



Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA:

Eksperymentalne wyznaczanie zastępczego modułu
sprężystości objętościowej cieczy i przewodu
oraz zastępczego współczynnika ściśliwości
cieczy i przewodu

Opracowanie: R. Cieśllicki, P. Bury, J. Wróbel, M. Stosiak, P. Osiński

1. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie na drodze eksperymentalnej zastępczego współczynnika ścisłości cieczy i przewodności β_{c+p} , oraz zastępczego modułu sprężystości objętościowej cieczy i przewodności E_{c+p} .

2. Wstęp

Nośnikiem energii w napędzie hydrostatycznym jest ciecz, nazywana także czynnikiem roboczym lub obiegowym. Jej rola polega na zmagazynowaniu energii ciśnienia wytworzonej przez pompę wyporową, a następnie przeniesieniu jej poprzez strukturę układu do elementu wykonawczego w celu jej powtórnej zamiany na energię mechaniczną. Dlatego też ciecz roboczą należy uważać za niezwykle ważny element, wywierający zasadniczy wpływ na pracę układu, a zatem na jego charakterystyki i sprawność, a także trwałość poszczególnych elementów i zespołów tworzących układ.

Własności cieczy stosowanych jako czynnik roboczy w układach hydrostatycznych powinny być następujące:

- jak najmniejsza zmienność lepkości wraz z ze zmianą temperatury,
- jak najmniejsza temperatura krzepnięcia i jak najwyższa temperatura zapłonu,
- duże ciepło właściwe, dobra przewodność i mała rozszerzalność cieplna,
- dobre własności smarne,
- jednorodność struktury i trwałość chemiczna,
- obojętność chemiczna w stosunku do metali i materiałów uszczelnień,
- mała ścisłość, a więc duży moduł sprężystości objętościowej.

W napędach hydrostatycznych stosuje się obecnie następujące rodzaje cieczy roboczych:

- oleje mineralne uzyskane z produktów destylacji ropy naftowej,
- ciecze syntetyczne,
- emulsje oleju w wodzie.

Jak dotąd, najbardziej rozpowszechnione są oleje mineralne, dlatego też ten rodzaj cieczy w postaci oleju hydraulicznego 68, jest przedmiotem rozważań w tym ćwiczeniu.

3. Ścisłość i moduł sprężystości objętościowej.

Ścisłość jest to cecha substancji określająca zmianę jej objętości pod wpływem zmian ciśnienia zewnętrznego.

Ścisłość cieczy charakteryzuje współczynnik ścisłości względnej β_c przedstawiający względną zmianę objętości cieczy przypadającą na jednostkę ciśnienia, definiowany jako:

$$\beta_c = \Delta V / V_0 \cdot 1 / \Delta p \quad /1/$$

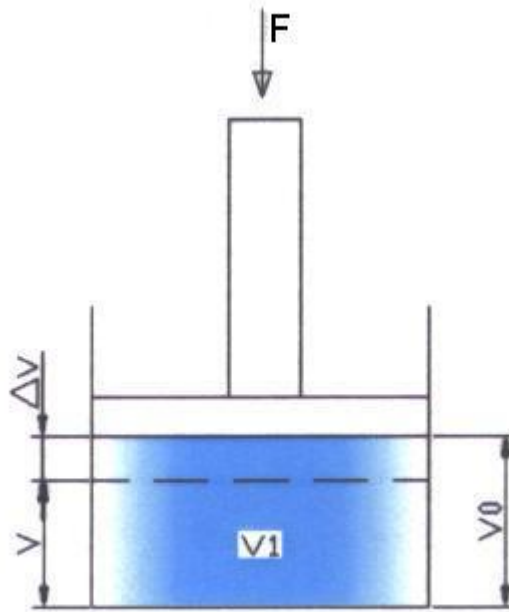
gdzie zgodnie z rys.1. będącym interpretacją graficzną podanej zależności:

β_c – współczynnik ścisłości cieczy,

V_0 – objętość początkowa cieczy w cylindrze,

Δp – przyrost ciśnienia w cieczy wywołany siłą F działającą na tłok cylindra,

ΔV – zmiana objętości cieczy w cylindrze wywołana przyrostem ciśnienia pod wpływem działającej siły F na tłok cylindra.



Rys.1. Zmiana objętości oleju w cylindrze wywołana przyrostem ciśnienia w cieczy pod wpływem działającej na tłok siły F .

Z zależności /1/ współczynnika ścisłości, wynika że jest on wielkością mianowaną, wyrażoną jednostką będącą odwrotnością ciśnienia [MPa^{-1}]. Dla większości olejów stosowanych w hydrostatycznych układach napędowych, współczynnik ścisłości przyjmuje wartości $\beta_c = (5 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-4}) \text{ 1/MPa}$.

Odwrotnością współczynnika ścisłości jest moduł sprężystości objętościowej cieczy wyrażony w jednostce ciśnienia.

$$E_c = 1 / \beta_c \quad [\text{MPa}] \quad /2/$$

$$E_c = \Delta p \cdot V_0 / \Delta V \quad /3/$$

gdzie

E_c – moduł sprężystości objętościowej cieczy,

V_0 – objętość początkowa cieczy w cylindrze,

Δp – przyrost ciśnienia w cieczy wywołany siłą F działającą na tłok cylindra,

ΔV – zmiana objętości cieczy w cylindrze, wywołana przyrostem ciśnienia pod wpływem działającej siły F na tłok cylindra.

Dla większości olejów stosowanych w hydrostatycznych układach napędowych wartość modułu sprężystości objętościowej zawarta jest w zakresie $E_c = (1,25 \cdot 10^3 \div 2,0 \cdot 10^3) \text{ MPa}$. Wartości mniejsze przyjmuje się zwykle dla olejów o mniejszym ciężarze właściwym. Dla wody i emulsji wodnych można przyjmować $E_c = 2 \cdot 10^3 \text{ MPa}$.

Zwiększone oddziaływanie ścisłości cieczy na układ możliwe jest poprzez sprężyste odkształcenia ścianek przewodów oraz zawarty gaz w cieczy.

Ścisłość cieczy jest niewielka i zależy głównie od ilości rozpuszczonego w niej gazu. W oleju hydraulicznym, w warunkach normalnych (tj. temp. 20°C, ciśnienie 1 atmosfery) jest około 10-12% rozpuszczonego gazu. Obecność gazu w obwodzie hydraulicznym wpływa niekorzystnie powodując dodatkowo uwydatnienie takich zjawisk jak:

- zjawisko kawitacji,
- zmniejszenie dokładności pozycjonowania,
- zmniejszenie sztywności i sprawności układu,
- obniżenie częstości drgań własnych przez co układ staje się „gąbczasty”.

Ilość gazu, jaka w danych warunkach rozpuści się w cieczy określa prawo Henry'ego, które mówi, że przy stałej temperaturze ilość gazu rozpuszczonego w cieczy jest prawie wprost proporcjonalna do ciśnienia parcjalego (cząstkowego) tego gazu wokół cieczy zgodnie z zależnością:

$$V_g = \alpha_v \cdot V_c \cdot p \quad /4/$$

gdzie:

V_g – objętość rozpuszczonego gazu, odniesiona do ciśnienia atmosferycznego i temperatury 0°C,

V_c - objętość cieczy,

p - ciśnienie cieczy w MPa,

α_v – współczynnik Bunsena.

Uwzględnienie podatności układu na odkształcenia sprężyste, a w szczególności bardziej wrażliwych na to zjawisko przewodów elastycznych, pod wpływem przyrostu ciśnienia, prowadzi w konsekwencji do konieczności wyznaczania zastępczego współczynnika ścisłości oraz zastępczego modułu sprężystości objętościowej.

Zastępczy współczynnik ścisłości cieczy i przewodu przedstawia zatem względną zmianę objętości cieczy i przewodu $\Delta V/V_0$, które ulegają sprężystemu odkształceniu, na jednostkę przyrostu ciśnienia Δp , zgodnie z zależnością:

$$\beta_{c+p} = \Delta V/V_0 \cdot 1/\Delta p \quad /5/$$

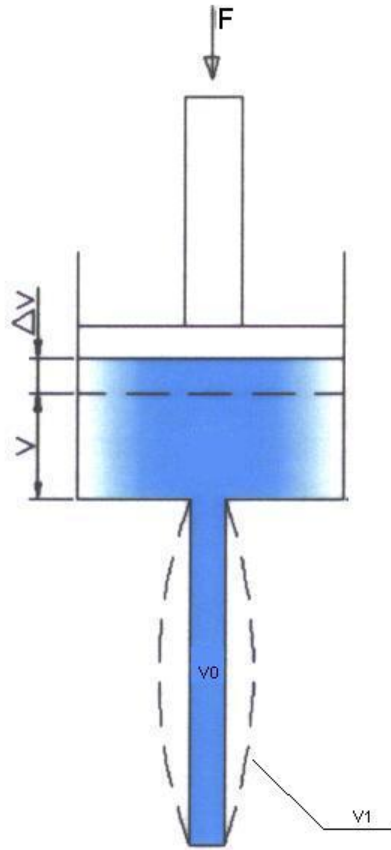
gdzie zgodnie z rys.2. będącym interpretacją graficzną podanej zależności:

β_{c+p} – zastępczy współczynnik ścisłości cieczy i przewodu,

V_0 – objętość początkowa cieczy w przewodzie elastycznym,

Δp – przyrost ciśnienia w cieczy wywołany siłą F działającą na tłok cylindra,

ΔV – zmiana objętości cieczy w przewodzie elastycznym wywołana przyrostem ciśnienia pod wpływem działającej siły F .



Rys.2. Zmiana objętości cieczy w przewodzie wywołana przyrostem ciśnienia w układzie pod wpływem działającej na tłok siły F .

Zastępczy moduł sprężystości objętościowej określa odporność cieczy i przewodu na zmianę objętości pod wpływem przyrostu ciśnienia. W konsekwencji jest to stosunek przyrostu ciśnienia Δp do względnej zmiany objętości cieczy i przewodu $\Delta V/V_0$ zgodnie z zależnością:

$$E_{c+p} = \Delta p \cdot V_0 / \Delta V \quad /6/$$

gdzie zgodnie z rys.2 będącym interpretacją graficzną podanej zależności:

E_{c+p} – zastępczy moduł sprężystości objętościowej cieczy i przewodu,
 V_0 – objętość początkowa cieczy w przewodzie elastycznym,
 Δp – przyrost ciśnienia w cieczy wywołany siłą F działającą na tłok cylindra,
 ΔV – zmiana objętości cieczy w przewodzie elastycznym, wywołana przemieszczeniem tłoka pod wpływem działającej siły F .

4. Podatność układu na odkształcenia pod wpływem ciśnienia.

W wykonywanych zazwyczaj obliczeniach statycznych układów napędowych nie ma potrzeby uwzględniania ściśliwości czynnika roboczego, można wówczas przyjąć, że ciecz jest nieściśliwa. Nie można jednak ściśliwości pomijać przy analizie zjawisk dynamicznych występujących w układzie, jak też w przypadkach, w których ciśnienia robocze występujące w układzie osiągają wysokie wartości $300 \div 500$ MPa. Nie można więc w takim przypadku pominąć przepływu wywołanego ściśliwością czynnika roboczego i odkształceniami elementów, w różnym stopniu rozbudowanego układu hydraulicznego.

$$Q = K_c \cdot dp/dt \quad /6/$$

gdzie:

K_c - współczynnik określający sprężystość cieczy roboczej i elementów układu hydraulicznego nazywany kapacytancją.

Kapacytancja układu będąca miarą jego podatności na odkształcenia sprężyste, jest sumą kapacytancji cieczy roboczej **Kol** i kapacytancji elementów podatnych układu **Kel**. Suma tych współczynników tworzy tzw. kapacytancję zredukowaną układu **Kzred**.

$$K_{zred.} = K_{ol} + K_{el} \quad /7/$$

Ze względu na wartości ciśnień występujących w układach napędowych, jako elementy podatne należy uwzględniać tylko przewody elastyczne, natomiast przewody stalowe traktować jako elementy nieodkształcalne. Wartość współczynnika kapacytancji cieczy znajdującej się w elementach nieodkształcalnych K_{ol} wyznaczyć można z zależności:

$$K_{ol} = V_{ol}/E_c \quad /8/$$

gdzie:

V_{ol} - objętość początkowa cieczy znajdująca się w elementach nieodkształcalnych,
 E_c - moduł sprężystości objętościowej cieczy roboczej.

Kapacytancja przewodów elastycznych definiowana jest analogicznie jak dla cieczy:

$$K_{ol} = V_{op}/E_{p+c} \quad /9/$$

gdzie:

V_{op} – objętość początkowa cieczy w przewodach elastycznych
 E_{p+c} – zastępczy moduł sprężystości objętościowej przewodów elastycznych
i zawartej w nich cieczy roboczej.

5. Zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie na drodze eksperymentalnej zastępczego współczynnika ścisłości cieczy i przewodu β_{c+p} , oraz zastępczego modułu sprężystości objętościowej cieczy i przewodu E_{c+p} . Zakres ćwiczenia obejmuje wyznaczenie zależności:

- przyrostu objętości przewodu od ciśnienia tłoczenia $\Delta V = f(P_t)$,
- zastępczego modułu sprężystości objętościowej cieczy i przewodu elastycznego od ciśnienia tłoczenia $E_{c+p} = f(p_t)$,
- zastępczego współczynnika ścisłości cieczy i przewodu elastycznego od ciśnienia tłoczenia $\beta_{c+p} = f(P_t)$,

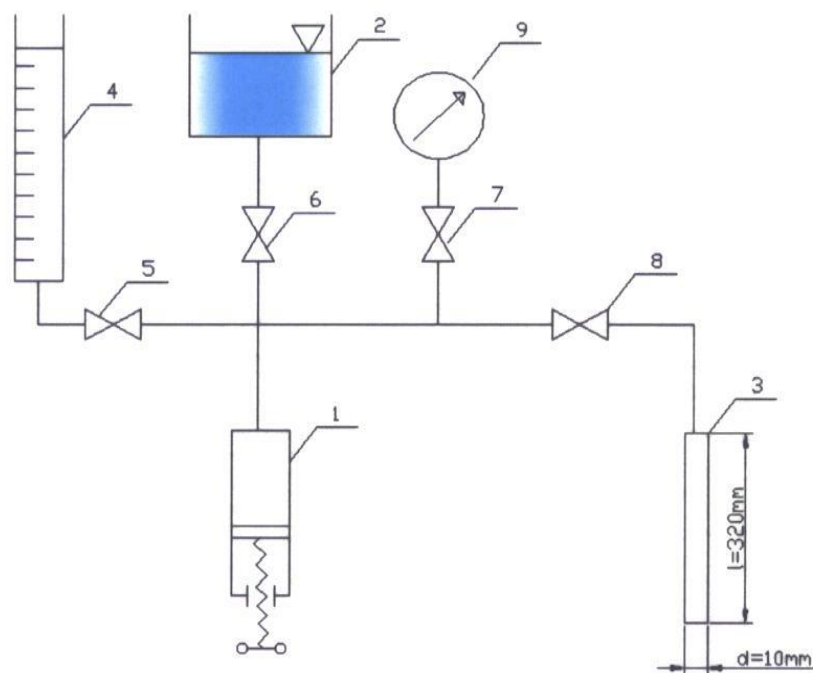
przy zachowaniu stałej temperatury cieczy podczas prowadzenia pomiarów i dokładnym odpowietrzeniu układu pomiarowego.

6. Schemat układu pomiarowego i sposób przeprowadzenia ćwiczenia.

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys.3. Na stanowisku zamontowany jest badany przewód elastyczny 3. o wymiarach geometrycznych $l = 320$ mm (długość przewodu), $d = 10$ mm (nominalna średnica wewnętrzna przewodu), $V_0 = 25$ cm³. Pompa z napędem ręcznym 1 zapewnia możliwość podania do układu wymaganej ilości czynnika roboczego i uzyskania tą drogą wymaganego ciśnienia tłoczenia p_t , odczytywanego na manometrze 9. Przyjęty na stanowisku pomiarowym system zaworów odcinających 5,6,7,8 zapewnia realizację następujących funkcji w trakcie prowadzenia pomiarów:

- napełnienie komory roboczej pompy z napędem ręcznym (otwarty zawór 6 pozostałe zawory 5,7,8 zamknięte),
- podanie czynnika roboczego do układu, zapewniającego uzyskanie wymaganego ciśnienia tłoczenia p_t , w układzie oraz w badanym przewodzie elastycznym (zamknięte zawory 5 i 6 otwarte zawory 7 i 8),
- wyzerowanie ciśnienia tłoczenia p_t panującego w układzie (zamknięte zawory 6,7,8 otwarty zawór 5),
- pomiar przyrostu objętości cieczy ΔV w badanym przewodzie elastycznym 3 pod wpływem zadanego ciśnienia tłoczenia p_t (zamknięty zawór 6,7; otwarte zawory 5,8).

Pomiar przyrostu objętości przewodu elastycznego wraz z cieczą roboczą ΔV dokonuje się drogą odczytu poziomu cieczy w menzurce pomiarowej przy wyzerowanym ciśnieniu w układzie pomiarowym oraz po otwarciu zaworu odcinającego 8. Przyrost objętości ΔV , jest wyznaczany jako różnica tych poziomów cieczy w menzurce. Odczyt przyrostu objętości przewodu wraz z cieczą roboczą, umożliwia naniesiona na ścianie menzurki podziałka (1 działka = 0,1 cm³). Dla założonego zakresu pracy przewodu i procesu pomiarowego należy przewidzieć 12 do 14 punktów pomiarowych, a więc ciśnień tłoczenia.



Rys.3.Schemat stanowiska pomiarowego.

7. Opracowanie wyników pomiarów

Tabela 1

Lp	pt	Δp	Lp	Lk	ΔL	ΔV	Vo	$\Delta V/Vo$	β_{c+p}	E_{c+p}
	MPa	Mpa	[dz]	[dz]	[dz]	cm ³	cm ³		1/Mpa	Mpa

Wyniki pomiarów należy wpisać do tabeli pomiarowej nr1. Potrzebne do obliczeń dane są następujące:

- objętość początkowa przewodu $V_o = 25 \text{ cm}^3$,
- przyrost objętości cieczy w przewodzie $\Delta V = \Delta L \cdot 0,1 \text{ cm}^3$,
- poziom początkowy cieczy w menzurce Lp po wyzerowaniu układu,
- poziom końcowy cieczy w menzurce po otwarciu zaworu odcinającego 8.

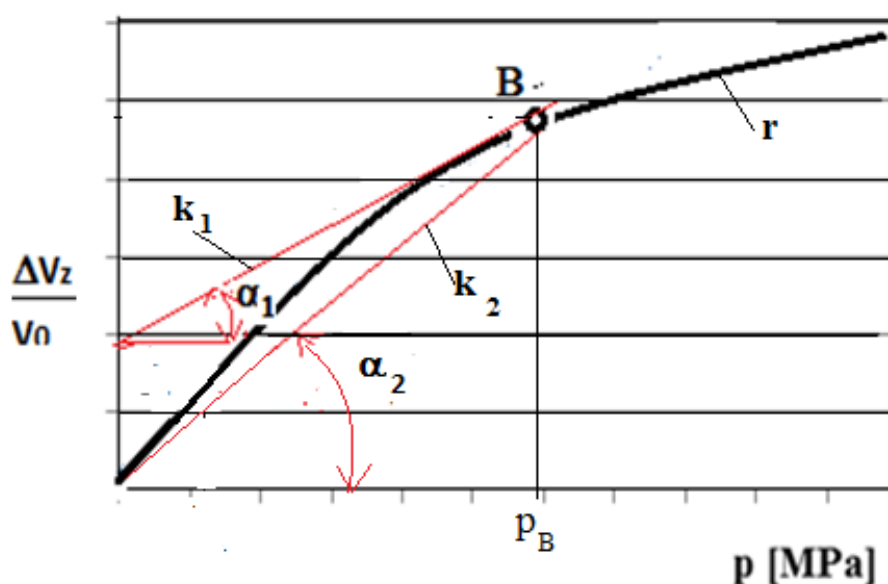
Otrzymane wyniki należy przedstawić graficznie w postaci wykresów:

$$\Delta V/V_o = f(p_t) ; \beta_{c+p} = f(p_t) ; E_{c+p} = f(p_t).$$

Sprawozdanie należy zakończyć interpretacją wyników obejmującą min. Wyjaśnienie ewentualnych rozbieżności pomiędzy wartościami rzeczywistymi / pochodzącymi z pomiarów/ a wartościami teoretycznymi.

Wiadomości uzupełniające

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów uzyskuje się charakterystykę odkształceń objętościowych przewodu hydraulicznego w postaci zależności względnych zmian objętości $\frac{\Delta V_z}{V_0}$ od ciśnienia p pokazaną w sposób poglądowy na rysunku 4. Jest to zależność nieliniowa. Dla uzyskania stałej wartości zastępczego modułu sprężystości objętościowej przewodu hydraulicznego w określonym zakresie ciśnień lub dla pewnej wartości ciśnienia przeprowadza się linearyzację charakterystyki odkształceń względnych za pomocą siecznej lub stycznej.



Rys.4 Charakterystyka odkształceń objętościowych przewodu hydraulicznego $\frac{\Delta V_z}{V_0} = f(p)$,

r – krzywa doświadczalna, k_1 , k_2 – linearyzacja odpowiednio w punkcie B i w zakresie $0 - p_B$.

Zastępczy moduł sprężystości objętościowej izotermicznej (przy stałej temperaturze) przedstawia zależność:

$$E_{zTi} = \text{ctg } \alpha_i$$

gdzie: $i = 1$ moduł styczny, $i = 2$ moduł sieczny

W normalnych obliczeniach operuje się wartościami stycznymi, natomiast zawsze gdy trzeba uwzględnić w obliczeniach zmiany objętości, stosuje się wartości sieczne