającą do chwili gdy wyczuje się wyraźny opór (stawiany przez sprężyny talerzowe dociskające tarcze)
- dokręcić śruby regulujące moment tarcia do położenia w którym nastąpi zetknięcie się ich łbów z powierzchnią czołową nakrętki ustalającej. Uzyskuje się wówczas maksymalną wartość moment tarcia
- w celu zmniejszenia wartości przekazywanego momentu należy wykręcić śruby regulujące tak by było możliwe swobodne poruszanie nakrętką ustalającą. Następnie należy nakrętkę wycofać o kąt podany w diagramie (rysunek 5), przy którym uzyska się wymagany przenoszony moment. Pozycjonowanie katowe nakrętki jest wymuszone przez otwory wykonane w dodatkowej tarczy umieszczonej wewnątrz sprzęgła – w otwory te muszą zagłębić się końce śrub ustalających. Po ustaleniu wymaganego położenia katowego nakrętki (zgodnie z diagramem), należy ponownie dokręcić śruby regulujące do położenia w którym nastąpi zetknięcie się ich łbów z powierzchnią czołową nakrętki. Na skutek wycofania nakrętki zwiększyła się odległość od sprężyn dociskowych a zatem po ponownym całkowitym wkręceniu śrub regulujących, zmniejszyło się napięcie wstępne sprężyn i w konsekwencji przenoszony przez sprzęgło moment.



Rysunek 5

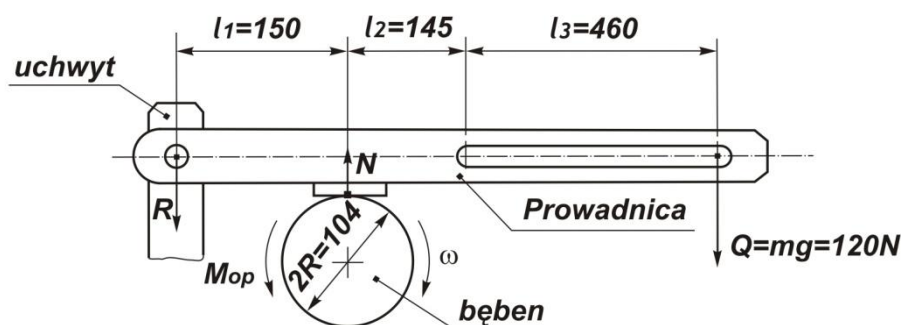
Diagram do ustawiania wymaganego momentu w funkcji położenia kątownego nakrętki

4.2. Ustawianie momentu oporowego M_{op} generowanego przez hamulec (symulacja obciążenia powstającego czasie pracy w ruchu ustalonym)

Ustawienie wartości momentu oporowego (rysunek 6) przeprowadza się przemieszczając obciążnik o masie $m = 12 \text{ kg}$ ($Q = mg = 120 \text{ N}$) wzdłuż prowadnicy podpartej obrotowo w uchwycie oraz ślizgowo (za pośrednictwem okładziny ciernej o współczynniku tarcia $\mu = 0,3$) na stalowym bębnie. Moment ten należy wyznaczyć z następującej zależności (po przyjęciu do obliczeń określonej długości ramienia działania siły Q):

$$M_{op} = Q \cdot \mu \cdot R \cdot \frac{l_1 + l_2 + l_3}{l_1} \quad [\text{Nm}]$$

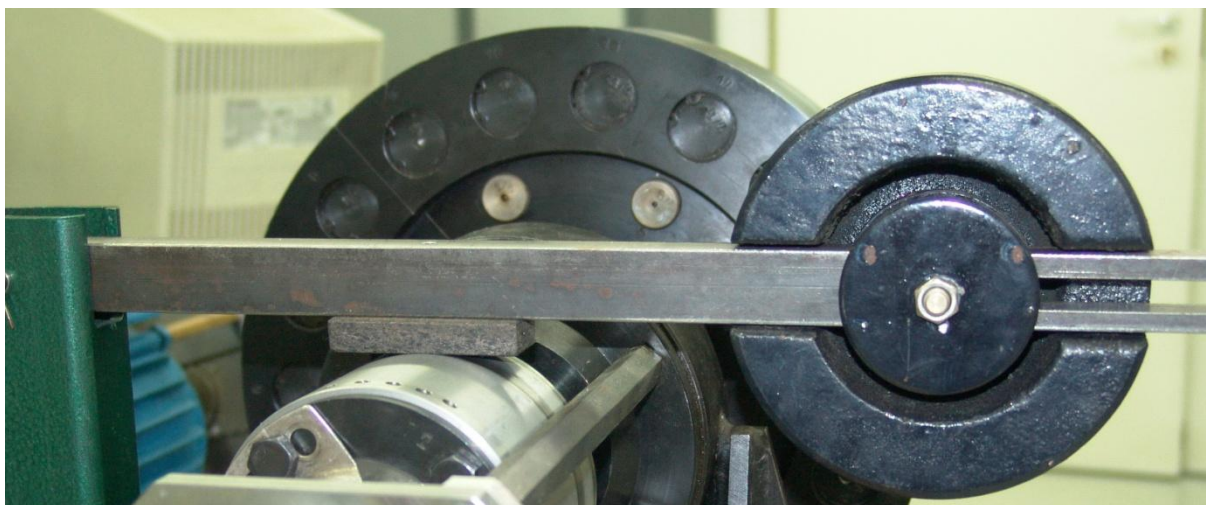
ponieważ: $M_{op} = T \cdot R = \mu \cdot N \cdot R$ zaś $N = Q \cdot \frac{l_1 + l_2 + l_3}{l_1}$



Rysunek 6

Schemat kinematyczny hamulca

Wartość maksymalną $M_{op.max} = 9,4 \text{ Nm}$ oraz minimalną $M_{op.min} = 3,7 \text{ Nm}$, otrzymuje się w przypadku zamocowania obciążnika w położeniach skrajnych. Na fotografii 4 przedstawiono postać konstrukcyjną hamulca.



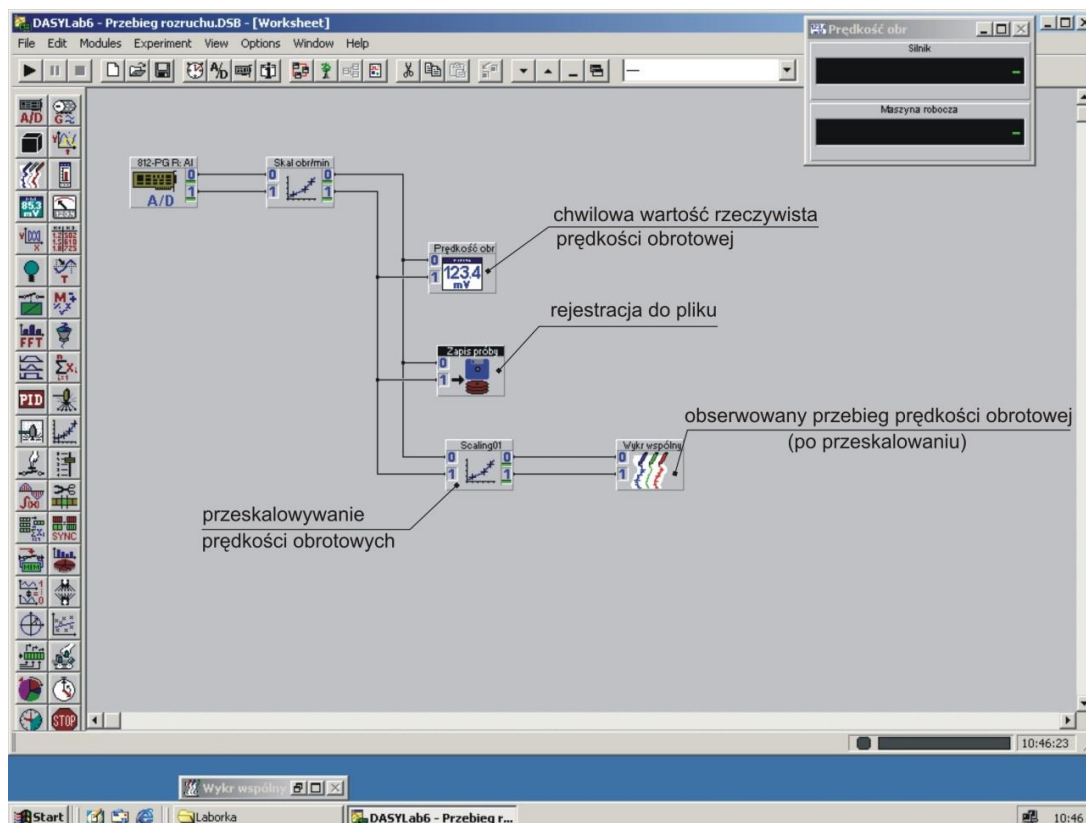
*Fotografia 4
Hamulec z obciążnikiem zamocowanym przesuwnie na dźwigni dociskającej okładzinę cierną do bębna*

4.3. Układ pomiarowo-rejestrujący

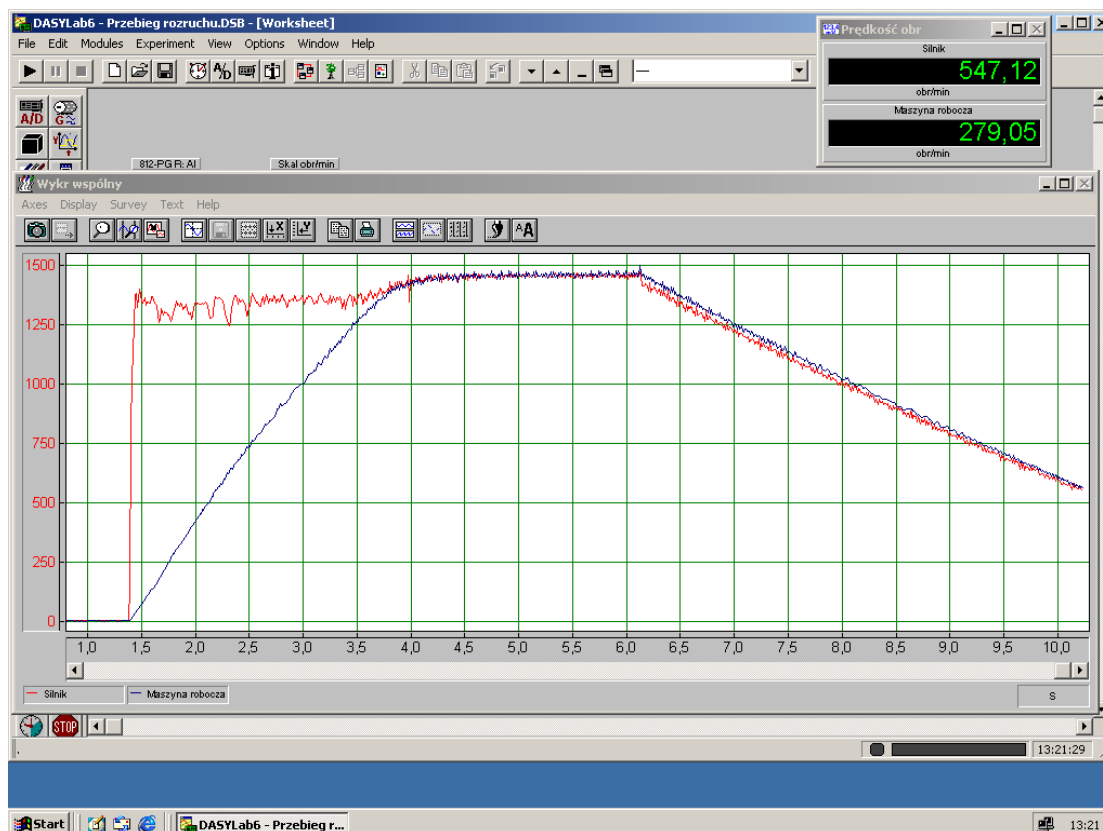
Układ pomiarowo – rejestrujący składa się z następujących elementów (fotografia 1):

- tachoprądnica (6) EVERSHED typ FBI 106/20/FBI do pomiaru prędkości obrotowej wału silnika
- tachoprądnica (7) EVERSHED typ FBI 106/20/FBI do pomiaru prędkości obrotowej wału zespołu koła zamachowego
- pulpit sterowniczy (8)
- komputer PC (9) z kartą pomiarową PCL 812 PG (16 kanałów pomiarowych analogowych, 2 kanały sterujące analogowe, 16 kanałów cyfrowych wyjściowych, sumaryczna częstotliwość pomiarowa 30 kHz (do rejestracji narastania prędkości obrotowej członu czynnego i biernego)

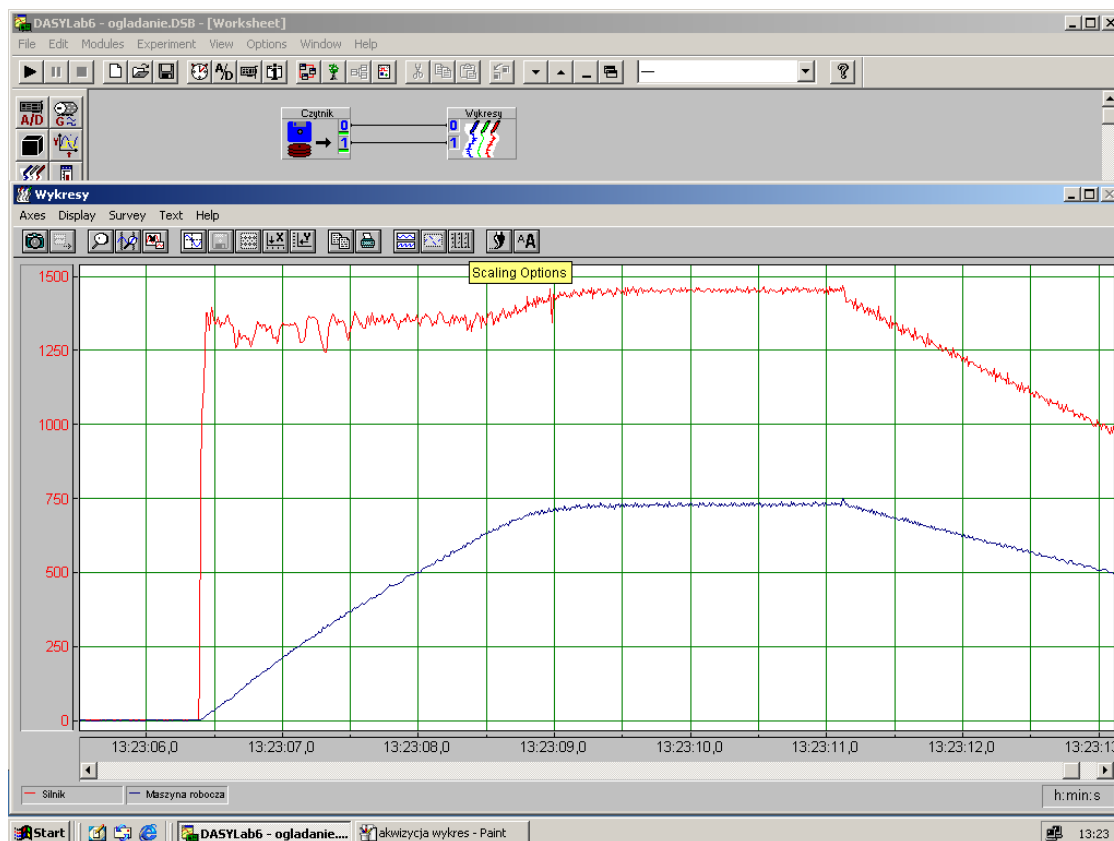
Do wizualizacji procesu narastania prędkości obrotowej członu czynnego (silnik) oraz członu biernego (zespół koła zamachowego) wykorzystano program Dasy Lab 6.0. Na rysunku 7 przedstawiono schemat układu pomiarowego prędkości obrotowych. Możliwe jest przedstawienie procesu rozruchu na wspólnym wykresie po przeskalowaniu prędkości obrotowych (rysunek 8). Ponieważ w układzie napędowym zastosowano przekładnię o przełożeniu $i = 2$, prędkości obrotowe silnika oraz koła zamachowego są różne. Program umożliwia obserwację narastania rzeczywistej prędkości obrotowej każdego z członów osobno (rysunek 9) oraz odczyt ich czasów rozruchu.



Rysunek 7
Schemat układu pomiarowego w programie DasyLab



Rysunek 8
Przebieg prędkości obrotowej układu silnik-maszyna robocza podczas rejestracji (po przeskalowaniu)



Rysunek 9
Przebieg zarejestrowanych prędkości obrotowych silnika i maszyny roboczej (prędkości rzeczywiste)

4.4. Przebieg ćwiczenia

W ramach ćwiczenia zostaną wykonane pomiary czasów rozruchu dla dwóch wariantów układu silnik – maszyna robocza:

I wariant : silnik sprzęgnięto w sposób trwały z zespołem koła zamachowego

II wariant: silnik sprzęgnięto z zespołem koła zamachowego przy pomocy sprzęgła rozruchowego o stałym momencie tarcia

4.4.1. Czynności wstępne

Przed przystąpieniem do pomiarów ćwiczący jest zobowiązany (w domu) do zapoznania się z instrukcją a zwłaszcza z podanymi w rozdz.3 modelami obliczeniowymi będącymi podstawą do wyznaczenia czasów rozruchu na drodze analitycznej.

4.4.2. Wykonanie pomiarów na stanowisku laboratoryjnym

Należy zachować następującą kolejność postępowania:

- przyjęcie parametrów pracy sprzęgła z zakresu wartości $M_T = 5 - 35 \text{ Nm}$ oraz hamulca z zakresu wartości $M_{op} = 3,7 - 9,4 \text{ Nm}$ (wybór arbitralny prowadzącego)
- ustawienie wybranej wartości momentu oporowego na hamulcu
- ustawienie wybranej wartości momentu tarcia na sprzęgle (II wariant) lub, jeżeli realizowany jest wariant I, założenie specjalnej tarczy unieruchamiającej koło pasowe przekładni względem okładzin ciernych (fotografia 2)
- uruchomienie komputera oraz wywołanie arkusza rejestracji prędkości silnika oraz zespołu koła zamachowego
- odblokowanie włącznika pulpitu sterującego (fotografia 1) – czerwone pokrętko
- uruchomienie programu rejestrującego narastanie prędkości
- uruchomienie silnika (czas – maksimum 30 s)
- zatrzymanie rejestracji prędkości
- zatrzymanie silnika
- odczytanie z monitora zarejestrowanych czasów rozruchu

4.4.3. Przygotowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- wyniki obliczeń czasów rozruchu wyznaczonych na drodze analitycznej w oparciu o przyjęte modele obliczeniowe (rozdział 3.1 oraz 3.2) – dla danych przyjętych do próby laboratoryjnych
- wyniki pomiarów laboratoryjnych
- analizę przyczyn ewentualnych rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej oraz analitycznej

LITERATURA

1. Maciakowski R., Majewski W.: Wykład z Podstaw Konstrukcji Maszyn z ćwiczeniami rachunkowymi. „Sprzęgła”, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1994
2. Markusik S. : „Sprzęgła Mechaniczne”. WNT. Warszawa 1979
3. Dietrich M. : „Podstawy Konstrukcji Maszyn” tom II. WNT. Warszawa 1995
4. Korewa W., Zygmunt K.: „Podstawy Konstrukcji Maszyn” tom II. PWN. Warszawa 1965