

## Ćwiczenie 5

# BADANIE NIERÓWNOMIERNOŚCI BIEGU MASZYN

### 5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest pokazanie, jak dobiera się koło zamachowe do maszyn o małym zmiennym zredukowanym momencie bezwładności.

### 5.2. Wprowadzenie teoretyczne

#### 5.2.1. Określenie stopnia nierównomierności biegu maszyny

W ruchu ustalonym maszyny w czasie każdego pełnego cyklu praca sił napędowych równa się pracy oporów.

$$L_c = L_b. \quad (5.1)$$

Jednak w poszczególnych częściach cyklu prace te różnią się od siebie. Jest to spowodowane zmiennością sił czynnych, zmiennością oporów, a także zmiennością zredukowanego momentu bezwładności. Wskutek tych zmian prędkość kątowa maszyny jest okresowo zmienna

$$\omega \neq \text{const}. \quad (5.2)$$

Wahania te mogą być małe – maszyny wirnikowe lub duże – jednocylindrowe maszyny tłokowe. W ruchu ustalonym średnią prędkość punktu redukcji określamy jako

$$\omega_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega dt, \quad (5.3)$$

gdzie:  $T$  – czas jednego cyklu ruchu maszyny,  
 $\omega$  – chwilowa prędkość kątowa.

Zwykle nie jest istotne szczegółowe określenie prędkości średniej, dlatego w przybliżeniu prędkość średnią zdefiniujemy jako

$$\omega_{\text{sr}} = \frac{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}}}{2}, \quad (5.4)$$

Stopień nierównomierności biegu maszyny zdefiniowany jest wyrażeniem

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{sr}}}, \quad (5.5)$$

gdzie:  $\omega_{\max}$  – maksymalna prędkość kątowa osiągnięta w cyklu pracy maszyny,

$\omega_{\min}$  – minimalna prędkość kątowa osiągnięta w cyklu pracy maszyny.

Uwzględniając wyrażenie (5.4) otrzymamy

$$\delta = 2 \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\max} + \omega_{\min}} \quad (5.6)$$

lub mnożąc licznik i mianownik przez sumę prędkości kątowych

$$\delta = \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2}{2\omega_{\text{sr}}^2}. \quad (5.7)$$

Z równania (5.6) wynika, że jeśli

$$\begin{aligned} \omega_{\max} &= \omega_{\min}, & \delta &= 0, \\ \omega_{\min} &= 0, & \delta &= 2. \end{aligned}$$

Tak więc największy, teoretycznie możliwy stopień nierównomierności biegu wynosi 2. W praktyce nierównomierność biegu maszyn jest znacznie mniejsza i wynosi dla:

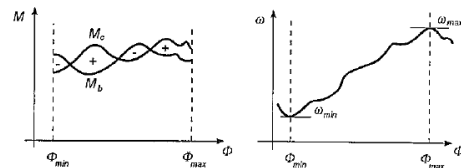
– obrabiarek do metali	$\delta = 0,2 \div 0,02,$
– pomp i dmuchaw	$\delta = 0,1 \div 0,03,$
– silników pojazdów na biegu luzem	$\delta = 0,028,$
– maszyn tkackich	$\delta = 0,025,$
– silników pojazdów pod obciążeniem	$\delta = 0,005 \div 0,003,$
– silników okrętowych	$\delta = 0,05 \div 0,007,$
– generatorów prądu zmiennego	$\delta = 0,003,$
– silników lotniczych tłokowych pod obciążeniem	$\delta = 0,001.$

### 5.2.2. Obliczenie stopnia nierównomierności biegu maszyny

W punkcie 5.2.1 zdefiniowano stopień nierównomierności biegu maszyny i podano różne postacie wyrażenia definiującego, dzięki czemu można było obliczyć zakres teoretycznej zmienności stopnia nierównomierności. Ponieważ nierównomierność biegu maszyny jest szkodliwa i powinna być ograniczona, obecnie zastanowimy się, od czego fizycznie zależy stopień nierównomierności biegu. Do oceny tego weźmy pod uwagę przedział kąta, w ruchu ustalonym maszyny, w którym osiągnięta jest najmniejsza i największa prędkość kątowa

maszyny (rys. 5.1). W tym czasie siły czynne i siły oporu wykonują pracę, równą sumie pól zaznaczonych na rys. 5.1. Pracę tę możemy wyznaczyć z wyrażenia

$$L_m = \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} (M_c - M_b) d\phi. \quad (5.8)$$



Rys. 5.1. Przebieg zmienności momentu czynnego  $M_c$ , momentu biernego  $M_b$  oraz prędkości kątowej maszyny

Obliczenie powyższej całki wymaga znajomości dwóch funkcji:  $M_c(\phi)$  oraz  $M_b(\phi)$ . Zwykle pracę tę znajdujemy doświadczalnie. Praca ta jest równa przyrostowi energii kinetycznej maszyny

$$L_m = \Delta E_k. \quad (5.9)$$

Aby  $\Delta E_k$  nie było równe zero, przedział kąta wzięty pod uwagę, od  $\phi_{\min}$  do  $\phi_{\max}$ , nie może być okresem ruchu maszyny. Energia kinetyczna wyraża się wzorem

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} d(J_z \omega^2). \quad (5.10)$$

Jeśli zredukowany moment bezwładności maszyny jest stały lub oscyluje względem wartości średniej tak niewiele, że można go uznać za stały, wyrażenie na  $J_z$  wyciągamy przed całkę i otrzymujemy

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} J_z (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) = L_m. \quad (5.11)$$

Uwzględniając wyrażenie (5.7) uzyskujemy

$$L_m = J_z \delta \omega_{\text{sr}}^2, \quad (5.12)$$

stąd

$$\delta = \frac{L_m}{J_z \omega_{\text{sr}}^2}, \quad (5.13)$$

Z analizy wzoru (5.13) wynika, że stopień nierównomierności biegu jest tym większy, im większa jest różnica prac sił czynnych i biernych, a tym mniejszy, im większy jest zredukowany moment bezwładności maszyny i średnia prędkość kątowa. W celu zmniejszenia stopnia nierównomierności biegu należy dążyć do zminimalizowania wahań momentów. Zwykle możemy wpływać na moment czynny. Zmniejszenie jego wahań w maszynach tłokowych uzyskujemy przez zwiększenie liczby cylindrów i odpowiednie ustawienie korb układów korbowych. Można także zwiększyć  $\omega_{\text{śr}}$ , jednak wymaga to stosunkowo lekkich tłoków, aby nie osiągnąć zbyt dużych sił bezwładności. Obie podane wyżej metody są do zastosowania w fazie projektowania silnika. Jednak gdy silnik jest już zaprojektowany (lub wykonany), najłatwiej jest zmniejszyć stopień nierównomierności biegu przez powiększenie zredukowanego momentu bezwładności. Osiąga się to przez odpowiedni dobór koła zamachowego.

### 5.2.3. Dobór koła zamachowego

Zredukowany moment bezwładności maszyny jest sumą momentu bezwładności koła zamachowego (jeśli koło osadzone jest na wale, do którego zredukowano układ)  $J_k$  oraz zredukowanego momentu maszyny bez koła zamachowego  $J_{zkk}$ .

$$J_z = J_k + J_{zkk}. \quad (5.14)$$

Jeśli koło osadzone jest na innym wale, jego moment bezwładności należy zredukować do wału redukcji według wzoru

$$J_{zi} = J_k \frac{\omega^2}{\omega_1^2} = J_k i^2, \quad (5.15)$$

gdzie  $i$  — przełożenie między wałem redukcji a wałem, na którym osadzone koło.

Podstawiając wyrażenie (5.14) do (5.13) i zakładając stopień nierównomierności biegu, który chcemy otrzymać, możemy obliczyć moment bezwładności koła zamachowego

$$J_k = \frac{L_m}{\delta \omega_{\text{śr}}^2} - J_{zkk}. \quad (5.16)$$

Należy pamiętać, że wyrażenie (5.13) wyprowadziliśmy przy założeniu  $J_z = \text{const}$ . Aby założenie to mogło być spełnione z techniczną dokładnością, po obliczeniu momentu bezwładności koła należy sprawdzić warunek

$$J_{zkk} \ll J_k. \quad (5.17)$$

Jeżeli uznajemy, że warunek nie jest spełniony, możemy zwiększyć nieco moment bezwładności koła (tym samym otrzymujemy stopień nierównomier-

ności  $\delta$ , inny niż założyliśmy) lub, dla tego samego  $\delta$ , zastosować inną metodę obliczania koła zamachowego (metodą Wittenbauera).

## 5.3. Opis stanowiska

Stanowisko składa się z silnika napędowego, który przez przekładnię napędza pompkę tłoczkową. Pompka tłoczkowa jest elementem wywołującym nierównomierność biegu silnika. Nierównomierność tę można zmieniać przez dobór oporów przepływu tłoczonego oleju. Opory przepływu zmienia się zaworem dławicowym. Na wałku mimośrodowym pompki możemy zamocować różne koła zamachowe i w ten sposób zmieniać zredukowany moment bezwładności pompki, a także nierównomierność biegu silnika. Zredukowany do osi obrotu wałka mimośrodowego pompki moment bezwładności układu ruchomego, bez koła zamachowego  $J_{zkk}$ , wynosi

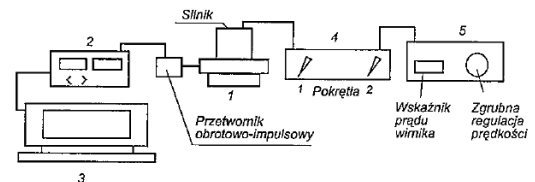
$$J_{zkk} = 0,0952 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

a masy kół wynoszą:

- koło duże — 3,04 kg,
- koło średnie — 1,22 kg,
- koło małe — 0,59 kg.

Z konstrukcji stanowiska wynika, że na moment bezwładności układu ruchomego składają się: wirnik silnika elektrycznego, przekładnia ślimakowa, wałek mimośrodowy oraz tłoczek pompki. Zmianę zredukowanego momentu bezwładności w czasie obrotów powoduje tylko pompka. Ponieważ jej moment bezwładności jest dużo mniejszy od momentu bezwładności wirnika, przekładni oraz wałka mimośrodowego, można więc z bardzo dużą dokładnością założyć, że  $J_{zkk} = \text{const}$ , a więc omówiona wyżej metoda doboru koła zamachowego może mieć zastosowanie.

Do opisanego stanowiska przyłączony jest układ pomiarowy. Schemat połączeń tego układu pokazany jest na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Schemat układu pomiarowego

Na rysunku tym oznaczono:

- 1 – pompka wraz z silnikiem napędzającym i przetwornikiem obrotowo-impulsowym,
- 2 – miernik lokalnej prędkości kątowej.
- Na płycie czołowej miernika znajdują się dwa wyświetlacze. Lewy wyświetla numer okienka, w którym odbywa się pomiar, prawy – wartość chwilowej prędkości kątowej. Poza tym są tam następujące przyciski:
- < – służy do przeglądania wartości chwilowych prędkości kątowych. Naciskanie powoduje zmniejszenie numeru okienka o 1. Przytrzymanie przycisku powoduje zmniejszenie numeru co 10;
- > – działa podobnie jak przycisk poprzedni, z tym że następuje zwiększenie numeru okienka;
- Min – naciśnięcie powoduje wyświetlenie numeru okienka, w którym występuje najmniejsza chwilowa prędkość kątowa oraz wartość tej prędkości,
- Max – analogicznie do poprzedniego, z tym że wskazane jest okienko i wartość największej chwilowej prędkości kątowej;
- Średnia – naciśnięcie powoduje wyświetlenie wartości średniej prędkości kątowej.
- Uwaga: Jeśli przyrząd nie był skalibrowany lub nie dokonano pomiaru, przyciski te nie działają.*
- Start – naciśnięcie powoduje rozpoczęcie pomiaru. Dopóki pomiar trwa, na pierwszej pozycji lewego wyświetlacza jest wyświetlana litera P. Po zakończeniu pomiaru na prawym wyświetlaczu jest wyświetlana wartość średnia (z siedmiu obrotów) prędkości kątowej.
- Uwaga: Na pierwszej pozycji lewego wyświetlacza po włączeniu przyrządu powinna wyświetlić się litera S. Oznacza to, że przyrząd gotowy jest do pomiaru. Brak litery S oznacza, że należy przeprowadzić kalibrację przyrządu.*
- Jeśli na lewym wyświetlaczu pojawi się symbol  $\square$  oznacza to, że prędkość obrotowa jest za duża, aby można było dokonać kalibracji czy pomiaru. Symbol  $\square$  oznacza, że prędkość jest za mała.
- Jeśli przyrząd był wykalibrowany, to przyciskami na płycie czołowej można dokonać przeglądu chwilowych prędkości kątowych w 256 okienkach.
- 3 – komputer
- Po wysłaniu litery W z komputera, następuje przesłanie do komputera 256 wyników pomiaru chwilowych prędkości kątowych oraz wartości średniej prędkości. Wartości te mogą być wydrukowane na drukarce. Poza tym na podstawie tych wartości można zrobić wykres zmian prędkości kątowych na ekranie komputera, a następnie wydrukować go na drukarce.
- 4 – ogranicznik momentu silnika
- Pokrętło 1 służy do regulacji prądu wzbudzenia. Pokrętłem tym regulujemy prędkość obrotową silnika. Obrót w prawo powoduje zwiększenie prędkości. Pokrętło 2 służy do regulacji prądu wimnika. Pokrętłem tym

regulujemy wielkość momentu silnika. Jeżeli nie nastąpi zmiana obciążenia, powinno pozostać w lewym skrajnym położeniu.

- 5 – zgrubna regulacja prędkości

Na przyrządzie tym znajduje się cyfrowy wskaźnik prądu wimnika i pokrętło do zgrubnej regulacji prędkości. Pokrętło to powinno być nastawione w pobliżu max, tj. około 100 działek.

## 5.4. Przebieg ćwiczenia

Badanie nierównomierności biegu pompki przy różnych, zakładanych kołach zamachowych należy wykonać w następującej kolejności:

- Zdjąć wszystkie koła, które znajdują się na osi pompki. Zawór dławiący ustawić w określone położenie wskazane przez prowadzącego.
- Włączyć zasilanie stanowiska przez włączenie przełącznika na przedniej ścianie regulatora. Jeśli silnik nie zacznie się obracać, należy wprawić stanowisko w ruch ręką, zwracając uwagę, aby obrót nastąpił w kierunku **wskazany strzałką** na przetworniku obrotowo-impulsowym.
- Włączyć miernik lokalnej prędkości kątowej (włącznik znajduje się na tylnej ścianie przyrządu). Jeśli w lewym wyświetlaczu nie pojawi się litera S, należy przeprowadzić kalibrację (może to zrobić tylko prowadzący ćwiczenie).
- Włączyć komputer i wybrać na nim program „NEKA”, włączyć drukarkę.
- Na ograniczniku momentu (poz. 4, rys. 5.2) pokrętłem 1 ustalić określony prąd wzbudzenia i zanotować jego wartość.
- Pokrętłem zgrubnej regulacji prędkości nastawić wartość w pobliżu max.
- Na wskaźniku prądu wimnika odczytać przybliżoną wartość średnią wskaźni i zanotować ją. Odpowiada to pewnemu momentowi silnika, który powinien być przez cały czas badania taki sam.
- Wcisnąć przycisk „start” na mierniku lokalnej prędkości kątowej, poczekać aż zgaśnie na wyświetlaczu litera „L” i ukazać się wartość średniej prędkości kątowej.
- Na komputerze w programie „NEKA” przejść na plik „frys” i wcisnąć kolejno klawisze P, <ENTER>, W, W, A, <ENTER>. Po zakończeniu przesyłania wyników pomiaru do komputera, co sygnalizowane jest napisem „Przesłano 100%”, na ekranie pojawi się wykres zmiany prędkości kątowej. Po ukazaniu się wykresu wydrukować go wciskając kolejno <Print Screen> i <1>. Uwaga: Drukarka musi być włączona.
- Z wydrukowanego wykresu odczytać  $\omega_{\max}$  i  $\omega_{\min}$ , szacując średnie wartości z wykresu. Następnie obliczyć  $\omega_{gr}$  i  $\delta$ . Z kolei policzyć pracę, jaką wykonał silnik przy napędzaniu pompki bez kół zamachowych, z wyrażenia

$$L_m = \delta \omega_{gr}^2 J_{zmk}.$$

11. Obliczyć moment bezwładności względem osi, koła zamachowego wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie.
12. Wyłączyć napęd silnika, wstawić wskazane koło zamachowe i przykręcić.
13. Włączyć zasilanie napędu silnika. Poczekać aż osiągnie pełne obroty i przyciskając przycisk „start” dokonać pomiaru prędkości średniej. Jeśli nie jest ona taka sama jak poprzednio, obracając delikatnie pokrętkiem  $I$  na ograniczniku momentu doprowadzić wartość prędkości średniej do wskazywanej przy pomiarze bez koła zamachowego. Należy pamiętać, że każdorazowy pomiar prędkości średniej dokonuje się poprzez wciśnięcie przycisku „start”.
14. Skasować stary zapis na ekranie komputera naciskając <Esc> i T.
15. Sporządzić nowy wykres zmian prędkości kątowej na ekranie komputera postępując jak poprzednio i wydrukować go.
16. Odczytać z wydrukowanego wykresu  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  i  $\omega_{\text{sr}}$  oraz obliczyć otrzymane z wykresu  $\delta$ .
17. Obliczyć  $J_z$  z kołem i zakładając, że dla tego samego położenia zaworu dławiącego praca mechaniczna silnika jest taka sama, obliczyć z wyrażenia (5.13) stopień nierównomierności biegu.
18. Porównać otrzymaną z obliczeń wartość  $\delta$  z wartością  $\delta$  obliczoną z wykresu komputerowego i oszacować błąd wyniku. Przeanalizować przyczyny błędu.
19. Powtórzyć pomiary dla innego zestawu kół zamachowych wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie.

## 5.5. Treść sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić:

1. Opis i schemat stanowiska badawczego.
2. Obliczenie momentów bezwładności kół zamachowych i uzyskanych stopni nierównomierności biegu.
3. Wyniki otrzymanych pomiarów.
4. Wnioski co do sposobu obliczeń stopnia nierównomierności biegu i ewentualnych różnic między obliczeniami a pomiarami.

## LITERATURA

- [1] *Osiński Z.*: Teoria maszyn i podstaw automatyki. Część 1. WPW, Warszawa 1974.
- [2] *Morecki A., Oderfeld J.*: Teoria maszyn i mechanizmów. WPW, Warszawa 1987.
- [3] *Kotaczin T.*: Podstawy teorii maszyn i automatyki. WPW, Warszawa 1995.