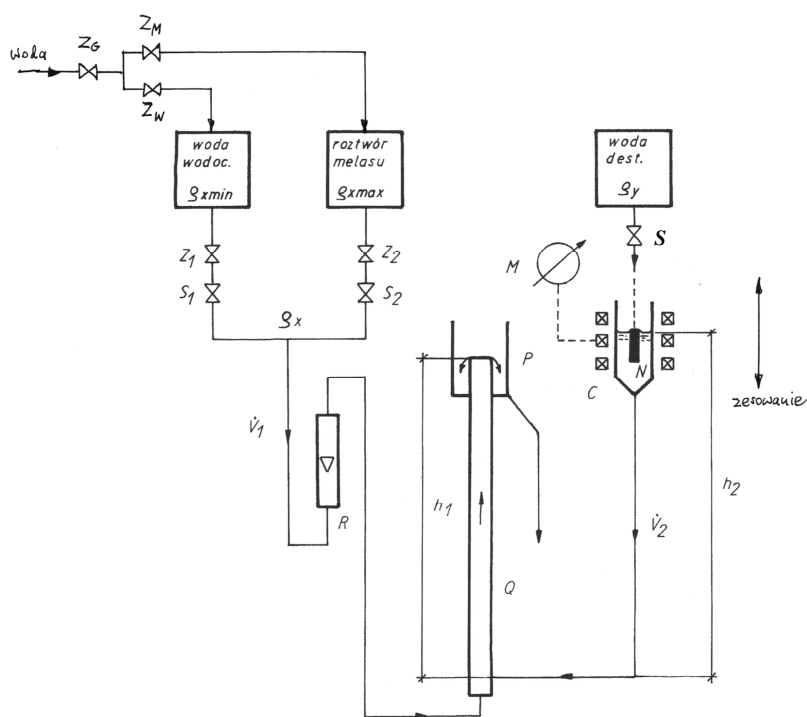


# 1. PRZEPIYWOWY GĘSTOŚCIOMIERZ HYDROSTATYCZNY DO POMIARU STĘŻENIA ROZTWORÓW

**Cel zadania:** *Poznanie ciągłego pomiaru gęstości cieczy fizyczną metodą hydrostatyczną. Kalibrowanie gęstościomierza i określenie jego właściwości dynamicznych. Poznanie działania transformatorowego czujnika przesunięcia liniowego.*

## 1.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYRZĄDU

Gęstościomierz (rys. 1.1) składa się z pionowej rury pomiarowej  $Q$ , zakończonej w górnej części przelewem  $P$ , umożliwiającym utrzymanie stałej wysokości słupa cieczy  $h_1$  (patrz [1], rozdz. 12.3.3). Ciecz o mierzonej gęstości  $\rho_x$  dopływa do rury pomiarowej z jednego ze zbiorników przez układ zaworów i rotametr  $R$  mierzący natężenie przepływu  $\dot{V}_1$ . Do dolnego końca rury pomiarowej jest również podłączony wylot przewodu, przez który przepływa z natężeniem  $\dot{V}_2$  ciecz o stałej gęstości  $\rho_y$ . Żeby uniknąć błędu pomiaru spowodowanego rozcieńczaniem cieczy o gęstości  $\rho_x$  cieczą o gęstości  $\rho_y$ , natężenie przepływu  $\dot{V}_2$  jest wielokrotnie mniejsze od  $\dot{V}_1$ .



Rys. 1.1. Schemat gęstościomierza

Ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy o mierzonej gęstości  $\rho_x$  jest równoważone przez ciśnienie słupa cieczy o gęstości  $\rho_y$  zgodnie z równaniem:

$$h_1 \cdot \rho_x \cdot g = h_2 \cdot \rho_y \cdot g \quad (1.1)$$

gdzie  $g$  jest przyspieszeniem ziemskim.

Ponieważ gęstość  $\rho_y$  ma wartość stałą i wysokość słupa cieczy  $h_1$  jest również stała, wysokość słupa cieczy  $h_2$  jest liniową funkcją mierzonej gęstości  $\rho_x$ .

Zmianę wysokości słupa cieczy  $\Delta h_2$ , powstającą w wyniku zmiany gęstości o  $\Delta \rho_x$  określa w warunkach statycznych zależność:

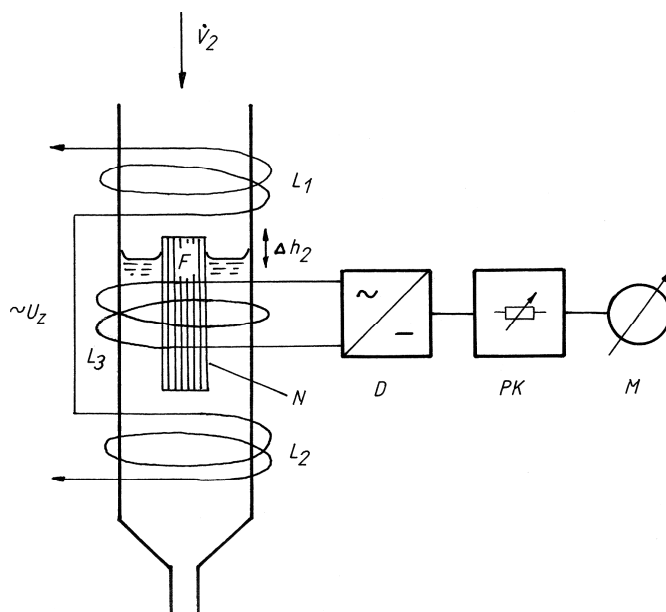
$$\Delta h_2 = \frac{h_1}{\rho_y} \cdot \Delta \rho_x = K \cdot \Delta \rho_x \quad (1.2)$$

Z równania (1.2) wynika, że w celu osiągnięcia dużej dokładności pomiaru (dużej wartości stałej  $K$  – wzmocnienia gęstościomierza) należy stosować możliwie dużą wysokość słupa cieczy  $h_1$ . Ponieważ gęstość cieczy jest funkcją temperatury, przy bardzo dokładnych pomiarach jest również konieczne uzyskanie jednakowych temperatur cieczy o porównywanych gęstościach, co może być zrealizowane np. przez umieszczenie rurki z cieczą o gęstości  $\rho_y$  wewnątrz rury pomiarowej z cieczą o gęstości  $\rho_x$ .

Zmiany poziomu cieczy  $\Delta h_2$  powodują przesuwanie się pływaka  $N$  zanurzonego w tej cieczy. Z kolei przesunięcie pływaka jest przetwarzane na analogowy sygnał elektryczny w transformatorowym czujniku przesunięcia liniowego  $C$  i wskazywane przez miernik  $M$ .

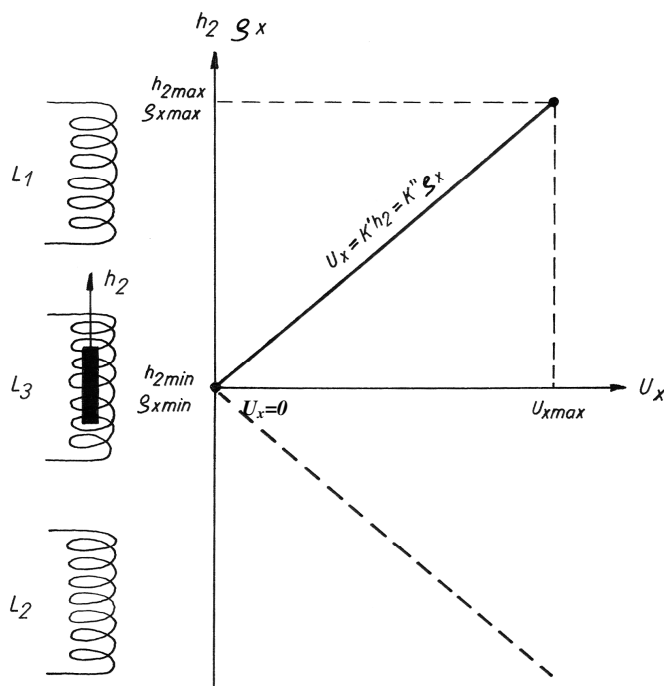
Działanie czujnika przesunięcia (transformatora różnicowego), wyjaśnia rysunek 1.2 (patrz też [1], rozdz. 10.1.6.B). Pływak  $N$  zawiera wewnątrz rdzeń ferromagnetyczny  $F$ . Rdzeń ten znajduje się w obszarze oddziaływania strumieni magnetycznych z uzwojeń pierwotnych  $L_1$  i  $L_2$  transformatora różnicowego. Uzwojenia są zasilane napięciem przemiennym  $U_z$  i połączone w ten sposób, że w połowie odległości między nimi przeciwnie skierowane strumienie magnetyczne kompensują się. Jeżeli więc rdzeń pływaka znajduje się w połowie odległości między uzwojeniami  $L_1$  i  $L_2$ , to w uzwojeniu wtórnym  $L_3$  nie będzie się wzbudzało napięcie. Wystarczy jednak, by pływak przesunął się nieco w górę lub w dół, żeby została naruszona równowaga układu. Uzwojenie  $L_3$  sprzęgnie się silniej z uzwojeniem  $L_1$  lub  $L_2$  i wzbudzi się w nim napięcie proporcjonalne do przesunięcia rdzenia pływaka. Napięcie to jest

prostowane w detektorze  $D$  i poprzez nastawiany ręcznie dzielnik (potencjometr) kalibrowania przyrządu  $PK$  doprowadzane do miernika (wskaźnika) magnetoelektrycznego  $M$ .



Rys. 1.2. Transformatorowy czujnik przesunięcia liniowego

Charakterystykę statyczną transformatorowego czujnika przesunięcia liniowego i zarazem charakterystykę statyczną gęstościomierza przedstawia rysunek 1.3.



Rys. 1.3. Charakterystyka statyczna transformatorowego czujnika przesunięcia liniowego

Wykres charakterystyki pokazuje zależność napięcia  $U_x$  wskazywanego przez miernik gęstościomierza, od położenia  $h_2$  pływaka w czujniku transformatorowym (gęstości cieczy  $\rho_x$ ). Zerowa wartość napięcia  $U_x$  odpowiada symetrycznemu położeniu pływaka między uzwojeniami  $L_1$  i  $L_2$ .

Ponieważ charakterystyka czujnika jest liniowa, wystarczy określić tylko jej dwa punkty: minimalny poziom  $h_{2\min}$  ( $U_x = 0$ ), któremu odpowiada minimalna wartość mierzonej gęstości  $\rho_{x\min}$  oraz maksymalny poziom  $h_{2\max}$  ( $U_x = U_{x\max}$ ), któremu odpowiada maksymalna wartość mierzonej gęstości  $\rho_{x\max}$ . Ze wzrostem gęstości napięcie wyjściowe czujnika powinno rosnąć, korzystamy więc tylko z górnej części charakterystyki (linia ciągła na wykresie).

Wyznaczając charakterystykę statyczną gęstościomierza przez określenie jej początkowego i końcowego punktu, używamy dwóch roztworów o znanych gęstościach. W ten sposób dokonujemy **kalibrowania** przyrządu metodą wychyłową (patrz [1], rozdz. 3.2). Należy zwrócić uwagę na fakt, że drugi punkt charakterystyki nie musi być wyznaczony przy  $\rho_{x\max}$  lecz przy jakiegokolwiek znanej wartości  $\rho_x$  większej od  $\rho_{x\min}$ . Dokładność kalibrowania będzie jednak wtedy mniejsza, ze względu na mniejszą odległość między punktami.

## 1.2. PRZYGOTOWANIE ROZTWORU MELASOWEGO

Należy sporządzić  $15 \text{ dm}^3$  roztworu melasowego o zawartości suchej substancji 1% ( $Bx = 1$ ), któremu to stężeniu odpowiada gęstość  $\rho_x = 1004 \text{ kg/m}^3$  w temperaturze  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ . W tym celu trzeba najpierw przygotować roztwór o zawartości  $20 \pm 0,5\%$  suchej substancji ( $Bx = 20 \pm 0,5$ ), kontrolując jego stężenie refraktometrem. Około 250 g (do kreski w zlewce) melasu rozcieńczyć powoli **wodą wodociągową**, aż do uzyskania wymaganego stężenia – zacząć od dolania ok.  $700 \text{ cm}^3$  wody). Stężenie mierzyć refraktometrem optycznym (na stanowisku pomiarowym), a po uzyskaniu wskazań  $Bx = 20 \pm 0,5$  sprawdzić zawartość suchej substancji w sporządzonym roztworze automatycznym refraktometrem cyfrowym (u laboranta).

Następnie stężony roztwór rozcieńczyć wodą 20-krotnie w stosunku wagowym, wlewając  $700 \text{ cm}^3$  tego roztworu (0,75 kg) przez lejek do butli z napisem „melas”, do której poprzednio wiano  $14,25 \text{ dm}^3$  (do kreski) wody wodociągowej. Otrzymany roztwór wymieszać sprężonym powietrzem z elektrycznej dmuchawy, nie zdejmując butli z półki.

### 1.3. ZEROWANIE GĘSTOŚCIOMIERZA

Zerowanie gęstościomierza polega na znalezieniu położenia dolnego punktu wykresu charakterystyki statycznej przyrządu (rys. 1.3), podczas przepuszczania przez rurę pomiarową cieczy o minimalnej mierzonej gęstości  $\rho_{x\min}$ . Cieczą tą będzie w tym przypadku woda wodociągowa o gęstości  $1000 \text{ kg/m}^3$  w temperaturze  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Cieczą o gęstości  $\rho_y$  (porównawczą), będzie podczas wszystkich doświadczeń woda destylowana o gęstości wynoszącej w temperaturze  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  również  $1000 \text{ kg/m}^3$ . W tych warunkach, w czasie zerowania gęstościomierza,  $\rho_x \approx \rho_y$  i poziomy cieczy  $h_1$  oraz  $h_2$  będą jednakowe.

Sprawdzić napełnienie butli wodą do kreski oznaczającej poziom maksymalny. W razie potrzeby dolać wody, otwierając zawór główny  $Z_G$  i zawór  $Z_W$ . Nie wolno dopuścić do przepełnienia butli, które zostanie zasygnalizowane przez automatyczny układ zabezpieczający! **W przypadku włączenia się dzwonka alarmowego, natychmiast zamknąć zawór dopływu wody  $Z_W$ !**

Włączyć zasilanie czujnika transformatorowego wyłącznikiem  $W_s$ . Powinna zaświecić się lampka sygnalizacyjna. Pokrętko kalibrowania przyrządu ( $PK$ ) przekręcić do oporu w prawo, czyli nastawić maksymalne nachylenie charakterystyki statycznej (wzmocnienie) gęstościomierza. Otwierając zawór napływowy  $Z_1$  (zawór  $Z_2$  zamknięty), doprowadzić do rury pomiarowej gęstościomierza wodę z butli z napisem „woda”.

Obserwując wskazania rotometru (górną płaszczyzna nurnika!), ustalić ściskaczem śrubowym  $S_1$  natężenie przepływu  $\dot{V}_1 = 20 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$ . Okresowo należy kontrolować wielkość przepływu  $\dot{V}_1$  i zapas wody w butli, uzupełniając go w razie potrzeby z instalacji wodociągowej (zawór  $Z_W$ ). Nie wolno dopuścić do całkowitego opróżnienia się butli, jak również do jej przepełnienia! **W przypadku włączenia się dzwonka alarmowego, natychmiast zamknąć zawór dopływu wody  $Z_W$ !**

Uruchomić ściskaczem  $S$  dopływ wody destylowanej  $\dot{V}_2$  do czujnika poziomu cieczy  $C$ . Woda powinna kapać w ilości **1 – 2 krople na sekundę**. Okresowo należy kontrolować również ten przepływ wody destylowanej. Jeśli w butli z wodą destylowaną jest jej mniej niż 25% napełnienia, poprosić laboranta!

Po odczekaniu około 5 minut na ustalenie się warunków pracy przyrządu, należy przesuwając **bardzo wolno** cały czujnik transformatorowy w górę lub w dół nakrętką podtrzymującą, znaleźć takie jego położenie, przy którym wskazówka miernika gęstości osiągnie minimalne wychylenie na działce  $1000 \pm 0,1 \text{ kg/m}^3$  ( $U_x = 0$  wg rys. 1.3). Gęstościomierz został wyzerowany i **do końca wykonywania zadania czujnik nie może być już przesuwany!** Przepływ wody  $\dot{V}_1$  należy zamknąć zaworem  $Z_1$ , nie poruszając ściskacza śrubowego  $S_1$ .

#### 1.4. NASTAWIENIE WZMOCNIENIA GĘSTOŚCIOMIERZA

Nastawienie wzmocnienia gęstościomierza polega na ustaleniu położenia drugiego punktu wykresu charakterystyki statycznej przyrządu, podczas przepuszczania przez gęstościomierz cieczy o określonej, maksymalnej gęstości  $\rho_{x\max}$ . Cieczą tą będzie przygotowany wcześniej (punkt 1.2) roztwór melasowy o znanej pozornej zawartości suchej substancji (Bx), zmierzonej za pomocą refraktometru. Gęstość takiego roztworu może być odczytana z odpowiednich tabel; unikamy w ten sposób jej oddzielnego wyznaczenia.

Przez gęstościomierz przepuszczać roztwór melasowy o gęstości  $1004 \text{ kg/m}^3$  z butli z wydajnością  $\dot{V}_1 = 20 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz.}$ , otwierając zawór  $Z_2$  i nastawiając przepływ ściskaczem śrubowym  $S_2$ . Sprawdzić kapanie wody destylowanej! Po wypełnieniu się rury pomiarowej gęstościomierza roztworem melasowym, **ustawiać pokrętle kalibrowania PK** wskazówkę miernika gęstości na działkę  $1004 \text{ kg/m}^3$  aż do momentu, kiedy wskazania będą prawie stałe ( $\pm 0,1 \text{ kg/m}^3$ ) przez co najmniej dwie minuty. Po przeprowadzeniu kalibrowania, **pokrętła PK nie wolno już poruszać do końca wykonywania zadania!**

Ponieważ kalibrowanie gęstościomierza nie zmienia położenia poprzednio ustalonego zerowego punktu charakterystyki statycznej, lecz tylko jej nachylenie (wzmocnienie statyczne  $K$  przetwornika gęstości), przyrząd mamy wyskalowany w dwóch punktach:  $\rho_{x\min} = 1000 \text{ kg/m}^3$  i  $\rho_{x\max} = 1004 \text{ kg/m}^3$ . Przy założeniu liniowości charakterystyki pomiarowej gęstościomierza (równanie 1.2), przyrząd jest gotowy do ciągłych pomiarów gęstości  $\rho_x$  w zakresie od 1000 do  $1004 \text{ kg/m}^3$ .

Po wykalibrowaniu gęstościomierza, dopływ roztworu melasowego należy zamknąć zaworem  $Z_2$ , nie poruszając ściskacza śrubowego  $S_2$ . **Przy braku przepływu roztworu przez rurę pomiarową przyrządu, wskazówka miernika może zejść z działki  $1004 \text{ kg/m}^3$ !**

## 1.5. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE GĘSTOŚCIOMIERZA

Gęstościomierz hydrostatyczny jest członem inercyjnym wyższego rzędu z opóźnieniem i w celu określenia jego właściwości dynamicznych, należy zbadać odpowiedź wskazań przyrządu na skokowe wymuszenie zmiany na jego wejściu (charakterystykę dynamiczną skokową). Z wykresu tej charakterystyki będzie można określić podstawowe parametry dynamiczne gęstościomierza – zastępczą stałą czasową  $T_z$  oraz zastępczy czas opóźnienia  $\tau_o$ . Doświadczenie będzie polegało na wprowadzeniu skokowej zmiany gęstości cieczy dopływającej do przyrządu i obserwowaniu, jak przebiegają w funkcji czasu zmiany wskazań miernika gęstości. Wymuszenia skokowe będą wykonywane w dwóch kierunkach (wzrost i spadek gęstości) oraz przy trzech wartościach przepływu  $\dot{V}_1$ .

Sprawdzić i w razie potrzeby uzupełnić zapas wody w butli. Sprawdzić kapanie wody destylowanej. Ponownie otworzyć zawór  $Z_2$ . Poczekać, aż wskazania miernika gęstości ustalą się w pobliżu  $1004 \text{ kg/m}^3$  ( $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$ ). Niewielkie odchylenia od tej wartości nie są istotne dla dalszych pomiarów dynamicznych, a wynikają ze zmian temperatury wody i badanego roztworu, znacznie wpływających na gęstość. Można wykonać doświadczenie z podgrzewaniem rury  $Q$ , chwytając ją dłonią poniżej połowy wysokości na kilkanaście sekund. Gęstość wskazywana przez miernik powinna wyraźnie zmaleć!

Po ustaleniu się wskazań miernika w pobliżu  $1004 \text{ kg/m}^3$  ( $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$ ) należy przygotować sekundomierz, tabele na wyniki pomiarów i podzielić czynności między wykonujących zadanie: jedna z osób pilnuje natężenia przepływu  $\dot{V}_1$  i przełącza zawory, pozostałe określają zależność wskazań miernika gęstości od czasu.

Na umówiony sygnał – początek mierzenia czasu – należy szybko zamknąć zaworem  $Z_2$  dopływ roztworu melasowego do gęstościomierza i otworzyć zaworem  $Z_1$  dopływ wody z butli, natychmiast korygując ściskaczem  $S_1$  natężenie przepływu  $\dot{V}_1$  do wartości  $20 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$ . Od tego momentu notować zmniejszające się wskazania miernika gęstości co 10 sekund z dokładnością  $0,1 \text{ kg/m}^3$ . Pierwszego odczytu dokonać w czasie  $\tau = 0$ . Gdy wskazania miernika ustalą się w pobliżu  $1000 \text{ kg/m}^3$  ( $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$ ), notować je jeszcze przez minutę.

Przygotować kolejną tabelę. Na umówiony sygnał, mierząc czas od nowa, szybko zamknąć zaworem  $Z_1$  dopływ roztworu wody z butli i otworzyć zaworem  $Z_2$  dopływ roztworu melasowego, natychmiast ustalając ściskaczem  $S_2$  natężenie przepływu  $\dot{V}_1 = 20 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$ . Znow co 10 sekund notować rosnące wskazania miernika gęstości z dokładnością  $0,1 \text{ kg/m}^3$ ,

aż do ich ustalenia się przez minutę w pobliżu  $1004 \text{ kg/m}^3 \pm 0,2 \text{ kg/m}^3$ . Pierwszego odczytu gęstości dokonać w czasie  $\tau = 0$ .

Powtórzyć powyższe czynności, wypierając roztwór melasowy wodą, a następnie wodę roztworem melasowym przy  $\dot{V}_1 = 15 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$ .

Wykonać ostatnią serię pomiarów, wypierając roztwór melasowy wodą, a następnie wodę roztworem melasowym przy  $\dot{V}_1 = 25 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$ .

## 1.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Zamknąć ściskaczem  $S$  dopływ wody destylowanej do czujnika poziomu cieczy. Wypuścić resztę roztworu melasowego z butli, otwierając na maksimum zawór  $Z_2$  i ściskacz  $S_2$ . Zawór  $Z_1$  ma być zamknięty. Przepłukać dwukrotnie butlę „melas” wodą otwierając zawory  $Z_G$  i  $Z_M$  i potem  $Z_2$  i  $S_2$ . Na koniec napełnić butlę „melas” wodą do kreski. Zamknąć zawór  $Z_2$ . Sprawdzić zamknięcie zaworów wodnych  $Z_M$ ,  $Z_W$  i  $Z_G$ , służących do napełniania butli. Wyłączyć wyłącznikiem  $W_S$  zasilanie elektryczne czujnika poziomu cieczy. Umyć refraktometr i sprzęt szklany.

## 1.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

Sporządzić na **poziomym** arkuszu papieru o formacie A-4 (najlepiej ręcznie, na papierze milimetrowym), **we wspólnym układzie współrzędnych**, wykresy charakterystyk dynamicznych gęstościomierza  $\rho_x = f(\tau)$  dla wypierania wody roztworem melasowym, przy trzech badanych wartościach natężenia przepływu  $\dot{V}_1 = 15, 20$  i  $25 \text{ dm}^3/\text{godz}$ . Wyznaczyć sposobem graficznym zastępcze stałe czasowe  $T_z$  i zastępcze czasy opóźnienia  $\tau_{oz}$  (patrz [1], rozdział 16.3.2, rys. 16.20 i dodatkowa instrukcja teoretyczna do laboratorium nr 3).

Podobnie sporządzić na **wspólnym rysunku** o formacie A-4 wykresy  $\rho_x = f(\tau)$  dla wypierania roztworu melasowego wodą, również przy trzech badanych wartościach  $\dot{V}_1$ . Wyznaczyć sposobem graficznym wartości  $T_z$  i  $\tau_{oz}$ .

Wszystkie wyznaczone wartości  $T_z$  i  $\tau_{oz}$  (6 par) zebrać z tabelce z podaniem kierunku zmiany roztworów i wartości przepływu  $\dot{V}_1$ .



Korzystając z wzoru (1.2) obliczyć zmianę wysokości słupa wody  $\Delta h_2$  (w mm), odpowiadającą zmianie gęstości cieczy  $\rho_x$  od 1000 do 1004 kg/m<sup>3</sup>. Przyjąć  $h_1 = 140$  cm.

## 1.8. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty schemat całego układu gęstościomierza z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- wykresy charakterystyk dynamicznych gęstościomierza  $\rho_x = f(\tau)$  (dwa arkusze po 3 wykresy dla trzech badanych przepływów cieczy) z graficznym wyznaczeniem  $\tau_{oz}$  i  $T_z$ ,
- zestawienie wszystkich wyznaczonych wartości  $\tau_{oz}$  i  $T_z$  (tabelka),
- obliczenie zmiany wysokości słupa wody  $\Delta h_2$  odpowiadającej zmianie gęstości cieczy  $\rho_x$  od 1000 do 1004 kg/m<sup>3</sup>,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyznaczonych wartości  $\tau_{oz}$  i  $T_z$ .

## 1.9. LITERATURA

Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów „Pomiary i automatyka” na Wydziale Biotechnologii i Nauk o Żywności, dodatkowe cztery instrukcje teoretyczne do laboratorium oraz książki:

- [1] Ludwicki M.: **Sterowanie procesami w przemyśle spożywczym, PTTŻ, Łódź 2002.**
- [2] Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, W-wa 1978.
- [3] Żelazny M.: Podstawy automatyki, PWN, W-wa 1976.

Opracował: dr inż. Marek Ludwicki, Politechnika Łódzka, I-30

<http://snack.p.lodz.pl/ludwicki>  
[marek.ludwicki@p.lodz.pl](mailto:marek.ludwicki@p.lodz.pl)

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana, czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie w jakikolwiek sposób, bądź elektroniczny, bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych nośników informacji, bez zgody autora.