



**LABORATORIUM NAPĘDÓW HYDRAULICZNYCH  
I PNEUMATYCZNYCH**

---

**INSTYTUT MASZYN ROBOCZYCH CIĘŻKICH  
WYDZIAŁ SAMOCHODÓW I MASZYN ROBOCZYCH  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA  
*ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa***



## Ćwiczenie HP7

### **Charakterystyka przekładni hydrostatycznej**

### Instrukcja

Opracowanie: dr inż. Lech Knap

## 1. Wstęp

Przekładnia hydrostatyczna należy do grupy napędów hydrostatycznych. Transmisja energii od jej źródła (np. silnik spalinowy, elektryczny) do odbiornika (np. osprzęt maszyn roboczych) jest w takich napędach realizowana za pośrednictwem cieczy roboczej. Wykorzystuje się przy tym przede wszystkim energię potencjalną ciśnienia cieczy. Głównymi elementami przekładni hydrostatycznej są pompa wyporowa i silnik wyporowy. Tworzą one zespół napędowy o ruchu obrotowym, który służy do zmiany momentu i prędkości obrotowej. Cieczą roboczą jest olej hydrauliczny. Przekładnia hydrostatyczna może być zbudowana jako przekładnia o stałej wartości przełożenia, w której nie ma możliwości sterowania prędkością ruchu silnika wyporowego, bądź jako przekładnia o przełożeniu zmiennym w sposób skokowy lub ciągły. Zależy to od budowy układu hydraulicznego i/lub konstrukcji maszyn hydraulicznych tworzących przekładnię.

Podstawowym celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową, działaniem i własnościami przekładni hydrostatycznej oraz ze sposobami zmiany jej przełożenia. Wyniki przeprowadzonych przez studentów pomiarów są podstawą do sporządzenia przez nich charakterystyki badanej przekładni – patrz pkt 1.5.

## 2. Budowa i działanie przekładni hydrostatycznej, podstawowe pojęcia i zależności

Przekładnia hydrostatyczna może być zbudowana z hydraulicznych maszyn wyporowych - pompy i silnika - o stałej lub zmiennej geometrycznej objętości roboczej. Geometryczna objętość robocza przedstawia teoretyczną objętość cieczy, która podczas jednego obrotu wału maszyny jest dostarczana do instalacji hydraulicznej - w przypadku pompy, lub pobierana z tej instalacji - w przypadku silnika wyporowego. Używane są również nazwy: wydajność jednostkowa pompy  $q_p$  ( $V_{gp}$ ) lub chłonność jednostkowa silnika  $q_s$  ( $V_{gs}$ ) – patrz ćwiczenie HP5 (Charakterystyka pompy wyporowej). Maszyny wyporowe tworzące przekładnię hydrostatyczną mogą pracować w tzw. obiegu hydraulicznym otwartym, półzamkniętym bądź zamkniętym. Przestrzenie wysokiego ciśnienia maszyn hydraulicznych tworzących przekładnię są ze sobą połączone - np. za pomocą wysokociśnieniowego przewodu hydraulicznego - niezależnie od zastosowanego rodzaju obiegu hydraulicznego. W przypadku przekładni pracującej w obiegu zamkniętym lub półzamkniętym połączone są ze sobą również przestrzenie niskiego ciśnienia obu maszyn. Zastosowanie obiegu hydraulicznego zamkniętego wymaga uzupełniania wewnętrznych przecieków cieczy roboczej – tzw. strat wolumetrycznych (objętościowych), które występują w pompie i silniku wyporowym. Stosuje się w tym celu pomocniczy układ hydrauliczny zasilający linię niskiego ciśnienia przekładni. W skład przekładni wchodzi ponadto szereg elementów sterujących w postaci różnego rodzaju zaworów oraz szereg elementów pomocniczych – np. zbiornik, filtr, chłodnica oleju itp.

Sterowanie prędkością kątową wału wyjściowego przekładni, którym jest wał silnika wyporowego, jest realizowane poprzez zmianę przełożenia kinematycznego przekładni  $i_k$ . Przełożeniem tym jest nazywany stosunek prędkości kątowych wału silnika wyporowego  $\omega_s$  i wału pompy wyporowej  $\omega_p$  (lub prędkości obrotowych  $n_s, n_p$ ) tworzących przekładnię:

$$i_k = \frac{\omega_s}{\omega_p} = \frac{n_s}{n_p}$$

Wartość przełożenia kinematycznego przekładni wynika z geometrycznych objętości roboczych zastosowanych maszyn wyporowych, z objętościowych natężeń przepływu cieczy roboczej podawanej przez pompę  $Q_p$  (wydajności pompy) i pobieranej przez silnik wyporowy  $Q_s$  (chłonności silnika) oraz z przecieków wewnętrznych występujących w obu maszynach (strat objętościowych zwanych wolumetrycznymi - patrz ćwiczenie X). Opisuje ją zależność:

$$i_k = \frac{Q_s \cdot q_p}{Q_p \cdot q_s} \cdot \eta_{vp} \cdot \eta_{vs} ,$$

gdzie:  $\eta_{vp}, \eta_{vs}$  – sprawności wolumetryczne pompy i silnika wyporowego.

Zmiana przełożenia kinematycznego przekładni zbudowanej z maszyn wyporowych o stałej geometrycznej objętości roboczej jest możliwa wyłącznie w wyniku zmiany chłonności silnika  $Q_s$  – realizowanej poprzez szeregowe lub równoległe dławienie przepływu. Zmiana przełożenia kinematycznego przekładni zbudowanej z pompy o zmiennej wydajności i silnika o stałej chłonności, lub z obu maszyn o zmiennej geometrycznej objętości roboczej, może być realizowana poprzez zmianę geometrycznej objętości roboczej jednej lub obu maszyn. Zmianie takiej towarzyszy zmiana przełożenia dynamicznego przekładni, co pozwala dostosowywać wartość momentu obrotowego silnika wyporowego do zmian obciążenia zewnętrznego według przyjętego kryterium regulacji – np. bez zmiany wartości momentu obrotowego na wale pompy.

Przełożeniem dynamicznym przekładni hydrostatycznej jest nazywany stosunek momentu obrotowego  $M_s$  odbieranego z jej wału wyjściowego (wału silnika) do momentu obrotowego  $M_p$  napędzającego wał wejściowy (wał pompy):

$$i_d = \frac{M_s}{M_p} .$$

Wartość tego przełożenia zależy od geometrycznych objętości roboczych obu maszyn wyporowych, różnicy ciśnień  $\Delta p_p$  pomiędzy wylotem i wlotem cieczy do pompy, różnicy ciśnień  $\Delta p_s$  na wlocie i wylocie cieczy z silnika, oraz sprawności hydrauliczno-mechanicznych  $\eta_{hmp}, \eta_{hms}$  obu maszyn :

$$i_d = \frac{q_s \cdot \Delta p_s}{q_p \cdot \Delta p_p} \cdot \eta_{hmp} \cdot \eta_{hms}.$$

Występujący w powyższej zależności stosunek różnicy ciśnień przedstawia sprawność instalacji hydraulicznej przekładni hydrostatycznej:

$$\eta_i = \frac{\Delta p_s}{\Delta p_p}.$$

Transmisji energii przez przekładnię hydrostatyczną towarzyszy jej rozpraszanie, którego przyczynami są:

- straty mechanicznymi wynikające z tarcia pomiędzy elementami pompy i silnika waporowego pozostającymi w ruchu względnym,
- straty ciśnienia związane z oporami przepływu cieczy roboczej przez kanały dolotowe i wylotowe pompy i silnika oraz przez instalację hydrauliczną przekładni,
- przecieki wewnętrzne występujące w pompie i silniku waporowym.

Moc  $N_s$  odbierana z wału silnika waporowego jest w związku z tym mniejsza od mocy  $N_p$  doprowadzanej do wału pompy. Stosunek tych mocy przedstawia sprawność ogólną przekładni hydrostatycznej

$$\eta = \frac{N_s}{N_p} = \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_i,$$

gdzie:  $\eta_p$ ,  $\eta_s$  – sprawność pompy i silnika waporowego przekładni.

Łatwo wykazać, że sprawność ogólna przekładni hydrostatycznej jest równa iloczynowi jej przełożenia dynamicznego i kinematycznego:

$$\eta = \frac{M_s \cdot \omega_s}{M_p \cdot \omega_p} = i_d \cdot i_k.$$

### 3. Obiekt badań

Obiektem badań realizowanych podczas ćwiczenia jest przekładnia hydrostatyczna złożona z dwóch identycznych jednostek hydraulicznych PTOZ-40R f-my PZL Wrocław. Są to maszyny waporowe wielotłoczkowe osiowe z wychylną tarczą oporową regulowaną ręcznie za pomocą pokrętki. Jedna z tych maszyn pełni funkcję pompy waporowej, a druga silnika waporowego. Widok badanej przekładni jest przedstawiony na Rysunku 1.



Rys.1 Widok badanej przekładni hydrostatycznej

System sterowania stanowiskiem pozwala na regulację prędkości obrotowej pompy wyporowej oraz regulację obciążenia silnika wyporowego. Dodatkowo poprzez ręczną regulację wydatku jednostkowego pompy lub chłonności jednostkowej silnika możliwa jest zmiana przełożenia dynamicznego oraz przełożenia kinematycznego.

Przełożenie kinematyczne jest stosunkiem prędkości wału silnika wyporowego do prędkości wału pompy wyporowej. Natomiast przełożenie dynamiczne jest odpowiednio stosunkiem momentów. Iloczyn przełożenia kinematycznego oraz dynamicznego równy jest sprawności przekładni hydrostatycznej.

Przełożenie przekładni hydrostatycznej w zależności od rodzaju wykorzystywanych jednostek hydraulicznych, jakie ją tworzą, może być stałe lub zmienne. Stałe przełożenie jest uzyskiwane poprzez stosowanie jednostek o stałej wydajności jednostkowej pompy wyporowej (objętość cieczy tłoczony na jeden obrót wału pompy wyporowej) i chłonności jednostkowej.

Jak już wspomniano przełożenie kinematyczne i dynamiczne badanej przekładni może być zmieniane poprzez ręczną regulację wydajności jednostkowej pompy i/lub chłonności jednostkowej silnika hydraulicznego. Zmiany geometrycznej objętości roboczej każdej z tych maszyn są realizowane w wyniku zmiany kąta wychylenia jej tarczy oporowej. Konstrukcja zastosowanych maszyn hydraulicznych pozwala na wychylenie tarczy oporowej tylko w jednym kierunku. Zmiana kąta wychylenia jest możliwa w zakresie od zera do wartości maksymalnej, co odpowiada minimalnej i maksymalnej geometrycznej objętości roboczej maszyny. Wał wyjściowy przekładni może się w związku z tym obracać tylko w jednym kierunku.

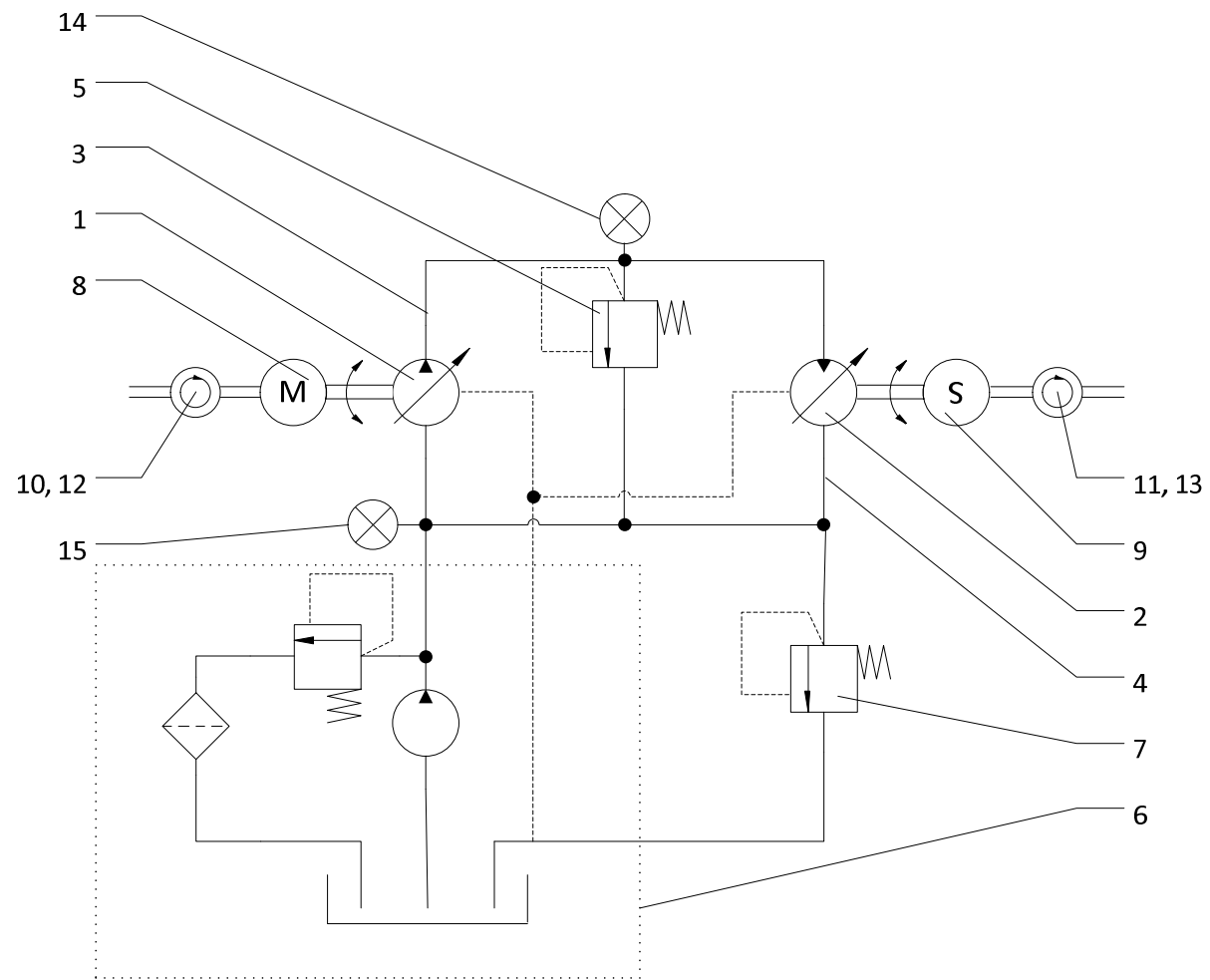
#### 4. Stanowisko badawcze

Widok ogólny stanowiska badawczego został przedstawiony na Rysunku 2. Schemat hydrauliczny przekładni hydrostatycznej wraz z układem zasilania hydraulicznego został pokazany na Rysunku 3. Elementy wchodzące w skład przekładni zostały przedstawione na tym schemacie za pomocą symboli elementów hydraulicznych. Głównymi elementami przekładni są pompa wporowa (1) oraz silnik wporowy (2). W celu zabezpieczenia układu hydraulicznego przed przeciążeniem pomiędzy magistralą wysokiego ciśnienia (3) a niskiego ciśnienia (4) został zastosowany zawór maksymalny (tzw. bezpieczeństwa) (5). Służy on do ograniczenia maksymalnej wartości ciśnienia w magistrali wysokiego ciśnienia. Otwarcie zaworu następuje w przypadku wzrostu ciśnienia w magistrali wysokiego ciśnienia do wartości przekraczającej dopuszczalną wartość maksymalną ustawioną w zaworze. Część oleju podawanego przez pompę przepływa wtedy przez zawór do magistrali niskiego ciśnienia z pominięciem silnika wporowego. Powoduje to obniżenia ciśnienia w magistrali wysokiego ciśnienia do ciśnienia nastawionego na zaworze maksymalnym.

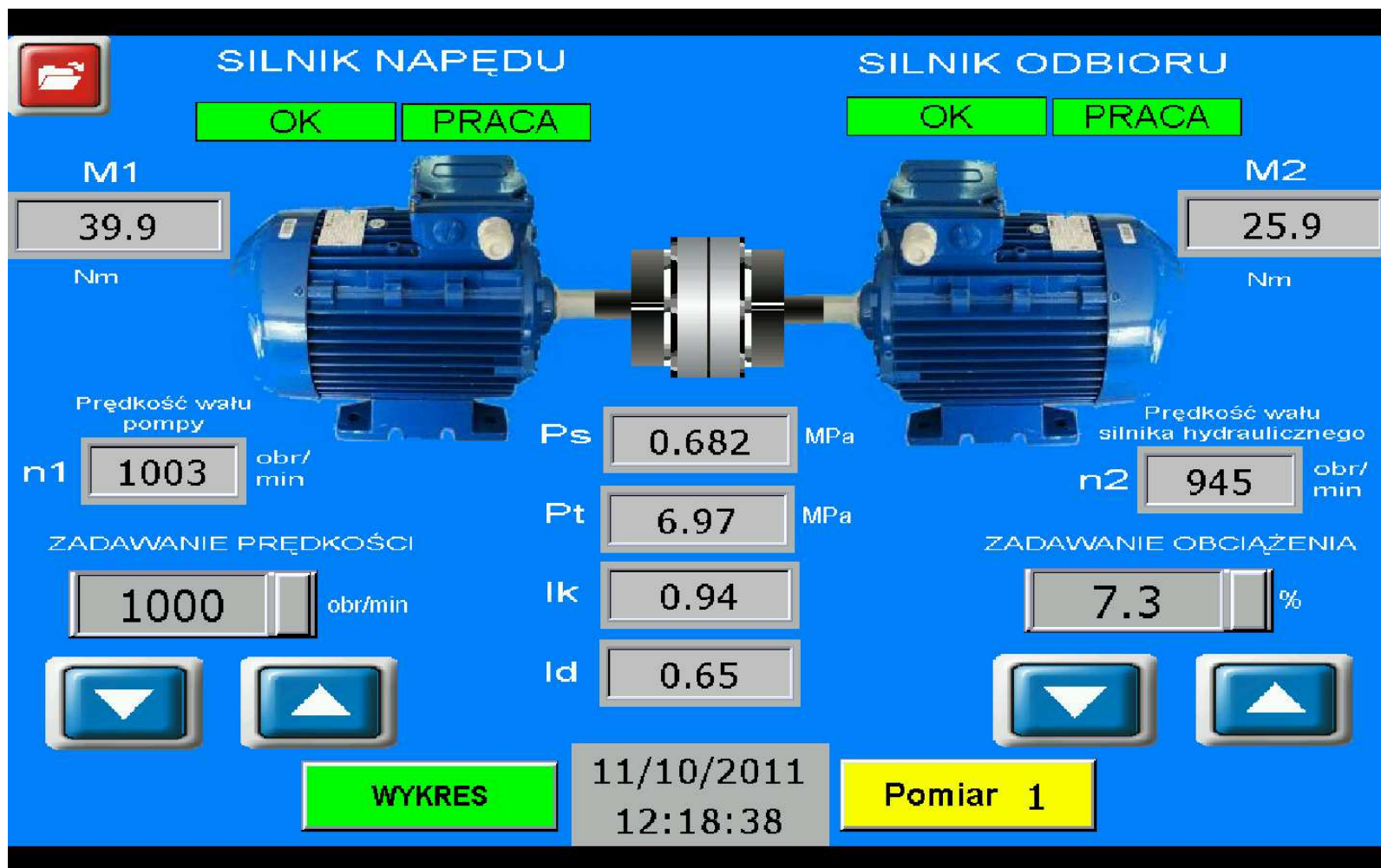


Rysunek 2. Widok ogólny stanowiska badawczego oraz przekładni hydrostatycznej

Badana przekładnia hydrostatyczna pracuje w obiegu zamkniętym. Układ taki wymaga uzupełniania oleju w układzie. Realizowane jest to poprzez wykorzystanie wspomagającego układu zasilania hydraulicznego (6). W zastosowanym układzie konieczne jest także chłodzenie czynnika roboczego. Odbywa się to poprzez wymianę oleju hydraulicznego w magistrali niskiego ciśnienia poprzez zawór przelewowy (7) oraz wspomagający układ zasilania hydraulicznego wyposażony w chłodnicę, która została zabudowana na zasilaczu hydraulicznym.



Rysunek 3. Schemat budowy stanowiska badawczego do badania przekładni hydrostatycznych (opis oznaczeń w tekście)



Rysunek 4. Widok ogólny pulpitu sterowniczego stanowiska do badań przekładni hydrostatycznych



Maszyny hydrauliczne tworzące przekładnię hydrostatyczną zostały połączone z maszynami elektrycznymi (8, 9), które odpowiednio służą do napędu pompy wyporowej lub hamowania silnika wyporowego. Zastosowane w stanowisku maszyny elektryczne są obcowzbudnymi maszynami prądu stałego. Silnik elektryczny napędzający pompę wyporową pozwala na regulację prędkości obrotowej a dzięki regulatorowi pozwala na utrzymanie prędkości obrotowej na stałym poziomie niezależnie od obciążenia przekładni. Prądnica elektryczna połączona z wałem silnika wyporowego pozwala na odwzorowywanie różnych statycznych obciążeń przekładni hydrostatycznej poprzez możliwość regulacji przyłożonego obciążenia. Dzięki takiej zabudowie możliwe jest uzyskiwanie szerokich zakresów regulacji prędkości obrotowej bądź momentu obrotowego - a więc zmiany przełożenia kinematycznego i przełożenia dynamicznego.

Stanowisko badawcze wyposażone jest także w szereg czujników wielkości mechanicznych. Do pomiaru prędkości obrotowej wykorzystywane są czujniki prędkości (10, 11) zamontowane na wałach maszyn elektrycznych podpartych obrotowo i połączonych bezpośrednio z wałami pompy wyporowej oraz silnika wyporowego. Pomiar momentu obrotowego na jednostkach hydraulicznych odbywa się w sposób pośredni poprzez pomiar momentu reakcyjnego (siły reakcji na określonym ramieniu) na obu maszynach elektrycznych (12, 13). Pomiar ciśnienia odbywa się przy wykorzystaniu czujników ciśnienia w magistrali wysokiego (14) i niskiego ciśnienia (15). Sygnały wszystkich czujników po przetworzeniu wyświetlane są na pulpicie sterującym stanowiska. Widok ogólny ekranu pulpitu sterowniczego pokazano na Rysunku 4.

## **5. Metoda pomiarów**

Jednym z celów ćwiczenia jest opracowanie charakterystyki przekładni hydrostatycznej. Charakterystyką zewnętrzną przekładni hydrostatycznej jest zależność przełożenia dynamicznego, mocy oraz momentów na wale pompy i silnika hydraulicznego, ciśnień w magistrali wysokiego ciśnienia w funkcji przełożenia kinematycznego. Dlatego w czasie wykonywania pomiaru należy dokonywać odczytu wielkości: prędkość i moment na wale pompy oraz silnika, ciśnienia w magistrali wysokiego i niskiego ciśnienia. W celu ułatwienia pomiarów na pulpicie sterującym na bieżąco są wyświetlane szacunkowe wartości przełożenia kinematycznego oraz dynamicznego. Pomiaru powyższych wielkości należy dokonywać po ustabilizowaniu warunków pracy przekładni hydrostatycznej. Nie należy dokonywać pomiarów podczas regulacji przekładni hydrostatycznej.

Wykonanie pomiarów niezbędnych do opracowania charakterystyki badanej przekładni hydrostatycznej podzielone jest na następujące części:

- Część 1 - obszar regulacji wydajności jednostkowej pompy wyporowej przy założeniu doprowadzania stałej mocy do przekładni hydrostatycznej oraz przy założeniu stałej nastawy chłonności jednostkowej silnika wyporowego. Pomiaru należy wykonywać

dla różnych nastaw wydajności jednostkowej pompy wyporowej zgodnie z zakresem regulacji podanym przez prowadzącego,

- Część 2 - obszar regulacji wydajności jednostkowej pompy wyporowej przy założeniu stałości ciśnienia w magistrali wysokiego ciśnienia (a więc symulacja pracy zaworu przelewowego) oraz przy założeniu stałej chłonności jednostkowej silnika wyporowego. Pomiary należy wykonywać dla różnych nastaw wydajności jednostkowej pompy wyporowej zgodnie z zakresem regulacji podanym przez prowadzącego,
- Część 3 - obszar regulacji chłonności jednostkowej silnika wyporowego przy założeniu doprowadzania stałej mocy do przekładni hydrostatycznej oraz przy założeniu stałego wydatku jednostkowego pompy wyporowej. Pomiary należy wykonywać dla różnych nastaw chłonności jednostkowej silnika wyporowego zgodnie z zakresem regulacji podanym przez prowadzącego,

W przypadku wykorzystywania pamięci USB<sup>1</sup> dokonywanie pomiarów odbywa się poprzez naciśnięcie przycisku „Pomiar” na ekranie panelu sterowniczego. Poprawność zapisy pomiaru potwierdzana jest poprzez zmianę numeru pomiaru. W przypadku braku pamięci USB pomiary należy wykonywać zapisując je na protokole wykonania ćwiczenia.

### **Opracowanie wyników pomiarów**

W celu opracowania charakterystyki zewnętrznej przekładni hydrostatycznej należy w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów prędkości oraz momentów na jednostkach hydraulicznych wyznaczyć wartości przełożenia kinematycznego oraz dynamicznego.

Wartość przełożenia kinematycznego wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$i_k = \frac{\omega_s}{\omega_p} = \frac{n_s}{n_p}$$

gdzie:

- $\omega_s, n_s$  – prędkość obrotowa wału silnika wyporowego,
- $\omega_p, n_p$  – prędkość obrotowa wału pompy wyporowej.

Wartość przełożenia dynamicznego wyznaczana jest na podstawie zależności:

---

<sup>1</sup> Inaczej zwane także: pendrive, USB Flash Drive, Flash Disk, Flashdrive, Finger Disk, Massive Storage Device, Flash Memory Stick Pen Drive, USB-Stick. Ze względu na oprogramowanie paneli sterowniczych możliwe jest korzystanie jedynie z pamięci USB wykorzystujących system plików FAT 32.

$$i_d = \frac{M_s}{M_p}$$

gdzie:

- $M_s$  – moment obrotowy wału silnika waporowego,
- $M_p$  – moment obrotowy wału pompy waporowej.

Wartość sprawności przekładni hydrostatycznej wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$\eta = \frac{M_s \cdot \omega_s}{M_p \cdot \omega_p} = i_d \cdot i_k$$

Następnie należy wykreślić przebieg przełożenia dynamicznego, ciśnienia w magistrali wysokiego ciśnienia, momentu i mocy na wale pompy waporowej, momentu i mocy na wale silnika waporowego oraz sprawności przekładni hydrostatycznej w funkcji przełożenia kinematycznego. Należy zwrócić uwagę na połączenie w jedną całość wszystkich obszarów regulacji pompą waporową (część pomiarów 1 i 2) jak i silnikiem waporowym (część pomiarów 3). Wyliczenia oraz wykresy należy sporządzać przy wykorzystaniu jednostek miary układu pomiarowego SI.

## 6. Zagadnienia dotyczące tematu ćwiczenia

Jednym z celów ćwiczenia (obok wyznaczenia charakterystyki przekładni hydrostatycznej) jest zapoznanie studentów z budową przekładni hydrostatycznej oraz analiza zachodzących w przekładni hydrostatycznej procesów energetycznych. Dlatego też w ramach niniejszego ćwiczenia niezbędne jest opanowanie przez studentów wiedzy z zakresu:

- budowy przekładni hydrostatycznych – a w tym w szczególności znajomości budowy i właściwości pomp waporowych i silników waporowych,
- układów połączeń hydraulicznych przekładni hydrostatycznych,
- sposobów regulacji przekładni hydrostatycznej – w szczególności obejmuje to analizę wpływu zmiany parametrów regulacji lub obciążenia jednostek hydraulicznych przekładni hydrostatycznej na właściwości użytkowe przekładni hydrostatycznej.

## Literatura

- [1] Szydelski, Z.: *Napęd i sterowanie hydrauliczne w pojazdach i samojezdnych maszynach roboczych*. WNT. 1980.

- [2] Szydelski Z.: Pojazdy samochodowe. Napęd i sterowanie hydrauliczne, WKiŁ, Warszawa 1993.
- [3] Szydelski Z.: Podstawy napędów hydraulicznych, skrypt OWPW, Warszawa 1995.
- [4] Szydelski Z., OLechowicz J.: Elementy napędu i sterowania hydraulicznego i pneumatycznego. PWN, Warszawa 1986.
- [5] Stryczek, S.: Napęd hydrostatyczny. Tom I i II. WNT. 1995.