

SPIS TREŚCI.

UKŁADY I SYSTEMY POMIAROWE

1. UKŁADY POMIAROWE
2. SYSTEMY POMIAROWO-REGULACYJNE
 - 2.1. ANALOGOWY SYSTEM ELEKTRYCZNY
 - 2.2. ANALOGOWY SYSTEM PNEUMATYCZNY
 - 2.3. SYSTEMY DYSKRETNE
3. UKŁADY SYGNALIZACYJNE
4. LITERATURA

STEROWANIE I REGULACJA AUTOMATYCZNA

1. STEROWANIE RĘCZNE W UKŁADZIE ZAMKNIĘTYM
2. REGULACJA AUTOMATYCZNA
3. LITERATURA

DOŚWIADCZALNE OKREŚLANIE WŁAŚCIWOŚCI UKŁADÓW POMIAROWYCH I REGULACYJNYCH

1. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE - WZMOCNIENIE STATYCZNE
2. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE - ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE
 - 2.1. METODY WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ CZŁONÓW INERCYJNYCH I RZĘDU
 - 2.1.1. SPOSOBEM GRAFICZNYM
 - 2.1.2. Z NACHYLENIA CHARAKTERYSTYKI SKOKOWEJ W DANYM PUNKCIE
 - 2.1.3. Z WARTOŚCI CHARAKTERYSTYKI SKOKOWEJ W PUNKCIE $\tau = T$
3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE UKŁADÓW ZŁOŻONYCH
4. LITERATURA

Zadania :

1. PRZEPŁYWOWY GĘSTOŚCIOMIERZ HYDROSTATYCZNY DO POMIARU STĘŻENIA ROZTWORÓW
 - 1.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYRZĄDU
 - 1.2. ZEROWANIE GĘSTOŚCIOMIERZA
 - 1.3. KALIBROWANIE GĘSTOŚCIOMIERZA
 - 1.4. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE GĘSTOŚCIOMIERZA
 - 1.5. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
 - 1.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
 - 1.7. SPRAWOZDANIE
 - 1.8. LITERATURA
2. KONDUKTOMETR PRZEPŁYWOWY JAKO OBIEKT WSPOMAGANEGO KOMPUTEROWO BADANIA STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI CZŁONÓW INERCYJNYCH
 - 2.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYRZĄDU



- 2.2. PRZYGOTOWANIE ROZTWORÓW
- 2.3. NASTAWIANIE CZUŁOŚCI KONDUKTOMETRU
- 2.4. KALIBROWANIE KONDUKTOMETRU
- 2.5. BADANIE DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI OBIEKTÓW INERCYJNYCH
 - 2.5.1. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO I RZĘDU
 - 2.5.2. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO II RZĘDU
- 2.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 2.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 2.7.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA KONDUKTOMETRU
 - 2.7.2. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO I RZĘDU
 - 2.7.3. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO II RZĘDU
- 2.8. SPRAWOZDANIE
- 2.9. LITERATURA

3. PNEUMATYCZNY PRZETWORNIK SIŁY - WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE

- 3.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYRZĄDU
- 3.2. URUCHOMIENIE UKŁADU POMIAROWEGO
- 3.3. BADANIE PRZETWORNIKA SIŁY
 - 3.3.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA
 - 3.3.2. DODATKOWE UJEMNE SPRĘŻENIE ZWROTNE
 - 3.3.3. WPŁYW CIŚNIENIA POWIETRZA ZASILAJĄCEGO
- 3.4. BADANIE PRZETWORNIKA CIŚNIENIA
 - 3.4.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA
 - 3.4.2. DODATKOWE UJEMNE SPRĘŻENIE ZWROTNE
 - 3.4.3. PRZESUNIĘCIE CHARAKTERYSTYKI STATYCZNEJ
- 3.5. KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH PRZETWORNIKA
 - 3.5.1. INERCYJNE UJEMNE SPRĘŻENIE ZWROTNE
 - 3.5.2. INERCYJNE DODATNE SPRĘŻENIE ZWROTNE
- 3.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 3.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 3.7.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA PRZETWORNIKA SIŁY
 - 3.7.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA PRZETWORNIKA CIŚNIENIA
 - 3.7.3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE PRZETWORNIKA
- 3.8. SPRAWOZDANIE
- 3.9. LITERATURA

4. WZMACNIACZ I REGULATOR ELEKTRONICZNY

- 4.1. UKŁAD POMIAROWY
- 4.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TRANZYSTORA
- 4.3. TRANZYSTOROWY WZMACNIACZ PRZEKAŹNIKOWY
 - 4.3.1. FOTOELEKTRYCZNY PRZETWORNIK PRZESUNIĘCIA
 - 4.3.2. KONDUKTOMETRYCZNY PRZETWORNIK POZIOMU CIECZY



- 4.3.3. TRANSFORMATOROWY PRZETWORNIK PRZESUNIĘCIA
- 4.4. ELEKTRONICZNA STABILIZACJA PRĄDU I NAPIĘCIA
 - 4.4.1. REZYSTOR W OBWODZIE PRĄDU STAŁEGO
 - 4.4.2. DZIAŁANIE STABILIZATORA
 - 4.4.3. TRANZYSTOR JAKO STABILIZATOR PRĄDU
- 4.5. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE INERCYJNEGO CZWÓRNIKA RC
- 4.6. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE ELEKTRONICZNEGO REGULATORA IMPULSOWEGO
- 4.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 4.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 4.8.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TRANZYSTORA
 - 4.8.2. ELEKTRONICZNA STABILIZACJA NAPIĘCIA I PRĄDU
 - 4.8.3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE INERCYJNEGO CZWÓRNIKA RC
 - 4.8.4. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE ELEKTRONICZNEGO REGULATORA IMPULSOWEGO RE-5
- 4.9. SPRAWOZDANIE
- 4.10. LITERATURA

5. TYRYSTOROWY ŁĄCZNIK I STEROWNIK MOCY JAKO URZĄDZENIA WYKONAWCZE AUTOMATYKI

- 5.1. UKŁAD POMIAROWY
- 5.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TYRYSTORA
 - 5.2.1. CHARAKTERYSTYKA BRAMKOWO - ANODOWA TYRYSTORA
 - 5.2.2. WZMOCNIENIE TYRYSTORA
- 5.3. TYRYSTOR JAKO ŁĄCZNIK PRĄDU PRZEMIENNEGO
- 5.4. DWUPOŁOŻENIOWY REGULATOR TEMPERATURY
 - 5.4.1. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE UKŁADU REGULACJI DWUPOŁOŻENIOWEJ
 - 5.4.2. WPŁYW DODATKOWEGO OPORU CIEPLNEGO
- 5.5. PÓŁOKRESOWY STEROWNIK MOCY
 - 5.5.1. STEROWANIE OŚWIECENIEM
- 5.6. STEROWANIE PRĘDKOŚCIĄ OBROTOWĄ SILNIKA
- 5.7. POMIARY PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA
- 5.8. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 5.9. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 5.9.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TYRYSTORA
 - 5.9.2. WZMOCNIENIE TYRYSTORA
 - 5.9.3. SPRAWNOŚĆ TYRYSTORA
 - 5.9.4. POMIARY PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA
- 5.10. SPRAWOZDANIE
- 5.11. LITERATURA

6. PNEUMATYCZNY REGULATOR PID - WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE

- 6.1. UKŁAD POMIAROWY
- 6.2. BUDOWA I DZIAŁANIE REGULATORA
- 6.3. RĘCZNE STEROWANIE URZĄDZENIEM WYKONAWCZYM
- 6.4. PRZEŁĄCZANIE UKŁADU NA AUTOMATYCZNY RODZAJ PRACY



- 6.5. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE REGULATORA PROPORCJONALNEGO (P)
 - 6.5.1. PRACA ODWROTNA, $X_P = 100\%$
 - 6.5.2. PRACA NORMALNA, $X_P = 100\%$
 - 6.5.3. PRACA NORMALNA, $X_P = 200\%$
 - 6.5.4. PRACA NORMALNA, $X_P = 50\%$
 - 6.5.5. PRZESUWANIE PUNKTU PRACY
- 6.6. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE REGULATORA PID
 - 6.6.1. REGULATOR PROPORCJONALNO-CĄKUJĄCY (PI)
 - 6.6.2. REGULATOR PROPORCJONALNO-RÓŻNICZKUJĄCY (PD)
 - 6.6.3. REGULATOR PID
- 6.7. WPŁYW CIŚNIENIA POWIETRZA ZASILAJĄCEGO
- 6.8. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 6.9. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 6.9.1. RĘCZNE STEROWANIE URZĄDZENIEM WYKONAWCZYM
 - 6.9.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA REGULATORA P
 - 6.9.3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE REGULATORA PID
 - 6.9.4. WPŁYW CIŚNIENIA POWIETRZA ZASILAJĄCEGO
- 6.10. SPRAWOZDANIE
- 6.11. LITERATURA

7. ELEKTRONICZNY REGULATOR PID DO REGULACJI POZIOMU CIECZY W ZBIORNIKU

- 7.1. UKŁAD REGULACJI
- 7.2. BUDOWA I DZIAŁANIE ELEKTRONICZNEGO REGULATORA PID
- 7.3. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE UKŁADU
 - 7.3.1. CHARAKTERYSTYKA STEROWANIA ZAWOREM REGULACYJNYM
 - 7.3.2. CHARAKTERYSTYKA DWUPOŁOŻENIOWEGO CZUJNIKA POZIOMU WODY
 - 7.3.3. CHARAKTERYSTYKA CIĄGŁEGO CZUJNIKA POZIOMU WODY
- 7.4. RĘCZNE STEROWANIE POZIOMEM WODY W ZBIORNIKU
- 7.5. DWUPOŁOŻENIOWA REGULACJA POZIOMU WODY
- 7.6. CIĄGŁA REGULACJA POZIOMU WODY
 - 7.6.1. OKREŚLENIE KRYTYCZNEGO WZMOCNIENIA REGULATORA
 - 7.6.2. OBLICZENIE NASTAW REGULATORA PID
- 7.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 7.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 7.8.1. RĘCZNE STEROWANIE POZIOMEM WODY W ZBIORNIKU
 - 7.8.2. CHARAKTERYSTYKA DWUPOŁOŻENIOWEGO CZUJNIKA POZIOMU WODY
 - 7.8.3. RĘCZNE STEROWANIE POZIOMEM WODY W ZBIORNIKU
 - 7.8.4. DWUPOŁOŻENIOWA REGULACJA POZIOMU WODY
 - 7.8.5. CIĄGŁA REGULACJA POZIOMU WODY
- 7.9. SPRAWOZDANIE
- 7.10. LITERATURA

8. AUTOMATYCZNA, MIKROPROCESOROWA REGULACJA pH W REAKTORZE PRZEPŁYWOWYM

- 8.1. UKŁAD REGULACJI



- 8.2. PRZYGOTOWANIE ODCZYNNIKÓW
- 8.3. URUCHOMIENIE UKŁADU REGULACJI
- 8.4. ODPOWIEDŹ OBIEKTU REGULACJI NA WYMUSZENIE SKOKOWE
- 8.5. REGULACJA PROPORCJONALNA
 - 8.5.1. REGULATOR Z MAŁYM WZMOCNIENIEM (XP=200%)
 - 8.5.2. REGULATOR Z DUŻYM WZMOCNIENIEM (XP=50%)
- 8.6. REGULACJA PROPORCJONALNO – CAŁKUJĄCA
- 8.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 8.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 8.8.1. ODPOWIEDŹ OBIEKTU NA WYMUSZENIA SKOKOWE
 - 8.8.2. AUTOMATYCZNA REGULACJA pH
- 8.9. SPRAWOZDANIE
- 8.10. LITERATURA

9. POMIARY PRZEPŁYWU CIECZY W RUROCIĄGU

- 9.1. UKŁAD POMIAROWY
- 9.2. URUCHOMIENIE OBIEGU CIECZY
- 9.3. POMIARY PRZEPŁYWU PRZEPŁYWOMIERZEM SKRZYDEŁKOWYM
- 9.4. POMIARY PRZEPŁYWU ZWĘŻKĄ
 - 9.4.1. ZWĘŻKA Z MANOMETREM CIECZOWYM
 - 9.4.2. ZWĘŻKA Z PRZETWORNIKIEM MAGNETOELEKTRYCZNYM
 - 9.4.3. BADANIE CHARAKTERYSTYK PRZETWORNIKÓW RÓŻNICY CIŚNIEŃ
- 9.5. POMIARY PRZEPŁYWU PRZEPŁYWOMIERZAMI INDUKCYJNYM I CIEPLNYM
- 9.6. BADANIE CHARAKTERYSTYKI POMPY WIROWEJ ODŚRODKOWEJ
 - 9.6.1. MAKSYMALNE CIŚNIENIE TŁOCZENIA POMPY
 - 9.6.2. WYDAJNOŚĆ POMPY
 - 9.6.3. MOC POBIERANA PRZEZ SILNIK POMPY
- 9.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 9.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
 - 9.8.1. POMIARY PRZEPŁYWOMIERZEM SKRZYDEŁKOWYM
 - 9.8.2. POMIARY PRZEPŁYWU ZWĘŻKĄ
 - 9.8.3. POMIARY PRZEPŁYWOMIERZAMI INDUKCYJNYM I CIEPLNYM
 - 9.8.4. CIŚNIENIE TŁOCZENIA POMPY
 - 9.8.5. WYDAJNOŚĆ POMPY
 - 9.8.6. MOC POBIERANA PRZEZ SILNIK POMPY
 - 9.8.7. SPRAWNOŚĆ POMPY
 - 9.8.8. WYKORZYSTANIE CHARAKTERYSTYKI POMPY
- 9.9. SPRAWOZDANIE
- 9.10. LITERATURA

10. ELEKTROCHEMICZNY ANALIZATOR SKŁADU ROZTWORU

- 10.1. DZIAŁANIE ANALIZATORA SKROPLIN Z WYPARKI CUKROWNICZEJ
- 10.2. BUDOWA ANALIZATORA
- 10.3. URUCHOMIENIE ANALIZATORA
- 10.4. PRZYGOTOWANIE ROZTWORÓW
- 10.5. BADANIA LABORATORYJNE ANALIZATORA



- 10.5.1. SPRAWNOŚĆ ODPĘDZANIA WĘGLANU AMONOWEGO
- 10.5.2. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ZWIĄZKÓW AMONOWYCH
- 10.5.3. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ROZTWORU SACHAROZY
- 10.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA
- 10.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ
- 10.7.1. SPRAWNOŚĆ ODPĘDZANIA WĘGLANU AMONOWEGO
- 10.7.2. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ZWIĄZKÓW AMONOWYCH
- 10.7.3. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ROZTWORU SACHAROZY
- 10.7.4. SPRAWOZDANIE
- 10.8. LITERATURA



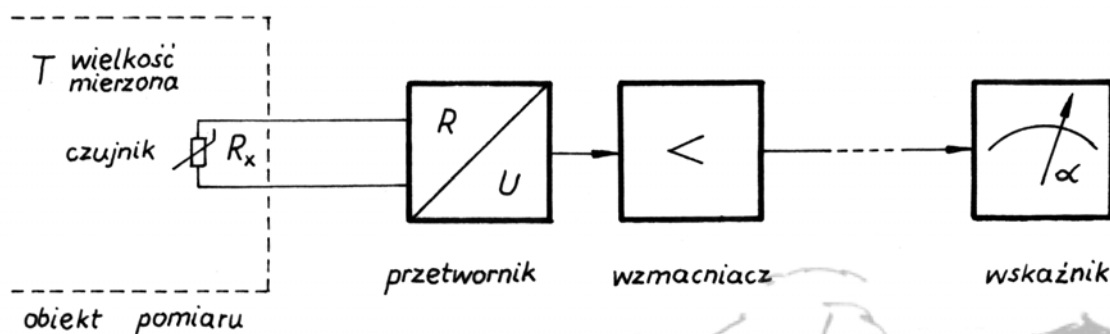
UKŁADY I SYSTEMY POMIAROWE

1. UKŁADY POMIAROWE

Układ pomiarowy składa się z kilku członów połączonych szeregowo. Podstawową rolę w procesie pomiaru pełni **czujnik**. Jest to układ fizyczny, fizykochemiczny lub biologiczny, którego wybrana właściwość y jest z wielkością mierzoną x ściśle związaną znaną i powtarzalną zależnością $y = f(x)$. Właściwość y powinna nadawać się do dalszego przetworzenia na użyteczny sygnał pomiarowy, a funkcja f powinna być w miarę możliwości funkcją liniową.

Czujnik pomiarowy jest pierwotnym przetwornikiem, przetwarzającym mierzoną wielkość na wielkość inną, nadającą się do bezpośredniego określenia (pomiaru bezpośredniego) lub wymagającą przetworzenia w **przetworniku** wtórnym na jeszcze inną wielkość (pomiar pośredni). Wtórnego przetwarzania sygnału wymagają wszystkie czujniki parametryczne, jednakże i większość czujników generacyjnych musi być uzupełniana układami wzmacniającymi ich sygnał wyjściowy lub (i) przetwarzającymi go, np. na sygnał o znormalizowanej wartości (standardowy). Z tego względu praktycznie wszystkie czujniki pomiarowe stosowane w pomiarach zdalnych i automatycznych są łączone z wtórnym układem przetwarzającym i **wskaźnikiem** w **zespół pomiarowy**, nazywany najczęściej układem pomiarowym. Układ pomiarowy umieszczony we wspólnej obudowie (ewent. z wydzielonym czujnikiem) nazywa się **przyrządem pomiarowym**.

Przykład zespołu pomiarowego do mierzenia temperatury w suszarni parametrycznym czujnikiem rezystancyjnym przedstawia rysunek 1.1.



Rys. 1.1 Zespół pomiarowy do mierzenia temperatury w suszarni



Czujnik (termorezystor) jest umieszczony w komorze suszarni (obiekcie pomiaru) w temperaturze T . Jego rezystancja R_x ustala się zgodnie z charakterystyką pomiarową $R = f(T)$. Wartość tej rezystancji jest pierwotnym sygnałem pomiarowym, przetwarzanym następnie w przetworniku pomiarowym na napięcie elektryczne U - wtórny sygnał pomiarowy. Po wzmocnieniu we wzmacniaczu sygnał ten może być już przesyłany na pewną odległość i może uruchamiać miernik (wskaźnik) wyjściowy. Wychylenie wskazówki miernika α będzie funkcją temperatury T w komorze suszarni.

Zespół pomiarowy może być bardziej rozbudowany w przypadku konieczności zmiany rodzaju sygnału wtórnego (np. z elektrycznego na pneumatyczny lub odwrotnie), zmiany postaci tego sygnału (np. modulacji lub demodulacji, przetwarzania analogowo-cyfrowego lub cyfrowo-analogowego), czy dokonania operacji matematycznej.

2. SYSTEMY POMIAROWO-REGULACYJNE

Układy (zespoły) pomiarowe składają się z członów, między którymi są przekazywane różnego rodzaju sygnały. **Sygnałem pomiarowym** nazywamy w tym przypadku pewną wielkość fizyczną, będącą funkcją czasu i stanowiącą nośnik informacji o wielkości mierzonej. Sygnał z zakodowaną informacją może być przesyłany na pewne odległości i wykorzystywany do uruchamiania dodatkowego wskaźnika wielkości mierzonej (przy pomiarach zdalnych) lub (i) układu automatycznej regulacji.

Konieczność równoczesnego pomiaru dużej liczby wielkości fizycznych występujących we współczesnych technologiach, szybkiego przetwarzania informacji, dokonywania analizy i badania korelacji sygnałów, uproszczenia obsługi rozbudowanych układów pomiarowych, a często konieczność wstecznego oddziaływania na badany proces (automatyzacja), stanowiły przesłanki rozwoju tzw. systemów pomiarowo-regulacyjnych. **Systemem pomiarowo-regulacyjnym** nazywa się zestaw spełniających założone funkcje i mogących ze sobą współpracować przyrządów pomiarowych i urządzeń pomocniczych, przeznaczonych do zbierania, porównywania, rejestracji i przetwarzania informacji o mierzonych wielkościach fizycznych.

W zależności od rodzaju energii wykorzystanej w sygnałach pomiarowych jako nośnik informacji oraz od charakteru tych sygnałów, powstają różne blokowe systemy pomiarowo-regulacyjne: zestawy czujników, przetworników pomiarowych, wzmacniaczy, elementów matematycznych, zadajników, regulatorów, siłowników, wskaźników, rejestratorów itp. Stosowanie sygnałów znormalizowanych umożliwia dowolne łączenie

poszczególnych członów systemu w często bardzo skomplikowane układy pomiarowo-regulacyjne. Współpracę urządzeń z różnych systemów umożliwiają przetworniki międzysystemowe.

W systemach analogowych przetwarzanie sygnałów nie zmienia ich ciągłego charakteru, a wynik pomiaru przedstawia się w postaci odczytywanych lub rejestrowanych (najczęściej w funkcji czasu) sygnałów analogowych. W systemach cyfrowych występuje dyskretyzacja sygnału analogowego (przetwarzanie analogowo-cyfrowe), a wynik pomiaru przedstawia się w postaci cyfrowej.

Obecnie największą popularność zyskały trzy systemy pomiarowo-regulacyjne: analogowy system elektryczny, analogowy system pneumatyczny i cyfrowy system elektryczny. W małym stopniu są wykorzystywane sygnały mechaniczne w postaci przesunięcia lub siły, przesyłane na niewielkie odległości cięgnami i dźwigniami. W urządzeniach wymagających rozwijania znacznych mocy (dźwigi, maszyny budowlane itp.) stosuje się sygnały hydrauliczne w postaci ciśnienia cieczy. Przyszłościowym kierunkiem jest wykorzystanie modulowanych, dyskretnych sygnałów optycznych - bardzo pojemnego i odpornego na zakłócenia nośnika informacji, przesyłanego na znaczne odległości za pomocy światłowodów.

2.1. ANALOGOWY SYSTEM ELEKTRYCZNY

Analogowy system elektryczny wykorzystuje sygnał w postaci napięcia lub natężenia stałego prądu elektrycznego. Sygnał taki może być z łatwością przesyłany na znaczne odległości, wzmacniany, modulowany, przekształcany matematycznie. Linia przesyłowa jest tania. Stosowanie nowoczesnych, scalonych elementów półprzewodnikowych pozwala na osiągnięcie dużej dokładności i niezawodności funkcjonowania członów systemu. Wadami systemu elektrycznego są: trudności w przesyłaniu sygnałów znacznej mocy, wrażliwość na zakłócenia i możliwość iskrzenia, stanowiąca w pewnych warunkach zagrożenie wybuchowe. Najnowsze rozwiązania systemów elektrycznych są zabezpieczone przed wystąpieniem iskrzenia.

Znormalizowane, standardowe sygnały prądowe i napięciowe analogowego systemu elektrycznego mają następujące zakresy:

0... 5 mA	0... 5 V,
0...20 mA	0...10 V,
4...20 mA	1... 5 V.



Na uwagę zasługuje zalecany i najczęściej obecnie stosowany sygnał prądowy **4...20 mA**, w którym istnieje możliwość odróżnienia stanu awarii urządzenia pomiarowego lub linii przesyłowej sygnału pomiarowego od dolnej granicy zakresu zmian tego sygnału.

2.2. ANALOGOWY SYSTEM PNEUMATYCZNY

System pneumatyczny wykorzystuje sygnał w postaci ciśnienia powietrza. Sygnał taki jest bardzo odporny na zakłócenia, może przenosić znaczne moce, nie stanowi żadnego zagrożenia wybuchowego.

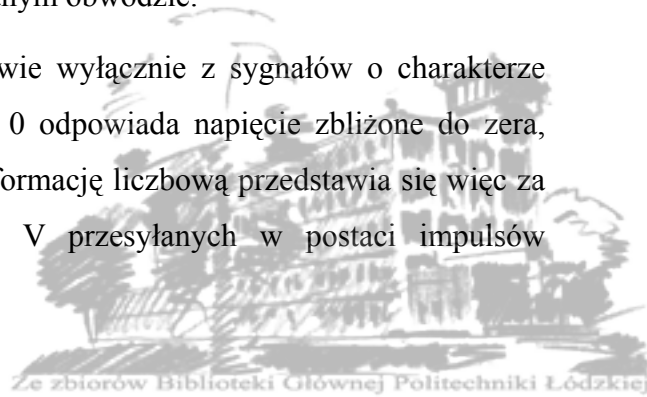
Wzmacnianie i przekształcanie sygnału pneumatycznego wymaga jednak stosowania dość skomplikowanych urządzeń, a przesyłanie sygnału na większe odległości jest bardziej złożone niż w przypadku sygnału elektrycznego. Znormalizowany, standardowy sygnał pneumatyczny ma zakres zmian ciśnienia powietrza od **20 do 100 kPa**. Przesunięcie początku zakresu umożliwia łatwą identyfikację awarii urządzenia lub linii przesyłowej.

2.3. SYSTEMY DYSKRETNE

Sygnały analogowe, wykorzystywane w analogowych metodach pomiarowych i analogowych systemach pomiarowo-regulacyjnych, mają istotną wadę: są mniej lub bardziej podatne na różnego rodzaju zakłócenia, które się na nie nakładają w sposób zupełnie przypadkowy, są też podatne na wpływy ciągłych, choć często powolnych zmian parametrów elementów wchodzących w skład zespołu pomiarowego, np. starzenie się, zmiany warunków zasilania itp.

Nowoczesna technika pomiarowo-regulacyjna stosuje inny rodzaj sygnałów - sygnały dyskretne. Sygnały te mają charakter nieciągły, składają się z zespołu impulsów (najczęściej elektrycznych) odpowiedniego kształtu i amplitudy, a treść zawartej w nich informacji jest określona przez częstotliwość impulsów, ich wzajemną odległość w czasie lub też obecność albo nieobecność napięcia w danym obwodzie.

W technice cyfrowej korzysta się prawie wyłącznie z sygnałów o charakterze elektrycznym. Przyjęto na przykład, że bitowi 0 odpowiada napięcie zbliżone do zera, natomiast bitowi 1 napięcie ok. +5 V. Każdą informację liczbową przedstawia się więc za pomocą kombinacji napięć ok. 0 i ok. +5 V przesyłanych w postaci impulsów



elektrycznych bądź linią wieloprzewodową (1 przewód na każdy bit + 1 przewód sygnału synchronizującego) w systemie transmisji równoległej (np. połączenie komputera PC z drukarką łączem zwanym dawniej Centronix), bądź też linią dwuprzewodową, po dodatkowym kodowaniu informacji w czasie (np. łączy szeregowo portu myszy w PC typu **RS-232**, USB, czy ich przemysłowa wersja **RS-485**).

Podstawowymi zaletami stosowania dyskretnych sygnałów cyfrowych są: bardzo znaczne ograniczenie wpływu zakłóceń oraz wielka szybkość przekazywania informacji, pozwalająca na wykorzystanie tych sygnałów m.in. w cyfrowej technice obliczeniowej z użyciem komputerów.

3. UKŁADY SYGNALIZACYJNE

Układy sygnalizacyjne w odróżnieniu od układów pomiarowych nie informują o chwilowej wartości wielkości mierzonej lecz sygnalizują przekroczenie dopuszczalnych granic tej wielkości. Najczęściej sygnalizacja dotyczy następujących stanów wielkości mierzonej:

- a) za mała - prawidłowa - za duża,
- b) za mała - za duża,
- c) za mała - prawidłowa,
- d) prawidłowa - za duża.

Jak widać, do przekazania informacji w układach sygnalizacyjnych są potrzebne tylko dwa lub trzy poziomy sygnałów, mamy więc tu do czynienia z najprostszym przypadkiem pomiaru dyskretnego.

Układy sygnalizacyjne są stosowane bardzo często, zwykle łącznie z układami pomiarowo-regulacyjnymi i wykorzystują sygnały elektryczne (np. napięcie 0 V i napięcie 220 V lub 0 i +5 V), sygnały pneumatyczne (np. ciśnienie 0 kPa i 100 kPa), czy mechaniczne. Sygnały elektryczne są stosowane najczęściej, ponieważ najprostszym rozwiązaniem układu sygnalizacyjnego jest zastosowanie sygnalizacji optycznej (np. lampek o różnej barwie) lub akustycznej (buczki, syreny) informującej o przekroczeniu któregoś z istotnych parametrów procesu technologicznego.



4. LITERATURA

- [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@snack.p.lodz.pl

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

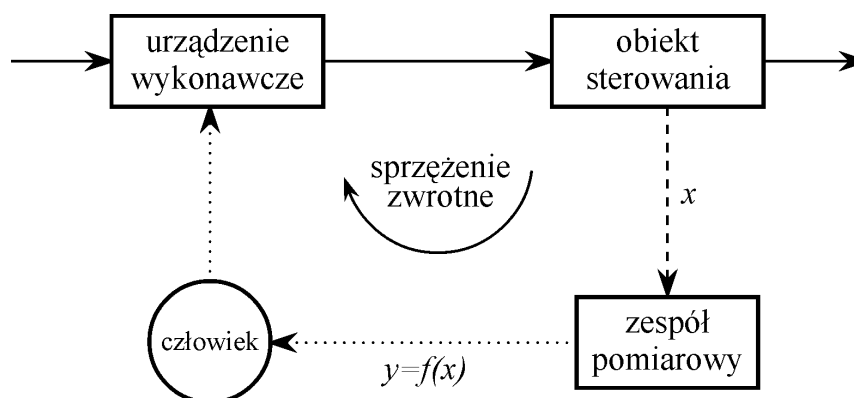
Copyright © 2004
All rights reserved



STEROWANIE I REGULACJA AUTOMATYCZNA

1. STEROWANIE RĘCZNE W UKŁADZIE ZAMKNIĘTYM

Schemat zamkniętego układu sterowania ręcznego przedstawia rysunek 1.1. Centralnym elementem układu jest obiekt sterowania - urządzenie lub proces, w którym steruje się co najmniej jednym z parametrów x . Parametr ten jest mierzony i przetwarzany na standardowy sygnał pomiarowy przez zespół (układ) pomiarowy. Wartość wtórnego sygnału pomiarowego y jest wskazywana przez miernik wyjściowy zespołu. Człowiek sterujący procesem porównuje wartość sygnału $y = f(x)$ z wartością ustaloną wcześniej jako optymalną i w przypadku występowania różnicy, odpowiednio oddziałuje na obiekt sterowania za pośrednictwem urządzenia wykonawczego. Proces sterowania jest komplikowany przez występowanie zakłóceń wpływających na sterowany parametr. Gdyby nie było zakłóceń, można by jednorazowo ustalić optymalne ustawienie urządzenia wykonawczego i sterowanie byłoby zbędne.

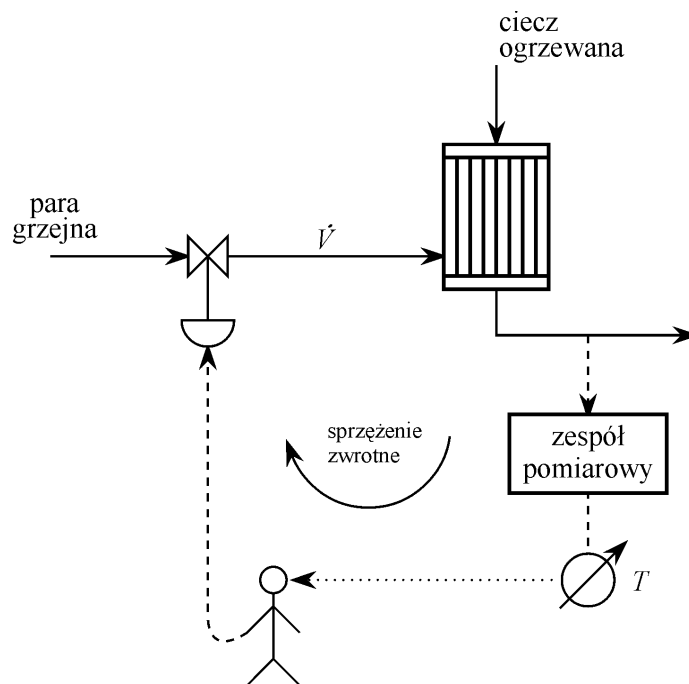


Rys. 1.1. Schemat zamkniętego układu sterowania ręcznego

Ponieważ w układzie sterowania ręcznego występuje zwrotne oddziaływanie na obiekt (sprężenie zwrotne ujemne), dokonywane w wyniku oceny zmian wielkości sterowanej, układ ten jest układem zamkniętym, nazywanym niekiedy układem regulacji ręcznej.

Przykład sterowania ręcznego temperaturą cieczy ogrzewanej w wymienniku ciepła przedstawia rys. 1.2. Operator obsługujący proces ogrzewania cieczy (lub po prostu konkretne urządzenie – wymiennik ciepła), porównuje wskazania miernika temperatury T z wartością temperatury wymaganej przez proces, zadaną mu do utrzymywania np. przez instrukcję technologa. W przypadku gdy temperatura cieczy jest za wysoka, zmniejsza

pokrętle zadajnika strumień pary $\dot{V}$ doprowadzany do wymiennika; przy temperaturze za niskiej reaguje odwrotnie. Jeżeli temperatura jest prawidłowa, nie reaguje. Tak jak w sterowaniu w układzie otwartym, natężenie dopływu pary grzejnej do wymiennika $\dot{V}$ jest tu funkcją ustawienia pokrętła zadajnika, ale położenie pokrętła jest kontrolowane w sposób praktycznie ciągły przez obsługującego proces i w ten sposób zamyka się pętla stabilizującego, ujemnego sprzężenia zwrotnego. Sterowanie procesem wymaga jednak aktywnego udziału operatora, zwłaszcza jego wysiłku psychicznego, nie jest więc automatyczne.



Rys. 1.2. Przykład zamkniętego układu sterowania ręcznego

W omówionym przykładzie ciekawe będzie prześledzenie, jak działało by tu zastąpienie ujemnego sprzężenia zwrotnego sprzężeniem dodatnim. Wystarczy odwrócić reakcję operatora, który na wzrost temperatury T reagował by zwiększeniem strumienia ciepła do wymiennika, a przy spadku wartości T poniżej zadanego poziomu zmniejszał by strumień pary. Takie sterowanie doprowadziło by do osiągania skrajnych możliwych wartości T i całe sterowanie nie miało by sensu. Jak widać dodatnie sprzężenie zwrotne działało by na proces destabilizująco.

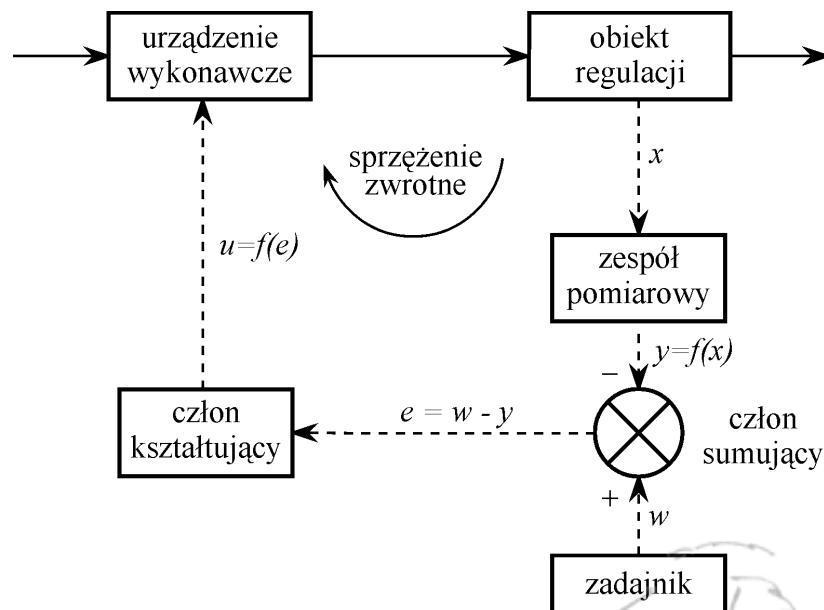
2. REGULACJA AUTOMATYCZNA

Jeżeli w wyżej opisanym, zamkniętym układzie sterowania ręcznego, czynności człowieka polegające na ocenie różnicy między wartością wielkości sterowanej y ,



a wartością ustaloną jako optymalną oraz na zwrotnym oddziaływaniu na obiekt sterowania w celu zmniejszenia tej różnicy zastąpimy działaniem urządzenia automatycznego, otrzymamy zamknięty układ sterowania automatycznego. Układ taki nosi nazwę układu automatycznej regulacji, a urządzenie automatyzujące nazywa się regulatorem.

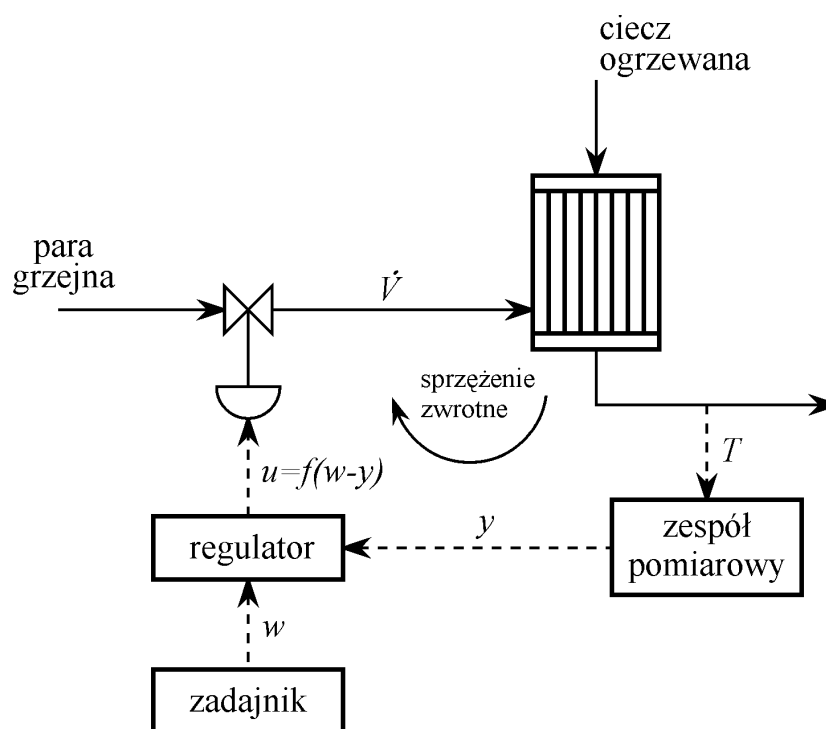
Schemat zamkniętego układu regulacji przedstawia rysunek 2.1. Obiektem regulacji jest urządzenie lub proces, w którym reguluje się jeden z parametrów x . Parametr ten jest mierzony i przetwarzany na standardowy sygnał pomiarowy przez zespół pomiarowy. Sygnał wyjściowy zespołu, czyli sygnał **wielkości regulowanej** $y = f(x)$, jest doprowadzany z zespołu pomiarowego do członu sumującego regulatora, do którego doprowadza się też sygnał **wielkości zadanej** w z zadajnika. Zadajnik umożliwia dowolne, ręczne nastawianie wielkości zadanej. Człon sumujący dokonuje porównania wielkości regulowanej z wielkością zadaną i wysyła sygnał **odchylenia regulacji** $e = w - y$ do zasadniczej części regulatora - członu kształtującego. W członie kształtującym następuje obróbka matematyczna sygnału e zgodnie z algorytmem zależnym od rodzaju regulatora i powstały sygnał **wielkości regulującej** $u = f(e)$ jest doprowadzany do urządzenia wykonawczego, które pośrednio wpływa na wartość regulowanego parametru x . W ten sposób następuje zamknięcie pętli automatycznego ujemnego sprzężenia zwrotnego, stanowiącego zasadniczą cechę układu regulacji automatycznej.



Rys. 2.1. Schemat zamkniętego układu regulacji automatycznej



Przeanalizujmy przykład zamkniętego układu automatycznej regulacji temperatury cieczy ogrzewanej w rurkowym wymienniku ciepła (rys. 2.2). Do komory grzejnej wymiennika, przez który przepływa ogrzewana ciecz, dopływa przez zawór regulacyjny z siłownikiem (urządzenie wykonawcze regulatora) strumień pary grzejnej z natężeniem $\dot{V}$. Temperatura cieczy opuszczającej wymiennik (T) ma być stała, niezależna od zmian natężenia jej przepływu, jej temperatury przed ogrzaniem i ciśnienia pary grzejnej (wielkości zakłócających). Zespół pomiarowy przetwarza wielkość temperatury cieczy $x = T$ na sygnał wielkości regulowanej $y = f(x)$. Sygnał ten jest następnie porównywany w członie sumującym z sygnałem temperatury zadanej w z zadajnika.



Rys. 2.2. Przykład zamkniętego układu regulacji automatycznej

Jeżeli temperatura cieczy na wyjściu wymiennika jest niższa od zadanej ($y < w$), odchylenie (uchyby) regulacji $e = w - y$ jest dodatnie i człon kształtujący regulatora wysyła do urządzenia wykonawczego taki sygnał wielkości regulującej $u = f(e)$, że następuje otwieranie zaworu na dopływie pary grzejnej do wymiennika. Strumień pary grzejnej wzrasta i temperatura cieczy osiąga zadaną wartość. Jeżeli temperatura T przekroczy zadany poziom ($y > w$), odchylenie regulacji stanie się ujemne i regulator będzie przymykał zawór, doprowadzając powtórnie temperaturę cieczy do wartości zadanej.

W ten sposób zakłócenia spowodowane zmiennymi parametrami ogrzewanej cieczy i pary grzejnej zostaną automatycznie skompensowane i temperatura cieczy opuszczającej wymiennik ciepła będzie automatycznie, bez udziału człowieka utrzymywana na zadanym poziomie. Każda zmiana wartości T spowoduje zwrotne oddziaływanie układu ogrzewającego w takim kierunku, żeby tej zmianie przeciwdziałać. Mamy tu więc do czynienia z występowaniem stabilizującego, ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Człon kształtujący regulatora zawsze określa funkcję:

$$u = f(w - y) = f(e) \quad (2.1)$$

Charakter tej funkcji jest zależny od rodzaju tego regulatora (dwupołożeniowy, analogowy, P, PI, czy PID).

Układ automatycznej regulacji realizuje te same czynności, które przy ręcznym sterowaniu w układzie zamkniętym (jak na rys. 1.1) wykonywał operator. Działa on jednak bez udziału człowieka, a jedynym zewnętrznym elementem do którego mamy dostęp jest pokrętło lub klawiatura zadajnika.

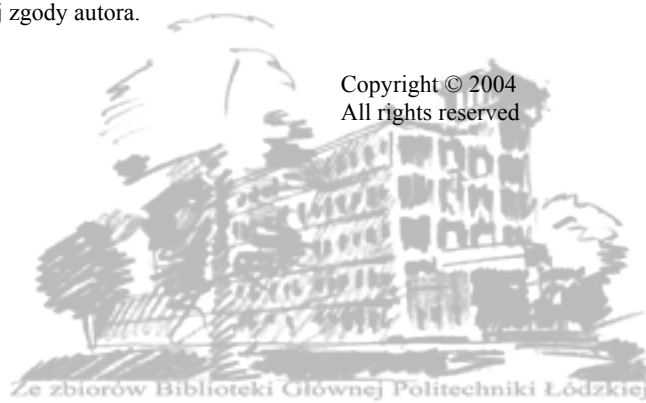
3. LITERATURA

- [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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved



DOŚWIADCZALNE OKREŚLANIE WŁAŚCIWOŚCI UKŁADÓW POMIAROWYCH I REGULACYJNYCH

Tak zwana identyfikacja charakteru i właściwości obiektu regulacji, a zwykle i całego układu pomiarowo-regulacyjnego, jest podstawowym warunkiem prawidłowego zaprojektowania układu regulacji oraz dobrania warunków jego pracy. Właściwości obiektu mogą być w większości przypadków określone z wyprowadzonego wzoru (modelu) matematycznego, często jednak łatwiejsze jest doświadczalne wyznaczenie charakterystyk badanego układu.

Właściwości przetworników i obiektów powinny być w zasadzie określone przez technologa, który najlepiej rozumie fizyczną i chemiczną stronę procesu zachodzącego w danym urządzeniu. Dopiero w trudniejszych przypadkach jest tu konieczna pomoc automatyka. Niżej podano ogólne zasady określania charakterystyk obiektu regulacji. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat zawiera literatura [1,3].

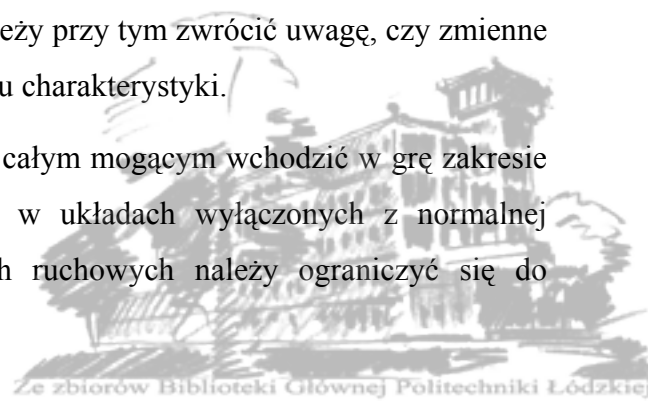
1. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE - WZMOCNIENIE STATYCZNE

Właściwości statyczne układów pomiarowych i regulacyjnych są określone przez zależność między wielkością wyjściową Y , a wielkością wejściową X , w ustalonym stanie działania układu, tzn. wtedy, kiedy nie występują żadne zmiany wartości zarówno X , jak i Y :

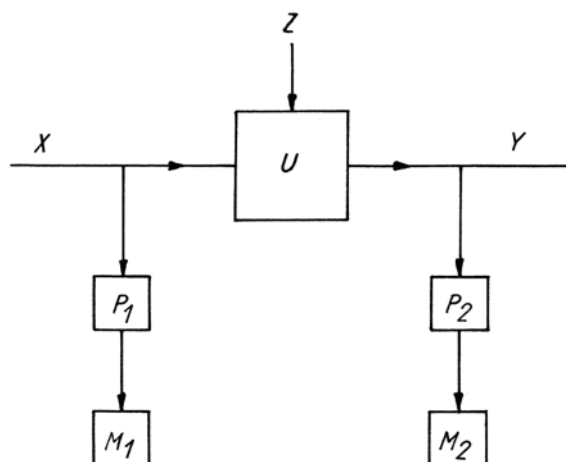
$$Y = f(X) \quad (1.1)$$

Wyznaczenie właściwości statycznych badanego układu wymaga zainstalowania dwóch przetworników pomiarowych: przetwornika sygnału wejściowego i przetwornika sygnału wyjściowego. Przetworniki te uruchamiają odpowiednie mierniki wyjściowe, dwukanałowy rejestrator lub są połączone z systemem komputerowym. Zmieniając skokowo wartości sygnału wejściowego X , rejestruje się odpowiadające im wartości sygnału wyjściowego Y **po ich ustaleniu się** (rys. 1.1). Należy przy tym zwrócić uwagę, czy zmienne wielkości zakłócające Z nie zniekształcają przebiegu charakterystyki.

Pomiary powinny być przeprowadzone w całym mogącym wchodzić w grę zakresie zmian sygnałów X i Y , co jest możliwe tylko w układach wyłączonych z normalnej eksploatacji lub doświadczalnych. W warunkach ruchowych należy ograniczyć się do



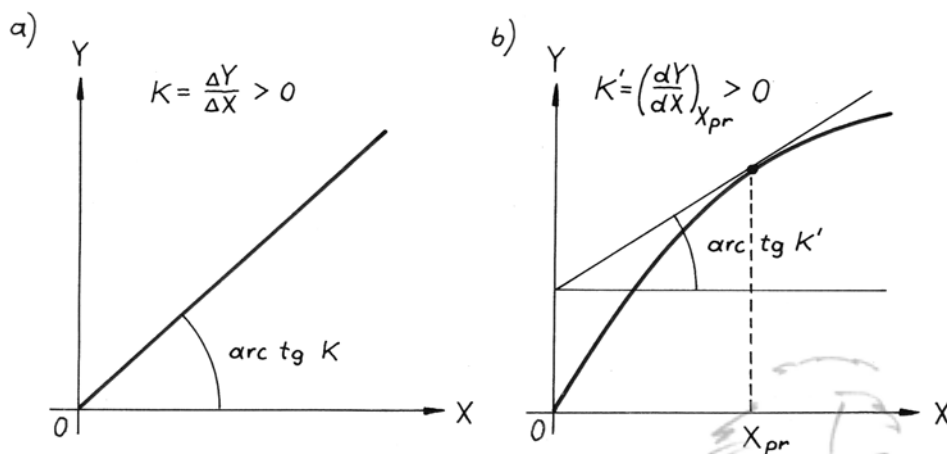
wyznaczenia niewielkiego odcinka charakterystyki w pobliżu punktu normalnej pracy układu (X_{pr}).



Rys. 1.1. Wyznaczanie charakterystyki statycznej

Wynikiem pomiaru jest charakterystyka $Y = f(X)$ w warunkach statycznych. Metodą analityczną lub graficzną można wyznaczyć nachylenie całej charakterystyki $\frac{\Delta Y}{\Delta X}$ (wzmocnienie statyczne obiektu K) lub w przypadku jej nieliniowego przebiegu, nachylenie w punkcie normalnej pracy obiektu $\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right)_{X_{pr}}$ (wzmocnienie różniczkowe obiektu K').

Wykres równania opisującego statyczne właściwości układu liniowego przedstawia rysunek 1.2.a.



Rys. 1.2. Charakterystyka statyczna układu liniowego (a) i nieliniowego linearyzowanego (b)



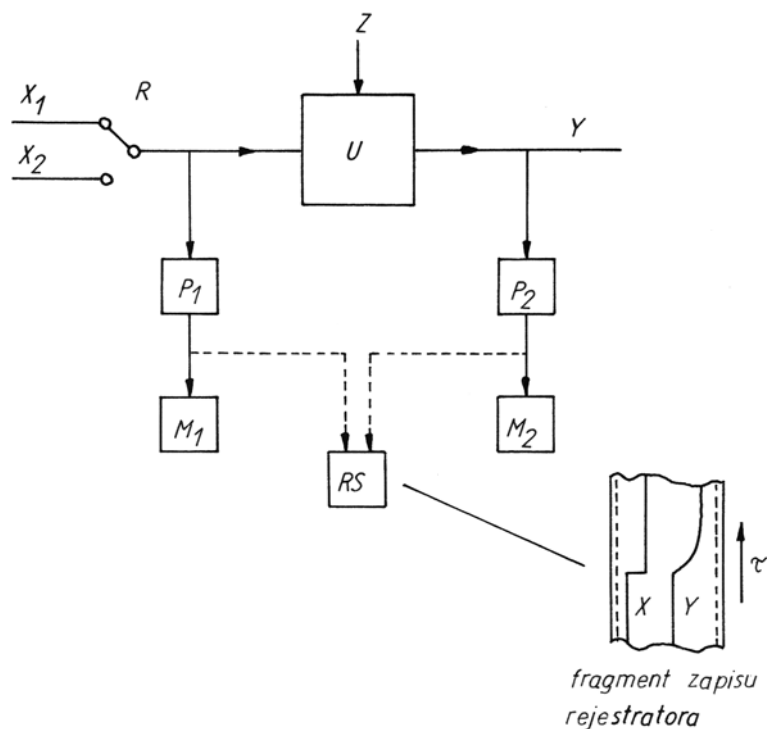
Wyróżnikiem statycznych właściwości układu jest jego **wzmocnienie statyczne** K , czyli stosunek $\frac{dY}{dX}$. W układach liniowych, przy prostoliniowym przebiegu charakterystyki statycznej, wzmocnienie statyczne ma wartość stałą (rys. 1.2.a) i może być wyznaczone np. ze stosunku przyrostów $\frac{\Delta Y}{\Delta X}$. W układach nieliniowych równanie charakterystyki statycznej nie jest równaniem prostej, jednakże w wielu przypadkach można wybrać liniowy odcinek tej charakterystyki lub dokonać jej linearyzacji w otoczeniu wybranego punktu, nazywanego punktem normalnej pracy układu (X_{pr} na rys. 1.2.b). Wzmocnienie układu jest wtedy wyznaczane z nachylenia stycznej w punkcie X_{pr} i nosi nazwę wzmocnienia różniczkowego K' .

2. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE - ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE

Wyznaczenie właściwości dynamicznych badanego układu wymaga wykonania skoku wielkości wejściowej obiektu (wymuszenia skokowego X_{st}) i zbadania przebiegu odpowiedzi sygnału wyjściowego $Y(\tau)$. Pomiaru charakterystyki dokonuje się najczęściej w niewielkim obszarze wokół wybranego punktu pracy układu, przy skoku wartości X wynoszącym 5 do 15% całego normalnego zakresu zmian tej wielkości. Jest to bardzo istotne zwłaszcza w przypadku układów nieliniowych z linearyzowaną charakterystyką statyczną. Wykonanie większych wymuszeń jest zresztą możliwe tylko w układach wyłączonych z normalnej eksploatacji lub doświadczalnych.

Wyznaczenie odpowiedzi układu na wymuszenie skokowe wymaga zainstalowania przyrządów przedstawionych na rysunku 2.1. Na wejściu badanego układu U znajduje się przełącznik R sygnału wejściowego, umożliwiający skokową zmianę tego sygnału z wartości X_1 na wartość X_2 lub odwrotnie. Wielkość wymuszenia skokowego jest mierzona zespołem pomiarowym P_1M_1 i może być rejestrowana jednym z kanałów rejestratora RS . Po wykonaniu wymuszenia (skoku wartości X), bada się odpowiedź układu (zmianę wartości sygnału Y w funkcji czasu) przy pomocy zespołu pomiarowego P_2M_2 i czasomierza lub korzystając z drugiego kanału rejestratora RS .





Rys. 2.1. Wyznaczenie odpowiedzi na wymuszenie skokowe

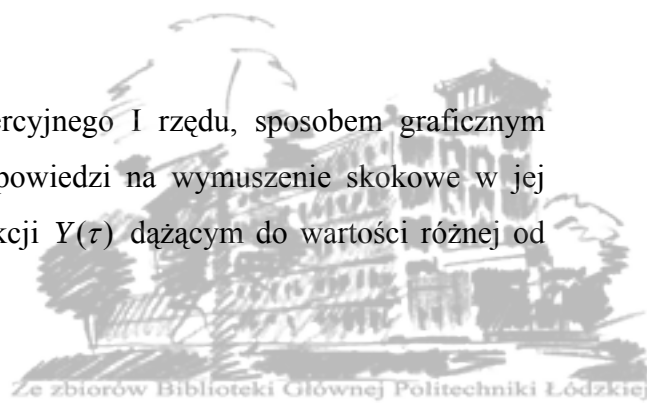
Podstawowym warunkiem dokładnego wyznaczenia charakterystyki dynamicznej jest mała, w porównaniu z badanym układem, inercja zespołów pomiarowych P_1M_1 i P_2M_2 , a także stałość w czasie wielkości zakłócających Z . W celu dokładnego przedstawienia charakterystyki bez korzystania z rejestratora, należy uzyskać odpowiednio dużą liczbę punktów do sporządzenia wykresu.

Z wykresu odpowiedzi na wymuszenie skokowe wyznacza się podstawowe wskaźniki dynamicznych właściwości badanego obiektu - stałą czasową lub parametry zastępcze w przypadku układów złożonych - zastępczą stałą czasową i zastępczy czas opóźnienia. Sposoby wyznaczania tych parametrów podano niżej.

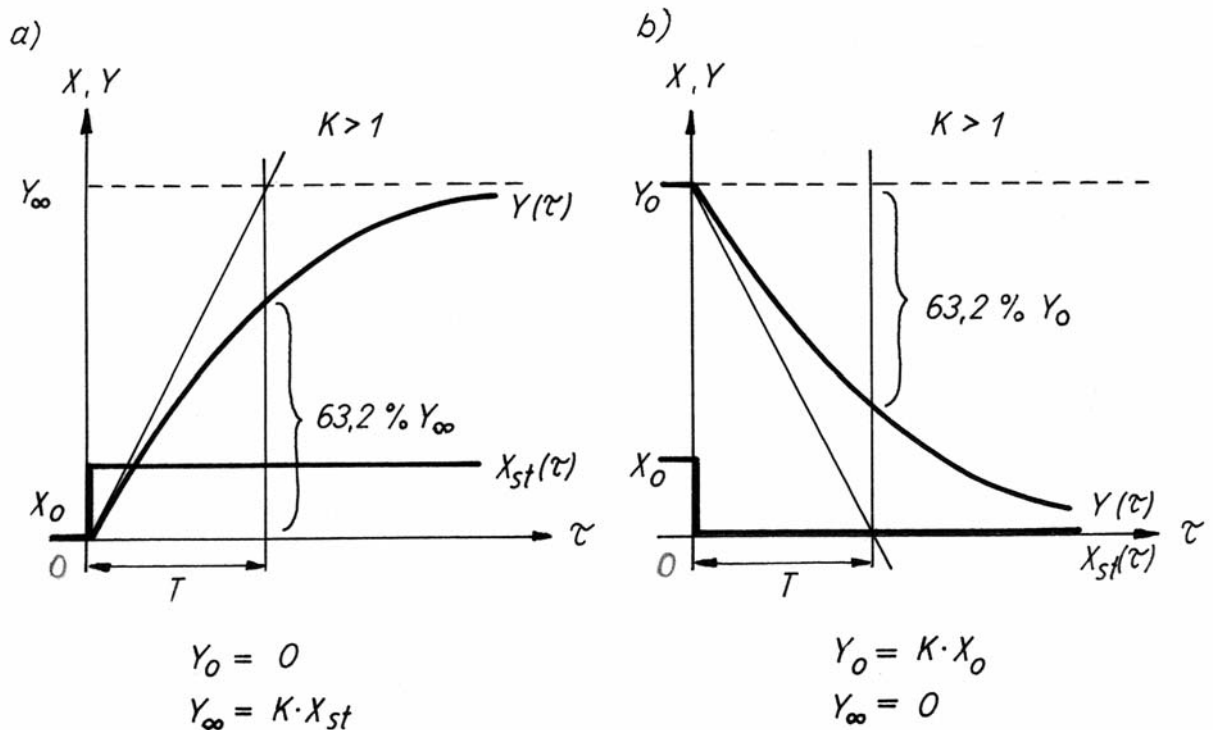
2.1. METODY WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ CZŁONÓW INERCYJNYCH I RZĘDU

2.1.1. SPOSOBEM GRAFICZNYM

Wyznaczenie stałej czasowej układu inercyjnego I rzędu, sposobem graficznym polega na wykreśleniu stycznej do przebiegu odpowiedzi na wymuszenie skokowe w jej początkowym punkcie $\tau = 0$. Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącym do wartości różnej od



zera (rys. 2.2.a), kreśli się następnie asymptotę charakterystyki na poziomie $K \cdot X_{st} = \infty$. Rzutując punkt przecięcia stycznej z asymptotą na oś odciętych, otrzymujemy punkt $\tau = T$ i określamy tym samym wartość stałej czasowej analizowanego układu.



Rys. 2.2. Wyznaczanie stałej czasowej sposobem graficznym i z wartości charakterystyki skokowej w punkcie $\tau = T$ dla przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącego do $Y_\infty \neq 0$ (a) i $Y_\infty = 0$ (b)

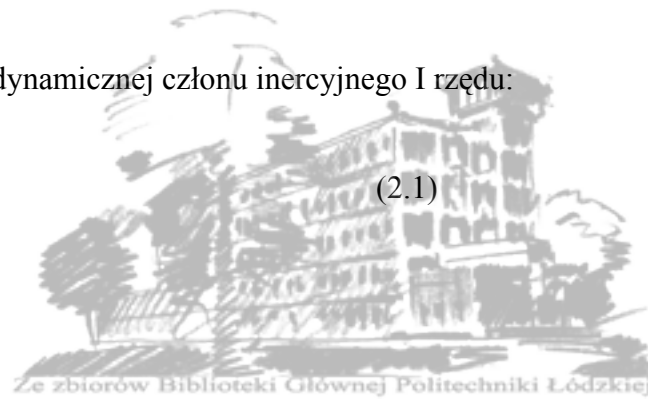
Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącym do zera (rys. 2.2.b) postępuje się podobnie - z tym, że asymptotą charakterystyki jest oś odciętych. Wartość stałej czasowej układu określa wtedy punkt przecięcia stycznej z osią odciętych.

Ze względu na trudność precyzyjnego wykreślenia stycznej do przebiegu charakterystyki skokowej w punkcie $\tau = 0$, graficzne wyznaczenie stałej czasowej układu inercyjnego I rzędu daje wynik przybliżony.

2.1.2. Z NACHYLENIA CHARAKTERYSTYKI SKOKOWEJ W DANYM PUNKCIE

Przekształcając równanie charakterystyki dynamicznej członu inercyjnego I rzędu:

$$T \cdot \frac{dY}{d\tau} + Y = K \cdot X \quad (2.1)$$



otrzymamy zależność:

$$T = \frac{K \cdot X - Y}{\frac{dY}{d\tau}} \quad (2.2)$$

w której X jest wartością X_{st} po wykonaniu wymuszenia skokowego.

Jeżeli przyjąć, że $\frac{dY}{d\tau}$ jest nachyleniem charakterystyki dynamicznej skokowej w punkcie n , $K \cdot X_{st}$ jest wartością Y w czasie $\tau = \infty$ (asymptotą charakterystyki Y_{∞}), Y wartością rzędnej w punkcie n , otrzymamy wzór na obliczenie stałej czasowej T :

$$T = \frac{Y_{\infty} - Y_n}{\left(\frac{dY}{d\tau}\right)_n} \quad (2.3)$$

Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącym do asymptoty $Y_{\infty} \neq 0$ (rys. 2.2.a), jest konieczna znajomość wartości wszystkich składników prawej strony równania (2.3). Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącym do zera (rys. 2.2.b), równanie (2.3) upraszcza się, ponieważ $Y_{\infty} = 0$.

W praktyce punkt n biera się na mało zakrzywionym, stromym odcinku wykresu charakterystyki skokowej, a nachylenie tej charakterystyki określa się dla bezpośredniego otoczenia wybranego punktu. W celu zwiększenia dokładności obliczeń, należy wyznaczyć średnią stałą czasową dla kilku różnych punktów charakterystyki.

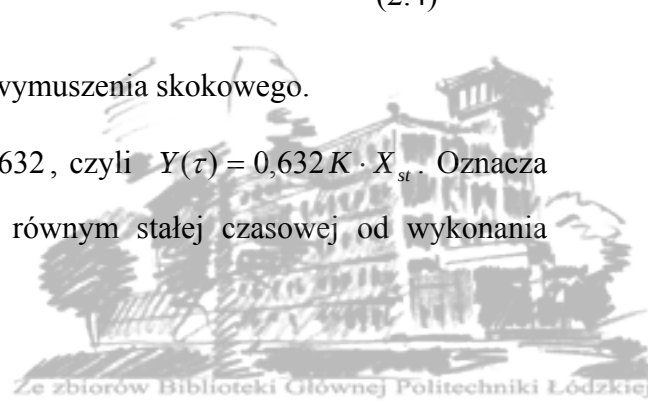
2.1.3. Z WARTOŚCI CHARAKTERYSTYKI SKOKOWEJ W PUNKCIE $\tau = T$

Całkując równanie charakterystyki dynamicznej układu inercyjnego I rzędu (2.1), otrzymamy dla przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącego do wartości różnej od zera zależność:

$$Y(\tau) = K \cdot X \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (2.4)$$

gdzie X jest wartością X_{st} po wykonaniu wymuszenia skokowego.

W czasie $\tau = T$ otrzymamy $1 - e^{-1} = 0,632$, czyli $Y(\tau) = 0,632 K \cdot X_{st}$. Oznacza to, że w członie inercyjnym I rzędu po czasie równym stałej czasowej od wykonania



wymuszenia skokowego, wartość Y osiąga 63,2 % swojej wartości maksymalnej $K \cdot X_{st} = Y_{\infty}$ (rys. 2.2.a). Znając wartość Y_{∞} można łatwo obliczyć wartość stałej czasowej członu.

Dla przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącego do zera, po scałkowaniu równania (2.1) otrzymamy zależność:

$$Y(\tau) = K \cdot X \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (2.5)$$

gdzie X jest początkową wartością X_0 przed wykonaniem wymuszenia skokowego.

W czasie $\tau = T$ otrzymamy $e^{-1} = 0,368$, czyli $Y(\tau) = 0,368 \cdot K \cdot X_0$. Oznacza to, że po czasie T od wymuszenia skokowego wartość Y osiąga 36,8 % swojej wartości początkowej $K \cdot X_0 = Y_0$, czyli spada o 63,2 % (rys. 2.2.b). Znając wartość Y_0 łatwo można obliczyć wartość stałej czasowej układu.

3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE UKŁADÓW ZŁOŻONYCH

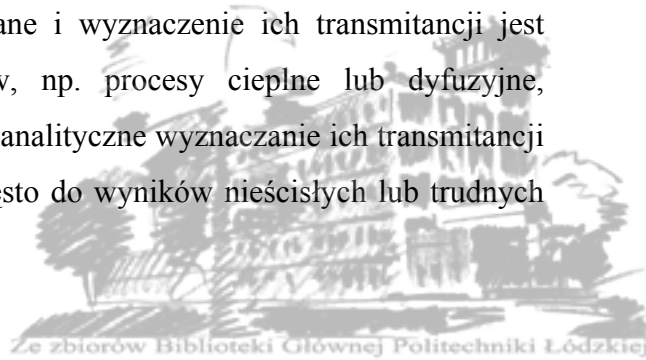
Liniowe układy złożone, zbudowane z dwóch lub większej liczby połączonych ze sobą (najczęściej szeregowo) członów elementarnych, klasyfikuje się w zależności od cechy samodzielnego osiągania lub nieosiągania stanu równowagi trwałej po wprowadzeniu wymuszenia skokowego na dwie grupy:

- a) układy statyczne,
- b) układy astatyczne.

Układy astatyczne zawierają przynajmniej jeden element całkujący. Układy statyczne nie zawierają elementów o właściwościach całkujących.

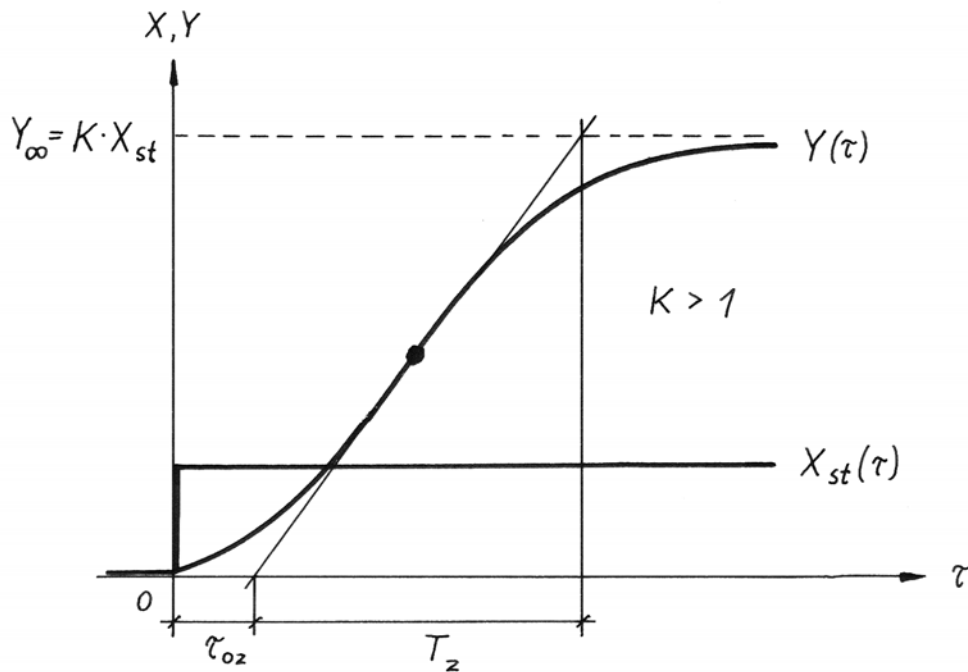
Najczęściej spotykany w praktyce układ inercyjny wyższego rzędu składa się z połączonych szeregowo elementów inercyjnych I rzędu (przykładem może być szeregowy przepływowy reaktor wielozbiornikowy). Rząd układu wyznacza liczba połączonych elementów.

Często równania opisujące właściwości spotykanych w praktyce złożonych obiektów pomiarowo-regulacyjnych nie są dostatecznie znane i wyznaczenie ich transmitancji jest niemożliwe. Ponadto niektóre rodzaje obiektów, np. procesy cieplne lub dyfuzyjne, charakteryzują się inercyjnością wysokiego rzędu i analityczne wyznaczanie ich transmitancji ma małe znaczenie praktyczne, gdyż prowadzi często do wyników nieścisłych lub trudnych



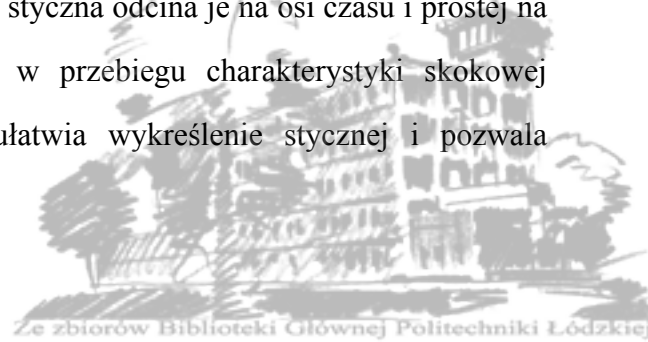
do wykorzystania ze względu na złożoną formę matematyczną. W takich przypadkach często lepiej jest opierać się na doświadczalnie wyznaczonych odpowiedziach na wymuszenia skokowe, które można **aproksymować** w umowny sposób.

W przypadku układów statycznych, których odpowiedzi na wymuszenia skokowe nie mają charakteru oscylacyjnego, wyznaczoną doświadczalnie krzywą odpowiedzi na wymuszenie skokowe aproksymuje się graficznie za pomocą opóźnienia i inercyjności pierwszego rzędu, zgodnie z rysunkiem 3.2. Prowadzi się styczną do charakterystyki w punkcie przegięcia. Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącym do wartości różnej od zera, styczna ta odcina na osi czasu i prostej na poziomie $K \cdot X_{st} = Y_{\infty}$ zastępcze parametry układu: czas opóźnienia τ_{oz} oraz stałą czasową T_z . Z położenia asymptoty przebiegu $Y(\tau)$ można określić wzmocnienie statyczne układu K .



Rys. 3.1. Aproxymowanie odpowiedzi na wymuszenie skokowe układu inercyjnego wyższego (II) rzędu

W podobny sposób wyznacza się zastępcze parametry dynamiczne układu przy dążącym do zera przebiegu funkcji $Y(\tau)$, z tym, że styczna odcina je na osi czasu i prostej na poziomie $K \cdot X_0 = Y_0$. Występowanie przegięcia w przebiegu charakterystyki skokowej układu inercyjnego wyższego rzędu znacznie ułatwia wykreślenie stycznej i pozwala osiągnąć dość dużą dokładność metody graficznej.



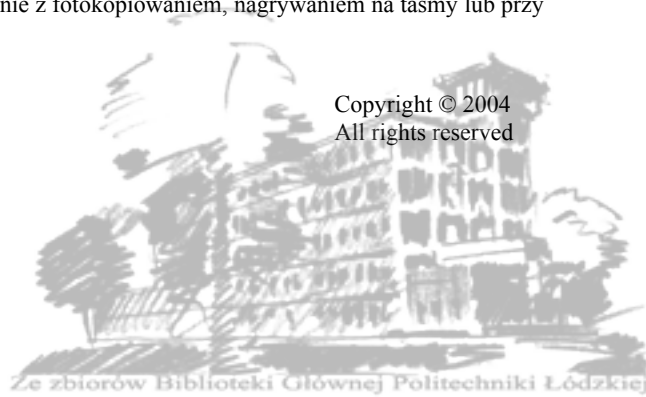
4. LITERATURA

- [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@snack.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 pisemnej zgody autora.

Copyright © 2004
All rights reserved



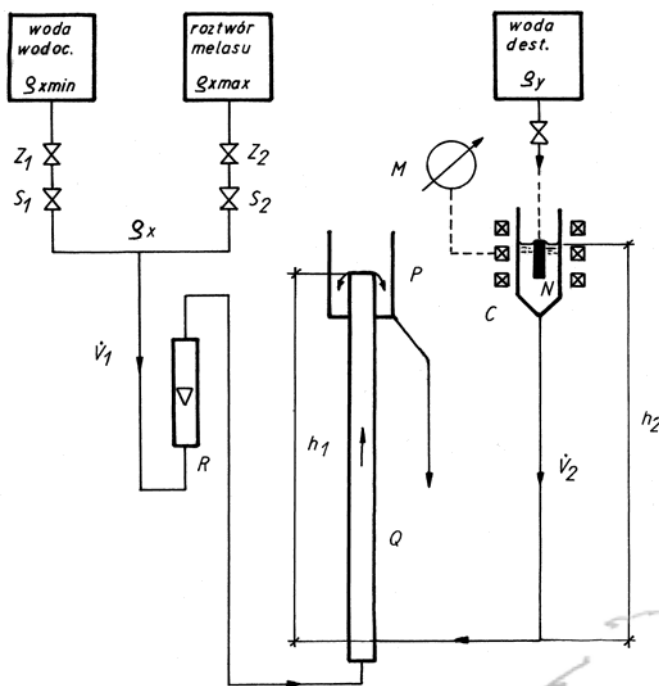
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

1. PRZEPŁYWOWY GĘSTOŚCIOMIERZ HYDROSTATYCZNY DO POMIARU STĘŻENIA ROZTWORÓW

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

1.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYZRZĄDU

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 ρ_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 ρ_y . Żeby uniknąć błędu pomiaru spowodowanego mieszaniem się cieczy o gęstości ρ_x z cieczą o gęstości ρ_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 ρ_y jest równoważone przez ciśnienie słupa cieczy o gęstości ρ_x 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.

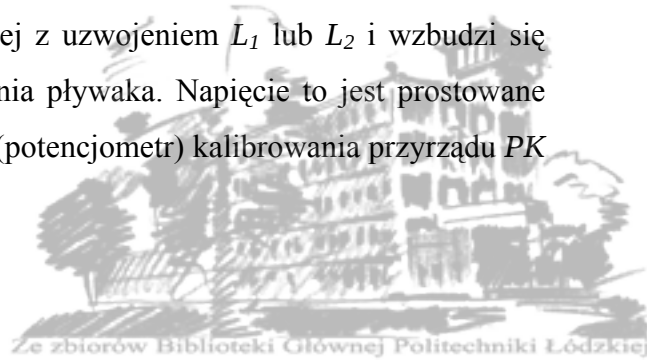
Ponieważ gęstość ρ_y ma wartość stałą i wysokość słupa cieczy h_1 jest również stała, wysokość słupa cieczy h_2 jest liniową funkcją mierzonej gęstości ρ_x .

Zmianę wysokości słupa cieczy Δh_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) 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 porównywanym gęstościach, co może być zrealizowane np. przez umieszczenie rurki z cieczą o gęstości ρ_y wewnątrz rury pomiarowej z cieczą o gęstości ρ_x . Zmiany poziomu cieczy Δh_2 powodują przesuwanie się pływak N zanurzonego w tej cieczy. Z kolei przesunięcie pływak 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 pływak 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 pływak. Napięcie to jest prostowane w detektorze D i poprzez nastawiany ręcznie dzielnik (potencjometr) kalibrowania przyrządu PK doprowadzane do miernika magnetoelektrycznego M .



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

Ponieważ charakterystyka czujnika jest liniowa, wystarczy określić tylko dwa punkty: minimalny poziom $h_{2\min}$ ($U_x = 0$), któremu odpowiada minimalna wartość mierzonej gęstości $\rho_{x\min}$ oraz maksymalny poziom $h_{2\max}$, 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. Należy zwrócić uwagę, że drugi punkt charakterystyki nie musi być wyznaczony przy $\rho_{x\max}$ lecz przy jakiegokolwiek znanej wartości ρ_x różnej od $\rho_{x\min}$. Dokładność kalibrowania będzie jednak wtedy mniejsza, ze względu na mniejszą odległość między punktami.

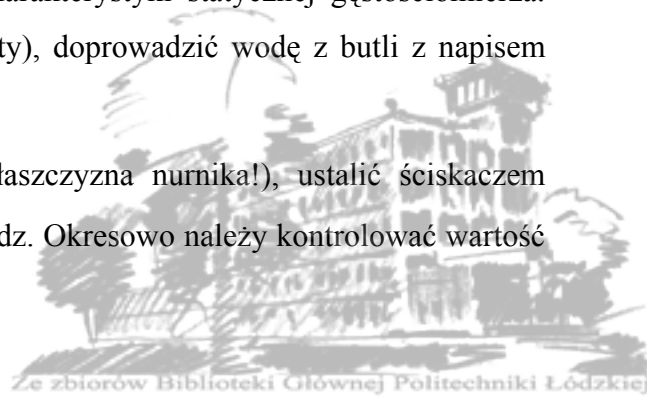
1.2. ZEROWANIE GĘSTOŚCIOMIERZA

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

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

Należy 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 gęstościomierza. Otwierając zawór napływowy Z_1 (zawór Z_2 zamknięty), doprowadzić wodę z butli z napisem „woda” do rury pomiarowej gęstościomierza.

Obserwując wskazania rotametr (górną płaszczyznę nurnika!), ustalić ściskaczem śrubowym S_1 natężenie przepływu $\dot{V}_1 = 25 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$. Okresowo należy kontrolować wartość



$\dot{V}_1$ i zapas wody w butli, uzupełniając go w razie potrzeby z instalacji wodociągowej. Nie wolno dopuścić do całkowitego opróżnienia się butli, jak również do jej przepełnienia! Automatyczny układ zabezpieczający sygnalizuje akustycznie stan przepełnienia butli!

Uruchomić dopływ wody destylowanej do czujnika poziomu cieczy. Woda powinna kapać w ilości **2 - 3 krople na sekundę** ($\dot{V}_2$). Okresowo należy kontrolować również ten przepływ wody destylowanej.

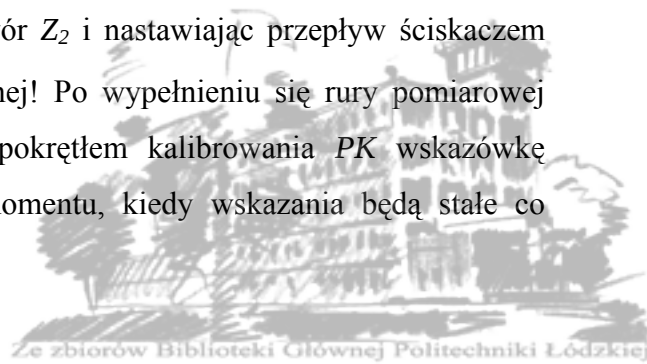
Po odczekaniu około 5 minut na ustalenie się warunków pracy przyrządu, należy przesuwając **bardzo wolno** cały czujnik transformatorowy w górę lub w dół nakrętką podtrzymującą znaleźć takie jego położenie, przy którym wskazówka miernika gęstości osiągnie minimalne wychylenie na działce 1000 kg/m^3 ($U_x = 0$). 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 .

1.3. KALIBROWANIE GĘSTOŚCIOMIERZA

Kalibrowanie gęstościomierza polega na ustaleniu położenia drugiego punktu wykresu charakterystyki statycznej przyrządu, podczas przepuszczania przez gęstościomierz cieczy o określonej gęstości ρ_x . Cieczą tą będzie roztwór melasowy o znanej pozornej zawartości suchej substancji (Bx), oznaczonej za pomocą refraktometru. Gęstość takiego roztworu może być odczytana z odpowiednich tabel, unikamy w ten sposób jej wyznaczania.

Należy sporządzić 15 dm^3 roztworu melasowego o zawartości suchej substancji 1 % ($Bx = 1$) i $\rho_x = 1004 \text{ kg/m}^3$ w temperaturze $+20^\circ\text{C}$. 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 melasu rozcieńczać powoli wodą wodociągową, aż do uzyskania wymaganego stężenia). Następnie stężony roztwór rozcieńczyć wodą 20-krotnie w stosunku wagowym, wlewając 700 cm^3 tego roztworu (0,75 kg) przez lejek do butli z napisem „melas”, do której poprzednio wleto $14,3 \text{ dm}^3$ (do kreski) wody wodociągowej. Otrzymany roztwór wymieszać sprężonym powietrzem z dmuchawy, nie zdejmując butli z półki.

Przez gęstościomierz przepuszczać roztwór melasowy o gęstości 1004 kg/m^3 z butli z wydajnością $\dot{V}_1 = 25 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz.}$, otwierając zawór Z_2 i nastawiając przepływ ściskaczem śrubowym S_2 . Sprawdzić kapanie wody destylowanej! Po wypełnieniu się rury pomiarowej gęstościomierza roztworem melasowym, ustawiać pokrętką kalibrowania PK wskazówkę miernika gęstości na działkę 1004 kg/m^3 aż do momentu, kiedy wskazania będą stałe co



najmniej przez dwie minuty. Po przeprowadzeniu kalibrowania, **pokręta PK nie wolno poruszać do końca wykonywania zadania!**

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

Po wykalibrowaniu gęstościomierza, dopływ roztworu melasowego można 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 kg/m^3 .

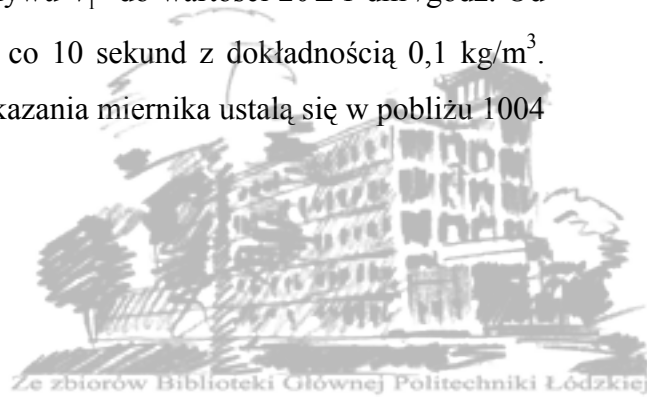
1.4. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE GĘSTOŚCIOMIERZA

Należy zbadać odpowiedź gęstościomierza na skokowe wymuszenie na jego wejściu (charakterystykę dynamiczną skokową przyrządu) i określić podstawowe parametry dynamiczne - zastępczą stałą czasową oraz zastępczy czas opóźnienia. Doświadczenie polega na wprowadzeniu skokowej zmiany gęstości cieczy dopływającej do gęstościomierza i obserwowaniu, jak przebiegają w czasie zmiany wskazań miernika gęstości (patrz [1], rozdz. 21.3.2).

Na wstępie należy wyprzeć z gęstościomierza roztwór melasowy, przepuszczając przez rurę pomiarową wodę wodociagową z butli, z wydajnością około 25 dm^3/godz . W razie potrzeby uzupełnić zapas wody w butli! Sprawdzić kapanie wody destylowanej!

Obserwować powolny spadek wskazań miernika gęstości. Po ustaleniu się wskazań miernika w pobliżu 1000 kg/m^3 należy przygotować sekundomierz, tabelę 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_1 dopływ wody do gęstościomierza i otworzyć zaworem Z_2 dopływ roztworu melasowego z butli, natychmiast korygując ściskaczem S_2 natężenie przepływu $\dot{V}_1$ do wartości $20 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$. Od tego momentu notować wskazania miernika gęstości co 10 sekund z dokładnością 0,1 kg/m^3 . Pierwszego odczytu dokonać w czasie $\tau = 0$. Gdy wskazania miernika ustalą się w pobliżu 1004 kg/m^3 , notować je jeszcze przez minutę.



Uzupełnić zapas wody w butli. Na umówiony sygnał, mierząc czas od nowa, szybko zamknąć zaworem Z_2 dopływ roztworu melasu i otworzyć zaworem Z_1 dopływ wody z butli, natychmiast ustalając ściskaczem S_1 natężenie przepływu $\dot{V}_1 = 20 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$. Znów co 10 sekund notować wskazania miernika gęstości z dokładnością $0,1 \text{ kg/m}^3$, aż do ich ustalenia się przez minutę w pobliżu 1000 kg/m^3 . Pierwszego odczytu dokonać w czasie $\tau = 0$.

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

Pomiary zakończyć wypierając wodę roztworem melasowym, a następnie roztwór melasowy wodą przy $\dot{V}_1 = 30 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{godz}$.

1.5. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Zamknąć zawory Z_1 i Z_2 . Spuścić resztę roztworu melasowego z butli, odłączając przewód doprowadzający do niej wodę z sieci wodociągowej (zdejmując wąż z łącznika przy zaworze wodnym). Przepłukać dokładnie (kilkakrotnie) butlę „melas”, napełniając ją na koniec wodą do kreski. Otworzyć zawór Z_2 i przepuszczać wodę przez gęstościomierz z wydajnością około $25 \text{ dm}^3/\text{godz}$, aż wskazania miernika gęstości ustalą się w pobliżu 1000 kg/m^3 przez co najmniej 5 minut. Zamknąć zawór Z_2 . Sprawdzić zamknięcie zaworów wodnych, służących do napełniania butli. Zamknąć dopływ wody destylowanej do czujnika poziomu cieczy. Wyłączyć zasilanie elektryczne czujnika poziomu cieczy. Umyć refraktometr i sprzęt szklany.

1.6. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

Sporządzić na arkuszu papieru milimetrowego o formacie A-4 wykresy charakterystyk dynamicznych gęstościomierza $\rho_x = f(\tau)$ dla wypierania wody roztworem melasowym przy trzech badanych wartościach natężenia przepływu $\dot{V}_1 = 20, 25$ i $30 \text{ dm}^3/\text{godz}$ we wspólnym układzie współrzędnych. Wyznaczyć graficznie zastępcze stałe czasowe T_z i zastępcze czasy opóźnienia τ_{oz} (patrz [1], rozdział 16.3.2, rys. 16.20).

Podobnie sporządzić na wspólnym rysunku wykresy $\rho_x = f(\tau)$ dla wypierania roztworu melasowego wodą również przy trzech badanych wartościach $\dot{V}_1$. Wyznaczyć graficznie wartości T_z i τ_{oz} .



Korzystając ze wzoru 1.2 obliczyć zmianę wysokości słupa wody Δh_2 odpowiadającą zmianie gęstości cieczy ρ_x od 1000 do 1004 kg/m³. Przyjąć $h_1 = 170$ cm.

1.7. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty schemat całego układu gęstościomierza z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- wykresy charakterystyk dynamicznych gęstościomierza,
- zestawienie wyznaczonych wartości τ_{oz} i T_z (tabelka),
- obliczenie zmiany wysokości słupa wody Δh_2 odpowiadającą zmianie gęstości cieczy ρ_x od 1000 do 1004 kg/m³
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyznaczonych wartości T_z i τ_{oz} .

1.8. LITERATURA

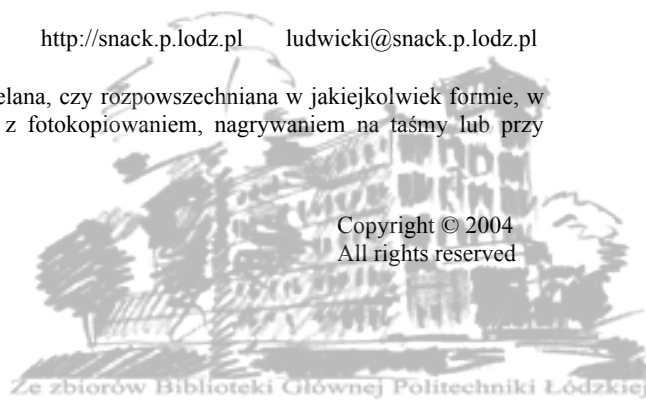
Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii oraz książki:

- [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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved

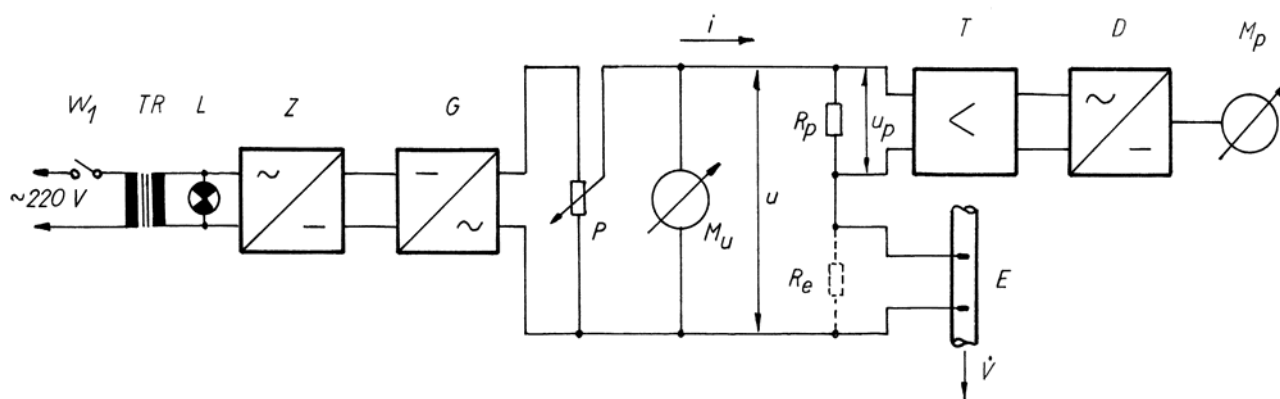


2. KONDUKTOMETR PRZEPŁYWOWY JAKO OBIEKT WSPOMAGANEGO KOMPUTEROWO BADANIA STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI CZŁONÓW INERCYJNYCH

Cel zadania: Poznanie zastosowania przepływowego konduktometru do ciągłego pomiaru stężenia roztworu elektrolitu. Zbiorniki przepływowe jako obiekty inercyjne pierwszego i drugiego rzędu. Komputerowe wspomaganie identyfikacji statycznych i dynamicznych właściwości układu pomiarowego. Wyznaczanie stałej czasowej członów inercyjnych różnymi metodami.

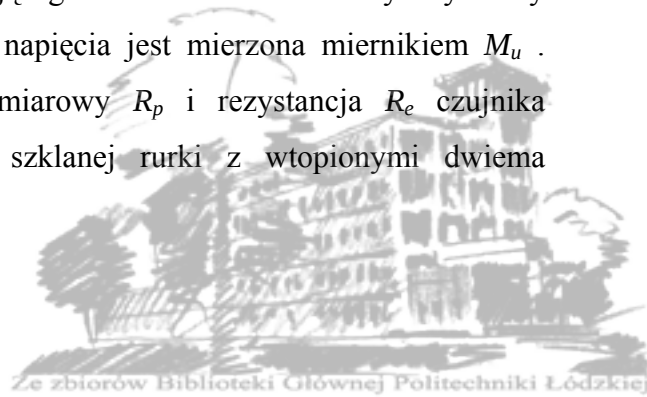
2.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYRZĄDU

Schemat elektryczny konduktometru przedstawia rysunek 2.1. Obniżone w transformatorze TR napięcie z sieci elektrycznej jest prostowane i stabilizowane w zasilaczu Z . Generator G przetwarza stałe napięcie z zasilacza na sinusoidalne napięcie przemienne o częstotliwości ok. 500 Hz i stałej amplitudzie. Zasilanie obwodu konduktometrycznego napięciem przemiennym o podwyższonej częstotliwości jest związane z koniecznością uniknięcia zjawiska polaryzacji elektrod pomiarowych (patrz też [1], rozdz. 12.7.2).



Rys. 2.1. Schemat elektryczny konduktometru

Do nastawiania wartości napięcia u zasilającego obwód konduktometryczny służy dzielnik napięcia (potencjometr) P , a wartość tego napięcia jest mierzona miernikiem M_u . Obwód konduktometryczny zamykają rezystor pomiarowy R_p i rezystancja R_e czujnika konduktometrycznego E , wykonanego w postaci szklanej rurki z wtopionymi dwiema elektrodami platynowymi.



Wartość natężenia prądu i płynącego w obwodzie konduktometrycznym można określić równaniem:

$$i = \frac{u}{R_p + R_e} = \frac{u}{R_p + \frac{1}{S}} \quad (2.1)$$

gdzie: u - wartość napięcia zasilającego obwód,

R_p - rezystancja pomiarowa,

R_e - rezystancja roztworu między elektrodami,

S - konduktancja roztworu między elektrodami.

Jeżeli $R_p \gg R_e$, to można przyjąć, że:

$$i = \frac{u}{R_e} = u \cdot S \quad (2.2)$$

Zakładając stałą wartość napięcia u zasilającego obwód konduktometryczny, otrzymamy:

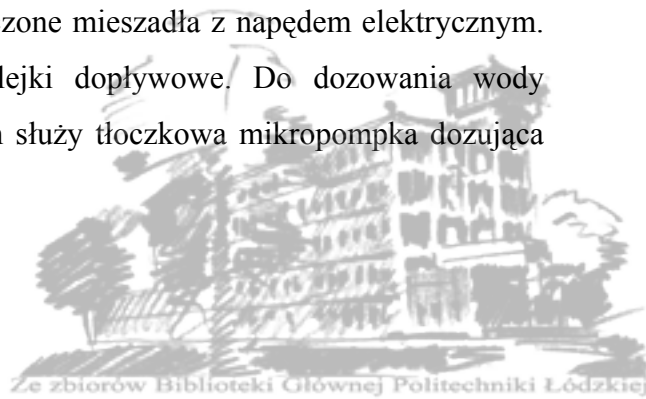
$$i = K_1 \cdot S \quad (2.3)$$

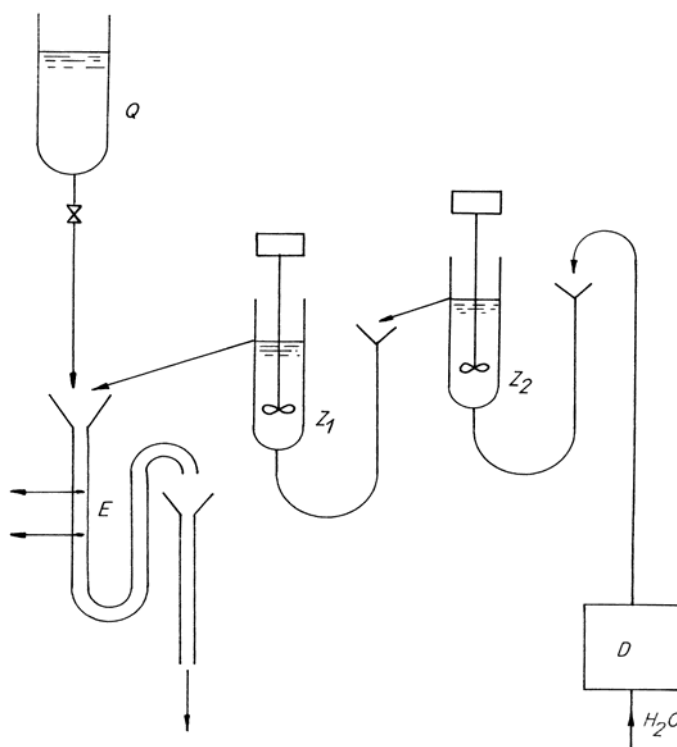
Do mierzenia wartości natężenia prądu i służy rezystor pomiarowy R_p , na którym spadek napięcia wynosi zgodnie z prawem Ohma:

$$u_p = R_p \cdot i = R_p \cdot u \cdot S = K_2 \cdot S \quad (2.4)$$

Wartość napięcia u_p jest więc liniową funkcją konduktancji S roztworu w czujniku konduktometrycznym. Napięcie to jest wzmacniane przez wzmacniacz elektroniczny T , prostowane w detektorze D i wskazywane przez miernik magnetoelektryczny M .

Z prawej strony tablicy z układem konduktometru znajduje się przedstawiony schematycznie na rysunku 2.2 zestaw zbiorników, służący do badania dynamicznych właściwości członów inercyjnych. Największy zbiornik Q służy do dozowania roztworu bezpośrednio do czujnika konduktometrycznego E lub do któregoś ze zbiorników przelewowych Z_1 albo Z_2 . W zbiornikach przelewowych są umieszczone mieszadła z napędem elektrycznym. Zbiorniki Z_1 i Z_2 napełnia się od dołu przez lejki dopływowe. Do dozowania wody rozcieńczającej roztwór znajdujący się w zbiornikach służy tłoczkowa mikropompka dozująca D .





Rys. 2.2. Schemat zestawu zbiorników do badania dynamicznych właściwości obiektów inercyjnych

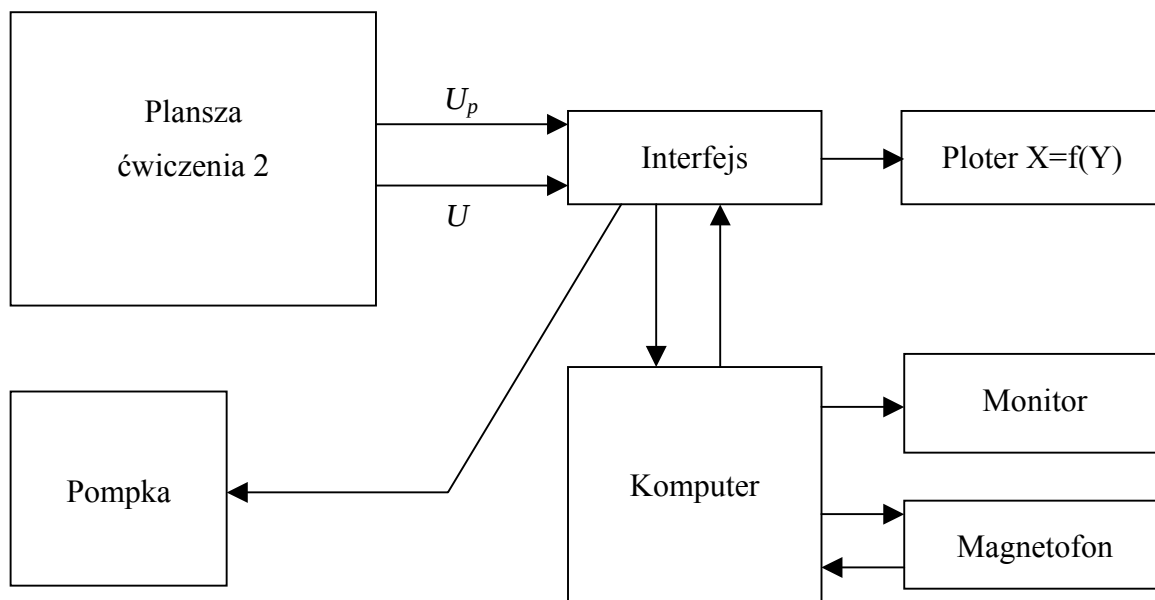
Uwaga ! Ćwiczenie może być wykonywane w dwóch wariantach. Całkowicie ręcznie lub ze wspomaganiem komputerowym. Obsługa ręczna jest stosowana wyłącznie w przypadku awarii układu komputerowego.

W celu umożliwienia korzystania ze wspomagającego mikrokomputera, sygnały napięciowe u i u_p z konduktometru doprowadzono dodatkowo do połączonego z komputerem specjalnego interfejsu (przetwornika analogowo-cyfrowego). Komputer jest wyposażony w monitor kontrolny wyświetlający niezbędne informacje oraz jest połączony z analogowym ploterem, wykreślającym wykresy i informacje tekstowe (rys.2.3).

Przed rozpoczęciem ćwiczenia w wersji ze wspomaganiem komputerowym należy poprosić laboranta o uruchomienie układu komputera!

Uważnie czytać wszystkie informacje wyświetlane na ekranie monitora!





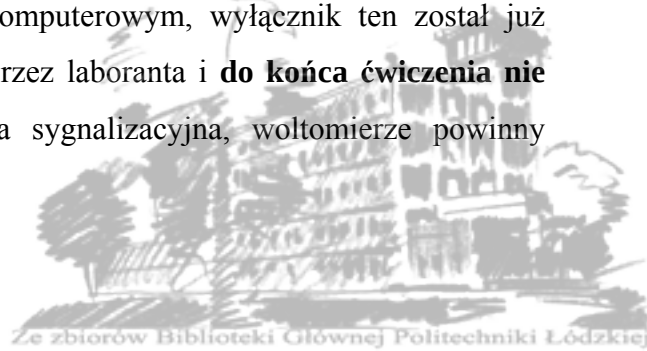
Rys. 2.3. Schemat komputerowego wspomaganie obsługi ćwiczenia

2.2. PRZYGOTOWANIE ROZTWORÓW

1. Przygotować podstawowy roztwór siarczanu miedziowego o stężeniu 0,8 %, rozpuszczając w naczyniu miarowym o pojemności 1 dm³ 12,5 g CuSO₄ · 5 H₂O w wodzie destylowanej. Do odważenia odczynnika należy użyć wagi technicznej.
2. Przygotować roztwór CuSO₄ o stężeniu 0,4 %, odmierzając do zlewki 250 cm³ roztworu o stężeniu 0,8 % i 250 cm³ wody destylowanej (rozcieńczyć roztwór podstawowy wodą w stosunku 1:1 . Zawartość zlewki wymieszać i zaznaczyć na zlewce stężenie roztworu.
3. Analogicznie przygotować z części roztworu o stężeniu 0,4 % roztwór o stężeniu 0,2 %, a dalej z części roztworu 0,2 % roztwór 0,1 % i w taki sam sposób roztwór o stężeniu 0,05 %.

2.3. NASTAWIANIE CZUŁOŚCI KONDUKTOMETRU

Pokrętko potencjometru *P* przekręcić w lewo do oporu i włączyć zasilanie z sieci wyłącznikiem *W*₁. Przy pracy ze wspomaganie komputerowym, wyłącznik ten został już włączony podczas uruchamiania układu komputera przez laboranta i **do końca ćwiczenia nie wolno go wyłączać!** Powinna świecić się lampka sygnalizacyjna, woltomierze powinny wskazywać zerowe wartości napięć *u* i *u_p*.



Przewód odpływowy z pojemnika roztworu Q umieścić w lejeczku nad czujnikiem konduktometrycznym. Pod wylot czujnika podstawić dużą zlewkę. Do pojemnika Q wlać około 250 cm^3 roztworu podstawowego o stężeniu $0,8\%$ CuSO_4 , włączyć kurkiem przepływ roztworu.

Po przepuszczeniu całej porcji roztworu przez czujnik konduktometryczny, należy tak ustawić pokrętkę potencjometru P , żeby osiągnąć górny zakres wskazań miernika M_p (wynik pomiaru i sygnalizacja prawidłowej wartości u są pokazywane na ekranie monitora komputera). W ten sposób uzyskuje się maksymalne nachylenie charakterystyki statycznej konduktometru i tym samym maksymalną czułość pomiaru. Zanotować wartość napięcia u , odpowiadającą maksymalnej wartości napięcia u_p . **Do końca pomiarów nie wolno już poruszać pokrętki potencjometru nastawiania napięcia u !**

2.4. KALIBROWANIE KONDUKTOMETRU

Kalibrowanie, czyli określenie przebiegu charakterystyki statycznej konduktometru polega na zbadaniu, jakie wartości napięcia u_p odpowiadają znanym stężeniom c roztworu w czujniku konduktometrycznym, przy danym, stałym napięciu u zasilającym konduktometr. W punkcie 2.3 określiliśmy wartość napięcia u_p dla roztworu o stężeniu $0,8\%$ CuSO_4 . Teraz do pojemnika Q należy wlać około 250 cm^3 roztworu o stężeniu $0,4\%$ CuSO_4 , uruchomić jego przepływ przez czujnik konduktometryczny i **po przepłynięciu całej porcji** odczytać z miernika wartość napięcia u_p odpowiadającą badanemu stężeniu - przy wspomaganie komputerowym nacisnąć klawisz „SPACE” mikrokomputera i zanotować wyświetloną na ekranie monitora wartość napięcia u_p .

W taki sam sposób należy określić wartości napięć u_p odpowiadające stężeniom $0,2$, $0,1$ i $0,05\%$ CuSO_4 . Kalibrowanie należy zakończyć przepuszczeniem przez czujnik konduktometryczny wody destylowanej, używanej do sporządzania roztworów (stężenie 0% CuSO_4). Wartość napięcia u_p nie musi być w tym przypadku równa zero, ze względu na obecność nawet w wodzie destylowanej śladowych ilości związków jonowych.

Po kalibrowaniu konduktometr jest przygotowany do ciągłych pomiarów stężenia i można by, korzystając z wykresu lub równania jego charakterystyki statycznej, wyposażyć woltomierz u_p w podziałkę wyskalowaną w procentach stężenia CuSO_4 . Pomiar byłby dokonywany analogową metodą wychyłową; możliwy byłby też pomiar ciągły, przepływowy.

Przy korzystaniu ze wspomaganie komputerowego, na ekranie monitora zostanie pokazana tabelka z wynikami pomiarów, a następnie wykres prostej regresji (obliczony metodą

najmniejszych kwadratów), równanie prostej regresji i wartość współczynnika korelacji liniowej między stężeniem c roztworu CuSO_4 i wartością napięcia wyjściowego u_p konduktometru.

2.5. BADANIE DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI OBIEKTÓW INERCYJNYCH

Jeżeli roztwór CuSO_4 nie dopływa do czujnika konduktometrycznego bezpośrednio, lecz przez zbiorniki pośrednie, to zmiana jego stężenia na dopływie do zbiorników nie spowoduje ustalenia się wskazań konduktometru natychmiast lecz po pewnym czasie, zależnym od pojemności zbiorników pośrednich oraz od natężenia przepływu roztworu. Zbiorniki stanowią więc obiekt o pewnej bezwładności - inercji.

Przepuszczając roztwór przez jeden zbiornik pośredni, otrzymamy obiekt inercyjny I rzędu (jednopojemnościowy). Jeżeli roztwór będzie dopływał do czujnika konduktometrycznego szeregowo przez dwa zbiorniki, otrzymamy obiekt inercyjny II rzędu (dwupojemnościowy). Warunkiem uzyskania prawidłowych charakterystyk obiektów inercyjnych jest dokładne mieszanie cieczy w zbiornikach (patrz też [1], rozdz. 16.3.2). Właściwości obiektów (członów) inercyjnych będziemy określać, dokonując na ich wejściu wymuszenia skokowego (nagłej zmiany stężenia dopływającego roztworu) i analizując przebieg odpowiedzi na wyjściu (zmianę stężenia roztworu wypływającego).

2.5.1. ODPOWIEŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO I RZĘDU

Przewód odpływowy z pojemnika Q umieścić w lejeczku na dopływie do pustego zbiornika przelewowego Z_1 . Do pojemnika wlać około 250 cm^3 podstawowego roztworu CuSO_4 o stężeniu $0,8 \%$. Przepuszczać roztwór szeregowo przez zbiornik Z_1 i czujnik konduktometryczny. Wskazania miernika M_p powinny się ustalić.

Przewód ssący mikropompki dozującej (D na rys. 2.2) należy zanurzyć w zlewce z dużym (ok. 1 dm^3) zapasem wody destylowanej. Wydajność pompki nastawić na $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ (praca ciągła, 40 tłoczeń na minutę, pojemność cylindra pompki 1 cm^3 - wartość 10,00 na śrubie mikrometrycznej). Zakończony haczykowato wylot przewodu tłoczącego pompki umieścić w oddzielnej zlewce, napełnić oraz przepłukać pompkę uruchamiając ją (tylko przy sterowaniu ręcznym!) przyciskiem „ON” (czerwonym) na ok. 1 minutę.



Przy korzystaniu ze wspomagania komputerowego, zgodnie z wytycznymi wyświetlanymi na ekranie monitora, przycisk „ON” wcisnąć na stałe, a pompkę uruchamiać i zatrzymywać korzystając z klawisza „SPACE” komputera.

Gdy w pojemniku Q zabraknie roztworu, zamknąć kurek, odwiesić przewód z pojemnika i włożyć haczykowaty wylot przewodu tłoczącego mikropompki do lejeczka dopływowego zbiornika Z_1 (rys. 2.2). Przygotować sekundomierz (tylko przy sterowaniu ręcznym!) i tabelkę na wyniki pomiarów.

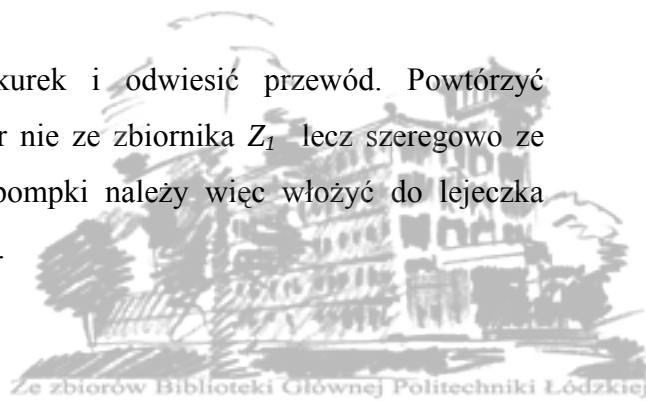
Przy ręcznej obsłudze zadania, w momencie przyjętym za początek mierzenia czasu włączyć pompkę dozującą wodę, zapisać wskazania woltomierza M_p w tym momencie i potem co 15 sekund. Gdy wartość u_p spadnie poniżej 10% pierwotnej, zakończyć doświadczenie zatrzymując pompkę. Opróżnić zbiornik Z_1 do zlewki, odhaczając lejeczek na jego dopływie.

Przy korzystaniu ze wspomagania komputerowego, należy postępować zgodnie z wytycznymi wyświetlanymi na ekranie monitora. Pompka zostanie uruchomiona automatycznie i automatycznie, co 15 s będzie dokonywany pomiar konduktywności roztworu opuszczającego zbiornik przelewowy. Wynik pomiaru zostanie przeliczony na stężenie CuSO_4 w procentach (z wykorzystaniem równania kalibrowania z rozdziału 2.4) i naniesiony na wykres na ekranie monitora. Wyniki pomiarów należy na bieżąco notować w tabelce, odczytując je (czas w sekundach i stężenie CuSO_4 w %) z ekranu monitora. Komputer sam zakończy doświadczenie, na wykres doświadczalny naniesie wykres będący wynikiem aproksymowania funkcyjnego (linia kropkowana), wyznaczy metodą graficzną parametry dynamiczne członu inercyjnego (stałą czasową i czas opóźnienia) oraz wykreśli je na papierze plotera.

2.5.2. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO II RZĘDU

Przewód odpływowy z pojemnika Q umieścić w lejeczku na dopływie do pustego zbiornika przelewowego Z_7 . Do pojemnika wlać około 400 cm^3 roztworu podstawowego CuSO_4 o stężeniu 0,8 % (w razie potrzeby przygotować nową porcję roztworu!). Przepuszczać roztwór szeregowo przez zbiorniki Z_2 , Z_1 i czujnik konduktometryczny; wskazania miernika M_p powinny się ustalić.

Po opróżnieniu pojemnika Q zamknąć kurek i odwiesić przewód. Powtórzyć doświadczenie z punktu A, wypierając wodą roztwór nie ze zbiornika Z_1 lecz szeregowo ze zbiorników Z_2 i Z_1 . Wylot przewodu tłoczącego pompki należy więc włożyć do lejeczka zasilającego zbiornik Z_2 . Pompki już nie przepłukiwać.



Przy ręcznej obsłudze zadania, po włączeniu pompki wartości u_p odczytywać przez pierwsze 3 minuty co 15 sekund, potem co 30 sekund, aż wskazania miernika M_p spadną poniżej 10 % pierwotnych. Zatrzymać pompkę.

Przy korzystaniu ze wspomagania komputerowego, należy postępować zgodnie z wytycznymi wyświetlanymi na ekranie monitora. Pompka znów zostanie uruchomiona automatycznie i automatycznie, co 15 s będzie dokonywany pomiar konduktywności roztworu opuszczającego zbiornik przelewowy. Wynik pomiaru zostanie przeliczony na stężenie CuSO_4 i naniesiony na wykres na ekranie monitora. Na wszelki wypadek (np. możliwość awarii układu komputerowego) również i na tym etapie wykonywania ćwiczenia wyniki pomiarów należy na bieżąco notować w tabelce, odczytując je (czas w sekundach i stężenie CuSO_4 w %) z ekranu monitora. Komputer znowu sam zakończy doświadczenie, na wykres doświadczalny naniesie wykres będący wynikiem aproksymowania funkcyjnego (linia kropkowana), wyznaczy metodą graficzną parametry dynamiczne członu inercyjnego (stałą czasową i czas opóźnienia) oraz wykreśli je na papierze plotera.

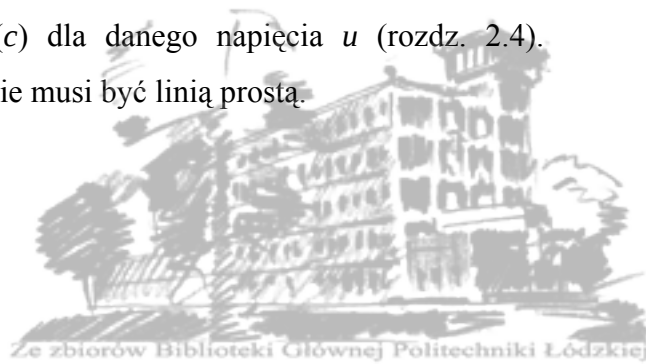
2.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Obrócić pokrętkę potencjometru P w lewo, aż do zaniku napięcia u . W przypadku korzystania ze wspomagania komputerowego postępować zgodnie z wytycznymi wyświetlanymi na ekranie monitora. Po zakończeniu działania plotera i układu komputerowego **nie wyłączać** zasilania całego układu konduktometru wyłącznikiem W_1 . Opróżnić i dokładnie przepłukać wodą destylowaną wszystkie zbiorniki i czujnik konduktometryczny. Zbiorniki pozostawić opróżnione. **Umyć wykorzystywane naczynia!**

2.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

2.7.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA KONDUKTOMETRU

Niezależnie od tego, czy korzystano ze wspomagania komputerowego, czy nie, sporządzić na papierze milimetrowym o formacie A-4 wykres zależności wskazań miernika konduktometru (u_p) od stężenia roztworu CuSO_4 (c) dla danego napięcia u (rozdz. 2.4). Ponieważ badano duży zakres stężeń CuSO_4 , wykres nie musi być linią prostą.



2.7.2. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO I RZĘDU

Korzystając z wykresu charakterystyki statycznej konduktometru $u_p = f(c)$ oraz tabeli z wynikami badania dynamicznych właściwości obiektu inercyjnego I rzędu $u_p = f(\tau)$ lub tylko $c = f(\tau)$ w przypadku korzystania z komputera (rozdz. 2.5.1), sporządzić na papierze milimetrowym o formacie A-4 wykres zależności $c = f(\tau)$. Wyznaczyć stałą czasową T badanego członu metodą pierwszą – sposobem graficznym ([1], rozdz. 16.2.3).

Następnie obliczyć stałą T metodą drugą – z nachylenia wykresu odpowiedzi na wymuszenie skokowe w danym punkcie ([1], rozdz. 16.2) zakładając, że poziom asymptoty wykresu Y_∞ wynosi $c_k = 0 \text{ \% CuSO}_4$:

$$T = \frac{c_k - c_x}{\left(\frac{dc}{d\tau}\right)_{c=c_x}} \quad (2.5)$$

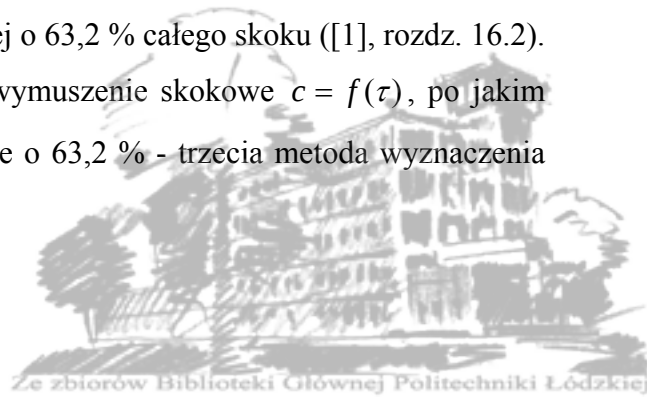
W tym celu należy wybrać trzy dowolne, sąsiednie trójki wyznaczonych punktów, w miejscach regularnego i stromego przebiegu wykresu odpowiedzi na wymuszenie skokowe. Sporządzić trzy tabelki z obliczeniami:

Tabela 2.1. Przykład obliczeń

Czas	[min] [s]	(przykładowo)		
		2 '	2'15"	2' 30"
Stężenie w danym momencie c_x	[%]	0,18	0,15	0,13
Szybkość spadku stężenia $dc/d\tau$	[%/min]	$(0,13-0,18) : 0,5 = -0,1$		
Stała czasowa układu T	[min]	$0,15 : 0,1 = 1,5$		

Z trzech wyliczonych wartości stałej czasowej T obliczyć średnią arytmetyczną T_{sr} .

W idealnym układzie inercyjnym I rzędu, po upływie czasu T od wymuszenia skokowego obserwuje się zmianę wielkości wyjściowej o 63,2 % całego skoku ([1], rozdz. 16.2). Sprawdzić i zaznaczyć na wykresie odpowiedzi na wymuszenie skokowe $c = f(\tau)$, po jakim czasie pierwotne stężenie CuSO_4 spadło rzeczywiście o 63,2 % - trzecia metoda wyznaczenia stałej czasowej członu inercyjnego.



2.7.3. ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE OBIEKTU INERCYJNEGO II RZĘDU

Sporządzić na papierze milimetrowym o formacie A-4 wykres zależności $c = f(\tau)$ obiektu inercyjnego II rzędu. Wyznaczyć zastępczy czas opóźnienia τ_{oz} i zastępczą stałą czasową T_z metodą graficzną (patrz [1], rozdz. 16.3.2, rys. 16.20).

2.8. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty, nie przerysowany z instrukcji schemat układu konduktometru z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- wykres charakterystyki statycznej $u_p = f(c)$ konduktometru,
- wykresy odpowiedzi na wymuszenie skokowe $c = f(\tau)$ (lub $u_p = f(\tau)$ jeśli nie korzystano ze wspomagania komputerowego) dla obu badanych członów – I i II rzędu,
- wyznaczenie stałej czasowej obiektu inercyjnego I rzędu trzema metodami,
- wyznaczenie T_z i τ_{oz} obiektu inercyjnego II rzędu sposobem graficznym,
- rysunek z plotera (jeśli korzystano ze wspomagania komputerowego)
- porównanie wyznaczonych wartości T , τ_{oz} i T_z różnymi metodami, w tym także podanych przez komputer (tabelka zbiorcza),
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń, wyników obliczeń i wykresów.



2.9. LITERATURA

Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów „Pomiary i automatyka” z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii 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@snack.p.lodz.pl

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



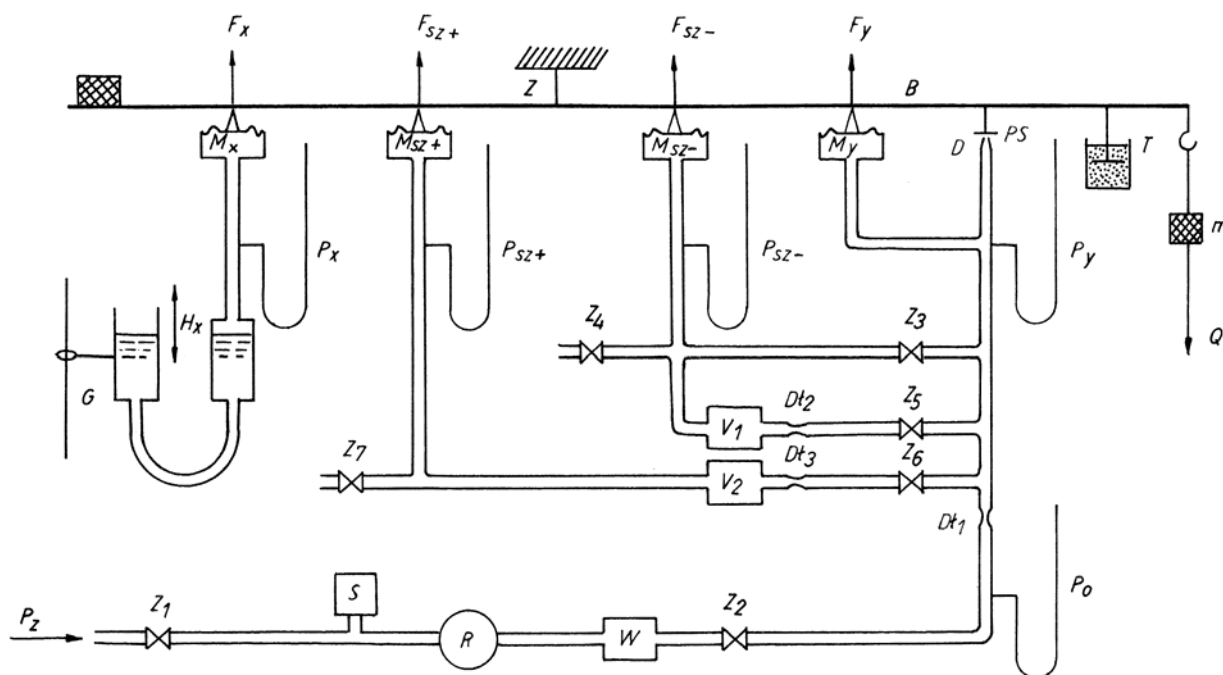
Copyright © 2004
All rights reserved

3. PNEUMATYCZNY PRZETWORNIK SIŁY - WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE

Cel zadania: *Poznanie budowy i działania modelu pneumatycznego przetwornika siły jako przetwornika pomiarowego i elementu składowego pneumatycznego regulatora PID.*

3.1. KONSTRUKCJA I DZIAŁANIE PRZYRZĄDU

Model pneumatycznego przetwornika siły przedstawiono schematycznie na rysunku 3.1. Podstawowym elementem przetwornika jest belka równoważni sił B , umocowana wahlwie na płaskiej sprężynie Z . Pod belką są umieszczone cztery membranowe przetworniki ciśnienia M , wywierające na nią siły F proporcjonalne do ciśnienia doprowadzonego powietrza. Odpowiednie ciśnienia powietrza P mierzą U-rurkowe manometry cieczowe.



Rys. 3.1. Model pneumatycznego przetwornika siły

Z prawej strony belki znajduje się kaskada pneumatyczna, składająca się z dławika Dt_1 , dyszy D , przesłony PS oraz membrany ujemnego sprzężenia zwrotnego M_y . Tłumik olejowy T tłumi ewentualne drgania belki. Kaskada jest zasilana powietrzem o ciśnieniu $P_0 \approx 3 \text{ kPa}$, doprowadzonym przez zawór zabezpieczający (ściskacz) Z_2 i filtr W z reduktora (stabilizatora)

ciśnienia R . Do reduktora dopływa przez zawór odcinający Z_1 powietrze o ciśnieniu $P_z = 250 \dots 300$ kPa ze stacji zasilania. Otwarcie zaworu Z_1 jest sygnalizowane przez optyczny sygnalizator ciśnienia S .

Działając na koniec belki równoważni siłą Q , np. przez zawieszenie ciężarka o masie m , dociskamy przesłonę do dyszy. Wzrost oporów wypływu powietrza z dyszy wywołuje podwyższanie się ciśnienia P_y i jednocześnie zwiększanie siły ujemnego sprzężenia zwrotnego F_y wskutek oddziaływania tego ciśnienia na belkę membrany M_y . Po zrównaniu się przeciwnie skierowanych momentów sił F_y i Q , wartość ciśnienia P_y ustala się. W ten sposób dzięki istnieniu ujemnego sprzężenia zwrotnego, ciśnienie wyjściowe kaskady P_y jest zawsze proporcjonalne do siły Q (patrz też [1], rozdz. 10.7.2.A).

Siła Q może być również wywierana przez działanie ciśnienia P_x na membranę M_x . Otrzymamy wówczas nie pneumatyczny przetwornik siły, lecz przetwornik ciśnienia, w którym ciśnienie wyjściowe P_y będzie proporcjonalne do ciśnienia wejściowego P_x . Z membraną M_x jest połączony zbiornik cieczy G . Przesuwając zbiornik w górę lub w dół można zmieniać poziom cieczy H_x i tym samym ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy P_x . Zmiany ciśnienia P_x są przetwarzane w przetworniku na zmiany ciśnienia P_y .

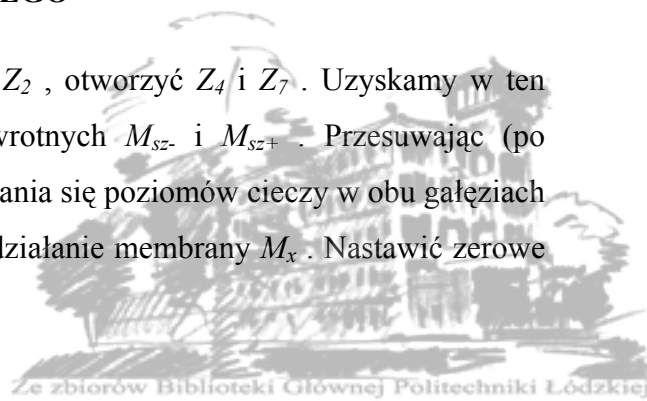
Otwarcie zaworu Z_3 powoduje przy zamkniętym zaworze Z_4 doprowadzenie powietrza o ciśnieniu P_y pod membranę M_{sz-} i powstanie dodatkowego proporcjonalnego, ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Otwarcie zaworu Z_5 , przy zamkniętych pozostałych zaworach w obwodzie sprzężenia zwrotnego, wytwarza inercyjne ujemne sprzężenie zwrotne, na skutek działania dławika Dl_2 , pojemności V_1 i membrany M_{sz-} . Podobnie, otwarcie zaworu Z_6 wytwarza inercyjne dodatnie sprzężenie zwrotne, na skutek działania dławika Dl_3 pojemności V_2 i membrany M_{sz+} .

Wymieniony system sprzężeń zwrotnych pozwala na kształtowanie statycznych i dynamicznych właściwości układu, co jest niezbędne przy zastosowaniu przetwornika siły lub ciśnienia jako przetwornika pomiarowego lub jako elementu składowego pneumatycznego regulatora PID.

3.2. URUCHOMIENIE UKŁADU POMIAROWEGO

Zamknąć zawory Z_1 Z_3 Z_5 Z_6 oraz ściskacz Z_2 , otworzyć Z_4 i Z_7 . Uzyskamy w ten sposób wyłączenie działania membran sprzężeń zwrotnych M_{sz-} i M_{sz+} . Przesuwając (po zluźnieniu śruby) zbiornik G , doprowadzić do zrównania się poziomów cieczy w obu gałęziach manometru P_x ($P_x = 0$). W ten sposób wyłączyliśmy działanie membrany M_x . Nastawić zerowe



wskazania wszystkich manometrów, przesuwając ich podziałki milimetrowe po zlurowaniu nakrętek. Odczytywać dolny menisk cieczy!

Sprawdzić, czy jest uruchomiona sprężarka stacji zasilania (spytać laboranta) i czy ciśnienie powietrza w stacji osiągnęło wartość 300 kPa (sprężarka wyłącza się wtedy automatycznie). Otworzyć **całkowicie** zawór odcinający Z_1 - zwrócić uwagę na działanie optycznego sygnalizatora ciśnienia S . Następnie **powoli**, żeby nie spowodować wydmuchnięcia cieczy z manometrów, otworzyć ściskacz Z_2 . Pokrętle reduktora ciśnienia R nastawić wartość ciśnienia zasilania $P_0 = 150 \pm 1$ mm (jednostki względne, wyniku nie mnożyć przez dwa!).

3.3. BADANIE PRZETWORNIKA SIŁY

3.3.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA

Należy określić zależność ciśnienia wyjściowego przetwornika P_y od wielkości siły Q działającej na koniec belki równoważni w stanie ustalonym. Siła Q może być zmieniana skokowo przez zmianę masy m ciężarków zawieszanych na haczyku belki.

Przy braku ciężarków na końcu belki, należy skorygować zerową wartość ciśnienia P_y , odpowiednio przesuwając podziałkę milimetrową. Następnie zawieszać na haczyku kolejno coraz więcej ciężarków 20-gramowych, zmieniając obciążenie końca belki od 0 do 200 g i notując w tabelce odpowiednie wartości ciśnienia P_y (jednostki względne - mm). Wartości masy m ciężarków przeliczyć (umieszczając wyniki obliczeń w tabelce) na siłę Q według wzoru 3.1, przyjmując wartość $g = 10$ m/s.

$$Q = m \cdot g \quad \left[kg \right] \cdot \left[\frac{m}{s^2} \right] = [N] \quad (3.1)$$

3.3.2. DODATKOWE UJEMNE SPRĘŻENIE ZWROTNE

Pomiary z punktu 3.3.1 należy powtórzyć po włączeniu dodatkowego proporcjonalnego, ujemnego sprzężenia zwrotnego. W tym celu pod membranę M_{sz} należy doprowadzić powietrze o ciśnieniu wyjściowym P_y przez zamknięcie zaworu Z_4 i otwarcie zaworu Z_3 . Wyniki pomiarów umieścić w tabelce.



3.3.3. WPLYW CIŚNIENIA POWIETRZA ZASILAJĄCEGO

W celu zbadania wpływu zmian ciśnienia powietrza zasilającego kaskadę pneumatyczną (P_0) na działanie pneumatycznego przetwornika siły, należy wyłączyć dodatkowe ujemne sprzężenie zwrotne (zamknąć zawór Z_3 i otworzyć Z_4) oraz obciążyć belkę równoważni jakąś siłą, np. $Q = 1$ N (powiesić na końcu belki 5 ciężarków). Odczytać wartość ciśnienia wyjściowego P_y przy ciśnieniu powietrza zasilającego $P_0 = 150$ mm. Następnie pokrętle reduktora ciśnienia podwyższyć ciśnienie P_0 o 20 mm i ponownie odczytać wartość P_y . To samo zrobić zmniejszając ciśnienie P_0 do 130 mm. Wniosek?

3.4. BADANIE PRZETWORNIKA CIŚNIENIA

3.4.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA

Ponownie nastawić wartość $P_0 = 150$ mm. Zdjąć wszystkie ciężarki z haczyka, siłę ciążenia ciężarków Q zastąpić parciem membrany M_x na przeciwległy koniec belki. Pod membranę M_x wytwarzać ciśnienie P_x podnosząc zbiornik z cieczą G (podwyższając poziom cieczy H_x). Blokując położenie zbiornika śrubą, nastawić po kolei $P_x = 10, 20, \dots 100 \pm 1$ mm. Notować w tabelce wartości P_x i P_y .

3.4.2. DODATKOWE UJEMNE SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Określić właściwości statyczne przetwornika $P_y = f(P_x)$ jak w punkcie 3.4.1 lecz z dodatkowym proporcjonalnym, ujemnym sprzężeniem zwrotnym, polegającym na skierowaniu powietrza o ciśnieniu P_y pod membranę M_{sz} . Sprzężenie włączamy zamykając zawór Z_4 i otwierając zawór Z_3 .

3.4.3. PRZESUNIĘCIE CHARAKTERYSTYKI STATYCZNEJ

Wyznaczyć $P_y = f(P_x)$ jak w punkcie 3.4.2 lecz z dodatkowym ciężarkiem 20 g na końcu belki ($Q_0 = 0,2$ N) i wyłączonym dodatkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym (otwarty zawór Z_4 i zamknięty Z_3).



3.5. KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH PRZETWORNIKA

Badany w rozdziałach 3.3 i 3.4 model pneumatycznego przetwornika siły i ciśnienia ma cechy przetwornika proporcjonalnego. Równanie jego charakterystyki statycznej jest równaniem prostej:

$$P_y = K \cdot P_x + P_{y0} \quad (3.2)$$

Wartość wzmocnienia K przetwornika (nachylenia charakterystyki statycznej) może być zmieniana przez zmianę głębokości (intensywności) ujemnego sprzężenia zwrotnego. Charakterystyka statyczna może być też przesuwana równolegle przez działanie na belkę równoważni dodatkową, stałą siłą Q_0 .

Charakterystyka dynamiczna (odpowieź na wymuszenie skokowe) przetwornika jest charakterystyką członu proporcjonalnego (patrz [1], rozdz. 16.2.1):

$$\frac{dP_y}{d\tau} = K \cdot \frac{dP_x}{d\tau} \quad (3.3)$$

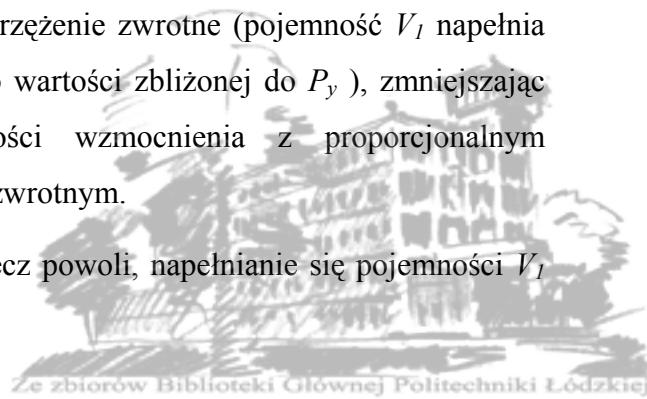
Wprowadzenie dodatkowego ujemnego sprzężenia zwrotnego nie zmienia przebiegu charakterystyki dynamicznej, ponieważ jest to sprzężenie proporcjonalne (bezinercyjne).

3.5.1. INERCYJNE UJEMNE SPRĘŻENIE ZWROTNE

Tego typu sprzężenie uzyskamy, doprowadzając powietrze o ciśnieniu P_y pod membranę dodatkowego ujemnego sprzężenia zwrotnego M_{sz} nie bezpośrednio przez zawór Z_3 lecz przez zawór Z_5 , dławik Dl_2 i pojemność V_I . W tym celu należy sprowadzić do zera wartość ciśnienia P_y ($P_x = 0$, $Q = 0$), otworzyć zawór Z_5 , zamknąć Z_4 (Z_3 i Z_6 również zamknięte). Dla uproszczenia czynności, do badania przetwornika posłużymy się nie ciśnieniem P_x lecz ponownie ciężarkami działającymi na koniec belki równoważni siłą Q .

Zawiesić na haczyku belki ciężarki działające siłą $Q = 2N$ (200 g) - ciężarki nie powinny się wahać. Ciśnienie P_y osiągnie natychmiast wartość wynikającą z charakterystyki statycznej przetwornika siły bez dodatkowego ujemnego sprzężenia zwrotnego, a następnie zacznie oddziaływać inercyjne dodatkowe ujemne sprzężenie zwrotne (pojemność V_I napęlnia się powoli powietrzem, P_{sz} wzrasta stopniowo aż do wartości zbliżonej do P_y), zmniejszając stopniowo wzmocnienie przetwornika do wartości wzmocnienia z proporcjonalnym (bezinercyjnym) dodatkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym.

Gdybyśmy siłę Q zwiększyli nie skokowo lecz powoli, napęlnianie się pojemności V_I



powietrzem nadążałoby za wzrostem ciśnienia P_y , ciśnienie P_{sz-} byłoby stale zbliżone do ciśnienia P_y i przetwornik miałby od razu wzmocnienie mniejsze, odpowiadające wzmocnieniu z włączonym proporcjonalnym dodatkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym.

Otrzymaliśmy więc przetwornik proporcjonalno-różniczkujący (PD) o przebiegu charakterystyk dynamicznych, zbliżonych do wykresów równań:

$$P_y = C \left(Q + T_D \frac{dQ}{d\tau} \right) \quad (3.4)$$

dla przetwornika siły lub:

$$P_y = K \left(P + T_D \frac{dP_x}{d\tau} \right) \quad (3.5)$$

dla przetwornika ciśnienia (por równanie 6.9).

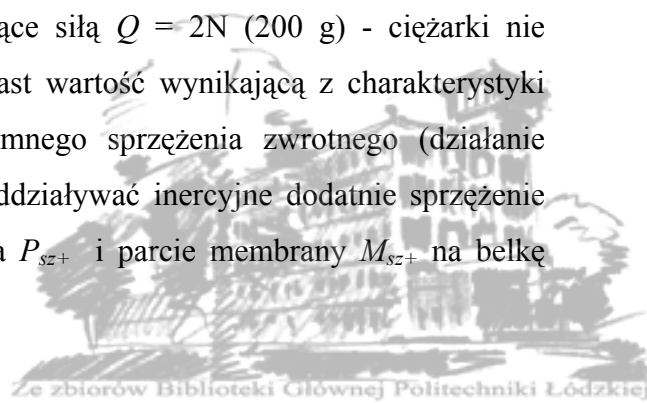
Ciśnienie wyjściowe P_y przetwornika jest proporcjonalne do wielkości sygnału wejściowego (Q lub P_x) oraz do szybkości zmian tego sygnału w czasie. Stała T_D określa intensywność różniczkującego działania przetwornika (por. [1], rozdz. 16.2.5).

W celu zbadania przebiegu charakterystyki dynamicznej (odpowiedzi na wymuszenie skokowe) układu, należy zdjąć ciężarki z haczyka belki i otwierając na chwilę zawór Z_4 zmniejszyć do zera wartość ciśnienia P_{sz-} . Przygotować sekundomierz i tabelkę z rubrykami τ i P_y . W czasie $\tau = 0$ zanotować wartość ciśnienia P_y i ostrożnie zawiesić ciężarki działające siłą $Q = 2N$ (200 g) na haczyku belki. Kontynuować odczytywanie wartości ciśnienia P_y co 5 sekund, aż do jego ustalenia się co najmniej na 30 sekund.

3.5.2. INERCYJNE DODATNIE SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Ten rodzaj sprzężenia uzyskamy, doprowadzając powietrze o ciśnieniu P_y pod membranę dodatniego sprzężenia zwrotnego M_{sz+} poprzez zawór Z_6 , dławik DL_3 i pojemność V_2 . W tym celu, przy zerowej wartości ciśnienia P_y ($P_x = 0$, $Q = 0$), otworzyć zawory Z_4 i Z_6 , a zamknąć Z_5 i Z_7 (Z_3 również zamknięty).

Zawiesić na haczyku belki ciężarki działające siłą $Q = 2N$ (200 g) - ciężarki nie powinny się wahać. Ciśnienie P_y osiągnie natychmiast wartość wynikającą z charakterystyki statycznej przetwornika siły bez dodatkowego ujemnego sprzężenia zwrotnego (działanie proporcjonalne przetwornika), a następnie zacznie oddziaływać inercyjne dodatnie sprzężenie zwrotne, podwyższając stopniowo wartość ciśnienia P_{sz+} i parcie membrany M_{sz+} na belkę



przetwornika. Ponieważ moment siły wywieranej przez membranę M_{sz+} dodaje się do momentu siły Q (sprężenie zwrotne dodatnie), zacznie również wzrastać ciśnienie wyjściowe P_y . Wzrost ten będzie trwał tak długo, jak długo będzie oddziaływała na belkę siła Q (lub do osiągnięcia stanu nasycenia przy $P_y \approx P_0$).

Otrzymaliśmy więc przetwornik proporcjonalno-całkujący (PI), o przebiegu charakterystyk dynamicznych (odpowiedzi na wymuszenia skokowe) zbliżonych do wykresów równań:

$$P_y = C \left(Q + \frac{1}{T_I} \int_0^{\tau} Q d\tau \right) \quad (3.6)$$

dla przetwornika siły lub:

$$P_y = K \left(P_x + \frac{1}{T_I} \int_0^{\tau} P_x d\tau \right) \quad (3.7)$$

dla przetwornika ciśnienia (por. równanie 6.13).

Ciśnienie wyjściowe P_y przetwornika jest proporcjonalne do wielkości sygnału wejściowego przetwornika (Q lub P_x) oraz do czasu trwania tego sygnału: całki z $Q d\tau$ lub z $P_x d\tau$. Stała T_I określa intensywność całkującego działania przetwornika (por. [1], rozdz. 16.2.6).

W celu zbadania przebiegu charakterystyki dynamicznej (odpowiedzi na wymuszenie skokowe) układu, należy zdjąć ciężarki z haczyka belki i otwierając na chwilę zawór Z_7 obniżyć do zera wartość ciśnienia P_{sz+} . Przygotować sekundomierz i tabelkę z rubrykami τ i P_y . W czasie $\tau = 0$ zanotować wartość P_y i ostrożnie zawiesić na haczyku belki ciężarki działające siłą $Q = 2\text{N}$ (200 g) - ciężarki nie powinny się wahać. Notować wartości P_y co 5 sekund, aż do osiągnięcia $P_y = 100\text{ mm}$. W tym momencie zakończyć doświadczenie i zdjąć ciężarki z haczyka.

3.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Ciężarki umieścić w pojemniku. Opróżnić pojemności V z powietrza przez zamknięcie zaworów Z_3 , Z_5 i Z_6 , a otwarcie Z_4 i Z_7 . Zamknąć dopływ powietrza zasilającego ściskaczem Z_2 , a następnie zaworem Z_1 . Sprawdzić i ewentualnie nastawić zerową wartość ciśnienia P_x .



3.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

3.7.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA PRZETWORNIKA SIŁY

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 3.3.1, sporządzić wykres zależności $P_y = f(Q)$. Z nachylenia wykresu charakterystyki obliczyć wzmocnienie przetwornika:

$$C_1 = \frac{\Delta P_y}{\Delta Q} \quad [\text{mm} \cdot \text{N}^{-1}] \quad (3.8)$$

W tym samym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykreślić charakterystykę statyczną $P_y = f(Q)$ przetwornika z dodatkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym (punkt 3.3.2). Z nachylenia charakterystyki obliczyć wzmocnienie tego przetwornika C_2 (równanie 3.8). Obliczyć również współczynnik dodatkowego sprzężenia zwrotnego α :

$$\alpha = \frac{C_2}{C_1} \quad (3.9)$$

3.7.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA PRZETWORNIKA CIŚNIENIA

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 3.4.1, sporządzić wykres zależności $P_y = f(P_x)$. Z nachylenia charakterystyki obliczyć wzmocnienie przetwornika:

$$K_1 = \frac{\Delta P_y}{\Delta P_x} \quad (3.10)$$

W tym samym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykreślić charakterystykę statyczną $P_y = f(P_x)$ przetwornika z dodatkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym (punkt 3.4.2). Z nachylenia charakterystyki obliczyć według równania 3.10 wzmocnienie tego przetwornika K_2 . Również w tym samym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykreślić charakterystykę statyczną przetwornika $P_y = f(P_x)$ z dodatkową siłą Q_0 działającą na koniec belki równoważni (rozdział 3.4.3). Obliczyć wzmocnienie tego przetwornika K_3 (równanie 3.10) oraz przesunięcie charakterystyki P_{y0} :

$$(P_{y0} = P_y)_{P_x=0} \quad (3.11)$$



Obliczyć również współczynnik dodatkowego sprzężenia zwrotnego:

$$\beta = \frac{K_2}{K_1} \quad (3.12)$$

Znając wartości liczbowe K_1 i P_{y0} napisać równanie pneumatycznego przetwornika ciśnienia bez dodatkowego ujemnego sprzężenia zwrotnego i z przesuniętą charakterystyką statyczną (równanie 3.2).

3.7.3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE PRZETWORNIKA

Korzystając z wyników doświadczeń z rozdziału 3.5.1, sporządzić wykres zależności $P_y = f(\tau)$. Wykres powinien rozpoczynać się w punkcie $\tau = 0$. Jest to wykres odpowiedzi na wymuszenie skokowe (charakterystyki dynamicznej skokowej) przetwornika z inercyjnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym (o właściwościach proporcjonalno-różniczkujących PD).

Na ten sam rysunek nanieść wykres zależności $P_y = f(\tau)$ - charakterystykę dynamiczną skokową przetwornika z inercyjnym dodatnim sprzężeniem zwrotnym (o właściwościach proporcjonalno-całkujących PI) - rozdział 3.5.2. Wykres powinien rozpoczynać się w punkcie $\tau = 0$.

3.8. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty, nie przerysowany z instrukcji schemat pneumatycznego proporcjonalnego przetwornika siły z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- wykresy charakterystyk statycznych i dynamicznych przetwornika,
- obliczenia wartości wzmacnień C i K oraz współczynników α i β ,
- równanie pneumatycznego przetwornika ciśnienia,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.



3.9. LITERATURA

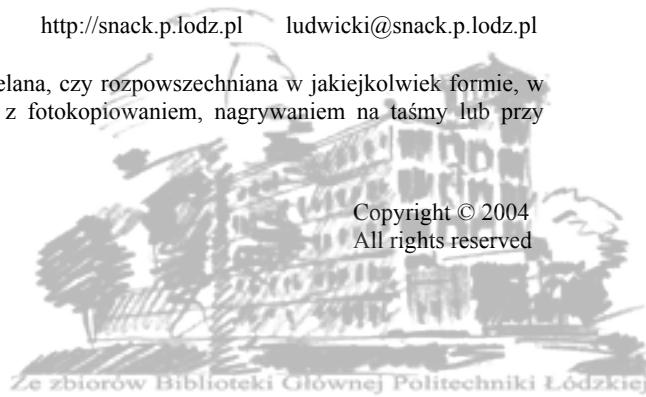
Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii oraz książki:

- [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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved

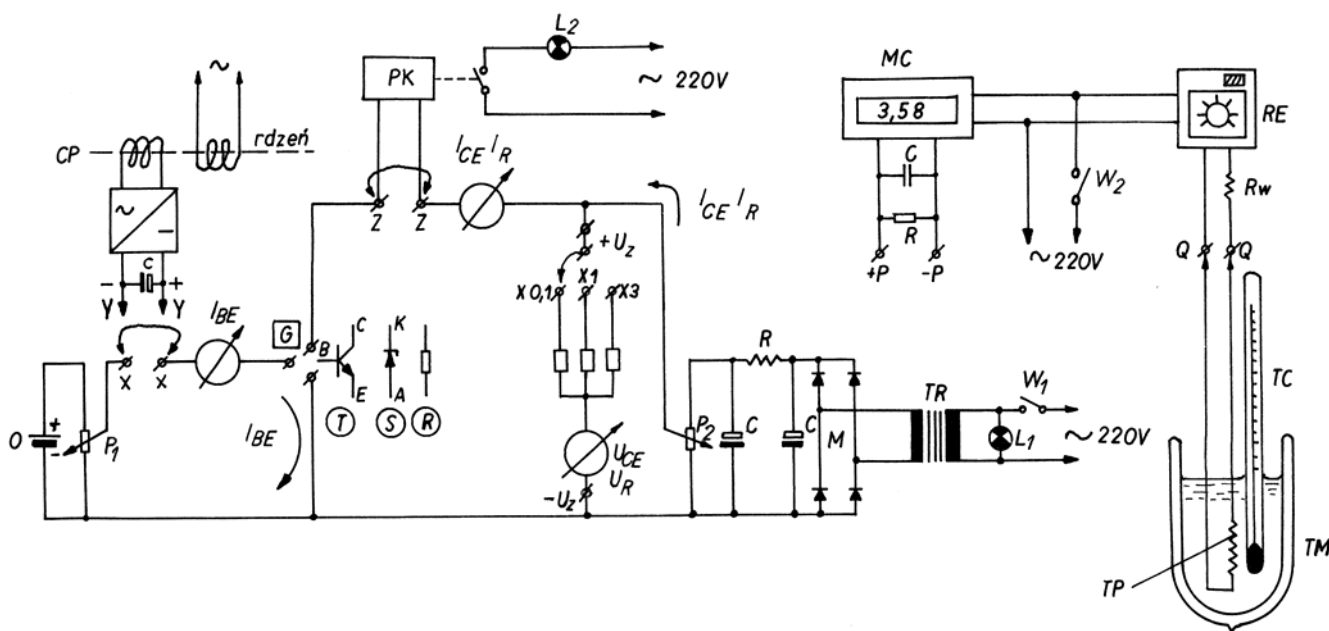


4. WZMACNIACZ I REGULATOR ELEKTRONICZNY

Cel zadania: Poznanie podstawowych właściwości i zastosowań niektórych elektronicznych elementów automatyki: tranzystora, stabilistora, fotorezystora, przekaźnika, czwórnika RC. Badanie statycznych i dynamicznych właściwości elektronicznego regulatora impulsowego.

4.1. UKŁAD POMIAROWY

Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 4.1. W gnieździe pomiarowym G może być umieszczony tranzystor T , stabilistor S lub rezystor R . Podczas doświadczeń z tranzystorem, jego obwód kolektor - emiter jest zasilany z sieci elektrycznej przez transformator TR , mostkowy prostownik pełnokresowy M i filtr wygładzający RC . Wartość napięcia U_{CE} może być nastawiana dzielnikiem (wielobrotowym potencjometrem) P_2 i mierzona woltomierzem. Woltomierz U_{CE} posiada trzy zakresy pomiarowe: $\times 0,1$; $\times 1$ i $\times 3$ V. Wartość natężenia prądu w obwodzie kolektora I_{CE} jest mierzona miliamperomierzem.



Rys. 4.1. Schemat układu pomiarowego wzmacniacza i regulatora elektronicznego



Obwód baza - emiter tranzystora jest zasilany z ogniwa O przez nastawiany dzielnik (potencjometr) P_1 i miernik natężenia prądu I_{BE} . W opisanym układzie pomiarowym można określać wzajemne relacje między napięciem U_{CE} , prądem I_{CE} oraz prądem I_{BE} , czyli badać charakterystykę statyczną (właściwości wzmacniające) tranzystora.

W obwód kolektora tranzystora może być włączone (po rozwarciu gniazd $Z - Z$) uzwojenie przekaźnika elektromagnetycznego PK , sterującego świeceniem lampki L_2 . W obwód bazy może być włączany (po rozwarciu gniazd $X - X$) transformatorowy czujnik przesunięcia liniowego CP lub inny czujnik.

Podczas doświadczeń ze stabilistorem, miernik U_{CE} mierzy napięcie wsteczne U_R , a miernik I_{CE} prąd wsteczny I_R stabilistora. W takim układzie pomiarowym można badać właściwość stabilizowania napięcia przez stabilistor.

W czasie doświadczeń z rezystorem, obydwa mierniki mierzą napięcie i natężenie prądu płynącego przez rezystor i umożliwiają sprawdzenie liniowości układu pomiarowego.

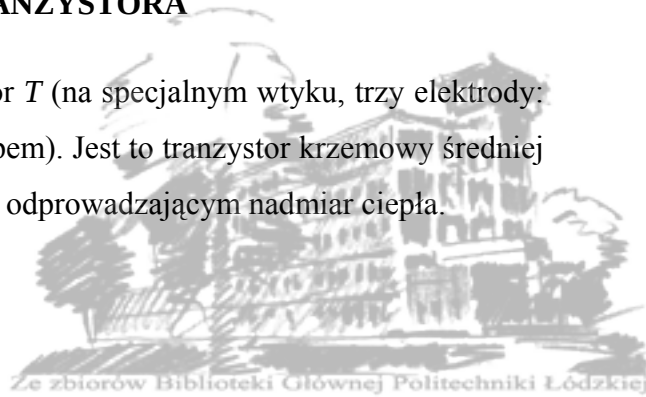
W układzie pomiarowym znajduje się również inercyjny czwórnik RC , połączony z woltomierzem cyfrowym MC . Łącząc gniazda $+P$ i $-P$ wejścia czwórnik ze źródłem napięcia stałego $+U_z$ i $-U_z$ ładujemy kondensator C do określonego napięcia i następnie po przerwaniu obwodu zasilającego (skokowym wymuszeniu spadku napięcia ładującego kondensator) możemy badać charakterystykę dynamiczną rozładowywania się kondensatora przez rezystancję R .

Osobnym elementem układu pomiarowego jest elektroniczny, impulsowy regulator temperatury RE z platynowym czujnikiem rezystancyjnym TP umieszczonym wraz z cieczowym termometrem wzorcowym TC w termosie TM , wypełnionym cieczą (olejem) o stałej temperaturze. Zmieniając zadaną wartość regulatora w (zadany poziom temperatury), można zmieniać odchylenie regulacji e i badać statyczne i dynamiczne właściwości regulatora (patrz [1], rozdz. 17.1.1 i 18.1.3).

Wszystkie zewnętrzne obwody elektryczne układu są zasilane obniżonym napięciem (maksimum 25 V), bezpiecznym w przypadku dotknięcia instalacji ręką.

4.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TRANZYSTORA

Umieścić w gnieździe pomiarowym tranzystor T (na specjalnym wtyku, trzy elektrody: kolektor C , baza B , emiter E , emiter oznaczony występem). Jest to tranzystor krzemowy średniej mocy, n-p-n, typu BC-211, z aluminiowym radiatorem odprowadzającym nadmiar ciepła.



Zamknąć obwód baza - emiter przez zwarcie gniazd $X - X$ oraz wyłączyć z obwodu kolektor - emiter uzwojenie przekątnika PK przez zwarcie gniazd $Z - Z$. Pokręćla obu potencjometrów P_1 i P_2 przekręcić ostrożnie w lewo do oporu, wyłączyć wyłącznik W_2 i włączyć wyłącznikiem W_1 zasilanie układu pomiarowego. Powinna zaświecić się lampka sygnalizacyjna.

Przygotować następującą tabelę:

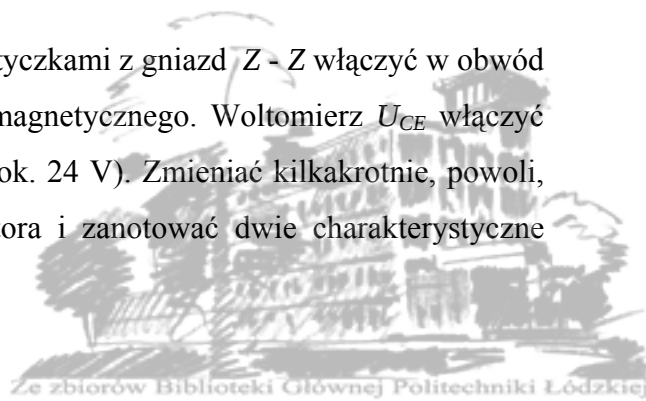
Tabela 4.1. Wyniki pomiarów

Kolektor Baza		Napięcie kolektora U_{CE} [V]			
		1	6	12	18
		Prąd kolektora I_{CE} [mA]			
Prąd bazy I_{BE} [μA]	20				
	40				
	60				
	80				
	100				
	120				
	140				

Pokręćłem potencjometru P_1 nastawić wartość prądu bazy $I_{BE} = 20 \mu A$. Zmieniając pokręćłem potencjometru P_2 napięcie U_{CE} zgodnie z drugim wierszem tabeli 4.1 (przełączać zakresy woltomierza!), odczytywać odpowiednie wartości prądu kolektora I_{CE} , wypełniając tabelę. To samo wykonać po nastawieniu kolejno $I_{BE} = 40, 60 \dots 140 \mu A$. Ze względu na wzajemny wpływ U_{CE} i I_{BE} , przed każdym odczytem wartości I_{CE} sprawdzić i ewentualnie skorygować wartości U_{CE} i I_{BE} . **Gdyby wartość I_{CE} przekroczyła 15 mA (zakres pomiarowy miliamperomierza), rubryki tabelki nie wypełniać!**

4.3. TRANZYSTOROWY WZMACNIACZ PRZEKĄŹNIKOWY

Nastawić $I_{BE} = 0 \mu A$. Wyjmując przewód z wtyczkami z gniazd $Z - Z$ włączyć w obwód kolektora tranzystora uzwojenie przekątnika elektromagnetycznego. Woltomierz U_{CE} włączyć na zakres $\times 3$ i nastawić napięcie U_{CE} na maksimum (ok. 24 V). Zmieniać kilkakrotnie, powoli, w obu kierunkach wartości prądu bazy I_{BE} tranzystora i zanotować dwie charakterystyczne



wartości prądu I_{CE} płynącego przez uzwojenie przekąźnika:

"prąd zadziałania" I_{zd} - najmniejszy prąd, przy którym przekąźnik zwiera styki (zaświecenie się lampki L_2 przy zwiększaniu prądu I_{CE}),

"prąd zwalniania" I_{zw} - największy prąd, przy którym przekąźnik zwalnia styki (zgaśnięcie lampki L_2 przy zmniejszaniu prądu I_{CE}).

Różnica $I_{zd} - I_{zw} = I_h$ jest prądem histerezy działania przekąźnika.

4.3.1. FOTOELEKTRYCZNY PRZETWORNIK PRZESUNIĘCIA

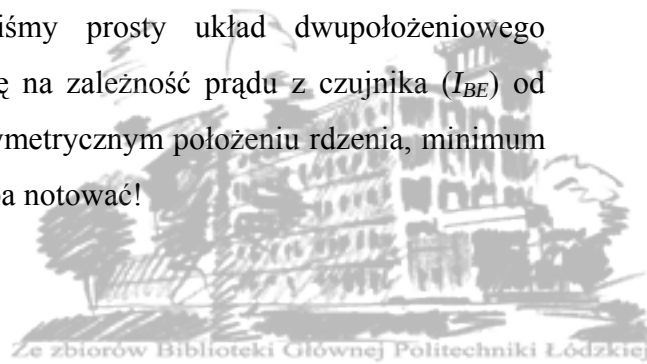
Nastawić $I_{BE} = 0 \mu A$. Do gniazd $X - X$ podłączyć fotorezystor (rezystor, którego rezystancja jest funkcją natężenia oświetlenia). Pozostawić maksymalną wartość napięcia U_{CE} . Wycelować fotorezystor na okno lub na lampę oświetleniową i tak dobrać wartość prądu I_{BE} żeby przekąźnik reagował na zasłanianie fotorezystora. Żadnych wielkości nie trzeba notować! Otrzymaliśmy prosty układ dwupołożeniowego fotoelektrycznego przetwornika przesunięcia liniowego.

4.3.2. KONDUKTOMETRYCZNY PRZETWORNIK POZIOMU CIECZY

Zamiast fotorezystora włączyć w gniazda $X - X$ dwie miedziane blaszki - elektrody. Przy nadal maksymalnym napięciu U_{CE} , nastawiać pokrętelem coraz większe wartości prądu I_{BE} i zanurzać elektrody w zleweczce z wodą wodociągową (!). Doprowadzić do reagowania przekąźnika na zanurzanie elektrod w wodzie. Żadnych wielkości nie trzeba notować! Otrzymaliśmy prosty układ dwupołożeniowego, konduktometrycznego przetwornika poziomu cieczy.

4.3.3. TRANSFORMATOROWY PRZETWORNIK PRZESUNIĘCIA

Wartość prądu I_{BE} zmniejszyć do zera. W gniazda $X - X$ włożyć wtyczki $Y - Y$ transformatorowego czujnika przesunięcia ("+" w stronę bazy tranzystora). Obserwować działanie przekąźnika w obwodzie kolektora tranzystora, przy wkładaniu i wyjmowaniu żelaznego rdzenia z cewek czujnika. Otrzymaliśmy prosty układ dwupołożeniowego przetwornika przesunięcia liniowego. Zwrócić uwagę na zależność prądu z czujnika (I_{BE}) od położenia rdzenia w cewkach - maksimum I_{BE} przy symetrycznym położeniu rdzenia, minimum przy wysuniętym rdzeniu. Żadnych wielkości nie trzeba notować!



4.4. ELEKTRONICZNA STABILIZACJA PRĄDU I NAPIĘCIA

4.4.1. REZYSTOR W OBWODZIE PRĄDU STAŁEGO

Wartość napięcia z zasilacza zmniejszyć potencjometrem P_2 do zera, zewrzeć gniazda Z - Z i umieścić w gnieździe pomiarowym wtyk z rezystorem. Podwyższając napięcie z zasilacza od 0 do 2 V, notować w tabelce wartości prądu płynącego przez rezystor. Pomiary zakończyć, jeżeli natężenie prądu przekroczy 15 mA.

4.4.2. DZIAŁANIE STABILISTORA

Wartość napięcia z zasilacza zmniejszyć potencjometrem P_2 do zera. Umieścić w gnieździe pomiarowym stabilistor (na specjalnym wtyku, dwie elektrody - anoda A i katoda K, anoda oznaczona występem). Jest to specjalna dioda krzemowa (tzw. dioda Zenera) typu BZP-611, polaryzowana w kierunku zaporowym ("+" na katodę). Dioda ta zaczyna przewodzić prąd elektryczny dopiero po przekroczeniu napięcia stabilizacji U_S .

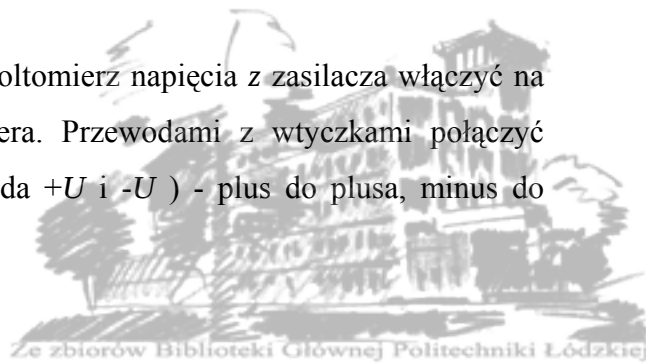
Wykonać pomiary prądu wstecznego stabilistora (I_R) podwyższając napięcie wsteczne U_R od zera do 2 V. Jeżeli napięcie U_R przestanie wzrastać mimo obracania pokrętle potencjometru (wejście w zakres stabilizacji), należy kontynuować pomiary, zmieniając wartości prądu I_R od 0 do 10 mA co 2 mA i notując w tabelce wartości U_R .

4.4.3. TRANZYSTOR JAKO STABILIZATOR PRĄDU

Obniżyć potencjometrem P_2 napięcie z zasilacza do zera. Zewrzeć gniazda X - X (gniazda Z - Z również zwarte). Umieścić w gnieździe pomiarowym tranzystor i nastawić pokrętle potencjometru P_1 prąd bazy $I_{BE} = 30 \mu A$. Nie poruszając pokrętła P_1 wykonać pomiary prądu kolektora I_{CE} dla napięć U_{CE} zmienianych od 0 do 18 V co 2 V. Powtórzyć pomiary po nastawieniu $I_{BE} = 50 \mu A$.

4.5. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE INERCYJNEGO CZWÓRNIKA RC

Wyjąć tranzystor z gniazda pomiarowego, woltomierz napięcia z zasilacza włączyć na zakres $\times 1$. Napięcie z zasilacza zmniejszyć do zera. Przewodami z wtyczkami połączyć czwórnik RC (gniazda +P i -P) z zasilaczem (gniazda +U i -U) - plus do plusa, minus do



minusa. Włączyć zasilanie woltomierza cyfrowego wyłącznikiem W_2 .

Obracając **bardzo wolno** pokrętką nastawiania napięcia z zasilacza (P_2), nastawić na woltomierzu cyfrowym wskazania $3,50 \pm 0,01$ V. Jeżeli napięcie wejściowe czwórnika oznaczmy przez U_x , a napięcie wyjściowe przez U_y , to otrzymaliśmy $U_y = U_x = 3,50$ V.

W momencie $\tau = 0$ uruchomić sekundomierz i wyjąć wtyczkę przewodu zasilacza z gniazda $+P$ czwórnika RC . W tej chwili $U_x = 0$, $U_y = 3,50$ V i kondensator C zaczyna rozładowywać się przez rezystancję R od napięcia U_y do zera. Co 10 sekund notować wskazania woltomierza cyfrowego, aż do osiągnięcia $U_y = 0,00$ V. Powyższe pomiary powtórzyć po naładowaniu kondensatora do niższego napięcia $U_y = U_x = 2,50 \pm 0,01$ V.

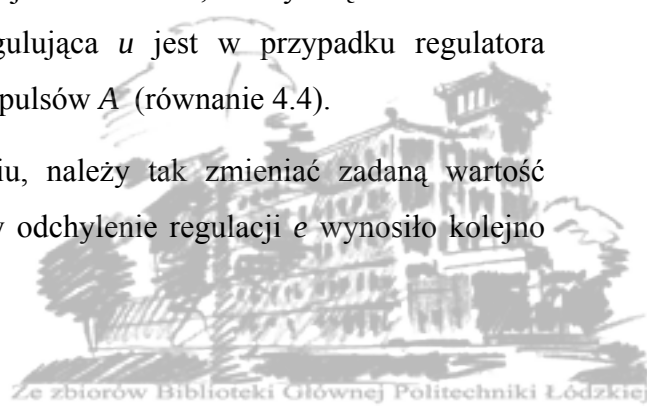
4.6. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE ELEKTRONICZNEGO REGULATORA IMPULSOWEGO

Badany regulator typu $RE-5$, produkcji zakładów MERA-LUMEL, jest elektronicznym impulsowym regulatorem temperatury (patrz [1], rozdz. 18.1.3), z czujnikiem rezystancyjnym (rezystor platynowy 100Ω) i przekaźnikowym, dwupołożeniowym wyjściem prądowym do sterowania grzejnikiem elektrycznym w regulowanym obiekcie. Wewnętrzne, inercyjne sprzężenie zwrotne nadaje regulatorowi charakter zbliżony do proporcjonalnie-różniczkującego (PD), w niewielkim zakresie wokół wartości zadanej (zakresie proporcjonalności). Poza tym zakresem regulator działa jak dwupołożeniowy.

Do gniazd $Q - Q$ wejścia regulatora włożyć wtyczki czujnika temperatury, umieszczonego wraz z termometrem wzorcowym w termosie wypełnionym olejem. Zwrócić uwagę na obecność w obwodzie termometrycznym rezystora wyrównawczego R_w , przedstawiającego wraz z przewodami łączącymi czujnik z regulatorem znormalizowaną rezystancję linii $R_L = 10 \Omega$.

Charakterystyką statyczną regulatora jest funkcja: $u = f(w - y) = f(e)$, gdzie e jest odchyleniem regulacji, w - wartością wielkości zadanej temperatury, nastawioną w regulatorze, a y wartością wielkości regulowanej temperatury oleju w termosie, odczytaną z termometru wzorcowego z dokładnością $0,5^\circ\text{C}$. Wielkość regulująca u jest w przypadku regulatora impulsowego równa współczynnikowi wypełnienia impulsów A (równanie 4.4).

Przy włączonym wyłącznikiem W_2 zasilaniu, należy tak zmieniać zadaną wartość w temperatury nastawianą pokrętką regulatora, żeby odchylenie regulacji e wynosiło kolejno



0; +0,5; +1,0; +2,0; +3,0; +4,0 oraz -0,5; -1,0; -2,0; -3,0; -4,0 °C ($e = w - y$, $y = \text{const.}$).

Po każdej zmianie wartości w należy odczekać co najmniej 3 minuty na ustalenie się pracy regulatora (wyeliminowanie jego działania różniczkującego). Następnie przy użyciu sekundomierza należy określić dwa charakterystyczne odcinki czasu:

τ_a - czas trwania załączenia napięcia na wyjściu regulatora (świeci się lampka w regulatorze) oraz

τ_b - czas trwania wyłączenia napięcia na wyjściu regulatora (lampka w regulatorze zgaszona).

Dla każdej nastawionej wartości e należy zmierzyć po trzy czasy τ_a i τ_b oraz obliczyć ich średnią arytmetyczną. Jeżeli wartość τ_a przekracza 3 min, przyjąć że $\tau_b = 0$ ($A = 100\%$). Jeżeli wartość τ_b przekracza 3 minuty, przyjąć, że $\tau_a = 0$ ($A = 0$ - patrz równanie 4.4). Wszystkie wyniki pomiarów zebrać w tabelce.

4.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Wyłączyć wyłączniki W_2 i W_1 . Zewrzeć gniazda $X - X$ oraz $Z - Z$. Pozostałe przewody, tranzystor, rezystor, stabilistor, fotorezystor, elektrody konduktometryczne włożyć do pudełka.

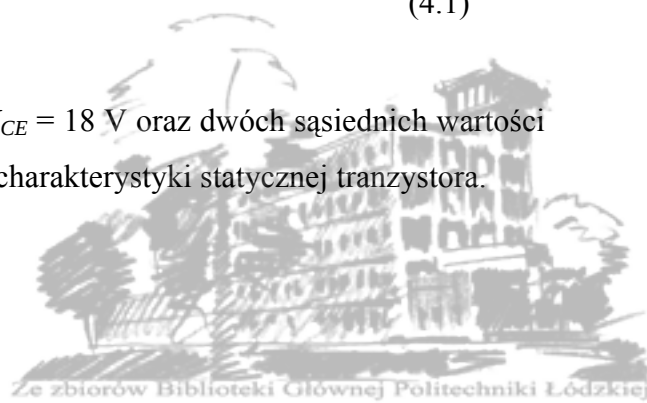
4.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

4.8.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TRANZYSTORA

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 4.2, sporządzić we wspólnym układzie współrzędnych wykres charakterystyki statycznej tranzystora $I_{CE} = f(I_{BE})$ przy wszystkich nastawianych wartościach U_{CE} . Obliczyć wartość współczynnika wzmocnienia tranzystora (β) w badanym układzie według wzoru:

$$\beta = \frac{\Delta I_{CE}}{\Delta I_{BE}} \quad (4.1)$$

Obliczenie wykonać dla napięcia kolektora $U_{CE} = 18\text{ V}$ oraz dwóch sąsiednich wartości I_{BE} na prostoliniowym, środkowym odcinku wykresu charakterystyki statycznej tranzystora.



4.8.2. ELEKTRONICZNA STABILIZACJA NAPIĘCIA I PRĄDU

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 4.4.1 wykreślić zależność $I = f(U)$ dla rezystora w obwodzie prądu stałego. Z prawa Ohma obliczyć wartości rezystancji R rezystora dla wszystkich badanych napięć i prądów oraz dopisać je do tabelki. Obliczyć średnią arytmetyczną rezystancji R_{sr} . Zbadaliśmy liniowość układu pomiarowego i metodą techniczną określiliśmy wartość rezystancji R_{sr} .

W tym samym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykreślić zależność $I_R = f(U_R)$ dla stabilizatora (punkt 4.4.2). Znaleźć charakterystyczne dla danego stabilizatora napięcie stabilizacji U_S , w punkcie przecięcia się stycznej do najbardziej stromego odcinka charakterystyki z osią odciętych. Z prawa Ohma obliczyć wartości rezystancji stabilizatora dla wszystkich badanych napięć i prądów oraz dopisać je do tabelki.

Również w tym samym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykreślić zależność $I_{CE} = f(U_{CE})$ dla obu nastawianych wartości prądu I_{BE} tranzystorowego stabilizatora prądu (punkt 4.4.3). Znaleźć wartości stabilizowanego prądu I_S w punktach przecięcia się stycznych do najbardziej płaskich odcinków charakterystyk z osią rzędnych. Płaski odcinek charakterystyki znajduje się w obszarze nasycenia kolektora tranzystora i jest najdłuższy przy niewielkich prądach bazy. W tych warunkach tranzystor pracuje jako tzw. źródło prądowe. Zmieniając wartość prądu bazy można zmieniać wartość stabilizowanego prądu I_S .

Z prawa Ohma obliczyć wartości rezystancji tranzystora dla wszystkich badanych napięć i prądów oraz dopisać je do tabelki.

4.8.3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE INERCYJNEGO CZWÓRNIKA RC

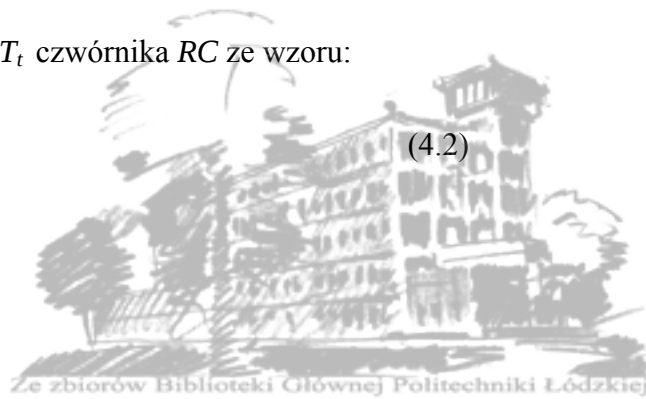
Na wspólnym rysunku wykreślić charakterystyki dynamiczne skokowe $U_y = f(\tau)$ czwórnika RC dla obu badanych początkowych napięć U_x (punkt 4.5). Wyznaczyć doświadczalne stałe czasowe T czwórnika dwiema metodami:

- graficznie, według [1], rozdz. 16.2.3,
- z wartości charakterystyki skokowej w punkcie $\tau = T$ (wg [1], rozdz. 16.2.3).

Obliczyć teoretyczną wartość stałej czasowej T_t czwórnika RC ze wzoru:

$$T_t \text{ [s]} = R \text{ [\Omega]} \cdot C \text{ [F]} \quad (4.2)$$

zakładając, że $R = 11 \text{ M}\Omega$ i $C = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$.



Obliczyć częstotliwość graniczną czwórnika f_{gr} , powyżej której układ inercyjny RC zaczyna działać jak filtr dolnoprzepustowy (np. filtr wygładzający w zasilaczu sieciowym napięcia stałego). Filtr taki zmniejsza amplitudę napięcia o częstotliwościach większych od f_{gr} :

$$f_{gr} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot T} \quad (4.3)$$

4.8.4. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE ELEKTRONICZNEGO REGULATORA IMPULSOWEGO RE-5

Korzystając z wyników doświadczeń wykonanych w punkcie 4.6, obliczyć współczynnik wypełnienia impulsów regulatora A dla każdej badanej wartości odchylenia regulacji e (równanie 4.4). Współczynnik ten przedstawia procentowe wykorzystanie mocy grzejnika w układzie regulacji z impulsowym regulatorem temperatury. Należy zauważyć, że w ćwiczeniu badaliśmy układ regulatora bez podłączonego urządzenia wykonawczego (grzejnika), a więc w warunkach statycznych (w dynamicznym układzie regulacji, świecenie lampki regulatora jednocześnie włączało by grzejnik podgrzewający wnętrze termosu, w którym jest umieszczony czujnik temperatury).

$$A = \frac{\tau_a}{\tau_a + \tau_b} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.4)$$

Sporządzić wykres charakterystyki statycznej regulatora $A = f(e)$, (przykład wykresu pokazuje rys. 18.6 w rozdz. 18.1.3 [1]).

Z wykresu wyznaczyć zakres proporcjonalności regulatora X_p w $^{\circ}\text{C}$ i wyrazić go w procentach zakresu nastawiania wartości zadanej regulatora, który wynosi od 0 do 100 $^{\circ}\text{C}$. Obliczyć wzmocnienie regulatora w zakresie proporcjonalności:

$$K_p = \frac{100}{X_p} \quad (4.5)$$



4.9. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty, nie przerysowany z instrukcji schemat układu tranzystorowego wzmacniacza przekaźnikowego z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- wykres charakterystyki statycznej tranzystora i obliczenie wartości β ,
- wartości I_{zd} i I_{zw} przekaźnika elektromagnetycznego,
- wykresy charakterystyk napięciowo-prądowych rezystora, stabilizatora i tranzystorowego stabilizatora prądu, z zaznaczeniem wartości U_S i I_S ,
- wykres charakterystyki skokowej czwórnika RC , wyznaczenie stałej czasowej czwórnika T i T_t różnymi metodami (tabelka zbiorcza), obliczenie f_{gr} ,
- wykres charakterystyki statycznej regulatora impulsowego oraz wyznaczenie wartości X_P i obliczenie wzmocnienia K_P regulatora,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.

4.10. LITERATURA

Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii 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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved



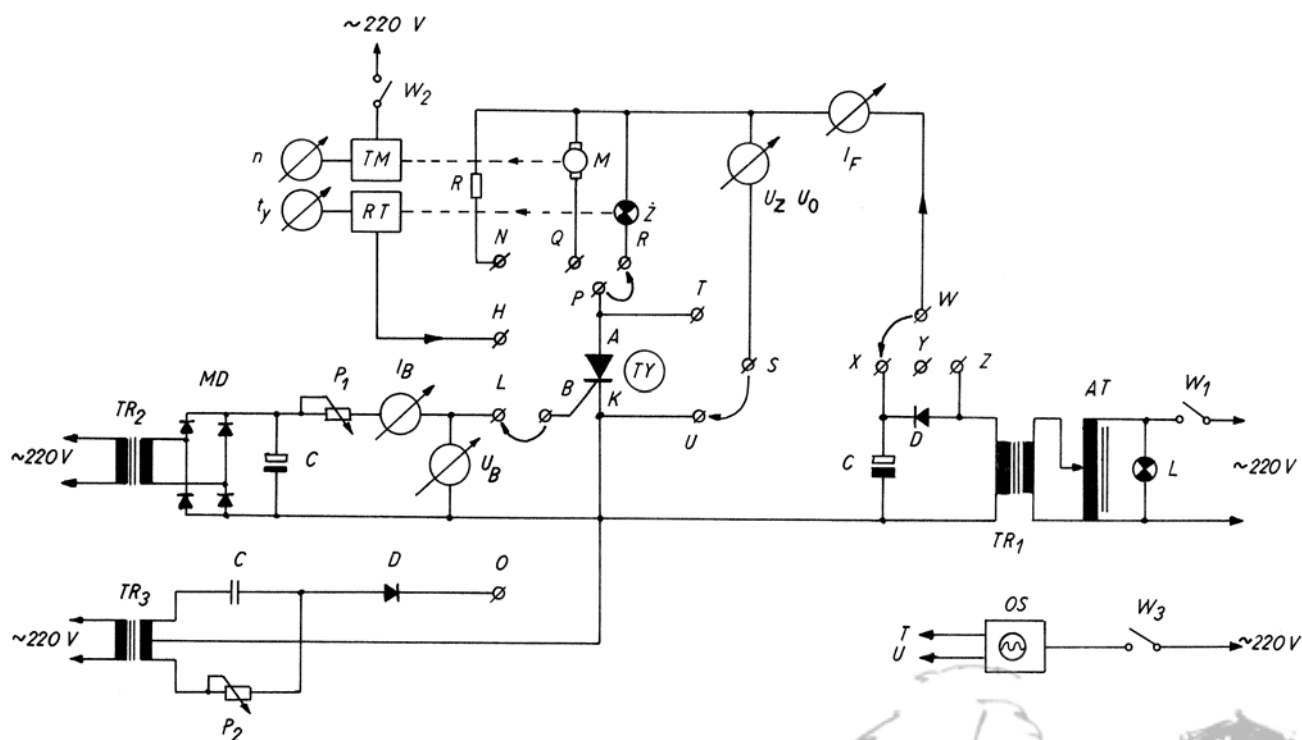
5. TYRYSTOROWY ŁĄCZNIK I STEROWNIK MOCY JAKO URZĄDZENIA WYKONAWCZE AUTOMATYKI

Cel zadania: *Poznanie podstawowych właściwości i zastosowań tyrystora jako łącznika i sterownika mocy oraz urządzenia wykonawczego regulatora dwupołożeniowego. Sterowanie oświetleniem, ogrzewaniem, prędkością obrotową silnika. Pomiary prędkości obrotowej.*

5.1. UKŁAD POMIAROWY

Tyrystor jest przyrządem półprzewodnikowym, który w odpowiednim układzie może sterować przewodzeniem prądu stałego lub przemiennego. Jest zbudowany z wielowarstwowej struktury krzemowej p-n-p-n i posiada trzy elektrody: anodę A , katodę K i bramkę B . W obwodzie elektrycznym zachowuje się jak sterowana dioda prostownicza - elektrodą sterującą jest bramka.

Schemat układu pomiarowego do badania właściwości tyrystora przedstawia rysunek 5.1.



Rys. 5.1. Schemat układu do badania właściwości tyrystora



Obwód anoda - katoda tyrystora TY jest zasilany napięciem z zasilacza sieciowego. Zasilacz składa się z nastawianego autotransformatora AT i transformatora obniżającego napięcie TR_1 . Do tyrystora może być doprowadzone napięcie przemiennie z gniazda Z lub stałe (wyprostowane) z gniazda X . W obwodzie anodowym tyrystora znajdują się amperomierz mierzący natężenie prądu przewodzenia I_F i jeden z odbiorników energii elektrycznej: żarówka $\dot{Z}$ lub silnik M . Woltomierz może mierzyć napięcie zasilania U_Z (po zwarcu gniazd S i U) lub spadek napięcia na odbiorniku U_O (po zwarcu gniazd S i T).

Obwód bramka - katoda tyrystora jest zasilany z drugiego zasilacza sieciowego z transformatorem TR_2 , mostkowym prostownikiem pełnookresowym MD i kondensatorem wygładzającym C . Natężenie prądu płynącego w obwodzie bramkowym I_B może być zmieniane rezystorem nastawnym (potencjometrem) P_1 i mierzone miliamperomierzem. Napięcie na bramce tyrystora mierzy woltomierz U_B . Opisany układ pomiarowy umożliwia określanie właściwości statycznych (charakterystyki statycznej) tyrystora oraz badanie tyrystora jako łącznika mocy.

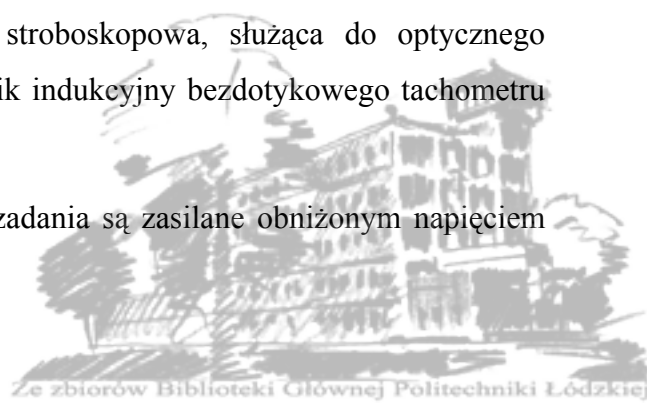
Włączając w gniazda B i N fotorezystor (rezystor, którego rezystancja jest funkcją natężenia oświetlenia), doprowadzimy do bramki tyrystora napięcie sterujące, będące funkcją oświetlenia fotorezystora. Otrzymamy bezstykowy, pozbawiony bezwładności mechanicznej łącznik fotoelektryczny.

W obwód bramki tyrystora można też włączyć (po zwarcu gniazd B i H) wyjście dwupołożeniowego regulatora temperatury RT z termorezystancyjnym, termistorowym czujnikiem pomiarowym. Tyrystor będzie wówczas bezstykowym urządzeniem wykonawczym regulatora.

Obwód bramka - katoda tyrystora można połączyć z przesuwnikiem fazowym (zwarte gniazda B i O), składającym się z transformatora TR_3 , kondensatora C i nastawianego rezystora P_2 . Przesuwnik umożliwia zmianę fazy prądu bramki względem prądu anodowego tyrystora i płynne sterowanie mocą wydzielaną w odbiorniku energii. Układ umożliwia płynne sterowanie świeceniem żarówki $\dot{Z}$ lub prędkością obrotową (kątową) silnika M . Przebieg czasowy napięcia przewodzenia tyrystora może być oglądany na ekranie oscyloskopu OS .

Na wale silnika jest umieszczona tarcza stroboskopowa, służąca do optycznego określania jego prędkości obrotowej, a nad nią czujnik indukcyjny bezdotykowego tachometru (obrotomierza) elektronicznego TM .

Wszystkie zewnętrzne obwody elektryczne zadania są zasilane obniżonym napięciem



(maksimum 25 V), bezpiecznym w przypadku dotknięcia instalacji ręką. W realizacjach praktycznych, w warunkach przemysłowych, tyrystory pracują pod napięciem wysokim, sięgającym tysięcy woltów i osiągają dzięki temu bardzo dużą sprawność.

5.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TYRYSTORA

Obwód anoda - katoda tyrystora połączyć z wyjściem zasilacza napięcia stałego (zwarte gniazda W i X). Woltomierz w obwodzie anodowym włączyć na pomiar napięcia zasilania U_Z (zwarte gniazda S i U). Jako obciążenie, w obwód anodowy należy włączyć żarówkę (zwarte gniazda P i R). Bramkę tyrystora włączyć w obwód zasilania napięciem stałym (zwarte gniazda B i L). Pokrętko P_I nastawiania prądu bramki I_B przekręcić w lewo do oporu. Wyłączniki zasilania tachometru, regulatora temperatury i oscyloskopu W_2 i W_3 powinny być wyłączone.

Włączyć zasilanie całego układu pomiarowego wy łącznikiem W_I - powinna zaświecić się lampka sygnalizacyjna, żarówka $\tilde{Z}$ nie powinna się świecić. Suwakiem autotransformatora nastawić wartość napięcia $U_Z = 15$ V.

5.2.1. CHARAKTERYSTYKA BRAMKOWO - ANODOWA TYRYSTORA

Należy zbadać zależność prądu przewodzenia tyrystora I_F od prądu bramki I_B i napięcia bramki U_B . W tym celu należy **bardzo wolno** podwyższać wartość prądu I_B od 5 mA co 0,5 mA, notując w tabelce wartości U_B i I_F . Zaznaczyć moment załączenia tyrystora (zaświecenie się żarówki $\tilde{Z}$). W tym punkcie pomiarowym prąd bramki I_B jest równy prądowi załączenia tyrystora I_{BT} - wielkości charakterystycznej dla danego typu tyrystora i zależnej od jego temperatury (ze wzrostem temperatury wartość I_{BT} maleje).

Pomiary kontynuować aż do $I_B = \max$. Następnie, w dalszym ciągu notując mierzone wielkości, obniżać prąd bramki tyrystora kolejno o 0,5 mA aż do $I_B = 5$ mA. Zwrócić uwagę, że po załączeniu tyrystora, obniżenie wartości prądu bramki nie powoduje jego wyłączenia. Nawet rozwarcie gniazd B i L ($I_B = 0$) nie spowoduje zgaśnięcia żarówki. Dopiero przerwanie na chwilę, nawet ułamek sekundy, obwodu anodowego, powodujące zanik napięcia U_Z i spadek prądu I_F poniżej tzw. prądu podtrzymania, wywołuje wyłączenie tyrystora. Wykonać doświadczenie z wyłączeniem tyrystora przez chwilowe rozwarcie gniazd W i X .



5.2.2. WZMOCNIENIE TYRYSTORA

Należy określić stosunek mocy wydzielonej w obciążeniu tyrystora (żarówce) do mocy traconej w obwodzie jego sterowania (bramkowym) w momencie załączenia. Jest to wzmocnienie mocy tyrystora jako łącznika w obwodzie prądu stałego.

Przy wyłączonym tyrystorze ($I_F = 0$, gniazda B i L zwarte, $I_B = 5 \text{ mA}$, $U_Z = 15 \text{ V}$), powoli podwyższać wartość prądu bramki I_B , aż do momentu osiągnięcia I_{BT} (zaświecenia się żarówki $\tilde{Z}$). Wtedy zapisać wartości $I_B = I_{BT}$ i $U_B = U_{BT}$ oraz I_F i U_Z . Po zwarceniu gniazd S i T odczytać wartość spadku napięcia na żarówce U_O .

5.3. TYRYSTOR JAKO ŁĄCZNIK PRĄDU PRZEMIENNEGO

Łącznik tyrystorowy pozwala na bezstykowe włączanie obwodów prądu stałego i przemiennego o dużej mocy za pomocą niewielkiego sygnału doprowadzonego do obwodu bramkowego tyrystora. Zastępuje przełączniki i styczniki, a przez wyeliminowanie części ruchomych (styków) jest pozbawiony bezwładności mechanicznej i posiada dużą trwałość.

Prąd bramki zmniejszyć do 5 mA . Obwód anoda - katoda tyrystora zasilić napięciem przemiennym z transformatora TR_1 przez zwarcie gniazd W i Z . Woltomierz przełączyć na pomiar napięcia zasilania U_Z (zwarte gniazda S i U). Suwakiem autotransformatora nastawić wartość napięcia $U_Z = 10 \text{ V}$.

Podwyższając i obniżając wartość prądu bramki I_B obserwować moment załączania tyrystora i świecenia się żarówki $\tilde{Z}$ przy $I_B \geq I_{BT}$ oraz jego wyłączania przy $I_B < I_{BT}$. Samoczynne wyłączenie tyrystora w obwodzie prądu przemiennego jest spowodowane okresowym obniżaniem się napięcia U_Z i prądu I_F do zera.

Złożony układ pomiarowy zasilania bramki tyrystora można zastąpić prostym doprowadzeniem do bramki dodatniego napięcia anodowego przez rezystor R ograniczający prąd I_B do wartości nieco większej od I_{BT} . Zwierając i rozwierając gniazda B i N można sterować załączaniem i wyłączaniem tyrystora.

Do gniazd B i N podłączyć fotorezystor (wisi z przewodami po lewej stronie tablicy z układem). Kierując fotorezystor na okno lub lampę oświetleniową i przysłaniając go dłonią, można obserwować załączanie i wyłączanie żarówki w obwodzie anodowym tyrystora. Otrzymaliśmy fotoelektryczny łącznik prądu przemiennego, który może być wykorzystany np. jako dwupołożeniowy przetwornik przesunięcia liniowego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że łącznik ten, w przeciwieństwie do układów z przełącznikami elektromagnetycznymi, jest

bezstykowy, pozbawiony histerezy, nie zawiera elementów o bezwładności mechanicznej i w związku z tym reaguje nawet na szybkie zmiany oświetlenia fotorezystora.

Włączając w obwód anodowy tyrystora zamiast żarówki silnik elektryczny (zwarte gniazda P i Q), otrzymamy fotoelektryczny, bezstykowy układ uruchamiania tego silnika. Wykonać doświadczenie z włączaniem i wyłączaniem silnika przez zmianę oświetlenia fotorezystora. Odłączyć fotorezystor.

5.4. DWUPOŁOŻENIOWY REGULATOR TEMPERATURY

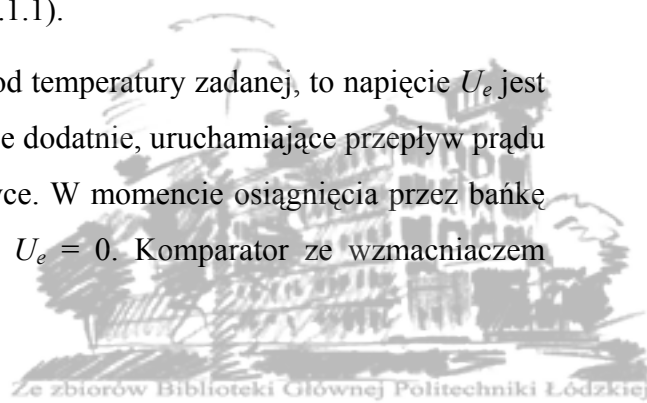
W obwód anodowy tyrystora ponownie włączyć żarówkę $\dot{Z}$ (zwarte gniazda P i R). Napięcie U_Z nadal 10 V prądu przemiennego. Włączyć zasilanie regulatora temperatury wyłącznikiem W_2 . Bramkę tyrystora połączyć z wyjściem regulatora temperatury RT przez zwarcie gniazd B i H .

Termistorowy czujnik temperatury, podłączony do wejścia regulatora, jest umieszczony w uchwycie nad żarówką w ten sposób, że jego element pomiarowy dotyka bańki żarówki. Włączona żarówka, działając jak grzejnik, podwyższa temperaturę t_y termistora. Ze wzrostem temperatury maleje rezystancja termistora, która jest przetwarzana w przetworniku pomiarowym na analogowy sygnał elektryczny U_y , uruchamiający miernik temperatury.

Wartość napięcia U_y (wielkość regulowana) jest porównywana w regulatorze RT z napięciem zadanej wartości temperatury U_w (zadana temperatura t_w wynosi około $+70^\circ\text{C}$). Sygnał odchylenia regulacji - różnica napięć $U_w - U_y = U_e$ jest analizowana przez elektroniczny człon kształtujący regulatora - komparator (układ reagujący na przejście napięcia U_e przez zero), który z kolei przez wzmacniacz steruje urządzeniem wykonawczym - bramką tyrystora. W ten sposób zamyka się pętla sprzężenia zwrotnego, umożliwiającą automatyczną, stałowartościową regulację temperatury bańki żarówki.

Sygnał wyjściowy regulatora może przybierać tylko dwie wartości: napięcie dodatnie uruchamiające tyrystor i napięcie zerowe, blokujące go. W tych warunkach tyrystor spełnia rolę nowoczesnego członu wykonawczego dwupołożeniowego regulatora temperatury – bezstykowego i bezhisterezowego łącznika mocy, zastępującego stosowany w tradycyjnych układach przekaźnik lub stycznik (patrz [1], rozdz. 18.1.1).

Jeżeli temperatura bańki żarówki jest niższa od temperatury zadanej, to napięcie U_e jest większe od zera i do bramki tyrystora dopływa napięcie dodatnie, uruchamiające przepływ prądu w obwodzie anodowym i wydzielanie ciepła w żarówce. W momencie osiągnięcia przez bańkę żarówki temperatury $t_y = t_w$, napięcie $U_y = U_w$ i $U_e = 0$. Komparator ze wzmacniaczem



wyłaczają tyrystor i przerywają obwód zasilający żarówkę. Po ochłodzeniu się bańki żarówki do temperatury niższej od zadanej, cykl działania regulatora powtarza się.

5.4.1. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE UKŁADU REGULACJI DWUPOŁOŻENIOWEJ

Gdyby układ żarówka - termistor nie posiadał cieplnego oporu gazu w żarówce i miał bardzo małą pojemność cieplną, byłby układem proporcjonalnym i bezhisterezowy regulator z dużą częstotliwością włączałby i wyłączał żarówkę, utrzymując z dużą dokładnością zadaną wartość temperatury. Niestety praktycznie każdy układ z ogrzewaniem elektrycznym jest obciążony inercją i opóźnieniem, co jest wynikiem pojemności cieplnej obiektu ogrzewanego i oporu cieplnego między grzejnikiem, obiektem ogrzewanym i czujnikiem pomiarowym. Bezładność obiektu, a zwłaszcza opóźnienie, powodują pogorszenie się jakości regulacji automatycznej i powstawanie różnic między temperaturą zadaną i regulowaną.

Czekając na ustabilizowanie się pracy regulatora obserwować jego działanie. Wartość zmierzonej temperatury t_y można odczytywać z miernika. Unikać zakłócającego (ochładzającego) przepływu powietrza w pobliżu żarówki (przeciąg, gwałtowne poruszanie się itp.). Po 5 minutach, obserwując wskazania miernika t_y , określić maksymalną amplitudę wahań temperatury $\Delta t_{y \max}$ z dokładnością 0,1 °C (średnia z kilku obserwacji). Zwrócić uwagę na zakłócające działanie dodatkowego odbioru ciepła, wywołanego np. dmuchaniem na żarówkę.

5.4.2. WPLYW DODATKOWEGO OPORU CIEPLNEGO

Unosząc nieco czujnik termistorowy, wsunąć między termistor, a bańkę żarówki niewielki (ok. 5 x 5 cm) kawałek papieru zeszytowego, stwarzając w ten sposób dodatkowy opór cieplny między obiektem regulacji (bańką żarówki), a czujnikiem pomiarowym (termistorem). Odczekać 5 minut na ustabilizowanie się pracy regulatora i ponownie określić jak w punkcie 11.5.4.1 maksymalną amplitudę wahań temperatury $\Delta t_{y \max}$. Pomiary powtórzyć, po wstawieniu między termistor a bańkę żarówki dwóch, trzech, czterech i pięciu warstw papieru.

Po wykonaniu pomiarów wyłączyć zasilanie regulatora wyłącznikiem W_2 oraz rozłączyć gniazda B i H .



5.5. PÓŁOKRESOWY STEROWNIK MOCY

W poprzednich punktach zadania badaliśmy tyrystor jako łącznik mocy w obwodach prądu stałego i przemiennego. W odróżnieniu od łącznika, sterownik umożliwia nie tylko dwupołożeniowe, lecz także i płynne nastawianie mocy wydzielanej w obwodzie anodowym tyrystora. Z tego względu sterownik tyrystorowy może być wykorzystany np. jako urządzenie wykonawcze regulatora o charakterystyce ciągłej.

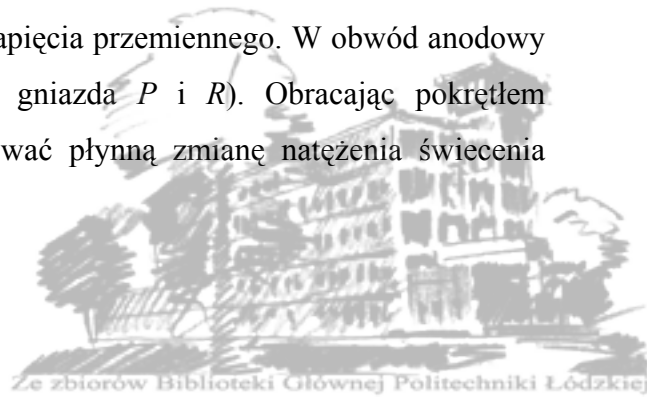
Działanie sterownika polega na doprowadzeniu do bramki tyrystora dodatnich impulsów wyzwalających, przesuniętych w fazie w stosunku do przebiegu prądu anodowego o kąt załączenia tyrystora θ_z . Jeżeli załączenie tyrystora następuje w momencie rozpoczęcia sinusoidalnego narastania prądu I_F ($\theta_z = 0$), to układ działa jak badany poprzednio półokresowy łącznik prądu przemiennego, przewodząc całkowicie dodatnie półówki prądu anodowego.

W miarę zwiększania opóźnienia załączenia tyrystora ($\theta_z \rightarrow \pi$), coraz mniejszy wycinek sinusoidy jest przepuszczany przez tyrystor, aż przy $\theta_z = \pi$ załączenie tyrystora następuje dopiero w momencie spadku prądu I_F do zera i tyrystor go nie przewodzi. Wartość skuteczna prądu w obwodzie anodowym tyrystora może być w ten sposób płynnie zmieniana od 50 do 0 % (w układzie pełnookresowym, przy sterowaniu obiema półówkami sinusoidy, od 100 do 0 %).

Przesuwanie impulsu wyzwalającego tyrystor może być w najprostszym przypadku realizowane przez nastawiany ręcznie przesuwnik fazowy RC , wykorzystujący właściwość przesuwania fazy napięcia przez kondensator. Analizując schemat przesuwnika fazowego P_2C na rysunku 5.1 można łatwo stwierdzić, że przy minimalnej wartości rezystancji P_2 na bramkę tyrystora jest podawane napięcie bezpośrednio z transformatora TR_3 ($\theta_z \approx 0$), natomiast w miarę zwiększania rezystancji P_2 zaczyna się oddziaływanie kondensatora C i przesuwanie fazy napięcia zasilającego bramkę tyrystora, aż do $\theta_z \approx \pi$. Dioda D w obwodzie bramki tyrystora nie dopuszcza do bramki ujemnych impulsów napięciowych i zabezpiecza ją przed przeciążeniem.

5.5.1. STEROWANIE OŚWIETLENIEM

Bramkę tyrystora należy połączyć z przesuwnikiem fazowym (zwarte gniazda B i O). Pokrętko P_2 przekręcić w lewo do oporu. $U_Z = 10V$ napięcia przemiennego. W obwód anodowy tyrystora powinna być włączona żarówka (zwarte gniazda P i R). Obracając pokrętkiem nastawiania kąta załączenia tyrystora (P_2), obserwować płynną zmianę natężenia świecenia żarówki.



Włączyć wyłącznikiem W_3 oscyloskop. Zmieniając intensywność świecenia żarówki obserwować na jego ekranie przebieg napięcia przewodzenia tyrystora. Nie kręcić pokrętlami oscyloskopu! W przypadku nieostrego lub niestabilnego obrazu, poprosić laboranta. Przerysować z ekranu oscyloskopu przebiegi prądu przewodzenia tyrystora dla $I_F = \max$, $I_F = 75 \% I_{Fmax}$, $I_F = 50 \% I_{Fmax}$ oraz $I_F = 25 \% I_{Fmax}$. Wyłączyć oscyloskop wyłącznikiem W_3 .

5.6. STEROWANIE PRĘDKOŚCIĄ OBROTOWĄ SILNIKA

Zamiast żarówki włączyć w obwód anodowy tyrystora silnik elektryczny (zwarcie gniazd P i Q). Obracając pokrętle nastawiania kąta załączenia tyrystora obserwować zmiany prędkości obrotowej (kątovej) silnika.

5.7. POMIARY PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA

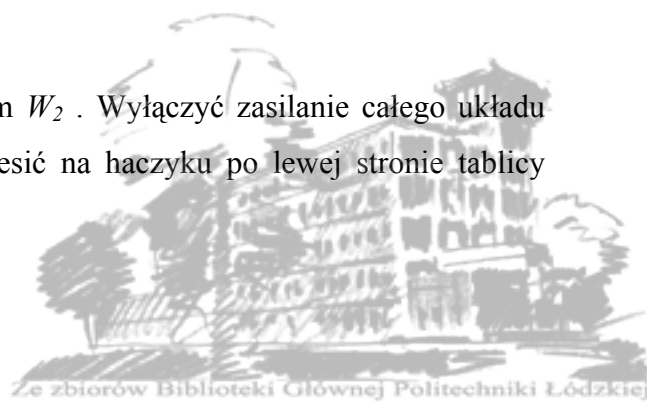
Pozostawić włączony układ sterownika prędkości obrotowej silnika. Włączyć zasilanie tachometru wyłącznikiem W_2 . Zwrócić uwagę na umocowaną do wału silnika, oświetloną neonówką tarczę stroboskopową oraz na umieszczony nad tarczą indukcyjny czujnik bezdotykowego tachometru elektronicznego. Na obwodzie tarczy jest umocowany miniaturowy magnes, który przesuwając się pod czujnikiem wzbudza w nim impulsy napięciowe. Częstotliwość tych impulsów jest przetwarzana w tachometrze na prąd mierzony miernikiem wychyłowym.

Przy zatrzymanym silniku policzyć liczbę czarnych pól N na zewnętrznym, środkowym i wewnętrznym pierścieniu tarczy stroboskopowej.

Bardzo wolno obracając pokrętkę P_2 uruchomić silnik i doprowadzić do **pozornego** zatrzymania się czarnych pól na zewnętrznym pierścieniu tarczy. Tarczę stroboskopu obserwować prostopadle z lewej strony. Zanotować wskazania tachometru elektronicznego n (tachometr jest włączony na zakres 0...3000 obr/min). Powtórzyć pomiary przy pozornym zatrzymaniu się pól kolejno na środkowym i wewnętrznym pierścieniu tarczy stroboskopowej.

5.8. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Wyłączyć zasilanie tachometru wyłącznikiem W_2 . Wyłączyć zasilanie całego układu pomiarowego wyłącznikiem W_1 . Fotorezystor powiesić na haczyku po lewej stronie tablicy z układem.



5.9. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

5.9.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA TYRYSTORA

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 5.2.1, wykreślić we wspólnym układzie współrzędnych zależność $I_F = f(I_B)$ dla obu kierunków zmiany I_B . Jest to charakterystyka bramkowo-anodowa tyrystora. Zaznaczyć na wykresie wartość prądu załączenia tyrystora I_{BT} .

5.9.2. WZMOCNIENIE TYRYSTORA

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 5.2.2, obliczyć moc traconą w obwodzie bramkowym tyrystora:

$$P_{BK} = I_{BT} \cdot U_{BT} \quad (5.1)$$

oraz moc wydzieloną w obciążeniu (żarówce):

$$P_O = I_F \cdot U_O \quad (5.2)$$

Następnie obliczyć wzmocnienie tyrystora w badanym układzie z równania:

$$K = \frac{P_O}{P_{BK}} \quad (5.3)$$

Nie pomylić jednostek !

W praktycznych układach wzmocnienie tyrystora może być dużo większe, ponieważ moc wydzielona w obwodach sterowania tyrystora rzędu kilkudziesięciu miliwatów jest w stanie uruchamiać moce obciążenia rzędu megawatów (wysokie napięcia i duże prądy). Wtedy wartość K osiąga 10^7 . Przyjmując maksymalne dopuszczalne obciążenie obwodu anodowego badanego tyrystora (typu BTP-10/500) $U_{Omax} = 500 \text{ V}$ i $I_{Fmax} = 10 \text{ A}$ oraz moc traconą w obwodzie bramkowym P_{BK} obliczoną z wyników doświadczeń (na tę moc nie mają wpływu parametry obwodu anodowego), obliczyć z równania 5.3 maksymalne wzmocnienie badanego tyrystora K_{max} przy całkowitym wykorzystaniu jego parametrów.



5.9.3. SPRAWNOŚĆ TYRYSTORA

Ze sprawnością tyrystora wiąże się moc tracona w samym tyrystorze, która jest wydzielana w postaci ciepła odbieranego przez aluminiowy radiator. Strata mocy jest wynikiem określonej rezystancji przewodzenia tyrystora.

Przez załączony tyrystor oraz żarówkę przepływa prąd I_F , który jest mierzony amperomierzem. Jeżeli określimy spadek napięcia na tyrystorze U_{AK} , to możemy obliczyć moc traconą w tyrystorze P_{AK} . Wartość napięcia U_{AK} można obliczyć, odejmując od siebie zmierzone przy załączonym tyrystorze i określonej wartości prądu I_F (w punkcie 5.2.2) wartości U_Z i U_O :

$$P_{AK} = I_F \cdot U_{AK} = I_F (U_Z - U_O) \quad (5.4)$$

Znając moc wydzieloną w obciążeniu tyrystora P_O oraz moc traconą w tyrystorze P_{AK} , możemy obliczyć sprawność tyrystora jako łącznika w obwodzie prądu stałego:

$$\eta = \frac{P_O - P_{AK}}{P_O} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.5)$$

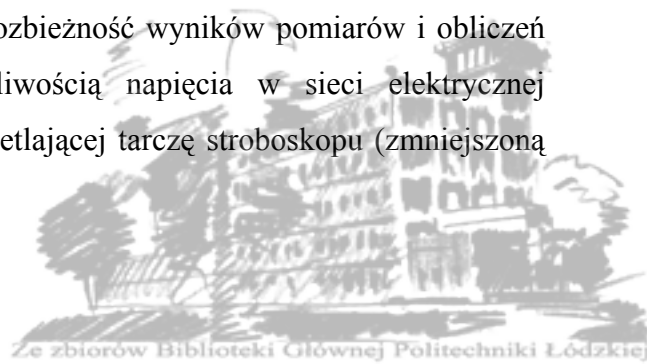
5.9.4. POMIARY PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA

Sprawdzić zgodność wskazań stroboskopu i tachometru, obliczając wartości prędkości obrotowej silnika, mierzone stroboskopem, z równania:

$$n_s = K_s \cdot \frac{1}{N} \quad (5.6)$$

Stała K_s jest zależna od częstotliwości błysków neonówki lub świetlówki oświetlającej tarczę stroboskopową. Przy zasilaniu neonówki napięciem o częstotliwości 50 Hz, częstotliwość jej błysków wynosi 100 Hz. Chcąc obliczyć wartość n_s wyrażoną w liczbie obrotów na minutę, należy przyjąć wartość $K_s = 100 \cdot 60 = 6000$. Wielkość N w równaniu 5.6 jest liczbą czarnych pól na odpowiednim obwodzie tarczy stroboskopowej.

W tabelce zestawień wartości prędkości obrotowej silnika obliczone z równania 5.6 oraz zmierzone tachometrem elektronicznym. Niewielka rozbieżność wyników pomiarów i obliczeń może być spowodowana nieco obniżoną częstotliwością napięcia w sieci elektrycznej - zmniejszoną częstotliwością migotania lampki oświetlającej tarczę stroboskopu (zmniejszoną wartością stałej K_s).



5.10. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- schemat tyrystorowego łącznika prądu przemiennego z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- wykres charakterystyki bramkowej - anodowej tyrystora,
- obliczenia wzmocnień K , K_{max} oraz sprawności tyrystora,
- tabelka z wynikami badania właściwości dynamicznych regulatora temperatury (wartości Δt_{ymax} dla 0 - 5 warstw papieru),
- przerysowane z ekranu oscyloskopu przebiegi napięcia przewodzenia tyrystora jako półokresowego sterownika mocy (dla badanych prądów I_F),
- zestawienie wyników obliczeń i pomiarów prędkości obrotowej silnika n i n_s ,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.

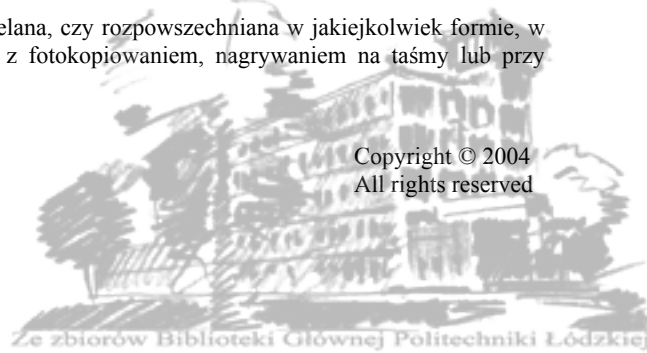
5.11. LITERATURA

Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii 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@snack.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 fotokopiuowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych nośników informacji, bez zgody autora.

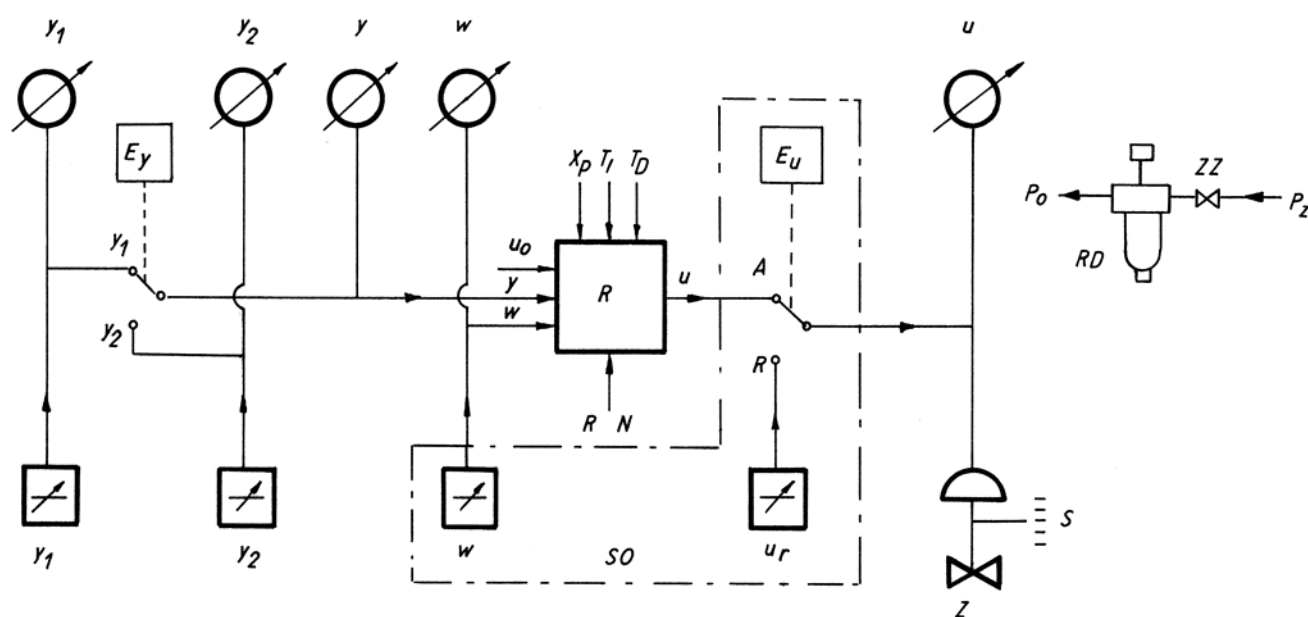


6. PNEUMATYCZNY REGULATOR PID - WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE

Cel zadania: Zbadanie statycznych i dynamicznych właściwości przemysłowego, pneumatycznego regulatora PID. Poznanie działania zadajnika pneumatycznego, stacyjki operacyjnej i zaworu regulacyjnego z pneumatycznym siłownikiem membranowym.

6.1. UKŁAD POMIAROWY

Schemat układu do badania właściwości pneumatycznego regulatora PID przedstawia rysunek 6.1. Przedmiotem doświadczeń jest przemysłowy regulator (R) typu TRPID produkcji zakładów MERA-PNEFAL, sprzęgnięty ze stacją operacyjną (SO) typu A-601. Regulator, stacja i inne człony układu pomiarowego są zasilane powietrzem o ciśnieniu $P_0 = 150$ kPa z automatycznego reduktora ciśnienia RD . Do reduktora jest doprowadzone, przez zawór odcinający ZZ , powietrze o ciśnieniu $P_z = 250 \div 300$ kPa ze stacji zasilania. Reduktor ciśnienia ma wbudowany filtr i odoliwiacz powietrza.



Rys. 6.1. Schemat układu do badania właściwości pneumatycznego regulatora PID

Do wejścia (y) regulatora R jest doprowadzony analogowy sygnał pneumatyczny wielkości regulowanej y z jednego z dwóch analogowych zadajników ciśnienia: y_1 lub y_2 , symulujących działanie przetwornika pomiarowego. Sterowany elektrycznie dwudrogowy zawór elektromagnetyczny E_y umożliwia skokowe przełączanie nastawionych zadajnikami wartości ciśnienia y .

Do drugiego wejścia regulatora (w) jest doprowadzony z zadajnika umieszczonego z lewej strony stacyjki operacyjnej analogowy sygnał pneumatyczny wielkości zadanej w . Sygnały pneumatyczne mają standardowy zakres zmian ciśnienia powietrza 20...100 kPa; odpowiednie ciśnienia są mierzone sprężystościowymi manometrami y , w i u .

Układ regulatora umożliwia też przesuwanie charakterystyki statycznej (punktu pracy) przez dodawanie sygnału u_0 . Zabieg ten ma praktyczne znaczenie przy minimalizowaniu statycznego błędu regulacji regulatora P lub PD. Regulatory PI i PID są astatyczne i same znajdują sobie optymalne położenie punktu pracy przy $e \approx 0$.

Regulator kształtuje sygnał wyjściowy (wielkość regulującą u) zgodnie z zadany algorytmem charakterystyki statycznej i dynamicznej. Zmianę przebiegu charakterystyki regulatora umożliwiają: przełącznik kierunku pracy z normalnego (N) na odwrotny (R) - z prawej strony regulatora, śruba nastawiania zakresu proporcjonalności X_P (obracana od spodu regulatora), śruby nastawiania czasu wyprzedzenia T_D i czasu zdwojenia T_I (obracane z boków regulatora), zaworek wyłączania całkowania I oraz pokrętło nastawiania przesunięcia charakterystyki statycznej u_0 (patrz [1], rozdz. 18.2.1).

Analogowy, pneumatyczny sygnał wielkości regulującej u z wyjścia regulatora jest przy pracy automatycznej doprowadzony do urządzenia wykonawczego, którym jest membranowy siłownik zaworu regulacyjnego Z . Zmiana ciśnienia u powoduje przesuwanie się grzybka zaworu, a stopień otwarcia zaworu pokazuje wskaźnik S .

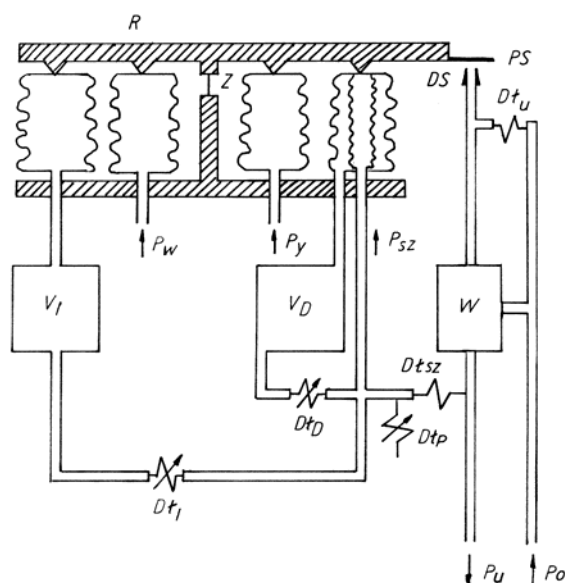
Przy pracy ręcznej, siłownik jest łączony przełącznikiem E_u z ręcznym zadajnikiem wielkości regulującej u_r , umieszczonym z prawej strony stacyjki operacyjnej. Przełącznik E_u rodzaju pracy układu (R - "ręczna", A - "automatyczna") jest wbudowany w stacyjkę operacyjną (przesuwana poziomo dźwignia pod wskaźnikiem ciśnień).

Opisany układ pomiarowy umożliwia badanie charakterystyki ręcznego sterowania urządzeniem wykonawczym, charakterystyki statycznej regulatora oraz jego właściwości dynamicznych (przebiegu odpowiedzi na wymuszenie skokowe - charakterystyki dynamicznej skokowej). Badania te są wykonywane w układzie otwartym, bez sprzężenia zwrotnego z wyjścia regulatora poprzez obiekt regulacji do jego wejścia - badany jest regulator, a nie układ regulacji.



6.2. BUDOWA I DZIAŁANIE REGULATORA

Schemat budowy pneumatycznego regulatora PID przedstawia rysunek 6.2. Pneumatyczne sygnały wielkości zadanej P_w i wielkości regulowanej P_y działają na mieszki sprężyste, znajdujące się po obydwu stronach dźwigni równoważni sił R , ułożyskowanej beztarciowo przy pomocy dwóch płaskich sprężyn Z . Układ mieszków stanowi człon sumujący regulatora (patrz [1], rozdz. 15.2.2). Czujnikiem stanu nierównowagi dźwigni R jest zespół dyszy DS i przesłony PS z dławikiem Dl_u , zasilany powietrzem o ciśnieniu P_0 (patrz [1], rozdz. 10.1.2 i 10.7.2.A). Sygnał nierównowagi dźwigni jest wzmacniany we wzmacniaczu pneumatycznym W i opuszcza regulator jako sygnał wielkości regulującej P_u .



Rys. 6.2. Schemat pneumatycznego regulatora PID

Liniowość charakterystyki członu sumującego uzyskuje się za pomocą pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego z dławikiem Dl_{sz} i wewnętrznym mieszkem sprężystym, zasilanym sygnałem P_{sz} . Nastawianie wzmocnienia układu K_P (zakresu proporcjonalności regulatora X_P) umożliwia nastawny dławik Dl_P , tworzący wraz z dławikiem Dl_{sz} nastawny dzielnik ciśnienia i wpływający na wartość sygnału ujemnego, proporcjonalnego sprzężenia zwrotnego P_{sz} .

Kształtowanie dynamicznych właściwości regulatora umożliwiają dwie inercyjne pętle sprzężenia zwrotnego: ujemnego, z dławikiem Dl_D , pojemnością V_D i prawym, zewnętrznym mieszkem równoważni, nadającego regulatorowi charakterystykę różniczkującą (D) i dodatniego, z dławikiem Dl_I , pojemnością V_I i lewym mieszkem równoważni, nadającego regulatorowi charakterystykę całkującą (I). Nastawne dławiki Dl_D i Dl_I umożliwiają nastawianie czasu wyprzedzenia T_D i czasu zdwojenia T_I regulatora (patrz [1], rozdz. 18.2).

6.3. RĘCZNE STEROWANIE URZĄDZENIEM WYKONAWCZYM

Sprawdzić, czy jest uruchomiona sprężarka stacji zasilania (spytać laboranta) i czy ciśnienie powietrza w stacji osiągnęło wartość 300 kPa (sprężarka wyłącza się wtedy automatycznie). Otworzyć **całkowicie** umieszczony w pobliżu reduktora ciśnienia *RD* zawór odcinający *ZZ*. Pokrętle reduktora (górnym) nastawić wartość ciśnienia $P_0 = 150$ kPa.

Dźwignię rodzaju pracy w stacyjce operacyjnej ustawić w położeniu "ręczna" (*R*). Dźwignia kierunku pracy regulatora (z prawej strony) w pozycji *O* (regulator wyłączony). Obracać prawym pokrętle stacyjki i obserwować górny wskaźnik w stacyjce, manometr wielkości regulującej u i wskaźnik stopnia otwarcia zaworu regulacyjnego S , wykalibrowany w % otwarcia. Dla co najmniej sześciu położów grzybka zaworu S , odczytać odpowiadające im ciśnienia u i wpisać je do tabelki. Wartości ciśnień odczytywać z dokładnością 1 kPa (uwaga na działki skali manometru poniżej 10 kPa!).

6.4. PRZELĄCZANIE UKŁADU NA AUTOMATYCZNY RODZAJ PRACY

W celu uniknięcia nagłych zmian ustawienia urządzenia wykonawczego i zakłóceń w układzie regulacji, przełączenie stacyjki ze sterowania ręcznego na pracę automatyczną i odwrotnie powinno odbywać się przy zrównaniu sygnałów ręcznego i automatycznego. Obracając pokrętle ręcznego zadajnika wielkości regulującej w stacyjce, doprowadzić do zrównania się wskazań obu wskaźników (górnego i dolnego) stacyjki i w tym momencie przestawić dźwignię rodzaju pracy w położenie "automatyczna" (*A*). Po dokonaniu przełączenia sprawdzić, że obracanie pokrętle ręcznego ustawiania zaworu nie zmienia już wartości ciśnienia u na wyjściu regulatora i nie wpływa na położenie grzybka zaworu.

6.5. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE REGULATORA PROPORCJONALNEGO (P)

Przełącznik kierunku pracy regulatora ustawić w pozycji *R* - praca odwrotna. Praca regulatora odwrotna oznacza, że ze wzrostem odchylenia regulacji, wielkość regulująca maleje (wzmocnienie regulatora $K_P < 0$). Równanie charakterystyki statycznej regulatora proporcjonalnego omówiono w literaturze ([1], rozdz. 18.2.1), a ma ono postać:



$$u = K_p \cdot e + u_0 = \frac{100}{X_p} \cdot (w - y) + u_0 \quad (6.1)$$

- gdzie:
- u - wielkość regulująca,
 - $|K_p| = \frac{1}{X_p} \cdot 100$ - wzmocnienie statyczne (proporcjonalne),
 - X_p - zakres proporcjonalności (w %),
 - $e = w - y$ - odchylenie regulacji,
 - u_0 - przesunięcie punktu pracy.

Zminimalizować wpływ różniczkowania przez nastawienie **minimalnej** wartości czasu wyprzedzenia T_D . Wpływ całkowania można by zminimalizować przez nastawienie maksymalnie długiego czasu zdwojenia T_I , jednak ze względu na konieczność (przy długotrwałych pomiarach) zupełnego wyłączenia całkowania, należy nastawić **minimalną** wartość czasu zdwojenia i przekręcić dodatkowy zaworek I w położenie "**I wyłączone**". Włączyć wyłącznik zasilania elektrycznego W_s .

6.5.1. PRACA ODWROTNA, $X_p = 100\%$

Przed rozpoczęciem pomiarów należy przygotować sześć tabel z rubrykami: X_p , w , y , e , u i u_0 (część rubryk zostanie wypełniona podczas przygotowywania sprawozdania). Pokrętle nastawiania zakresu proporcjonalności (od spodu regulatora) nastawić wartość $X_p = 100\%$ ($|K_p| = 1$). Pokrętle zadajnika y_I nastawić wartość ciśnienia $y_I = 60$ kPa. Przełącznik elektryczny zaworu elektromagnetycznego E_y ustawić w pozycji y_I - świeci się lampka y_I , do regulatora jest doprowadzony sygnał wielkości regulowanej $y = y_I$.

Pokrętle zadajnika w stacyjce operacyjnej nastawić $w = 60$ kPa. Ponieważ $y = w$, to $e = 0$ i $u = u_0$ (równanie 6.1). Obracając pokrętkę u_0 nastawić $u = u_0 = 60$ kPa.

Pokrętle zadajnika wielkości regulowanej y_I nastawić $y = y_I = 20$ kPa. W celu zbadania charakterystyki statycznej regulatora, podwyższać wielkość regulowaną y_I od 20 do 100 kPa co 10 kPa, notując w tabelce wartości wielkości regulującej u . Wartości ciśnień odczytywać z dokładnością 1 kPa. Ze względu na wpływ niecałkowicie wyłączzonego w regulatorze układu różniczkującego, odczytu u dokonywać dopiero po ustaleniu się wskazań miernika (po upływie około 10 s od zmiany wartości y)!



6.5.2. PRACA NORMALNA, $X_P = 100 \%$

Nastawić wielkość regulowaną $y = y_I = 20$ kPa, wielkość zadana nadal $w = 60$ kPa. Przełącznik kierunku pracy regulatora ustawić w pozycji N - praca normalna. Praca normalna regulatora oznacza, że ze wzrostem odchylenia regulacji wielkość regulująca rośnie ($K_P > 0$).

Podwyższać wielkość regulowaną y_I od 20 do 100 kPa co 10 kPa, notując w tabelce wartości wielkości regulującej u . Odczytu ciśnienia u dokonywać po ustaleniu się wskazań miernika (po upływie około 10 s).

6.5.3. PRACA NORMALNA, $X_P = 200 \%$

Nastawić wielkość regulowaną $y = y_I = 60$ kPa, wielkość zadana wciąż $w = 60$ kPa. Pokrętle nastawiania zakresu proporcjonalności nastawić $X_P = 200 \%$ ($K_P = 0,5$). Pokrętle u_0 nastawić $u = u_0 = 60$ kPa.

Nastawić wielkość regulowaną $y = y_I = 0$ kPa. Podwyższać wartość y_I od 0 kPa do 120 kPa co 10 kPa, notując w tabelce wartości wielkości regulującej u po ustaleniu się wskazań miernika.

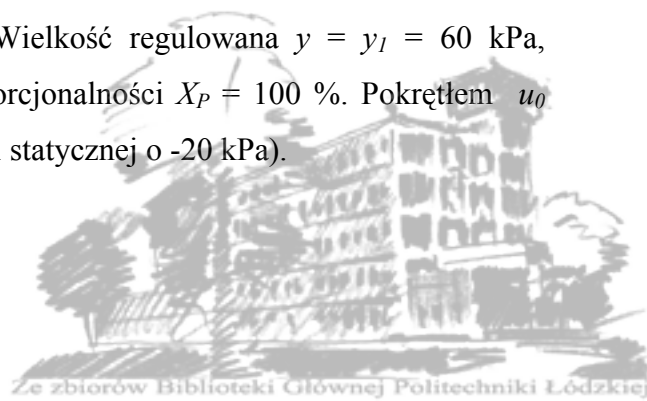
6.5.4. PRACA NORMALNA, $X_P = 50 \%$

Nastawić wielkość regulowaną $y = y_I = 60$ kPa, wielkość zadana nadal $w = 60$ kPa. Pokrętle nastawiania zakresu proporcjonalności nastawić $X_P = 50 \%$ ($K_P = 2$). Pokrętle u_0 nastawić $u = u_0 = 60$ kPa.

Nastawić wielkość regulowaną $y = y_I = 30$ kPa. Podwyższać wartość y_I od 30 kPa do 90 kPa co 10 kPa, notując w tabelce wartości wielkości regulującej u po ustaleniu się wskazań miernika.

6.5.5. PRZESUWANIE PUNKTU PRACY

Kierunek pracy regulatora normalny (N). Wielkość regulowana $y = y_I = 60$ kPa, wielkość zadana $w = 60$ kPa. Nastawić zakres proporcjonalności $X_P = 100 \%$. Pokrętle u_0 nastawić $u = u_0 = 40$ kPa (przesunięcie charakterystyki statycznej o -20 kPa).



Nastawić wielkość regulowaną $y = y_I = 0$ kPa. Podwyższać wartość y_I od 20 kPa do 100 kPa co 10 kPa, notując w tabelce wartości wielkości regulującej u po ustaleniu się wskazań miernika.

Powyższe pomiary powtórzyć po nastawieniu przy $w = y = 60$ kPa wartości $u = u_0 = 80$ kPa (przesunięcie punktu pracy o +20 kPa).

6.6. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE REGULATORA PID

Algorytmy i działanie regulatora PID omówiono w literaturze ([1], rozdz. 18.2). W następnych częściach zadania będziemy badać poszczególne składowe algorytmu (P, PI, PD), a w końcu algorytm PID.

6.6.1. REGULATOR PROPORCJONALNO-CĄKUJĄCY (PI)

Algorytm regulatora proporcjonalno-cąkującego (PI) ma postać:

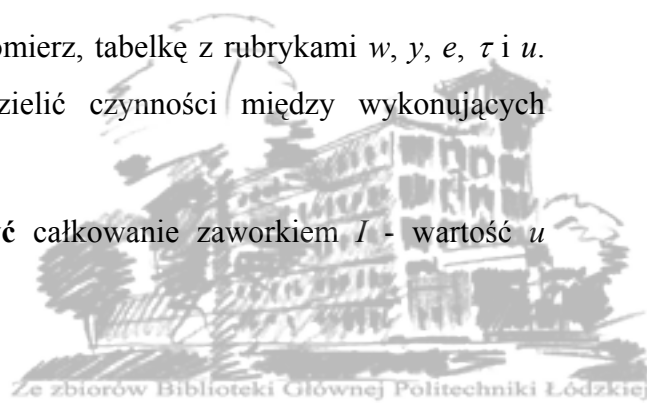
$$u = \frac{100}{X_P} \cdot \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^{\tau} e \, d\tau \right) \quad (6.2)$$

Wielkość regulująca u jest proporcjonalna do wartości odchylenia regulacji e (działanie proporcjonalne) oraz do czasu trwania odchylenia regulacji $\int_0^{\tau} e \, d\tau$ (działanie cąkujące). Czas zdwojenia T_I , nastawiany pokrętkiem w regulatorze, określa intensywność cąkowania i jest czasem, po upływie którego w czasie badania odpowiedzi regulatora na wymuszenie skokowe y , składowa cąkowa wielkości regulującej przewyższy jej składową proporcjonalną. Współczynnik X_P jest zakresem proporcjonalności regulatora.

Sprawdzić ustawienie normalnego kierunku pracy regulatora (N), zakresu proporcjonalności $X_P = 100\%$ ($|K| = 1$). Nastawić $y = y_I = 60$ kPa, $w = 60$ kPa ($e = 0$) i następnie pokrętkiem u_0 obniżyć $u = u_0$ do 0 kPa. Wartość czasu wyprzedzenia T_D pozostawić bez zmian (minimalną), natomiast pokrętkiem nastawiania czasu zdwojenia nastawić $T_I = 1$ min.

Nastawić $y_2 = 40$ kPa. Przygotować sekundomierz, tabelkę z rubrykami w , y , e , τ i u . Przeczytać najpierw ten rozdział do końca, podzielić czynności między wykonujących ćwiczenie.

Tuż przed rozpoczęciem pomiarów **włączyć** cąkowanie zaworkiem I - wartość u



powinna wynosić około 0 kPa ($e = 0$). Uruchomić pomiar czasu i w odstępach co 10 s zanotować trzy kolejne wartości u (pierwszy odczyt w czasie $\tau = 0$, wszystkie wartości u zbliżone do 0 kPa). W momencie $\tau = 30$ s, nie przerywając mierzenia czasu, zanotować czwartą wartość u i przełączyć wielkość regulowaną y z y_1 na y_2 (wymusić skok wartości y). Wartość y zmalała skokowo o 20 kPa, odchylenie regulacji $e = w - y$ wzrosło skokowo od zera do +20 kPa. W dalszym ciągu co 10 s notować wartości wielkości regulującej u , aż do osiągnięcia $u = 100$ kPa.

W tym momencie, nie przerywając mierzenia czasu i notowania wartości u co 10 s, przełączyć wielkość regulowaną z y_2 z powrotem na y_1 . Odchylenie regulacji e osiągnęło ponownie wartość zerową. Nadal co 10 s notować wartości wielkości regulującej u przez 30 s. W tym czasie szybko nastawić pokręteł zadajnika $y_2 = 80$ kPa. Po upływie 30 s, nadal nie przerywając mierzenia czasu i notowania wartości u , przełączyć wielkość regulowaną z y_1 na y_2 . Wartość y wzrosła skokowo o 20 kPa, wartość e zmalała skokowo od zera do -20 kPa. Co 10 s notować wartości u aż do osiągnięcia $u = 0$ kPa.

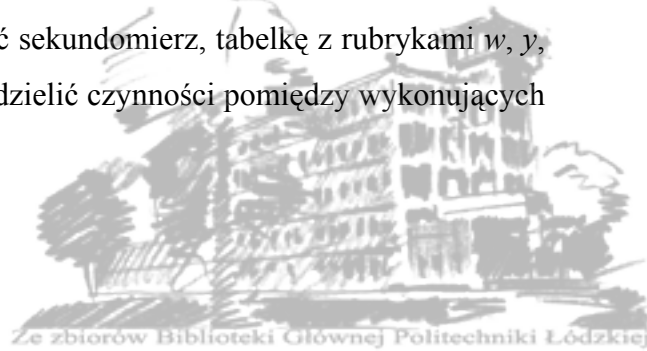
6.6.2. REGULATOR PROPORCJONALNO-RÓŻNICZKUJĄCY (PD)

Algorytm regulatora proporcjonalno-różniczkującego ma postać:

$$u = \frac{100}{X_p} \left(e + T_D \frac{de}{d\tau} \right) \quad (6.3)$$

Wielkość regulująca u jest proporcjonalna do wartości odchylenia regulacji e (działanie proporcjonalne) oraz do szybkości zmian odchylenia regulacji w czasie $\frac{de}{d\tau}$ (działanie różniczkujące). Czas wyprzedzenia T_D , nastawiany pokręteł w regulatorze, określa intensywność różniczkowania i jest czasem, po upływie którego przy liniowo narastającym odchyleniu regulacji, składowa proporcjonalna wielkości regulującej przewyższy jej składową różniczkową. Współczynnik X_p jest zakresem proporcjonalności regulatora.

Wyłączyć całkowanie zaworkiem I , wartość czasu zdwojenia T_I nastawić na minimum. Nastawić wielkość zadaną $w = 80$ kPa i wielkość regulowaną $y = y_1 = 70$ kPa. Wartość y_2 nastawić na 50 kPa. Zaczekać, aż u osiągnie wartość około 10 kPa, czyli $w - y$ ($X_p = 100$ %). Nastawić czas wyprzedzenia $T_D = 5$ min. Przygotować sekundomierz, tabelkę z rubrykami w , y , e , τ i u . Przeczytać najpierw ten rozdział do końca, podzielić czynności pomiędzy wykonujących zadanie.



Uruchomić pomiar czasu i w odstępach co 10 s zanotować trzy kolejne wartości u (pierwszy odczyt w czasie $\tau = 0$, wszystkie wartości u zbliżone do 10 kPa). W momencie $\tau = 30$ s zanotować czwartą wartość u i przełączyć wielkość regulowaną y z y_1 na y_2 . Wartość odchylenia regulacji e wzrosła skokowo z +10 kPa do +30 kPa (o 20 kPa). W dalszym ciągu co 10 s notować wartości u , aż do osiągnięcia stabilnej w czasie wartości $u \approx 30$ kPa ($w - y$). **Dodatkowo należy zanotować w tabelce wartość i czas osiągnięcia maksimum u natychmiast po przełączeniu wartości y .**

Po zakończeniu pomiarów nastawić w regulatorze minimalną wartość czasu wyprzedzenia T_D . Pokrętle nastawiania wielkości regulowanej $y = y_2$ zmieniać w obu kierunkach i z różnymi szybkościami wartość ciśnienia y , obserwując wpływ szybkości zmian sygnału wejściowego $\frac{dy}{d\tau}$ regulatora na wartość sygnału wyjściowego (ciśnienia u) - działanie różniczkujące regulatora. Na zakończenie doprowadzić u do wartości 0 kPa ($y = w$).

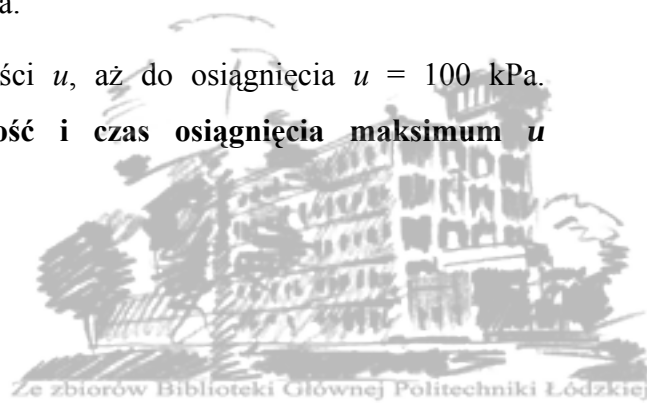
6.6.3. REGULATOR PID

Algorytm regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID) omówiono w literaturze [1]. Regulator ten łączy w sobie właściwości poprzednio zbadanych rodzajów regulatorów P, I oraz D.

Nastawić wielkość zadaną regulatora $w = 60$ kPa, wielkość regulowana $y = y_1 = 60$ kPa. Nastawić wartość $y_2 = 40$ kPa. Wartość u powinna wynosić około 0 kPa ($w - y$). Nastawić $T_D = 5$ min, $T_I = 1$ min, $X_P = 100$ %, praca regulatora normalna (N). Przygotować sekundomierz, tabelkę z rubrykami w , y , e , τ i u . Przeczytać najpierw ten rozdział do końca, podzielić czynności między wykonujących zadanie.

Tuż przed rozpoczęciem pomiarów włączyć całkowanie zaworkiem I , a następnie uruchomić pomiar czasu i w odstępach co 10 s zanotować trzy kolejne wartości u (pierwszy odczyt w czasie $\tau = 0$, wszystkie wartości u zbliżone do 0 kPa). W momencie $\tau = 30$ s zanotować czwartą wartość u i przełączyć wielkość regulowaną z y_1 na y_2 . Wartość y zmalała o 20 kPa, odchylenie regulacji e wzrosło od 0 do +20 kPa.

W dalszym ciągu notować co 10 s wartości u , aż do osiągnięcia $u = 100$ kPa. **Dodatkowo należy zanotować w tabelce wartość i czas osiągnięcia maksimum u natychmiast po przyłączeniu wartości y .**



6.7. WPLYW CIŚNIENIA POWIETRZA ZASILAJĄCEGO

Wyłączyć całkowanie zaworkiem I , nastawić minimalną wartość czasu zdwojenia T_I oraz minimalną wartość czasu wyprzedzenia T_D . Nastawić wielkość zadaną $w = 90$ kPa, wielkość regulowaną $y = y_I = 30$ kPa. Wielkość regulująca u powinna osiągnąć wartość około 60 kPa ($w - y$). Pokręćłem reduktora ciśnienia (górnym) zmieniać ciśnienie P_0 zasilające cały układ pomiarowy, w granicach $100 \div 160$ kPa co 10 kPa, notując w tabelce ustalone wartości wyjściowego sygnału regulatora u .

6.8. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Nastawić $P_0 = 150$ kPa, $w = y_I = y_2 = 60$ kPa, $u_0 = 60$ kPa. Przełącznik kierunku pracy regulatora ustawić w pozycji O . Przełącznik rodzaju pracy w stacyjce operacyjnej ustawić w pozycji "ręczna" (R). Wyłączyć wyłącznik W_s . Zamknąć zawór powietrza ZZ .

6.9. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

6.9.1. RĘCZNE STEROWANIE URZĄDZENIEM WYKONAWCZYM

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 6.3, sporządzić wykres charakterystyki ręcznego sterowania zaworem $S = f(u)$. Ze względu na brak przy siłowniku ustawnika pozycyjnego, charakterystyka ta może być nieliniowa i obarczona histerezą, co jest spowodowane między innymi nieliniową charakterystyką sprężyny powrotnej siłownika i tarciem w dławicy zaworu.

6.9.2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA REGULATORY P

Na wspólnym rysunku (w tym samym układzie współrzędnych) sporządzić wykresy charakterystyk statycznych $u = f(e)$ regulatora proporcjonalnego (P) dla wszystkich badanych zakresów proporcjonalności, kierunków pracy i wartości u_0 . Wykresy charakterystyk powinny być prostymi! Dla każdej prostej wyznaczyć z jej nachylenia i punktu przecięcia z osią rzędnych wartości K_p i u_0 (równanie 6.1). Przy każdym wykresie charakterystyki napisać wyznaczone równanie regulatora.



6.9.3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE REGULATORA PID

Sporządzić wykres odpowiedzi na wymuszenie skokowe $u = f(\tau)$ regulatora PI (rozdział 6.6.1). Na ten sam rysunek nanieść wykres skokowych przełążeń odchylenia regulacji $e = f(\tau)$.

Na oddzielnym rysunku sporządzić wykres odpowiedzi na wymuszenie skokowe $u = f(\tau)$ regulatora PD (rozdział 6.6.2). Również na ten rysunek nanieść przebieg skokowej zmiany wartości odchylenia regulacji $e = f(\tau)$.

Na trzecim rysunku sporządzić wykres odpowiedzi na wymuszenie skokowe regulatora PID (rozdział 6.6.3). Również i tu nanieść na rysunek przebieg zmiany wartości odchylenia regulacji.

6.9.4. WPLYW CIŚNIENIA POWIETRZA ZASILAJĄCEGO

Sporządzić wykres $u = f(P_0)$ (rozdział 6.7. Wyznaczyć współczynnik stabilizacji wewnętrznej regulatora ze wzoru:

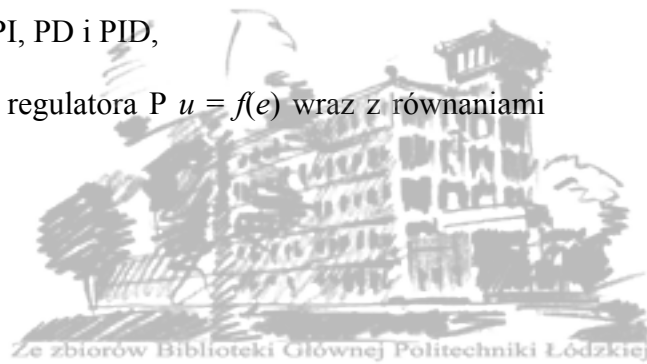
$$\gamma = \frac{\Delta u}{\Delta P_0} \quad [\%]/[\text{Kpa}] \quad (6.4)$$

Wartość Δu wyrazić w % zakresu zmienności u (20...100 kPa), natomiast wartość ΔP_0 w kPa. Wartość γ obliczyć dla maksymalnej badanej różnicy ΔP_0 .

6.10. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- uproszczony schemat układu do badania statycznych i dynamicznych właściwości regulatora pneumatycznego PID z krótkim opisem,
- wykres charakterystyki ręcznego sterowania zaworem $S = f(u)$,
- tabelki z wynikami badania charakterystyki statycznej i odpowiedzi na wymuszenia skokowe regulatora P, PI, PD i PID,
- wykresy charakterystyk statycznych regulatora P $u = f(e)$ wraz z równaniami uzyskanych prostych,



- wykresy odpowiedzi na wymuszenia skokowe $u, e = f(\tau)$ regulatora PI, PD oraz PID,
- tabelkę i wykres $u = f(P_0)$ oraz obliczenie współczynnik stabilizacji wewnętrznej regulatora γ ,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń

6.11. LITERATURA

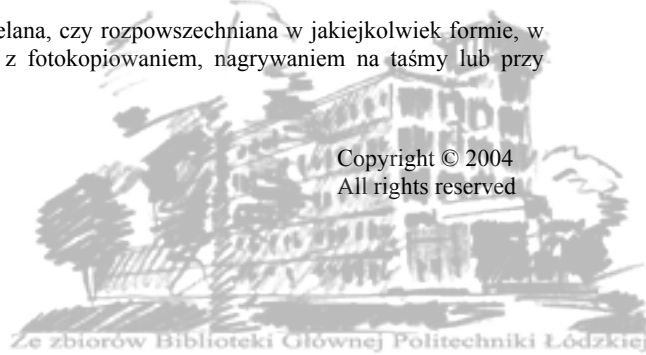
Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii oraz książki:

- [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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved

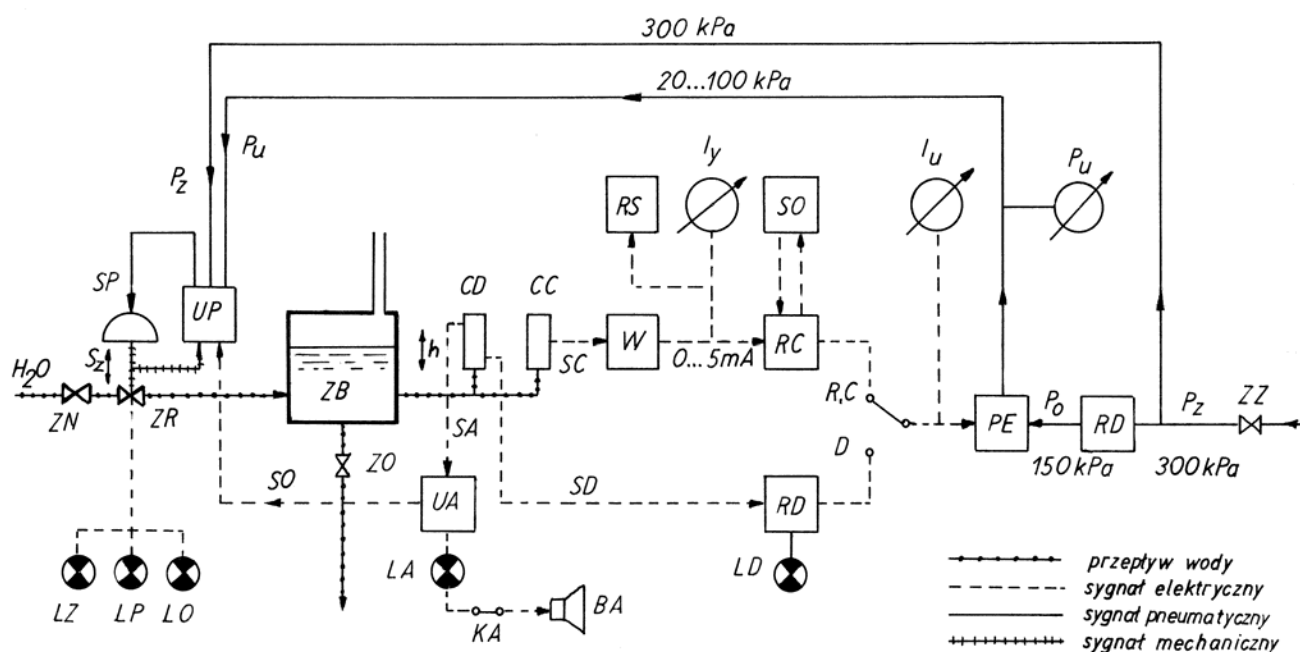


7. ELEKTRONICZNY REGULATOR PID DO REGULACJI POZIOMU CIECZY W ZBIORNIKU

Cel zadania: Porównanie statycznych i dynamicznych właściwości układów sterowania ręcznego oraz dwupołożeniowej i ciągłej regulacji poziomu cieczy w zbiorniku. Działanie przemysłowego regulatora elektronicznego PID, międzysystemowego przetwornika elektropneumatycznego oraz zaworu regulacyjnego z pneumatycznym siłownikiem tłokowym i ustawnikiem pozycyjnym. Doświadczalne określenie optymalnych nastaw regulatora PID metodą Zieglera i Nicholasa.

7.1. UKŁAD REGULACJI

Schemat układu regulacji poziomu cieczy przedstawia rysunek 7.1. Obiektem regulacji jest zbiornik ZB, przez który przepływa woda wodociągowa. Zadaniem układu regulacji jest utrzymanie zadanego poziomu wody w zbiorniku (regulacja stałowartościowa).



Rys. 7.1. Schemat układu regulacji poziomu cieczy

Woda dopływa do zbiornika przez zawór napływowy ZN i następnie przez kulowy zawór regulacyjny ZR. Zawór regulacyjny jest sterowany dwutłokowym siłownikiem pneumatycznym SP firmy Worcester, połączonym z ustawnikiem pozycyjnym UP. Ustawnik

zapewnia jednoznaczność i liniowość stopnia otwarcia zaworu (S_z) w funkcji wartości sygnału regulującego (ciśnienia P_u). Ustawnik i siłownik są zasilane sprężonym powietrzem o ciśnieniu $P_z = 250 \div 300$ kPa ze stacji zasilania. Pozostałe układy pneumatyczne są zasilane za pośrednictwem reduktora ciśnienia RD z filtrem i odoliwiaczem powietrza. Woda odpływa ze zbiornika przez zawór odpływowy ZO . Poziom h wody w zbiorniku oraz jest mierzony czujnikiem ciągłym (analogowym) CC , a przekroczenia jego założonych wartości są sygnalizowane czujnikiem dwupołożeniowym (dyskretnym) CD .

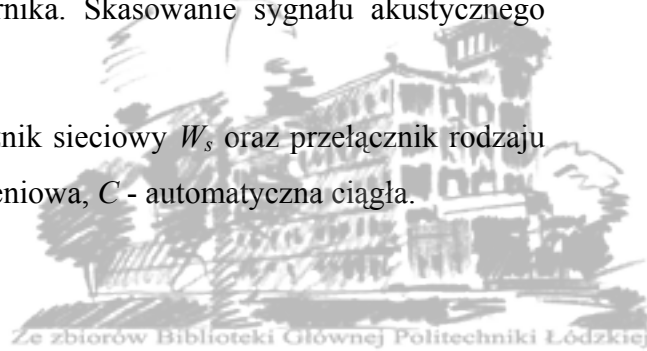
Czujnik dwupołożeniowy jest czujnikiem typu konduktometrycznego, w którym słup wody wodociągowej, zawierającej zawsze niewielkie ilości związków chemicznych w postaci zdysocjowanej, zamyka obwód prądu elektrycznego po zetknięciu się z umieszczonym w szklanej rurce drucikiem. Czujnik dwupołożeniowy wyposażono w dwa druciki, umocowane na różnych wysokościach i dostarczające dwóch dwustanowych sygnałów elektrycznych: sygnału SD do dwupołożeniowego regulatora poziomu wody RD oraz sygnału alarmu SA do układu alarmu UA . Rurka czujnika dwupołożeniowego jest zaopatrzona w podziałkę i może być wykorzystywana również jako miejscowy wskaźnik poziomu wody w zbiorniku - tzw. poziomowskaz.

Czujnik ciągły jest poziomomierzem pływakowym, z transformatorowym, różnicowym przetwornikiem liniowego przesunięcia pływaka, którego konstrukcję i działanie omówiono w literaturze ([1], rozdz. 10.1.6.B). Sygnał napięciowy SC z czujnika ciągłego jest doprowadzony do wzmacniacza W i następnie jako sygnał prądowy I_y do regulatora ciągłego RC .

Zespoły manipulacyjne i sygnalizacyjne są umieszczone w szafie sterowniczej. Elektryczny, ciągły sygnał poziomu wody w zbiorniku jest wskazywany przez miliamperomierz wielkości regulowanej I_y . Sygnał ten jest prądowym sygnałem standardowym 0...5 mA. Zerowy stan poziomu wody ($h = 0$) odpowiada wartości prądu $I_y = 0$ mA; maksymalny mierzony stan poziomu wody w zbiorniku ($h = 100\%$) odpowiada wartości prądu $I_y = 5$ mA.

Pod miernikiem sygnału I_y jest umieszczona lampka LD , sygnalizująca zadziałanie czujnika dwupołożeniowego CD przy napełnieniu zbiornika do ok. $h = 50\%$. Wzrost poziomu wody powyżej $h = 100\%$, powoduje zadziałanie czujnika alarmu i układu alarmu UA , odcinającego natychmiast dopływ wody do zbiornika i sygnalizującego optycznie (lampka LA) i akustycznie (buczek BA) stan przepełnienia zbiornika. Skasowanie sygnału akustycznego alarmu następuje po wciśnięciu przycisku KA .

Poniżej lampek LD i LA znajduje się wyłącznik sieciowy W_s oraz przełącznik rodzaju pracy układu: R - ręczna, D - automatyczna dwupołożeniowa, C - automatyczna ciągła.



W środkowej części szafy sterowniczej są umieszczone: elektroniczny regulator ciągły *RC* typu ARC-21, stacyjka operacyjna *SO* typu ADS-42 (obydwa urządzenia produkcji zakładów MERA-ELWRO) oraz rejestrator *RS* wielkości regulowanej (poziomu wody w zbiorniku). Rejestrator posiada (umieszczony z lewej strony) oddzielny wyłącznik sieciowy W_r . Prędkość przesuwu taśmy rejestratora nie jest typowa dla rejestratorów przemysłowych, jest 10x większa i wynosi 200 mm/godz.

Z prawej strony przedniej ściany szafy sterowniczej znajdują się mierniki standardowych sygnałów wyjściowych układu sterowania i regulacji: sygnału elektrycznego I_u (0...5 mA) oraz sygnału pneumatycznego P_u (20...100 kPa).

Pod miernikami są umieszczone lampki sygnalizujące stan urządzenia wykonawczego - zaworu regulacyjnego (*LZ* - zamknięty, *LO* - otwarty, *LP* - położenia pośrednie).

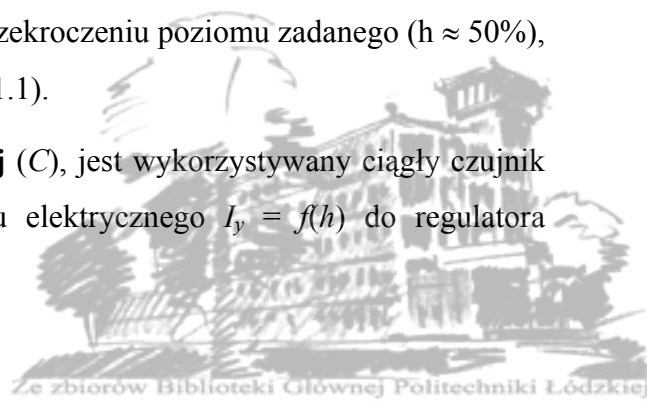
Układ sterująco-regulacyjny może pracować w trzech wariantach:

- a) systemie ręcznego sterowania poziomem cieczy w zbiorniku,
- b) systemie automatycznej regulacji dwupołożeniowej,
- c) systemie automatycznej regulacji ciągłej.

W systemie **sterowania ręcznego** (*R*), sygnał wyjściowy układu jest nastawiany ręcznie przez obsługującego za pośrednictwem stacyjki operacyjnej przełączonej na sterowanie ręczne. Ciągły, elektryczny sygnał wyjściowy stacyjki I_u jest przetwarzany w międzysystemowym przetworniku elektropneumatycznym *PE* na sygnał pneumatyczny P_u , który z kolei steruje ustawnikiem pozycyjnym sprzęgniętym z siłownikiem pneumatycznym i zaworem regulacyjnym. Wartość wielkości sterowanej (poziomu wody w zbiorniku) może być odczytywana ze wskaźnika I_y lub ze wskaźnika rejestratora.

W systemie **automatycznej regulacji dwupołożeniowej** (*D*) jest wykorzystywany dwupołożeniowy czujnik poziomu wody *CD*, dostarczający sygnału dyskretnego do regulatora dwupołożeniowego *RD*. Elektryczny sygnał wyjściowy regulatora, o charakterze nieciągłym (dwustanowym): 0 mA lub 5 mA, jest przetwarzany w przetworniku międzysystemowym na również dwustanowy sygnał pneumatyczny (20 lub 100 kPa), sterujący siłownikiem pneumatycznym i zaworem regulacyjnym. Siłownik może więc ustawiać zawór tylko w krańcowych położeniach: zamkniętym lub otwartym. Zbyt niski poziom wody w zbiorniku powoduje całkowite otwarcie zaworu, natomiast po przekroczeniu poziomu zadanego ($h \approx 50\%$), zawór zamyka się całkowicie (patrz też [1], rozdz. 18.1.1).

W systemie **automatycznej regulacji ciągłej** (*C*), jest wykorzystywany ciągły czujnik poziomu wody *CC*, dostarczający ciągłego sygnału elektrycznego $I_y = f(h)$ do regulatora



ciągłego RC . Regulator porównuje sygnał wielkości regulowanej I_y z sygnałem wielkości zadanej i odpowiednio kształtuje wyjściowy sygnał wielkości regulującej I_u , zgodnie z nastawioną charakterystyką (PID). Sygnał I_u jest następnie przetwarzany w przetworniku międzysystemowym na sygnał pneumatyczny, sterujący ustawnikiem pozycyjnym, sprzęgniętym z siłownikiem pneumatycznym i zaworem regulacyjnym. Wzrost poziomu wody w zbiorniku wywołuje zwiększenie prądu I_y . Regulator odpowiednio kształtuje wyjściowy sygnał wielkości regulującej, zmniejszając wartość prądu I_u i przemykając zawór regulacyjny na dopływie wody do zbiornika. W ten sposób zostaje zamknięta pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego w układzie stałowartościowej regulacji poziomu wody w zbiorniku (patrz [1], rozdz. 17.1.1 i 18.2.4).

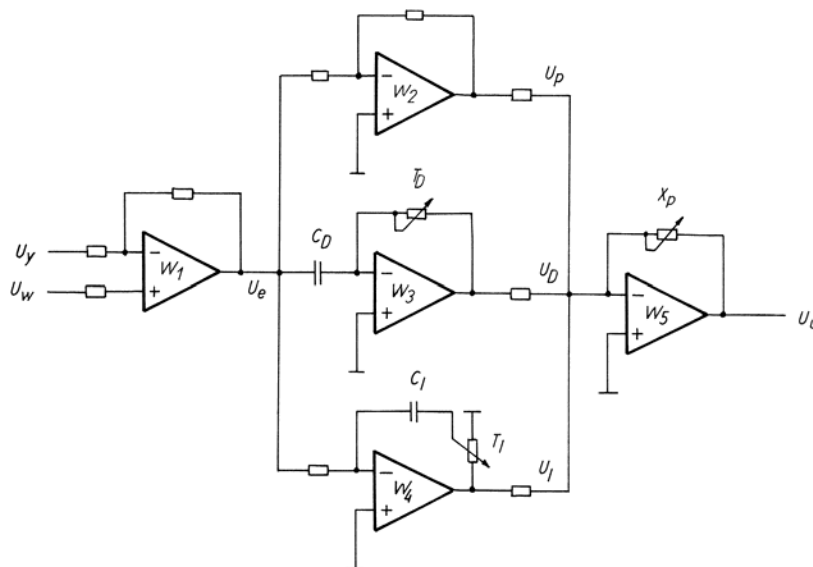
7.2. BUDOWA I DZIAŁANIE ELEKTRONICZNEGO REGULATORA PID

Uproszczony schemat blokowy elektronicznego regulatora PID przedstawia rysunek 7.2. Podstawowym elementem składowym układu regulatora jest scalony, półprzewodnikowy wzmacniacz operacyjny W , posiadający dwa wejścia: odwracające kierunek napięcia wejściowego (-) i nie odwracające kierunku napięcia wejściowego (+). Przez łączenie wyjścia wzmacniacza z jednym z jego wejść można zamykać pętlę sprzężenia zwrotnego ujemnego lub dodatniego. Sprzężenie to może być proporcjonalne (rezystor w pętli sprzężenia) lub o charakterystyce różniczkującej czy całkującej (odpowiednio włączony w pętlę człon RC). Ujemne sprzężenie proporcjonalne pozwala na zmianę statycznego wzmocnienia wzmacniacza, natomiast sprzężenie różniczkujące (D) lub całkujące (I) kształtuje jego właściwości dynamiczne.

Wzmacniacz W_1 jest członem sumującym regulatora, dokonującym operacji porównania dwóch sygnałów napięciowych $U_w - U_y = U_e$. Wzmacniacz W_2 jest członem proporcjonalnym o stałym wzmocnieniu. Wzmacniacz W_3 jest członem różniczkującym, z nastawianym czasem wyprzedzenia T_D natomiast wzmacniacz W_4 stanowi człon całkujący z nastawianym czasem zdwojenia T_I . Trzy sygnały: U_P , U_D i U_I są doprowadzone do wzmacniacza W_5 , umożliwiającego płynną zmianę wzmocnienia ich sumy i tym samym nastawianie zakresu proporcjonalności regulatora X_P .

Omówiony układ wzmacniaczy operacyjnych realizuje algorytm regulatora PID zgodnie z równaniami przedstawionymi w literaturze ([1], rozdz. 18.2.4).





Rys. 7.2. Schemat blokowy elektronicznego regulatora PID

7.3. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE UKŁADU

7.3.1. CHARAKTERYSTYKA STEROWANIA ZAWOREM REGULACYJNYM

Sprawdzić, czy jest uruchomiona sprężarka stacji zasilania (spytać laboranta) i czy ciśnienie powietrza w stacji osiągnęło wartość 300 kPa (sprężarka wyłącza się wtedy automatycznie). Otworzyć **całkowicie** umieszczony w pobliżu reduktora ciśnienia RD zawór odcinający ZZ. Pokrętle reduktora (górnym) nastawić wartość ciśnienia $P_0 = 150$ kPa.

Wyłączyć zasilanie rejestratora wyłącznikiem W_r . Włączyć zasilanie szafy sterowniczej czerwonym przyciskiem W_s . Nastawić ręczny rodzaj pracy układu sterująco-regulacyjnego przez wciśnięcie przycisku R. Regulator ciągły przełączyć na ręczną pracę układu - **wcisnąć** przycisk A/R w stacyjce operacyjnej. Pozostałe przyciski stacyjki w dowolnym położeniu. Zawór napływowy ZN wody do zbiornika (przy ścianie) powinien być zamknięty, zawór odpływowy ZO całkowicie otwarty (100 % wypływu). W tych warunkach mimo otwierania zaworu regulacyjnego, zbiornik nie będzie napełniany wodą.

Używając na przemian przycisków (+) i (−) w stacyjce operacyjnej, można dowolnie otwierać i zamykać zawór regulacyjny. Naciśnięcie i przytrzymanie odpowiedniego przycisku powoduje otwieranie lub zamykanie zaworu ze stałą prędkością. W momencie puszczenia przycisku, układ zapamiętuje położenie zaworu i utrzymuje je dowolnie długo. Nawet kilkunastominutowy zanik napięcia zasilającego nie powoduje skasowania analogowej pamięci układu.

Stopień otwarcia zaworu można odczytywać ze wskaźnika wyjścia stacyjki (sygnał u w procentach otwarcia zaworu), z miliamperomierza sygnału I_u (w mA) lub z ciśnieniomierza sygnału P_u (w kPa). Położenie zaworu jest również sygnalizowane lampkami LZ , LP i LO .

Wypróbować działanie przycisków ręcznego sterowania zaworem. Zwrócić uwagę na możliwość impulsowego operowania przyciskami, dzięki całkującej charakterystyce układu zapamiętywania położenia zaworu. Sprawdzić wpływ zaniku napięcia zasilającego na stan pamięci: po nastawieniu dowolnego położenia zaworu, wyłączyć zasilanie układu przyciskiem W_s nawet na kilka minut. Po ponownym włączeniu zasilania, zawór powinien ustawić się w położeniu takim samym, jak nastawione poprzednio.

Charakterystyka sterowania zaworem jest to zależność położenia zaworu S_z od wartości sterującego zaworem sygnału pneumatycznego P_u i elektrycznego sygnału wyjściowego stacyjki operacyjnej I_u . Operując przyciskami ręcznego sterowania zaworem, nastawiać kolejne wartości prądu I_u od 0 do 5 mA co 0,5 mA, notując w tabelce odpowiadające im wartości ciśnienia P_u oraz położenia zaworu S_z .

7.3.2. CHARAKTERYSTYKA DWUPOŁOŻENIOWEGO CZUJNIKA POZIOMU WODY

Przyciskiem sterowania ręcznego (–) zamknąć całkowicie zawór regulacyjny ($u = 0\%$). Otworzyć **całkowicie** zawór napływowy wody do zbiornika (przy ścianie). Zamknąć zawór odpływowy ZO .

Operując przyciskami (+) i (–) doprowadzić zawór regulacyjny do otwarcia w ok. 50% ($u = 50\%$). Obserwować poziomowskaz przy zbiorniku i podnoszący się powoli poziom wody h . Zwrócić uwagę na zadziałanie czujnika dwupołożeniowego (świeci się lampka LD) w momencie osiągnięcia poziomu wody $h \approx 50\%$.

Nie zamykając zaworu regulacyjnego poczekać, aż poziom wody przekroczy 100 % i osiągnie stan alarmowy. Po włączeniu się alarmu skasować sygnał akustyczny przyciskiem KA . Zwrócić uwagę na niemożność skasowania optycznego sygnału alarmowego (lampka LA) oraz automatyczne zamknięcie się zaworu regulacyjnego, niezależne od operowania przyciskami sterowania ręcznego. Lampka alarmu zgaśnie dopiero po obniżeniu się poziomu wody w zbiorniku, wtedy również zostanie przywrócona możliwość sterowania zaworem regulacyjnym.



7.3.3. CHARAKTERYSTYKA CIĄGŁEGO CZUJNIKA POZIOMU WODY

Przyciskiem sterowania ręcznego (–) doprowadzić sygnał u do wartości zerowej (zawór regulacyjny zamknięty). Otwierając minimalnie zawór odpływowy ZO, doprowadzić wskazania poziomomierza przy zbiorniku do 100 % (dolny menisk!). Zwrócić uwagę na zgaśnięcie lampki alarmu. Odczytać z miliamperomierza i zanotować w tabelce wartość sygnału wielkości regulowanej I_y .

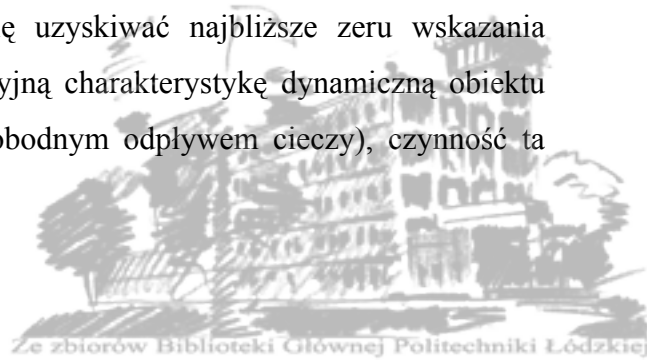
Poziom wody w zbiorniku obniżyć powoli do 90%. Ponownie odczytać wartość prądu I_y . Pomiary kontynuować, obniżając poziom wody w zbiorniku co 10% aż do 0%. Zbadaliśmy zależność wskazań miernika I_y od poziomu wody w zbiorniku h - charakterystykę statyczną ciągłego (analogowego) pomiaru poziomu wody.

7.4. RĘCZNE STEROWANIE POZIOMEM WODY W ZBIORNIKU

Czynność ta będzie polegała na takim operowaniu przyciskami ręcznego sterowania zaworem, żeby przy uruchomionym dopływie i odpływie wody, utrzymać w zbiorniku jej zadany poziom.

Stan napełnienia zbiornika można odczytywać z miernika I_y lub z rejestratora. Najlepiej jednak wykorzystać w tym celu stacyjkę operacyjną. Po nastawieniu w stacyjce zadanej wartości poziomu wody (w), miernik odchylenia regulacji ($-e$) wskazuje (w procentach) odchylenie poziomu wody w zbiorniku od wartości zadanej. Funkcję tę spełnia stacyjka niezależnie od rodzaju pracy układu (sterowania ręcznego, czy regulacji automatycznej). Właściwemu (zadanemu) poziomowi wody odpowiada oczywiście wartość $e = 0$ ($y = w$). Położenie zaworu regulacyjnego można oceniać na podstawie wychyleń drugiego (prawego) wskaźnika stacyjki (u), wykalibrowanego w procentach otwarcia zaworu.

Nastawić lewym pokrętkiem stacyjki $w = 50$ % (pokrętko jest wieloobrotowe, uwaga na cyfrowy odczyt jednostek w okienku i analogowy odczyt części dziesiątych na podziałce pokrętki). Włączyć rejestrator wyłącznikiem W_r . Otworzyć całkowicie zawór odpływowy ZO. Obserwując wskaźniki $-e$ oraz u stacyjki i operując przyciskami ręcznego sterowania zaworem (+ i –), starać się utrzymać zadaną wartość poziomu wody w zbiorniku (ok. 50 %). Na zwiększanie się poziomu wody (wzrost wartości $-e$) należy reagować przymykaniem zaworu (zmniejszaniem wartości u) i odwrotnie. Starać się uzyskiwać najbliższe zeru wskazania miernika $-e$ stacyjki. Ze względu na całkująco-inercyjną charakterystykę dynamiczną obiektu regulacji (zbiornik z wymuszonym dopływem i swobodnym odpływem cieczy), czynność ta wymaga dużego skupienia.



Każda z osób wykonujących zadanie powinna przeprowadzić próbę ręcznego utrzymywania poziomu wody w zbiorniku przez co najmniej 5 minut. Wyniki ręcznego utrzymywania zadanego poziomu wody w zbiorniku są rejestrowane na taśmie rejestratora. Na tej taśmie **należy nanieść** (po otwarciu drzwiczek rejestratora) inicjały autorów sterowania.

7.5. DWUPOŁOŻENIOWA REGULACJA POZIOMU WODY

Otworzyć całkowicie zawór regulacyjny ($u = 100\%$) i wcisnąć przycisk D włączający regulator dwupołożeniowy. Stacyjka nadal nastawiona na pracę ręczną, zawór odpływowy ZO całkowicie otwarty, rejestrator **włączony**.

Obserwować pracę układu regulacji przez 5 minut. Zwrócić uwagę na zależność stanu zaworu regulacyjnego od działania dwupołożeniowego czujnika poziomu wody w zbiorniku oraz na pewne opóźnienie funkcjonowania zaworu.

Po upływie 5 minut zmniejszyć wypływ wody ze zbiornika, przymykając zawór ZO do 50 % wypływu. Obserwować działanie regulatora przez następne 5 minut i zaznaczyć na taśmie rejestratora (po otwarciu drzwiczek) warianty regulacji.

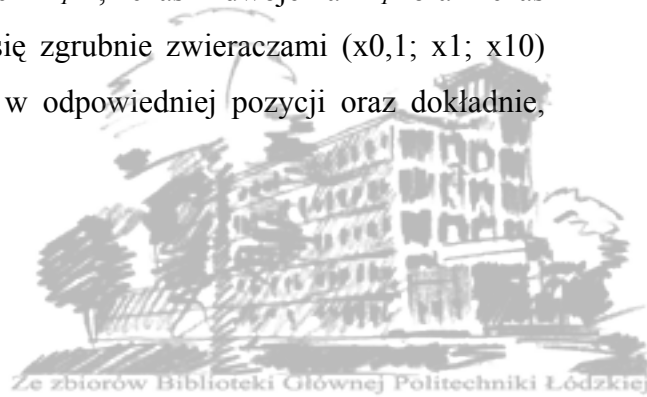
7.6. CIĄGŁA REGULACJA POZIOMU WODY

7.6.1. OKREŚLENIE KRYTYCZNEGO WZMOCNIENIA REGULATORA

Do określenia krytycznego wzmocnienia regulatora zostanie zastosowana metoda Zieglera i Nicholasa, opisana w literaturze ([1], rozdz. 23.2.2.B).

Stacyjkę operacyjną i regulator przełączyć na automatyczny rodzaj pracy (**wyciśnięte** przyciski S i A/R), rejestrator **włączony**. Wciskając przycisk C włączyć ciągłą regulację poziomu wody. Otworzyć całkowicie zawór odpływowy ZO . Pokrętle stacyjki nastawić zadany poziom wody $w = 50\%$.

Wysunąć z szafy sterowniczej panel regulatora RC (do pierwszego oporu!). Na prawej bocznej ścianie panelu są umieszczone elementy manipulacyjne regulatora PID. Można nimi nastawiać (w procentach) zakres proporcjonalności X_P , czas zdwojenia T_I oraz czas wyprzedzenia T_D . Nastawy regulatora wprowadza się zgrubnie zwieraczami ($\times 0,1$; $\times 1$; $\times 10$) wyciągając je z gniazdek i umieszczając ponownie w odpowiedniej pozycji oraz dokładnie, odpowiednimi pokrętlami.



Zminimalizować całkowite działanie regulatora przez nastawienie maksymalnego czasu zdwojenia ($T_I = 30$ min) oraz wyłączyć jego działanie różniczkujące przez nastawienie zerowego czasu wyprzedzenia ($T_D = 0$ min). Nastawić początkowe wzmocnienie regulatora $X_P = 100\%$ i przez 5 minut obserwować pracę układu regulacji.

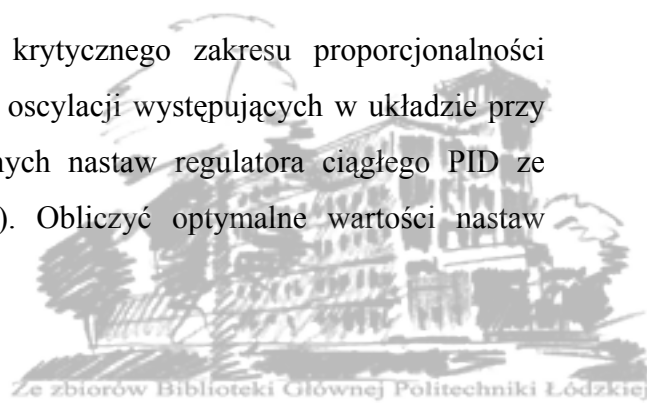
Zwrócić uwagę na proporcjonalne do odchylenia regulacji e wychylenia wskaźnika u stacyjki. Przy $X_P = 100\%$ współczynnik proporcjonalności (wzmocnienie proporcjonalne regulatora) wynosi 1. Spadek poziomu wody w zbiorniku powoduje proporcjonalne otwarcie zaworu regulacyjnego. Mimo włączenia układu ciągłego regulatora proporcjonalnego, wielkość regulowana może mieć jednak wartość różną od zadanej, ponieważ przy małym wzmocnieniu regulatora występuje znaczny statyczny błąd regulacji.

Kontynuować pomiary, zmniejszając stopniowo zakres proporcjonalności regulatora do 75, 50, 20, 15 i 10 %, rejestrując przy każdym nastawionym wzmocnieniu przebieg regulacji przez 5 minut. Obserwować, przy którym zakresie proporcjonalności pojawią się regularne oscylacje poziomu wody w zbiorniku (wykres rejestratora), o amplitudzie wyraźnie zwiększonej w stosunku do przebiegu przy poprzednim zakresie X_P (podobne do przebiegu regulacji dwupołożeniowej). W razie wątpliwości poprosić o pomoc prowadzącego zajęcia nauczyciela. Osiągnęliśmy krytyczny zakres proporcjonalności, wzmocnienie układu regulacji przy tym zakresie jest "wzmocnieniem krytycznym". Dalej nie potrzeba już zmniejszać zakresu proporcjonalności regulatora, tylko zanotować wartość X_{Pkr} (w %). Przy pomocy sekundomierza zmierzyć i zanotować okres oscylacji wielkości regulowanej (poziomu cieczy h) przy X_{Pkr} (w sekundach). Korzystać ze wskaźnika rejestratora, obliczyć średnią z trzech pomiarów. Okres oscylacji (T_{osc}) jest odcinkiem czasu pomiędzy dwoma sąsiednimi maksimami lub minimami rejestrowanego przebiegu zmian wielkości regulowanej.

Zwrócić uwagę na fakt, że po osiągnięciu krytycznego wzmocnienia regulatora, układ regulacji ciągłej ma charakterystykę dynamiczną regulatora dwupołożeniowego. Sygnał I_u osiąga tylko dwie krańcowe wartości, zawór regulacyjny jest otwarty lub zamknięty, a poziom wody w zbiorniku oscyluje wokół wartości zadanej.

7.6.2. OBLICZENIE NASTAW REGULATORA PID

Znajomość krytycznego wzmocnienia lub krytycznego zakresu proporcjonalności regulatora w badanym układzie regulacji oraz okresu oscylacji występujących w układzie przy tym wzmocnieniu, pozwala na obliczenie optymalnych nastaw regulatora ciągłego PID ze wzorów Zieglera i Nicholasa ([1], rozdz. 23.2.2.B). Obliczyć optymalne wartości nastaw



regulatora według tabeli 1.3 i czasy **przeliczyć na minuty**. Obliczone wartości nastawić odpowiednimi przełącznikami i pokrętlami regulatora.

Tabela 7.1. Optymalne nastawy regulatora PID wg Zieglera i Nicholsa [3]

Rodzaj regulatora	Nastawy		
	X_p	T_I	T_D
PID	$1,7 X_{pkr}$	$0,5 T_{osc}$	$0,12 T_{osc}$

Obserwować pracę układu ciągłej regulacji poziomu wody w zbiorniku z optymalnymi nastawami regulatora PID przez 5 minut. Po tym czasie zmniejszyć zadaną wartość poziomu wody w z 50 do 25%. Po następnych 5 minutach nastawić $w = 75\%$ i rejestrować przebieg regulacji jeszcze przez 5 minut. Po tym czasie wyłączyć rejestrator wyłącznikiem W_r i cały układ regulacji wyłącznikiem W_s .

7.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Zamknąć całkowicie zawór napływowy ZN wody do zbiornika (przy ścianie). Zawór odpływowy ZO pozostawić całkowicie otwarty. Zamknąć zawór odcinający dopływ sprężonego powietrza ZZ . Poprosić laboranta o wyjęcie taśmy z zapisem rejestratora.

7.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

7.8.1. RĘCZNE STEROWANIE POZIOMEM WODY W ZBIORNIKU

Korzystając z wyników pomiarów zawartych w punkcie 1.7.3.1, wykreślić charakterystykę statyczną sterowania zaworem z siłownikiem i ustawnikiem pozycyjnym - zależność położenia zaworu S_z od wielkości sygnału sterującego P_u . Na następnym wykresie przedstawić charakterystykę statyczną międzysystemowego przetwornika elektro-pneumatycznego - zależność wielkości sygnału pneumatycznego P_u od wielkości sygnału elektrycznego I_u , a na trzecim wykresie, wypadkową charakterystykę ręcznego sterowania zaworem - zależność położenia zaworu S_z od wielkości sygnału elektrycznego I_u .



7.8.2. CHARAKTERYSTYKA DWUPOŁOŻENIOWEGO CZUJNIKA POZIOMU WODY

Korzystając z wyników pomiarów zawartych w punkcie 7.3.3, wykreślić charakterystykę statyczną pływakowego, ciągłego czujnika poziomu wody w zbiorniku - zależność wielkości sygnału I_y od poziomu wody h . Ze względu na duży dla tego typu czujnika transformatorowego zakres przesunięcia liniowego pływaka, charakterystyka ta nie musi być idealnie liniowa.

7.8.3. RĘCZNE STEROWANIE POZIOMEM WODY W ZBIORNIKU

Korzystając z wykresu rejestratora z zapisanym przebiegiem ręcznego utrzymywania zadanego poziomu wody w zbiorniku, określić maksymalne odchylenia ($+e_{max}$ i $-e_{max}$) poziomu wody h od wartości zadanej ($h = 50 \%$) w procentach całego zakresu rejestracji (szerokości taśmy rejestratora), przyjętego za 100%. Przy analizie zapisu rejestratora nie brać pod uwagę odchylen h w momentach rozpoczynania i kończenia czynności sterowania ręcznego.

Obliczyć maksymalny błąd względny ΔE_{max} ręcznego sterowania poziomem wody w zbiorniku:

$$\Delta E_{max} = +e_{max} + |-e_{max}| \quad [\%] \quad (7.1)$$

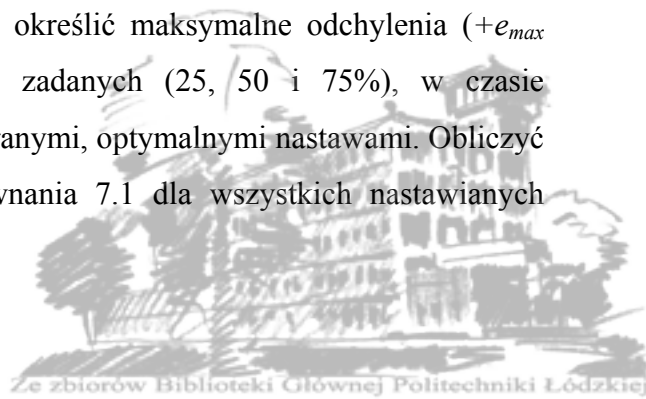
7.8.4. DWUPOŁOŻENIOWA REGULACJA POZIOMU WODY

Korzystając z zapisu rejestratora, określić maksymalne odchylenia poziomu wody w zbiorniku od wartości zadanej $h = 50 \%$ ($+e_{max}$ i $-e_{max}$) w czasie ustabilizowanej pracy regulatora (w kilka minut od uruchomienia pomiaru).

Obliczyć maksymalny błąd względny regulacji dwupołożeniowej z równania 7.1 dla obu badanych położenia zaworu odpływowego (100 % i 50 % wypływu).

7.8.5. CIĄGŁA REGULACJA POZIOMU WODY

Korzystając z taśmy z zapisem rejestratora, określić maksymalne odchylenia ($+e_{max}$ i $-e_{max}$) poziomu wody w zbiorniku od wartości zadanych (25, 50 i 75%), w czasie ustabilizowanej pracy regulatora PID z wcześniej dobranymi, optymalnymi nastawami. Obliczyć maksymalny błąd względny regulacji ciągłej z równania 7.1 dla wszystkich nastawianych wartości zadanych poziomu wody (25, 50 i 75 %).



7.9. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- uproszczone (nie przerysowane z instrukcji) schematy blokowe układów sterowania ręcznego oraz dwupołożeniowe i ciągłej regulacji poziomu wody w zbiorniku (z krótkimi opisami),
- tabele z wynikami pomiarów, zapis rejestratora z zaznaczeniem na taśmie **wszystkich** wykonanych doświadczeń,
- wykresy charakterystyk statycznych układu sterowania zaworem (trzy) i ciągłego czujnika poziomu wody,
- wartości błędów sterowania i regulacji $+e_{max}$, $-e_{max}$ i ΔE_{max} dla sterowania ręcznego i regulacji automatycznych (tabelka zbiorcza),
- obliczenia optymalnych nastaw regulatora PID,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.

7.10. LITERATURA

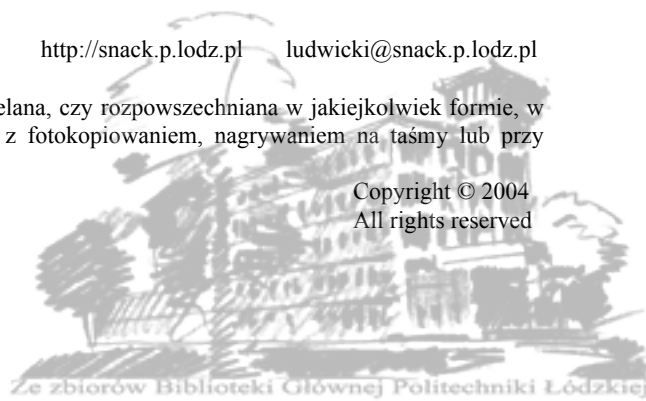
Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii oraz książki:

- [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@snack.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.

Copyright © 2004
All rights reserved

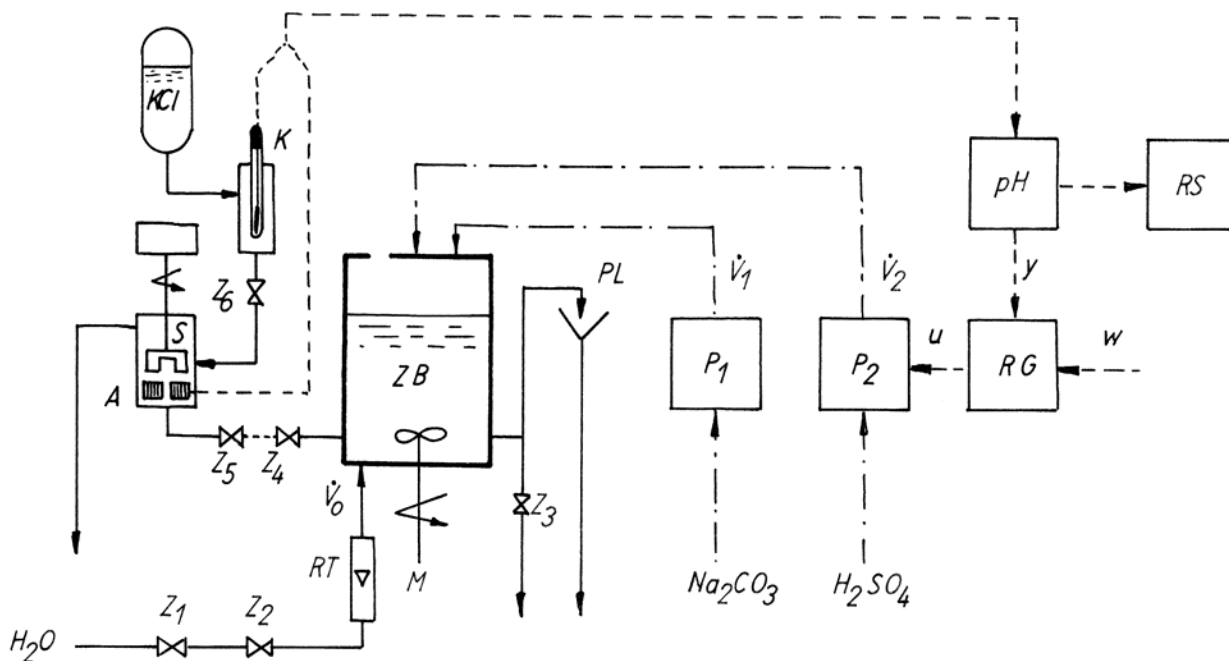


8. AUTOMATYCZNA, MIKROPROCESOROWA REGULACJA pH W REAKTORZE PRZEPŁYWOWYM

Cel zadania: *Poznanie działania układu stałowartościowej regulacji pH w zbiorniku przepływowym, z wykorzystaniem elektronicznego oraz mikroprocesorowego regulatora proporcjonalnego i proporcjonalno-całkującego. Wpływ opóźnienia transportowego na dynamikę obiektu regulacji.*

8.1. UKŁAD REGULACJI

Schemat układu regulacji pH przedstawia rysunek 8.1. Przez zbiornik (reaktor) *ZB* przepływa z natężeniem przepływu $\dot{V}_0$ woda wodociągowa. Wartość $\dot{V}_0$ mierzy rotametr *RT*. Ze zbiornika woda odpływa przez przelew *PL*, który umożliwia napełnienie zbiornika do stałego poziomu.



Rys. 8.1. Schemat układu regulacji pH

Część wody ze zbiornika przepływa przez zawory Z_4 i Z_5 oraz czujnik pehametryczny z antymonową elektrodą pomiarową *A* i chlorosrebrową elektrodą porównawczą *K*. Metalowa elektroda antymonowa jest czyszczona mechanicznie szczotką *S*, obracaną miniaturowym silnikiem elektrycznym. Elektrode chlorosrebrową łączy z czujnikiem mostek solny ("klucz elektrolityczny") wypełniony 2N roztworem KCl (patrz też [1], rozdz. 12.7.1.A).

Do zbiornika jest dozowany mikropompką P_1 z wydajnością $\dot{V}_1$ roztwór węglańca sodowego. Druga mikropompka (P_2) dozuje z wydajnością $\dot{V}_2$ roztwór kwasu siarkowego. Oba roztwory są mieszane w zbiorniku z przepływającą wodą mieszadłem magnetycznym M .

Wydajność pompy P_1 , dozującej roztwór Na_2CO_3 może być zmieniana skokowo ręcznie. Wydajność pompy dozującej roztwór H_2SO_4 (P_2) może być płynnie nastawiana ręcznie lub regulowana automatycznie za pośrednictwem regulatora RG .

Przy pracy automatycznej, regulator ma za zadanie utrzymać na wypływie ze zbiornika stałą wartość pH (regulacja stałowartościowa). Wielkość regulowana y z pehametru jest w tym celu porównywana z wielkością zadaną w z zadajnika ręcznego, a sygnał wyjściowy wielkości regulującej u regulatora zmienia wydajność pompy dozującej P_2 zgodnie z równaniami regulatora proporcjonalnego (P) lub proporcjonalno-całkującego (PI) (patrz [1], rozdz. 18.2).

W momencie zwiększania się pH cieczy opuszczającej zbiornik ponad wartość zadaną ($y > w$), u rośnie, pompa P_2 zwiększa wydajność dozowania kwasu i pH spada. Gdy $y = w$, pompa P_2 utrzymuje stałą wydajność. Gdy pH cieczy na wypływie zbiornika spada, $y < w$, u maleje i pompa P_2 zmniejsza wydajność, doprowadzając do podwyższenia się wartości pH. Wielkość proporcjonalnego wzmocnienia regulatora (zakresu proporcjonalności) może być nastawiana odpowiednim pokrętkiem (X_P). Całkowanie może być włączane lub wyłączane przyciskiem I . Przebieg zmian pH cieczy opuszczającej zbiornik jest rejestrowany w analogowym rejestratorze RS .

Uwaga ! *Ćwiczenie może być wykonywane w dwóch wariantach. Z ręcznym badaniem odpowiedzi na wymuszenie skokowe i analogową regulacją pH lub z komputerowym wspomaganie analizowania odpowiedzi na wymuszenie skokowe i mikroprocesorową regulacją pH. Wariant pierwszy jest stosowany wyłącznie w przypadku awarii układu komputerowego.*

W celu umożliwienia korzystania ze wspomagającego mikrokomputera, sygnał pomiarowy z pehametru doprowadzono dodatkowo do połączonego z komputerem specjalnego przetwornika analogowo-cyfrowego. Przetwornik ten posiada wyjścia cyfrowe do skokowego przełączania wydajności pompy P_1 oraz wyjście analogowe do sterowania wydajnością pompy P_2 . Komputer jest wyposażony w monitor kontrolny wyświetlający niezbędne informacje oraz jest połączony z drukarką drukującą wykresy odpowiedzi na wymuszenia skokowe oraz raporty z wyników regulacji pH.



*Przed rozpoczęciem ćwiczenia w wersji ze wspomaganie komputerowym, należy poprosić laboranta o włączenie zasilania elektrycznego **wszystkich** członów układu, w tym rejestratora i obu pomp (z podniesionymi pokrywami) oraz uruchomienie układu komputera!*

Uważnie czytać wszystkie informacje wyświetlane na ekranie monitora!

8.2. PRZYGOTOWANIE ODCZYNNIKÓW

Uwaga! Odczynniki przygotowują laboranci. Trzeba tylko sprawdzić stan napełnienia obu butli (roztworów kwasu siarkowego i węglanu sodowego) przynajmniej do połowy (należy przygotować 2 dm³ około 2N roztworu węglanu sodowego, rozpuszczając w zlewce z podziałką 200 g bezwodnego Na₂CO₃ w wodzie destylowanej oraz 2 dm³ około 0,4N roztworu kwasu siarkowego, rozcieńczając 30 cm³ stężonego H₂SO₄ wodą destylowaną – kwas wlewać do wody, a nie wodę do kwasu !!!).

8.3. URUCHOMIENIE UKŁADU REGULACJI

Kolejno należy wykonać podane niżej czynności. W wersji ze wspomaganie komputerowym, skrócony opis operacji uruchomieniowych jest podawany na ekranie monitora.

Zamknąć zawór (ściskacz) spustowy Z_3 , odkręcić całkowicie zawór odcinający wody wodociągowej Z_1 (od strony ściany) i korzystając ze wskazań rotametu, nastawić zaworem regulacyjnym Z_2 przepływ wody przez zbiornik $\dot{V}_0 = 2,0 \text{ dm}^3/\text{min}$. Korzystać z lewej podziałki i środkowego pierścienia pływaka rotametu. Okresowo należy kontrolować natężenie przepływu wody $\dot{V}_0$.

Po napełnieniu się zbiornika do przelewu, otworzyć ściskacze Z_4 i Z_5 na przewodzie doprowadzającym wodę do czujnika pehametrycznego. **Sprawdzić, czy woda przepływa przez czujnik!**

Włączyć zasilanie elektryczne całego układu wyłącznikiem W_s na tablicy czujnika pH (w wersji z komputerem wszystkie włączenia już zrobione!). Powinna zaświecić się lampka sygnalizacyjna. Następnie uruchomić mieszadło magnetyczne (przyciski "motor" i "fast") oraz pehametr (przyciski "sieć" i "aut"). Włączyć zasilanie regulatora pH przyciskiem S (wcisnięty też przycisk R (współpraca z regulatorem) oraz rejestratora przełącznikiem W_r . Uruchomić przesuw taśmy rejestratora przełącznikiem W_t . Liniowa szybkość przesuwu taśmy rejestratora wynosi 2 mm/min. Nie manipulować pokrętkami rejestratora! W przypadku jego nieprawidłowej

pracy poprosić laboranta.

Otworzyć ściskacz Z_6 na przewodzie łączącym elektrodę chlorosrebrową z czujnikiem pH. Przy wyłączonych obu pompkach dozujących (pokrywy obu pompek podniesione), wskaźniki pehametru i rejestratora powinny wskazywać identyczną wartość $\text{pH} = 7 \pm 1$.

8.4. ODPOWIEDŹ OBIEKTU REGULACJI NA WYMUSZENIE SKOKOWE

Badany reaktor przepływowy wraz z umieszczonym w pewnej odległości od niego przepływowym czujnikiem pH stanowią obiekt inercyjny z opóźnieniem. Zbadanie dynamicznych właściwości tego reaktora polega na wykonaniu skokowej zmiany wydajności pompki P_1 dozującej do zbiornika roztwór Na_2CO_3 , przy zachowaniu stałej wydajności pompki P_2 , dozującej roztwór H_2SO_4 .

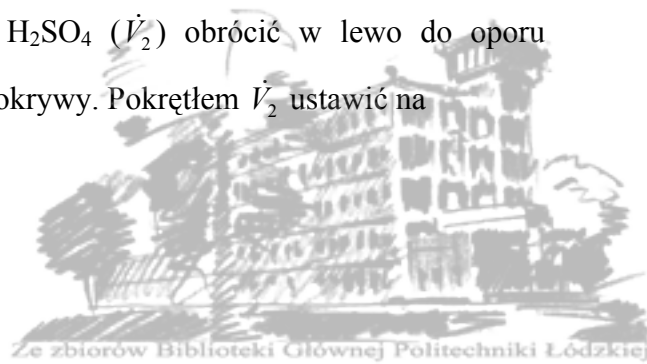
Analizując po wykonaniu wymuszenia skokowego przebieg zmian pH w funkcji czasu, możemy wyznaczyć podstawowe parametry dynamiczne obiektu regulacji: zastępczy czas opóźnienia τ_{oz} i zastępczą stałą czasową T_z .

Określając w warunkach statycznych (po ustaleniu się) zmianę ΔpH , odpowiadającą skokowej zmianie wydajności pompki P_1 o $\Delta \dot{V}_1$, możemy obliczyć statyczne wzmocnienie K_o obiektu regulacji w obszarze jego pracy $X_p = \Delta \dot{V}_1$:

$$K_o = \left(\frac{\Delta \text{pH}}{\Delta \dot{V}_1} \right)_{X_p = \Delta \dot{V}_1} \quad [\text{pH}]/[\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8.1)$$

Przełącznikiem na pokrywie lewej pompki dozującej (P_1) nastawić wydajność x1 i włączyć jej działanie przez opuszczenie pokrywy. W razie wątpliwości poprosić laboranta! Pompka posiada przełącznik wariantu sterowania. R oznacza sterowanie ręczne (ręczne przełączanie wydajności pompki x1 lub x2), A oznacza sterowanie automatyczne przez regulator analogowy PID, K - wspomaganie komputerowe. W zależności od wariantu wykonywania ćwiczenia nastawić przełącznik w pozycji R/A lub K . Wydajność dozowania roztworu Na_2CO_3 w położeniu x1 wynosi ok. $7,5 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Regulator pH włączyć na pracę ręczną (wciśnięty przycisk R). Pokrętło ręcznego nastawiania wydajności pompki dozującej roztwór H_2SO_4 ($\dot{V}_2$) obrócić w lewo do oporu i włączyć działanie pompki P_2 przez opuszczenie jej pokrywy. Pokrętłem $\dot{V}_2$ ustawić na



mierniku $\dot{V}$ wartość 15 jednostek. W tych warunkach wydajność dozowania roztworu H_2SO_4 wynosi ok. $15 \text{ cm}^3/\text{min}$.

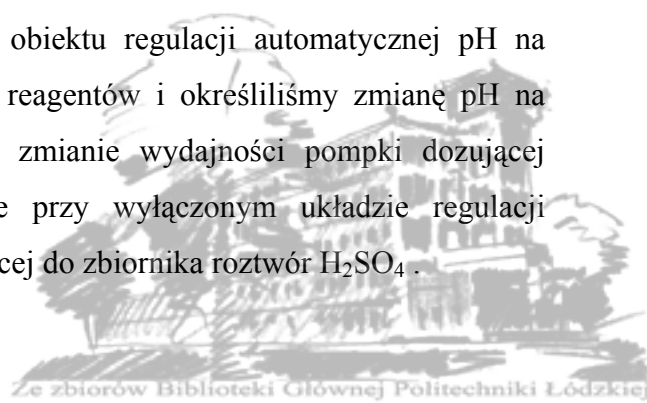
Obserwując zapis rejestratora czekać, aż pH cieczy opuszczającej reaktor ustali się (zbliżony do pionowego wykres rejestratora przez co najmniej $5 \text{ min} = 1 \text{ cm}$ zapisu). W tym czasie przygotować sekundomierz i tabelkę z rubrykami pH i τ . W wersji ze wspomaganie komputerowym, moment ustalenia się wartości pH określi komputer.

Po ustaleniu się pH, jednocześnie uruchomić pomiar czasu i przełącznikiem na pokrywie pompki P_1 dwukrotnie zwiększyć jej wydajność (pozycja x2, $\dot{V}_1 \approx 15 \text{ cm}^3/\text{min}$). Co 20 sekund odczytywać ze wskaźnika pehametru (nie z rejestratora!) i notować wartość pH, aż do jej ponownego ustalenia się (1 cm zbliżonego do pionowego zapisu rejestratora). Co pewien czas kontrolować natężenie przepływu wody przez zbiornik ($\dot{V}_0$). Zaznaczyć na taśmie rejestratora warunki doświadczenia. W wersji ze wspomaganie komputerowym, zmianę wydajności pompki, pomiary pH w funkcji czasu, wykres na ekranie monitora i jego wydruk wykona komputer.

Powyższe pomiary należy powtórzyć w przeciwnym kierunku (dwukrotnie zmniejszając wartość $\dot{V}_1$), po wprowadzeniu dodatkowego opóźnienia transportowego. W tym celu należy wydłużyć drogę cieczy między reaktorem, a czujnikiem pehametrycznym. Zaciśnąć przewód łączący reaktor z czujnikiem ściskaczami Z_4 i Z_5 z obu stron gumowej złączki. Podstawiając zlewkę rozłączyć złączkę i wstawić w jej miejsce odcinek gumowego węża o długości $L = 2 \text{ m}$. Otwierając ściskacze Z_4 i Z_5 uruchomić przepływ cieczy przez czujnik. **Sprawdzić wypływ cieczy z czujnika i ewentualnie odpowietrzyć wąż opóźniający!** Po ustaleniu się wskazań pehametru, wykonać podobnie jak poprzednio pomiary odpowiedzi na wymuszenie skokowe obiektu regulacji z dodatkowym opóźnieniem transportowym. Zaznaczyć na taśmie rejestratora warunki doświadczenia. W wersji ze wspomaganie komputerowym, zmianę wydajności pompki, pomiary pH w funkcji czasu, wykres na ekranie monitora i jego wydruk znowu wykona komputer.

8.5. REGULACJA PROPORCJONALNA

W punkcie 8.4 wyznaczyliśmy odpowiedź obiektu regulacji automatycznej pH na skokowe wymuszenie zmiany przepływu jednego z reagentów i określiliśmy zmianę pH na wypływie ze zbiornika, odpowiadającą dwukrotnej zmianie wydajności pompki dozującej roztwór Na_2CO_3 . Pomiary te były wykonywane przy wyłączonym układzie regulacji automatycznej - przy stałej wydajności pompki dozującej do zbiornika roztwór H_2SO_4 .



Jeżeli włączymy układ regulacji automatycznej, to zamkniemy pętlę sprzężenia zwrotnego z czujnika pH do pompki dozującej roztwór kwasu siarkowego. Skokowa zmiana wydajności pompki P_1 , wywołując zmianę pH na wypływie ze zbiornika, spowoduje zmianę wydajności pompki P_2 kompensującą z kolei zmianę pH. Stopień kompensacji będzie przy regulacji proporcjonalnej zależny od wzmocnienia K_P regulatora (odwrotności zakresu proporcjonalności X_P). Różnica między zadaną wartością pH i częściowo skompensowaną, ustaloną wartością pH na wypływie ze zbiornika, będzie błędem statycznym regulacji Δe_{st} (patrz [1], rozdz. 18.2.1).

8.5.1. REGULATOR Z MAŁYM WZMOCNIENIEM ($X_P=200\%$)

Odłączyć nad zlewką wąż dodatkowego opóźnienia transportowego, znowu wstawiając na jego miejsce gumową złączkę (po odłączeniu węża, wylać z niego wodę do zlewki!). **Sprawdzić przepływ cieczy przez czujnik pH !** Pokręćłem pH regulatora nastawić wartość zadaną $pH = 8,0$. Pokręćłem X_P nastawić zakres proporcjonalności regulatora $X_P = 200\%$ ($K_P = 0,5$). Przyciski I i D regulatora powinny być **wyciśnięte**. Pompka P_1 powinna być włączona na mniejszą wydajność $\times 1$ ($\dot{V}_1 = 7,5 \text{ cm}^3/\text{min}$).

Przełączyć regulator z pracy ręcznej na pracę automatyczną, wciskając przycisk "A" (**przy pracy ze wspomaganie komputerowym, wcisnąć przycisk "K"**). Obserwować pracę układu regulacji przez 10 minut. W tym czasie wartość pH powinna się ustalić. Zanotować ustaloną wartość pH i odpowiadającą jej wydajność pompki regulowanej $\dot{V}_2$. Ustaloną wartość pH najłatwiej odczytać z uśrednionego przebiegu pionowego odcinka zapisu rejestratora. Dwukrotnie zwiększyć wydajność pompki P_1 ($\times 2$, $\dot{V}_1 = 15 \text{ cm}^3/\text{min}$). Po 10 minutach ponownie odczytać ustaloną wartość pH oraz odpowiadającą jej wydajność pompki $\dot{V}_2$. Zaznaczyć na taśmie rejestratora warunki doświadczenia. Zwrócić uwagę na zmniejszenie przez regulator amplitudy skoku pH, w porównaniu z amplitudą ΔpH określoną w punkcie 11.8.4. **Przy pracy ze wspomaganie komputerowym, wszystkie czynności przełączeniowe wykona komputer!** Czytać uważnie i notować jego informacje, przewijające się u dołu ekranu monitora!



8.5.2. REGULATOR Z DUŻYM WZMOCNIENIEM ($X_P=50\%$)

Pokrętle regulatora nastawić zakres proporcjonalności $X_P = 50\%$ ($K_P = 2$ - czterokrotnie większe wzmocnienie niż w punkcie 8.5.1). Pozostałe nastawy regulatora i pompki P_1 bez zmian. Obserwować pracę regulatora przez 10 minut. Po tym czasie zanotować ustaloną wartość pH i odpowiadającą jej wydajność pompki $\dot{V}_2$.

Dwukrotnie zmniejszyć wydajność pompki P_1 i ponownie po 10 minutach odczytać ustaloną wartość pH i wydajność pompki $\dot{V}_2$. Zanotować na taśmie rejestratora warunki doświadczenia. Zwrócić uwagę na zmniejszenie się statycznego błędu regulacji w porównaniu z błędem przy zakresie proporcjonalności regulatora $X_P = 200\%$. **Przy pracy ze wspomaganie komputerowym, wszystkie czynności przełączeniowe ponownie wykona komputer!** Czytać uważnie i notować jego informacje, przewijające się u dołu ekranu monitora!

8.6. REGULACJA PROPORCJONALNO - CAŁKUJĄCA

Regulator proporcjonalno-całkujący pozwala, w odróżnieniu od regulatora proporcjonalnego, na całkowite wyeliminowanie statycznego błędu regulacji i bardzo dokładną regulację pH cieczy wypływającej ze zbiornika. Jego działanie jest jednak powolne i szybkie zakłócenia pogarszają jakość regulacji (patrz [1], rozdz. 18.2.2).

Nastawić znów niewielkie wzmocnienie proporcjonalne regulatora (zakres proporcjonalności $X_P = 200\%$). Uruchomić jego działanie całkujące, przez wciśnięcie przycisku "I". Wartość czasu zdwojenia T_I została dobrana do własności dynamicznych obiektu regulacji i wynosi około 3 minut. Pozostałe nastawy regulatora i pompki P_1 pozostawić bez zmian. Obserwować pracę regulatora przez 10 minut. Zanotować ustaloną wartość pH i odpowiadającą jej wydajność pompki P_2 . **Przy pracy ze wspomaganie komputerowym, wszystkie czynności przełączeniowe znów wykona komputer!** Czytać uważnie i notować jego informacje, przewijające się u dołu ekranu monitora!

Dwukrotnie zwiększyć wydajność pompki P_1 i ponownie po 10 minutach odczytać ustaloną wartość pH i wydajność pompki P_2 . Zaznaczyć na taśmie rejestratora warunki doświadczenia. Zwrócić uwagę, na wprowadzie powolne, ale skuteczne zmniejszanie się statycznego błędu regulacji do zera.



8.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Po wykonaniu pomiarów należy zatrzymać obie pompki dozujące (przez podniesienie ich pokryw. **Nie wyłączać** rejestratora, regulatora, pehametru, mieszadła. Zwiększyć przepływ wody przez zbiornik do $3 \text{ dm}^3/\text{min}$ i przepuszczać wodę jeszcze przez 5 minut. Po tym czasie zamknąć zaworem Z_1 dopływ wody wodociągowej. **Nie wyłączać** głównego wyłącznika na tablicy czujnika pH. Zamknąć ściskacz Z_6 na przewodzie z roztworem KCl oraz ściskacze Z_4 i Z_5 na dopływie wody do czujnika pH. Otwierając ściskacz Z_3 opróżnić zbiornik z wody. Poprosić laboranta o wyjęcie odcinka taśmy papierowej z zapisem rejestratora, ewentualnie również wydruku drukarki.

8.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

8.8.1. ODPOWIEDŹ OBIEKTU NA WYMUSZENIA SKOKOWE

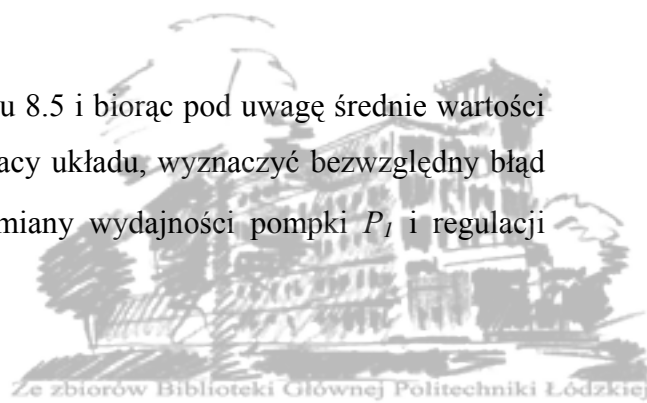
Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 8.4, sporządzić (tylko w wersji bez wspomagania komputerowego) na papierze milimetrowym (format A-4) wykres charakterystyki dynamicznej skokowej $\text{pH} = f(\tau)$ badanego układu bez dodatkowego opóźnienia transportowego. Wyznaczyć sposobem graficznym zastępczy czas opóźnienia τ_{oz} i zastępczą stałą czasową T_z (patrz [1], rozdz. 16.3.2, rys. 16.20).

Biorąc pod uwagę średnie wartości pH z zapisu rejestratora w okresie ustabilizowanej pracy układu, określić bezwzględną wartość zmiany pH $|\Delta \text{pH}|$, odpowiadającą dwukrotnej zmianie wydajności pompki P_1 , przy stałej wydajności pompki P_2 (wyłączonym układzie regulacji automatycznej). Z równania 8.1 obliczyć statyczne wzmocnienie obiektu regulacji K_o w obszarze jego pracy.

Wykres $\text{pH} = f(\tau)$, wyznaczenie τ_{oz} , T_z , $|\Delta \text{pH}|$ i K_o wykonać również dla układu z włączonym dodatkowym opóźnieniem transportowym (tylko w wersji bez wspomagania komputerowego).

8.8.2. AUTOMATYCZNA REGULACJA pH

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 8.5 i biorąc pod uwagę średnie wartości pH z zapisu rejestratora w okresie ustabilizowanej pracy układu, wyznaczyć bezwzględny błąd statyczny regulacji $\Delta e_{st} = |\Delta \text{pH}|$ dla dwukrotnej zmiany wydajności pompki P_1 i regulacji



proporcjonalnej z zakresami proporcjonalności $X_P = 200$ i 50%. Przeliczyć wartości Δe_{st} na wartości błędu statycznego względnego ΔE_{st} , wyrażonego w procentach mierzonego zakresu pH (5...13 pH).

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 8.6 i biorąc pod uwagę średnie wartości pH z zapisu rejestratora w okresie ustabilizowanej pracy układu, wyznaczyć bezwzględny i względny błąd statyczny regulacji dla dwukrotnej zmiany wydajności pompki P_1 i regulacji proporcjonalno-całkującej.

8.9. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty schemat blokowy układu regulacji automatycznej pH z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów (tylko w wersji bez wspomagania komputerowego),
- zapis rejestratora z zaznaczeniem **wszystkich** wykonanych doświadczeń,
- wydruk z drukarki (tylko w wersji ze wspomaganiem komputerowym),
- wykresy dwóch odpowiedzi obiektu regulacji na wymuszenia skokowe z wyznaczeniem τ_{oz} , T_z , określeniem $|\Delta pH|$ i obliczeniem K_o (w wersji ze wspomaganiem komputerowym τ_{oz} i T_z przepisane z wydruku, wartości $|\Delta pH|$ określone z zapisu rejestratora i obliczenia K_P),
- obliczone z zapisu rejestratora wartości błędów statycznych regulacji Δe_{st} i ΔE_{st} dla wszystkich badanych rodzajów regulacji automatycznej - tabelka zbiorcza (w wersji ze wspomaganiem komputerowym, dodatkowa tabelka na wydruku),
- zapisane podczas regulacji jej parametry (w wersji ze wspomaganiem komputerowym wydruk tabelki z raportami regulacji),
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.



8.10. LITERATURA

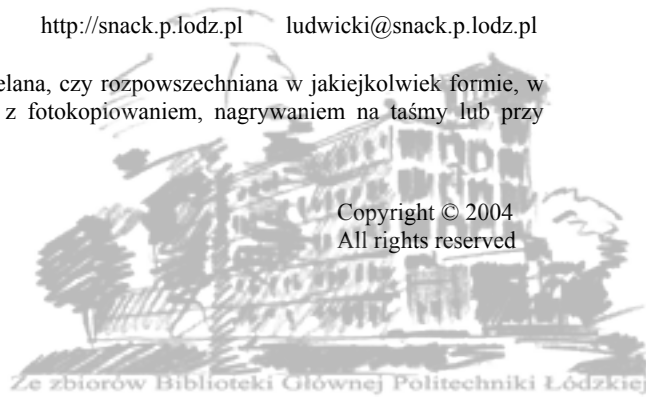
Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii oraz książki:

- [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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved

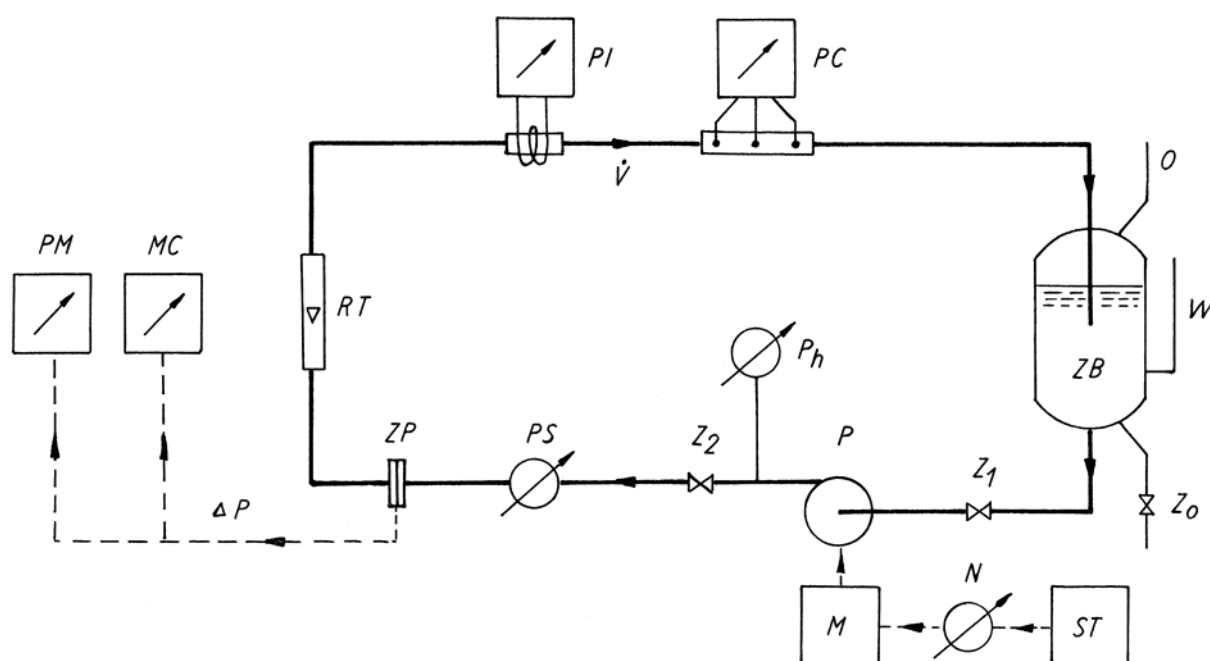


9. POMIARY PRZEPŁYWU CIECZY W RUROCIĄGU

Cel zadania: *Poznanie działania kilku rodzajów przetworników do pomiaru natężenia przepływu cieczy. Badanie charakterystyki pompy wirowej odśrodkowej z regulowanym napędem tyrystorowym.*

9.1. UKŁAD POMIAROWY

Schemat układu do pomiaru przepływu cieczy przedstawia rysunek 9.1. W zbiorniku *ZB* znajduje się ciecz (woda z dodatkami przeciwkorozyjnymi), która może być zasysana przez pompę wirową odśrodkową *P* i tłoczona w obieg zamknięty przez zestaw przepływomierzy. Zbiornik jest wyposażony w wodowskaz *W*, przewód odpowietrzający *O* i zawór spustowy *Z_o*.



Rys. 9.1. Schemat układu do pomiarów przepływu cieczy

Pompa jest napędzana silnikiem prądu stałego *M* o mocy 1,5 kW, zasilanym ze sterownika tyrystorowego *ST*. Sterownik ten umożliwia łagodny rozruch silnika pompy, płynne nastawianie jego prędkości obrotowej oraz stabilizowanie tej prędkości przy zmianach obciążenia pompy. Między sterownikiem a silnikiem jest włączony zestaw przyrządów pomiarowych, umożliwiających pomiar mocy elektrycznej *N* pobieranej przez silnik. Manometr sprężystościowy na przewodzie tłocznym umożliwia pomiar ciśnienia tłoczenia pompy *P_h*.

Ciecz tłoczona przez pompę przepływa kolejno przez przepływomierz skrzydełkowy (wodomierz) *PS*, zwężkę pomiarową *ZP*, rotametr *RT*, przepływomierz indukcyjny (magnetyczny) *PI* i przepływomierz kalorymetryczny (cieplny) *PC* (patrz też [1], rozdz. 10.10). Zwężka pomiarowa jest połączona z dwoma przyrządami przetwarzającymi sygnał różnicy ciśnień ΔP na wskazania analogowe: cieczowym manometrem różnicowym *MC* oraz mieszkowym przetwornikiem magnetoelektrycznym (z komorą Bartona) *PM* (patrz też [1], rozdz. 10.9).

Natężenia objętościowego przepływu cieczy, określane na podstawie wskazań poszczególnych przyrządów pomiarowych będą oznaczane następująco:

- przepływomierz skrzydełkowy - $\dot{V}_s$
- zwężka z manometrem cieczowym - $\dot{V}_{zc}$
- zwężka z przetwornikiem magnetoelektrycznym - $\dot{V}_{zm}$
- rotametr - $\dot{V}_r$
- przepływomierz indukcyjny - $\dot{V}_i$
- przepływomierz cieplny - $\dot{V}_c$

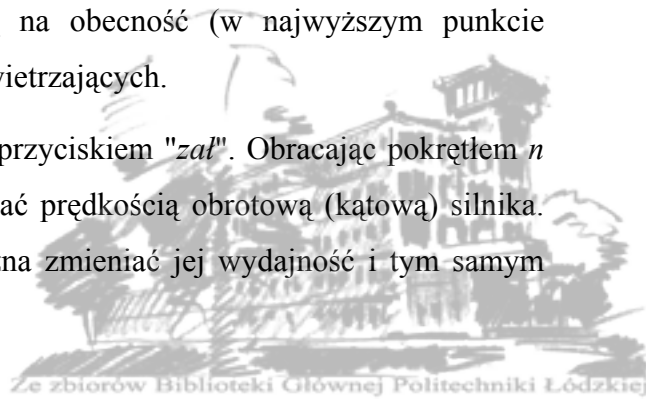
Jedynym przepływomierzem, wykalibrowanym przez producenta w jednostkach objętościowego natężenia przepływu cieczy (dm^3/godz) jest rotametr. Z tego względu przyrząd ten będzie służył za wzorcowy i z jego wskazania będą porównywane wskazania pozostałych mierników przepływu.

9.2. URUCHOMIENIE OBIEGU CIECZY

Należy włączyć zasilanie elektryczne całego układu głównym wyłącznikiem (na ścianie, nad zbiornikiem *ZB*), przyciskając zielony przycisk "zał". Powinna zaświecić się lampka sygnalizacyjna. Otworzyć zawór Z_1 na przewodzie ssawnym oraz zawór Z_2 na przewodzie tłocznym pompy.

Sprawdzić, czy cieczowy manometr różnicowy ma zerowe wskazania. Jeśli tak nie jest, poprosić laboranta o odpowietrzenie przewodów sygnałowych łączących zwężkę pomiarową z przetwornikami różnicy ciśnień. Zwrócić uwagę na obecność (w najwyższym punkcie przewodów sygnałowych) dwóch zbiorniczków odpowietrzających.

Włączyć sterownik silnika pompy zielonym przyciskiem "zał". Obracając pokrętkę n można, korzystając ze wskazań obrotomierza, sterować prędkością obrotową (kątową) silnika. Zmieniając prędkość obrotową silnika i pompy, można zmieniać jej wydajność i tym samym



natężenie przepływu cieczy w obiegu. Obracając pokrętkiem n sprawdzić działanie sterownika.

9.3. POMIARY PRZEPŁYWU PRZEPŁYWOMIERZEM SKRZYDEŁKOWYM

Przepływomierz skrzydełkowy należy do grupy przepływomierzy silnikowych. Jego działanie polega na zliczaniu obrotów wirnika umieszczonego w strumieniu przepływającej cieczy. Liczba wykonanych obrotów wirnika jest proporcjonalna do objętości przepuszczonej cieczy. Omawiany typ przepływomierza nie mierzy więc objętościowego natężenia przepływu

cieczy $\dot{V}$ lecz sumuje (całkuje) przepływ cieczy $\int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{V} d\tau$ w odcinku czasu od τ_1 do τ_2 .

Używając przepływomierza skrzydełkowego do pomiarów objętościowego natężenia przepływu, należy określić różnicę jego wskazań ΔV w określonym odstępie czasu $\Delta \tau$ i obliczyć objętościowe natężenie przepływu z równania:

$$\dot{V}_s = \frac{\Delta V}{\Delta \tau} \quad (9.1)$$

Należy zwrócić uwagę na cyfrowo-analogowe rozwiązanie wskaźnika licznika przepływomierza. Obracające się bębny pokazują cyfrowo wartości $\times 10000$ $\times 1000$ $\times 100$ $\times 10$ $\times 1$ $\times 0,1$ $\times 0,01$ i $\times 0,001$, natomiast mała wskazówka pokazuje analogowo wartości $\times 0,0001 \text{ m}^3$. Dokładność odczytu wynosi 1/2 elementarnej działki na skali, a więc $0,00005 \text{ m}^3$ ($0,05 \text{ dm}^3$). Przed rozpoczęciem pomiarów należy poćwiczyć odczytywanie stanu licznika!

Zbadanie działania przepływomierza skrzydełkowego będzie polegało na porównaniu wyników pomiaru przepływu ze wskazaniami rotametu. Obracając pokrętkiem sterownika pompy, należy nastawić natężenie przepływu cieczy przez rotametr $\dot{V}_r = 600 \text{ dm}^3/\text{godz}$ (górną płaszczyznę nurnika!). Następnie należy odczytać wskazania przepływomierza skrzydełkowego (V_1) i jednocześnie uruchomić pomiar czasu sekundomierzem (najlepiej na czas odczytów zamykać zawór Z_2 !). Ponownego odczytu stanu licznika (V_2) należy dokonać dokładnie po upływie 5 minut. Z różnicy wskazań licznika przepływu $V_2 - V_1 = \Delta V$ obliczyć według równania 9.1 objętościowe natężenie przepływu cieczy $\dot{V}_s$ w dm^3/godz . Powyższe czynności należy powtórzyć przy wskazaniach rotametu rosnących co $200 \text{ dm}^3/\text{godz}$, aż do $1800 \text{ dm}^3/\text{godz}$ (tabelka). Po wykonaniu pomiarów zmniejszyć do zera prędkość obrotową silnika pompy.



9.4. POMIARY PRZEPŁYWU ZWĘŻKĄ

9.4.1. ZWĘŻKA Z MANOMETREM CIECZOWYM

Zwężka pomiarowa jest przetwornikiem spiętrzeniowym, przetwarzającym wielkość objętościowego natężenia przepływu $\dot{V}$ na wielkość różnicy ciśnień ΔP ([1], rozdz. 10.10.1.A). Ogólne równanie tego przetwornika ma postać:

$$\Delta P = K \cdot \dot{V}^2 \quad (9.2)$$

gdzie K jest stałą, zależną od kształtu i wymiarów zwężki, gęstości i lepkości cieczy oraz wartości liczby Reynoldsa.

Różnica ciśnień po obu stronach zwężki (ΔP) jest w najprostszym przypadku mierzona cieczowym (rtęciowym) manometrem różnicowym. Żeby obliczyć objętościowy przepływ cieczy przez badany typ kryzy, należy zastosować empiryczny wzór:

$$\dot{V}_{zc} = 146,3 \sqrt{\Delta h} \quad (9.3)$$

w którym $\dot{V}_{zc}$ jest objętościowym natężeniem przyływu w dm^3/godz , a Δh jest różnicą poziomów rtęci w manometrze w mm.

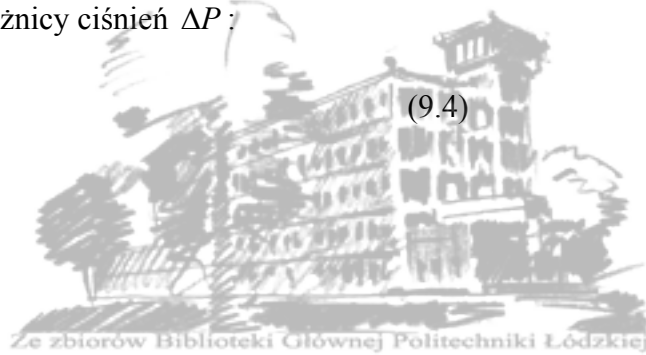
Oczywiście można by manometr różnicowy wykalibrować w jednostkach objętościowego natężenia przepływu lecz jego podziałka byłaby nieliniowa.

9.4.2. ZWĘŻKA Z PRZETWORNIKIEM MAGNETOELEKTRYCZNYM

Sygnał różnicy ciśnień ΔP ze zwężki jest doprowadzony równocześnie do przetwornika mieszkowego typu komory Bartona, połączonego z magnetoelektrycznym przetwornikiem siły, który przetwarza go na analogowy, standardowy sygnał elektryczny (prąd 0...20 mA). Sygnał wyjściowy przetwornika jest wskazywany przez miliamperomierz wykalibrowany w procentach zakresu $\dot{V}_{zm}$ (patrz [1], rozdz. 10.9.3.B).

Przetwornik magnetoelektryczny porównuje siłę pochodzącą od mierzonej różnicy ciśnień, z siłą magnetoelektryczną obwodu sprzężenia zwrotnego. W warunkach równowagi sił, prąd wyjściowy I przetwornika jest liniową funkcją różnicy ciśnień ΔP :

$$I = K \cdot \Delta P \quad (9.4)$$



Wartość stałej K - wzmocnienia przetwornika, może być nastawiana ręcznie w szafce przetwornika, w zależności od wielkości mierzonej różnicy ciśnień.

W specjalnym wykonaniu przetwornika, przystosowanym do zwężkowych pomiarów natężenia przepływu płynów, może on dokonywać operacji pierwiastkowania wartości sygnału wejściowego. Sygnał wyjściowy będzie wtedy liniową funkcją objętościowego natężenia przepływu:

$$i = K_1 \cdot \sqrt{\Delta P} = K_2 \cdot \dot{V} \quad (9.5)$$

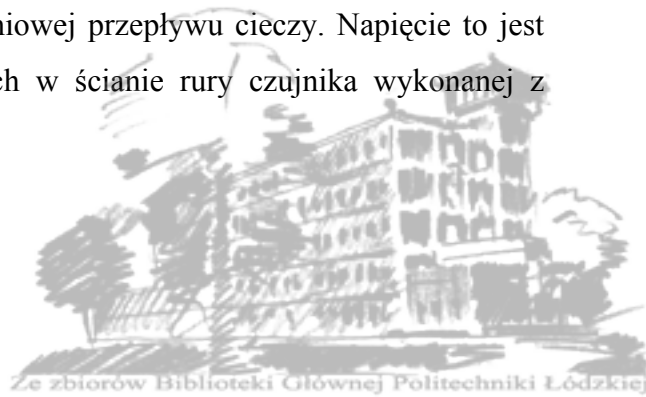
9.4.3. BADANIE CHARAKTERYSTYK PRZETWORNIKÓW RÓŻNICY CIŚNIEŃ

Włączyć przetwornik magnetoelektryczny przyciskiem S , umieszczonym w szafce miernika mierzącego prąd wyjściowy. Pokrętelem nastawiania prędkości obrotowej silnika pompy nastawić wartość natężenia przepływu cieczy mierzoną rotametrem $\dot{V}_r = 400 \text{ dm}^3/\text{godz.}$ Zanotować w tabelce wskazania (różnicę poziomów rtęci) manometru różnicowego Δh w mm oraz wskazania wyjściowego miernika przetwornika magnetoelektrycznego $\dot{V}_{zm}$ w % zakresu.

Powyższe pomiary powtórzyć, przy wskazaniach rotametu rosnących co $200 \text{ dm}^3/\text{godz.}$ aż do $1800 \text{ dm}^3/\text{godz.}$ Po zakończeniu pomiarów zmniejszyć do zera prędkość obrotową silnika pompy i wyłączyć zasilanie przetwornika magnetoelektrycznego.

9.5. POMIARY PRZEPŁYWU PRZEPŁYWOMIERZAMI INDUKCYJNYM I CIEPLNYM

Wymienione rodzaje przepływomierzy należą do grupy przepływomierzy elektrycznych. Przepływomierz indukcyjny jest jednym z najnowocześniejszych przetworników przepływu cieczy. Umożliwia dokładny i zdalny pomiar, przy bardzo dużej odporności na działanie zanieczyszczeń zawartych w cieczy. Wewnątrz czujnika nie ma na drodze cieczy żadnych zmian przekroju rurociągu czy kierunku przepływu. Pole magnetyczne skierowane prostopadle do kierunku przepływu cieczy wzbudza w jej strumieniu napięcie, które jest proporcjonalne do natężenia tego pola i prędkości liniowej przepływu cieczy. Napięcie to jest odbierane z dwóch płaskich elektrod, umieszczonych w ścianie rury czujnika wykonanej z dielektryku ([1], rozdz. 10.10.4).



Przepływomierz cieplny (kalorymetryczny) mierzy za pomocą dwóch czujników termistorowych przyrost temperatury przepływającej cieczy, do której doprowadza się z elektrycznego grzejnika stały strumień ciepła. Przyrost temperatury jest funkcją objętościowego natężenia przepływu cieczy. Ze względu na zależność warunków wymiany ciepła między grzejnikiem a cieczą od natężenia jej przepływu (liczby Reynoldsa), funkcja ta może być nieliniowa, zwłaszcza przy niewielkich przepływach ([1], rozdz. 10.10.3).

Przed rozpoczęciem pomiarów należy włączyć zasilanie obu przepływomierzy (przyciski S w szafkach). Przepływomierz cieplny wymaga sprawdzenia punktu zerowego. W tym celu należy wyłączyć grzejnik czujnika (**wyciśnięty** przycisk G) i nastawić maksymalny przepływ cieczy w obiegu ($\dot{V}_r \geq 1800 \text{ dm}^3/\text{godz}$). Pokrętle zerowania przepływomierza (0) nastawić zerowe wskazania miernika, a następnie przyciskiem G włączyć grzejnik czujnika. Włączenie grzejnika jest sygnalizowane migoczącą, czerwoną diodą. Układ posiada blokadę zabezpieczającą czujnik przed przegrzaniem i wyłączającą grzejnik w przypadku braku przepływu cieczy (sprawdzić, zmniejszając przepływ cieczy w obiegu do zera).

Podziałki wskaźników obu przepływomierzy elektrycznych nie są wyskalowane w jednostkach natężenia przepływu lecz w % zakresu i wymagają kalibrowania.

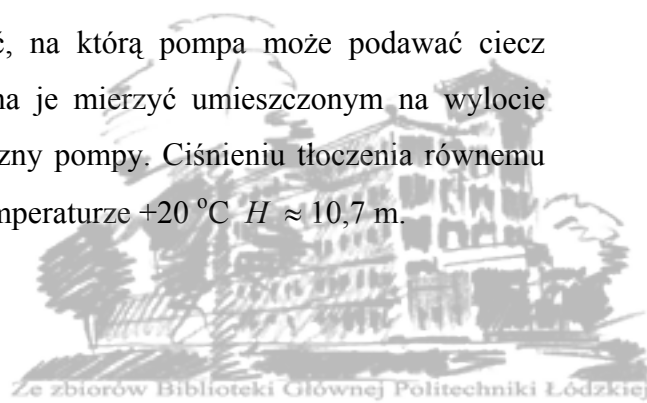
Nastawić przepływ $\dot{V}_r = 1800 \text{ dm}^3/\text{godz}$ i odczytać ustalone wskazania obu przepływomierzy ($\dot{V}_i$ i $\dot{V}_c$). Następnie powtórzyć pomiary, zmniejszając przepływ $\dot{V}_r$ co $200 \text{ dm}^3/\text{godz}$, aż do $400 \text{ dm}^3/\text{godz}$. Po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie obu przepływomierzy i zmniejszyć do zera prędkość obrotową silnika pompy.

9.6. BADANIE CHARAKTERYSTYKI POMPY WIROWEJ ODŚRODKOWEJ

Badanie charakterystyki pompy ma na celu określenie jej podstawowych parametrów: ciśnienia tłoczenia P_h i wydajności $\dot{V}$ w funkcji prędkości obrotowej silnika n , a także maksymalnej mocy N pobieranej przez silnik.

9.6.1. MAKSYMALNE CIŚNIENIE TŁOCZENIA POMPY

Ciśnienie to określa maksymalną wysokość, na którą pompa może podawać ciecz o znanej gęstości (wysokość podnoszenia H). Można je mierzyć umieszczonym na wylocie pompy manometrem, dławiąc zaworem przewód tłoczny pompy. Ciśnieniu tłoczenia równemu 100 kPa odpowiada wysokość podnoszenia wody o temperaturze $+20^\circ\text{C}$ $H \approx 10,7 \text{ m}$.



Zamknąć całkowicie zawór Z_2 na przewodzie tłocznym pompy. Sterownikiem silnika nastawić jego prędkość obrotową $n = 400$ obr/min. Odczytać ciśnienie tłoczenia pompy P_h . Pomiary powtórzyć przy prędkości obrotowej silnika rosnącej co 200 obr/min, aż do 1400 obr/min.

9.6.2. WYDAJNOŚĆ POMPY

Wydajność pompy jest zależna od jej konstrukcji, ciśnienia tłoczenia (wysokości podnoszenia) i prędkości obrotowej wirnika. Należy określić wzajemną zależność wydajności i ciśnienia tłoczenia przy kilku prędkościach obrotowych wirnika pompy. Z zależności tych można określić przydatność danej pompy w konkretnej sytuacji, gdy znana jest wysokość podnoszenia i natężenie przepływu cieczy. Możliwe jest również wybranie do napędu pompy silnika o odpowiedniej prędkości obrotowej i mocy.

Otworzyć całkowicie zawór Z_2 na przewodzie tłocznym pompy. Nastawić prędkość obrotową silnika $n = 600$ obr/min. Odczytać ciśnienie tłoczenia pompy P_h oraz natężenie przepływu cieczy $\dot{V}_r$ wskazywane przez rotametr. Pomiary powtórzyć, przymykając zawór Z_2 i zmniejszając w ten sposób wydajność pompy $\dot{V}_r$, aż do całkowitego zamknięcia zaworu. Uchwycić co najmniej sześć punktów do sporządzenia wykresu.

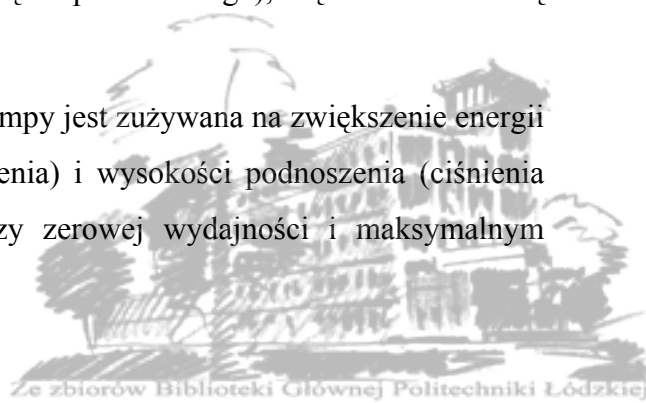
Ponownie otworzyć zawór Z_2 . Nastawić prędkość obrotową silnika pompy $n = 800$ obr/min. Jak poprzednio, określić zależność $\dot{V}_r$ i P_h dla co najmniej sześciu wartości $\dot{V}_r$.

Pomiary powtórzyć przy $n = 1000$ i 1200 obr/min, (również po co najmniej sześć wartości $\dot{V}_r$ i P_h).

9.6.3. MOC POBIERANA PRZEZ SILNIK POMPY

Znajomość wartości mocy pobieranej przez silnik pompy, a zwłaszcza jej wartości maksymalnej, pozwala na dobranie do napędu pompy odpowiedniego silnika. Zastosowanie silnika o zbyt małej mocy może spowodować jego uszkodzenie wskutek przeciążenia, natomiast silnik o zbyt dużym zapasie mocy (zwłaszcza prądu przemiennego), będzie miał niską sprawność wskutek niedociążenia.

Energia elektryczna pobierana przez silnik pompy jest zużywana na zwiększenie energii potencjalnej cieczy - jej objętości (wydajności tłoczenia) i wysokości podnoszenia (ciśnienia tłoczenia). Największe zużycie mocy następuje przy zerowej wydajności i maksymalnym



ciśnieniu tłoczenia (całkowite zdławienie pompy), kiedy to występują duże straty energii na mieszanie cieczy w pompie i sprawność pompy dąży do zera (patrz równanie 9.17).

Otworzyć całkowicie zawór Z_2 na przewodzie tłocznym pompy. Nastawić prędkość obrotową silnika $n = 400$ obr/min. Z rotametu odczytać wydajność pompy $\dot{V}_r$. Określić wskazania przyrządów mierzących napięcie U i natężenie I prądu dopływającego do silnika pompy. **Uwaga na zakresy pomiarowe mierników!**

Pomiary powtórzyć przy $n = 600, 800, 1000$ i 1200 obr/min. Po odczytaniu wartości $\dot{V}_r$, U i I przy $n = 1200$ obr/min, należy kontynuować pomiary przy stałej prędkości obrotowej silnika pompy (1200 obr/min), zmniejszając natężenie przepływu cieczy $\dot{V}_r$ (zwiększając ciśnienie tłoczenia P_h) przez stopniowe zamykanie zaworu na przewodzie tłocznym pompy. Odczytując wartości $\dot{V}_r$, U i I , uchwycić ich zmiany przynajmniej w sześciu punktach, aż do całkowitego zatrzymania przepływu cieczy.

Pozostawiając całkowicie zamknięty zawór na przewodzie tłocznym pompy, określić maksymalną moc pobieraną przez silnik (wartości U i I) przy zmniejszaniu jego prędkości obrotowej co 200 obr/min, aż do 400 obr/min.

9.7. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Pokrętem sterownika silnika pompy zmniejszyć prędkość obrotową silnika do zera. Wyłączyć sterownik czerwonym przyciskiem "wył". Zamknąć zawory na przewodach ssawnym i tłocznym pompy (Z_1 i Z_2). Sprawdzić, czy są wyłączone: magnetoelektryczny przetwornik różnicy ciśnień, przepływomierz indukcyjny i przepływomierz cieplny.

Wyłącznikiem głównym (czerwony przycisk "wył" w szafce na ścianie nad zbiornikiem) wyłączyć zasilanie całego układu pomiarowego

9.8. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

9.8.1. POMIARY PRZEPŁYWOMIERZEM SKRZYDEŁKOWYM

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 9.3, sporządzić wykres zależności $\dot{V}_s = f(\dot{V}_r)$. Sprawdzić, czy $\dot{V}_s \approx \dot{V}_r$ przez wyznaczenie współczynnika kierunkowego K_s wykreślonej prostej:



$$K_s = \frac{\Delta \dot{V}_s}{\Delta \dot{V}_r} \approx 1 \quad (9.6)$$

9.8.2. POMIARY PRZEPŁYWU ZWĘŻKĄ

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 9.4.4, przeliczyć wartości Δh na wartości $\dot{V}_{zc}$ (równanie 9.3) oraz sporządzić wykres $\dot{V}_{zc} = f(\dot{V}_r)$. Sprawdzić, czy $\dot{V}_{zc} \approx \dot{V}_r$ przez wyznaczenie współczynnika kierunkowego K_{zc} wykreślonej prostej:

$$K_{zc} = \frac{\Delta \dot{V}_{zc}}{\Delta \dot{V}_r} \approx 1 \quad (9.7)$$

Wartości Δh w milimetrach słupa rtęci przeliczyć na wartości różnicy ciśnień ΔP według wzoru:

$$\Delta P = \Delta h \cdot g (\rho_r - \rho_w) \quad [\text{kPa}] \quad (9.8)$$

zakładając wartości $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\rho_r = 13,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ i $\rho_w = 1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Sporządzić wykres charakterystyki statycznej magnetoelektrycznego przetwornika różnicy ciśnień $\dot{V}_{zm} = f(\Delta P)$.

9.8.3. POMIARY PRZEPŁYWOMIERZAMI INDUKCYJNYM I CIEPLNYM

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 9.5, sporządzić we wspólnym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykresy kalibrowania badanych przepływomierzy $\dot{V}_i = f(\dot{V}_r)$ oraz $\dot{V}_c = f(\dot{V}_r)$.

9.8.4. CIŚNIENIE TŁOCZENIA POMPY

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 9.6.1, wykreślić zależność $P_h = f(n)$. Sprawdzić równanie:

$$P_h \approx K \cdot n^2 \quad (9.9)$$

obliczając dla $n_1 = 600$ i $n_2 = 1200 \text{ obr/min}$ proporcję:



$$\frac{n_2}{n_1} \approx \sqrt{\frac{P_{h2}}{P_{h1}}} \approx 2 \quad (9.10)$$

9.8.5. WYDAJNOŚĆ POMPY

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 9.6.2, wykreślić we wspólnym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) zależności $\dot{V}_r = f(P_h)$ dla czterech badanych prędkości obrotowych silnika pompy. Jest to wykres podstawowej charakterystyki pompy $\dot{V}_r = f(P_h, n)$. Sprawdzić równanie:

$$\dot{V}_r \approx K \cdot n \quad (9.11)$$

obliczając dla $n_1 = 600$, $n_2 = 1200$ i obr/min i całkowicie otwartego zaworu Z_2 proporcję:

$$\frac{n_2}{n_1} \approx \frac{\dot{V}_{r2}}{\dot{V}_{r1}} \quad (9.12)$$

9.8.6. MOC POBIERANA PRZEZ SILNIK POMPY

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 9.6.3, obliczyć wartości mocy N pobieranej przez silnik elektryczny pompy:

$$N = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (9.13)$$

Ponieważ do napędu pompy zastosowano silnik prądu stałego, $\varphi = 0$ i $\cos \varphi = 1$.

Nanieść na wspólny wykres zależności $N = f(\dot{V}_r)$ dla rosnącej prędkości obrotowej silnika pompy, a następnie dla stałej, maksymalnej prędkości obrotowej ($n = 1200$ obr/min) i rosnącego ciśnienia tłoczenia pompy, podczas dławienia przepływu cieczy zaworem. **Jeden punkt krzywych będzie wspólny!** Zaznaczyć maksymalną moc N_{max} pobieraną przez silnik przy prędkości obrotowej $n = 1200$ obr/min i całkowitym zdławieniu pompy. Sprawdzić równanie:

$$N \approx K \cdot n^3 \quad (9.14)$$

obliczając dla $n_1 = 600$ i $n_2 = 1200$ obr/min oraz całkowicie otwartego zaworu Z_2 proporcję:



$$\frac{n_2}{n_1} \approx \sqrt[3]{\frac{N_2}{N_1}} \quad (9.15)$$

Na oddzielnym rysunku sporządzić wykres zależności maksymalnej mocy pobieranej przez silnik pompy przy całkowitym zdławieniu przepływu, od zmiennej prędkości obrotowej silnika pompy $N_{\max} = f(n)$.

9.8.7. SPRAWNOŚĆ POMPY

Moc pobierana przez silnik pompy może być określona ze wzoru:

$$N = \frac{\dot{V} \cdot P_h}{\eta_p \cdot \eta_s} \quad (9.16)$$

gdzie: $\dot{V}$ - wydajność pompy [m^3/s],

P_h - ciśnienie podnoszenia pompy [Pa],

η_p - współczynnik mechanicznej sprawności pompy,

η_s - współczynnik elektrycznej sprawności silnika.

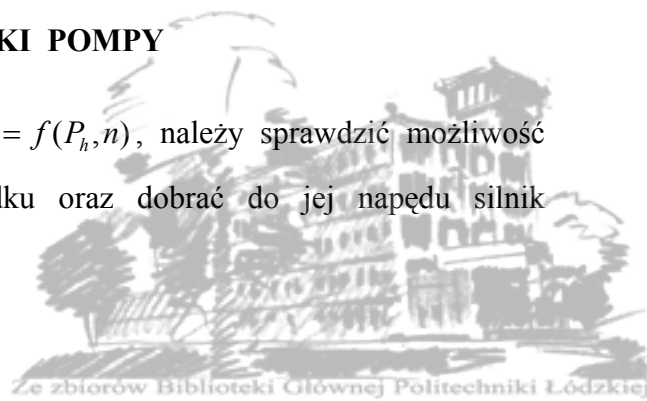
Przekształcając równanie 9.16 otrzymamy:

$$\eta_p = \frac{\dot{V} \cdot P_h}{N \cdot \eta_s} \quad (9.17)$$

Korzystając z wykresu charakterystyki pompy $\dot{V}_r = f(P_h, n)$, należy znaleźć dla $n = 1200$ obr/min trzy dowolne pary wielkości P_h i $\dot{V}_r$. Następnie z wykresu $N = f(\dot{V}_r)$ określić dla wybranych $\dot{V}_r$ moce N pobierane przez silnik pompy przy $n = 1200$ obr/min. Z równania 9.17 obliczyć współczynnik sprawności pompy przy trzech różnych wartościach natężenia przepływu $\dot{V}_r$, zakładając wartość współczynnika sprawności elektrycznej silnika $\eta_s = 0,75$.

9.8.8. WYKORZYSTANIE CHARAKTERYSTYKI POMPY

Znając przebieg charakterystyki pompy $\dot{V}_r = f(P_h, n)$, należy sprawdzić możliwość wykorzystania tej pompy w konkretnym przypadku oraz dobrać do jej napędu silnik o odpowiedniej prędkości obrotowej i mocy.



Badana pompa ma podawać ciecz o gęstości $\rho = 1004 \text{ kg/m}^3$ na wysokość $H = 5,4 \text{ m}$ z maksymalną wydajnością $\dot{V} = 0,8 \text{ m}^3/\text{godz}$. Korzystając ze wzoru na ciśnienie podnoszenia pompy:

$$P_h = H \cdot \rho \cdot g \quad (9.18)$$

oraz wykresu charakterystyki pompy, określić minimalną prędkość obrotową n silnika, jaki powinien być użyty do napędu pompy. Przyjąć $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Z wykresu zależności $N_{\max} = f(n)$, określić dla wybranej prędkości obrotowej silnika n_s jego moc $N_{\max}$. Obliczyć moc zainstalowaną silnika N_s :

$$N_s = N_{\max} \cdot R \quad (9.19)$$

przyjmując wartość współczynnika rezerwy mocy $R = 1,5$.

9.9. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- uproszczony schemat instalacji pomiarowej z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- wykresy charakterystyk przepływomierzy, wartości K_s i K_{zc} ,
- wykresy charakterystyki pompy: $P_h = f(n)$, $\dot{V}_r = f(P_h, n)$, $N = f(\dot{V}_r)$,
 $N_{\max} = f(n)$,
- obliczenia proporcji według wzorów: 9.10, 9.12, 9.15,
- obliczenia sprawności pompy η_p ,
- obliczenia wartości N_s i n_s ,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.



9.10. LITERATURA

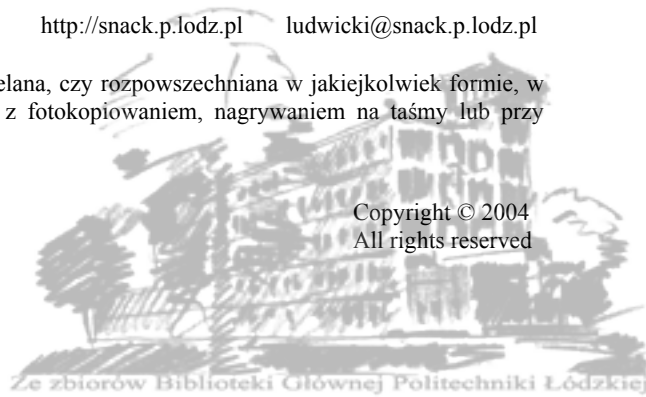
Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii oraz książki:

- [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@snack.p.lodz.pl

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

Copyright © 2004
All rights reserved



10. ELEKTROCHEMICZNY ANALIZATOR SKŁADU ROZTWORU

Cel zadania: *Poznanie budowy i działania urządzenia do automatycznego, konduktometrycznego kontrolowania jakości wody zasilającej kotły parowe w przemyśle cukrowniczym. Badanie odpowiedzi analizatora na wymuszenie impulsowe.*

10.1. DZIAŁANIE ANALIZATORA SKROPLIN Z WYPARKI CUKROWNICZEJ

Stosowanie w przemyśle spożywczym, a zwłaszcza w przemyśle cukrowniczym nowoczesnych, wysokopiętnych kotłów parowych o dużej wydajności, stwarza konieczność zwracania szczególnej uwagi na jakość wody zasilającej te kotły. Kotły parowe w cukrowni są zasilane skroplinami z wielodziałowej stacji wyparnej. W przypadku nieprawidłowego funkcjonowania wyparki, w skroplinach tych może znaleźć się pewna ilość sacharozy. Zacukrzonych skroplin nie można skierować do kotłowni, gdyż mogą one spowodować poważną awarię kotłów, można natomiast wykorzystać je do innych celów technologicznych.

Kontrolowanie czystości wody zasilającej kotłownię odbywa się w cukrowni przez okresowe stwierdzanie braku w skroplinach sacharozy, barwną reakcją z α -naftolem, w środowisku stężonego kwasu siarkowego. Analiza ta jest kłopotliwa do przeprowadzania w warunkach przemysłowych i z powodu okresowości wykonywania nie zabezpiecza całkowicie kotłowni.

Właściwą kontrolę jakości wody zasilającej kotły parowe w cukrowni zapewnia opracowany w Instytucie Chemicznej Technologii Żywności PŁ i wdrożony w przemyśle cukrowniczym ciągły, automatyczny analizator skroplin. Aparat wykrywa w skroplinach obecność śladowych ilości zagęszczanego w wyparce roztworu sacharozy, sygnalizując optycznie i akustycznie zanieczyszczenie wody zasilającej kotły. Współdziałając z układem automatycznych zaworów, zamyka dopływ zanieczyszczonych skroplin do kotłowni, kierując je do zbiornika gorącej wody technologicznej. Oddzielny obwód uruchamia zasilanie kotłów wodą ze zmiękczalni. Wynik analizy skroplin jest rejestrowany.

Zasada działania aparatu wykorzystuje fakt, że w roztworze poddawany zagęszczaniu w wyparce znajduje się oprócz sacharozy, również pewna ilość soli nieorganicznych, głównie sodowych i potasowych. Stosunek stężenia tych soli do stężenia sacharozy jest w przybliżeniu stały i wynosi około 1 : 80. W przypadku przedostania się roztworu cukru do skroplin (np. wskutek pienienia się lub nieszczelności komory grzejnej wyparki), w skroplinach znajdzie się pewna ilość związków o charakterze jonowym, których stężenie będzie proporcjonalne do

stężenia sacharozy. Stężenie tych związków można oznaczyć konduktometrycznie, po oddzieleniu przez oddestylowanie węglanu amonowego, znajdującego się normalnie w skroplinach, a pochodzącego z termicznego rozkładu amidów. Obecność węglanu wywierałaby działanie maskujące, uniemożliwiające pomiar.

W otrzymanym destylacie oznacza się dodatkowo, również konduktometrycznie, zawartość związków amonowych, których stężenie jest związane ze stopniem oczyszczenia roztworu sacharozy zagęszczanego w wyparce.

10.2. BUDOWA ANALIZATORA

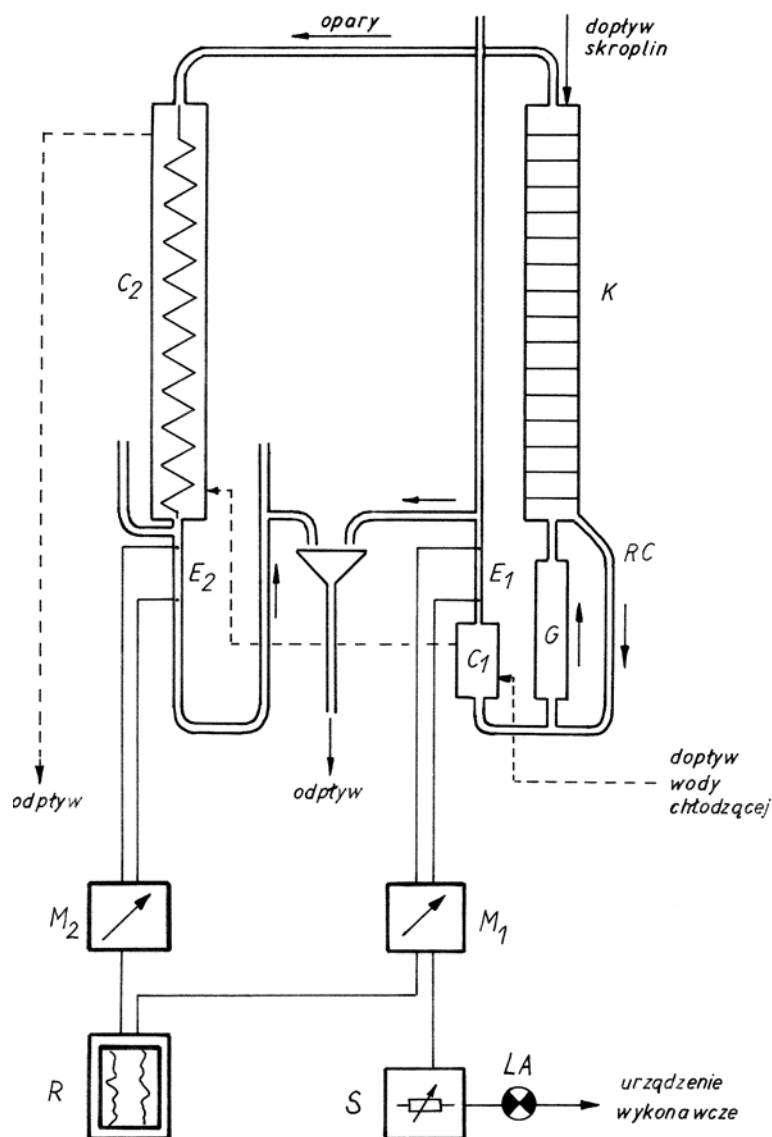
Schemat analizatora skroplin przedstawia rysunek 10.1. Analizowane skropliny są doprowadzone do górnej części szklanej kolumny rektyfikacyjnej K z wypełnieniem lejkowym typu Hartha. Spływając w dół, zostają pozbawione składników lotnych (węglanu amonowego) i znacznej części wody. Pod kolumną jest umieszczony grzejnik elektryczny G z rurką cyrkulacyjną RC . Zagęszczone i pozbawione węglanu amonowego skropliny, po ochłodzeniu w chłodnicy C_1 , dopływają do czujnika konduktometrycznego E_1 .

Opary z kolumny rektyfikacyjnej są skraplane w chłodnicy C_2 , a stężenie węglanu amonowego w kondensacie mierzy czujnik konduktometryczny E_2 .

Układ pomiarowy składa się z dwóch zespołów konduktometrów ze wskaźnikami stężenia cukru M_1 i stężenia związków amonowych M_2 , dwukanałowego rejestratora R i dwupołożeniowego sygnalizatora S . Sygnalizator umożliwia nastawienie dopuszczalnego stężenia cukru w skroplinach, po przekroczeniu którego jest uruchamiany układ alarmowy (lampka LA , sygnał akustyczny w stacji wyparnej i w kotłowni oraz automatyczne przełączenie zaworów w rurociągach zasilających kotły).

Szafę sterowniczą analizatora wyposażono w system sygnalizacji nieprawidłowego funkcjonowania: dodatkowe elektryczne układy alarmowe sygnalizują brak dopływu skroplin do aparatu (lampka LS), brak dopływu wody chłodzącej chłodnicy (lampka LC), czy uszkodzenie grzejnika (lampka LG). Przerwa w dopływie energii elektrycznej do analizatora powoduje automatyczne włączenie alarmu i przełączenie zaworów wodnych z wyparki do kotłowni.





Rys. 10.1. Schemat analizatora skroplin

W warunkach cukrowni, skropliny są dozowane do analizatora specjalną mikropompką membranową z niewielkiego zbiornika przelewowego, umieszczonego tuż przy aparacie. Natężenie przepływu skroplin przez zbiornik przelewowy jest wielokrotnie większe niż wydajność ich dozowania do analizatora. W ten sposób zostaje zmniejszone opóźnienie transportowe układu. W warunkach laboratoryjnych, do dozowania roztworu imitującego skropliny zastosowano mikropompkę tłoczkową o nastawianej ręcznie wydajności. Połączenie pompki z analizatorem długą rurką powoduje (przy niewielkim natężeniu przepływu cieczy) wystąpienie znacznego opóźnienia transportowego. Opóźnienie to może być jednak łatwo obliczone i uwzględnione w badaniach dynamiki analizatora.



10.3. URUCHOMIENIE ANALIZATORA

Pompka dozująca ciecz do analizatora jest nastawiona na wydajność $600 \text{ cm}^3/\text{godz.}$ W tym celu ustawiono takie położenie śruby mikrometrycznej wielkości skoku tłoka pompki, aby przy włączeniu 20 ruchów tłoka na minutę zapewnić żądany przepływ. Nastawienie śrubą wartości 10,00 daje objętość jednej tłoczonej porcji cieczy $1,000 \text{ cm}^3$. W naszym przypadku objętość jednej porcji cieczy powinna wynosić $600 : 20 : 60 = 0,500 \text{ cm}^3$, dlatego śrubą tłoka nastawiono wartość 5,00 jednostek.

Odkręcając zawór wodny przy ścianie, uruchomić przepływ wody wodociągowej przez układ chłodzenia aparatu i korzystając ze wskazań rotametu nastawić przepływ wody chłodzącej $1 \pm 0,2 \text{ dm}^3/\text{godz.}$ **Co pewien czas kontrolować przepływ wody chłodzącej!**

Wężyk ssący pompki dozującej zanurzyć w zlewce z **dużym** zapasem wody destylowanej. Włączyć pompkę na pracę ciągłą i dozować do analizatora wodę z wydajnością $600 \text{ cm}^3/\text{godz.}$

Włączyć analizator wyłącznikiem "sieć". Włączenie sygnalizuje lampka kontrolna. Grzejnik powinien być **wyłączony**, przełącznik "automat" w dowolnym położeniu. Przepłukiwać aparat wodą destylowaną przez około 15 minut, doprowadzając wskazanie miernika "cukier" do minimum (nie więcej niż 0,1 jednostki). Przy stosowaniu wody destylowanej gorszej jakości, jako maksymalną dopuszczalną można przyjąć wielkość wskazań miernika 0,5 jednostki. Ponieważ grzejnik aparatu jest wyłączony, przez czujnik konduktometryczny E_2 nie przepływa destylat (patrz rys. 10.1) i miernik stężenia związków amonowych może wskazywać przypadkową wartość.

Pokrętle sygnalizatora (po wciśnięciu przycisku w pokrętle) nastawić wartość 1,0 jednostki, odpowiadającą dolnej granicy czułości chemicznej metody wykrywania obecności śladów sacharozy w skroplinach, stosowanej w cukrowniach (reakcja z α -naftolem). Po przekroczeniu tej wartości przez miernik "cukier", analizator będzie sygnalizował obecność sacharozy w skroplinach świeceniem lampki "alarm".

Umieszczony w szafie analizatora dwukanałowy rejestrator stężenia cukru i związków amonowych nie jest wykorzystywany w zadaniu. Jest to rejestrator przemysłowy i ze względu na niewielką prędkość przesuwu taśmy (6 cm/godz) jest mało przydatny podczas wykonywania pomiarów w warunkach laboratoryjnych.



10.4. PRZYGOTOWANIE ROZTWORÓW

Należy przygotować dwa roztwory modelowe o składzie zbliżonym do składu skroplin ze stacji wyparnej w cukrowni. W tym celu trzeba odpowiednio rozcieńczyć świeżą wodą destylowaną podstawowy roztwór węglanu amonowego o stężeniu $2,5 \text{ g/dm}^3$. Przygotować roztwór *I* o mniejszej zawartości węglanu, dodając do $1,9 \text{ dm}^3$ wody 100 cm^3 roztworu podstawowego oraz roztwór *II* o większej zawartości węglanu, dodając do $1,8 \text{ dm}^3$ wody 200 cm^3 roztworu podstawowego.

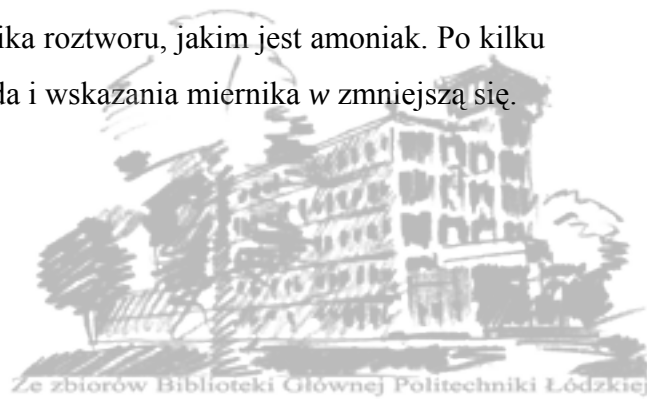
Dodatkowo należy przygotować około 100 cm^3 roztworu mączki cukrowniczej, o stężeniu około 10% suchej substancji (10 g mączki drugiej dopełnić w zlewce z podziałką wodą destylowaną do 100 cm^3 i dokładnie wymieszać, aż do rozpuszczenia się kryształów sacharozy).

10.5. BADANIA LABORATORYJNE ANALIZATORA

10.5.1. SPRAWNOŚĆ ODPĘDZANIA WĘGLANU AMONOWEGO

Wężyk ssący pompki dozującej przełożyć ze zlewki z wodą destylowaną do butli zawierającej roztwór węglanu amonowego o większym stężeniu (*II*). Od tego momentu notować wskazania mierników "cukier" (*c*) i " $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ " (*w*) co 1 minutę, aż do ustalenia się wskazań miernika "cukier" (grzejnik, chłodnica C_1 i czujnik konduktometryczny E_1 zostały wypełnione roztworem węglanu amonowego) .

Zbadanie sprawności odpędzania węglanu amonowego będzie polegało na określeniu spadku wskazań miernika "cukier" po włączeniu grzejnika analizatora. Znaczna część węglanu amonowego zostanie wtedy oddestylowana wraz z częścią wody i po skropleniu w chłodnicy C_2 znajdzie się w czujniku konduktometrycznym E_2 (patrz rys. 10.1). Dozując nadal do aparatu roztwór węglanu amonowego *II*, należy włączyć grzejnik analizatora. Włączenie grzejnika sygnalizuje lampka "grzejnik". Zaznaczyć w tabelce z wynikami pomiarów moment włączenia grzejnika i nie przerywając mierzenia czasu, w dalszym ciągu notować co 1 minutę wskazania obu mierników aparatu, aż do ich ponownego ustalenia się. Normalnym zjawiskiem jest początkowy gwałtowny wzrost wskazań miernika w nawet poza skalę, spowodowany rozpoczęciem destylacji od najbardziej lotnego składnika roztworu, jakim jest amoniak. Po kilku minutach zacznie być oddestylowywana również i woda i wskazania miernika w zmniejszą się.



10.5.2. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ZWIĄZKÓW AMONOWYCH

Zbadanie tej odpowiedzi będzie polegało na wykonaniu skokowej zmiany stężenia roztworu węglanu amonowego doprowadzanego do analizatora skroplin i określeniu przebiegu wskazań miernika " $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ " w funkcji czasu.

Przy ustalonej pracy analizatora zasilanego roztworem *II* węglanu amonowego, uruchomić od nowa pomiar czasu i w tym momencie ($\tau = 0$) przełożyć wężyk ssący pompki dozującej do butli zawierającej roztwór węglanu amonowego o mniejszym stężeniu (*I*). Notować co 1 minutę wskazania obu mierników analizatora, aż do ich ustalenia się.

10.5.3. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ROZTWORU SACHAROZY

Zbadanie tej charakterystyki będzie polegało na wykonaniu impulsowego wymuszenia na wejściu analizatora (symulowany przerzut roztworu sacharozy w wyparce) i określeniu przebiegu zmian wskazań miernika "*cukier*" w funkcji czasu. Wymuszenie impulsowe dokładniej naśladuje normalne warunki pracy aparatu niż wymuszenie skokowe. Symulowany, impulsowy przerzut roztworu cukru w wyparce cukrowniczej można w prosty sposób wykonać w laboratorium, przez doprowadzenie do analizatora określonej objętości roztworu mączki cukrowniczej.

W momencie przyjętym za początek mierzenia czasu ($\tau = 0$), dokonać odczytu wskazań obu mierników analizatora i wężyk ssący pompki dozującej przełożyć **na 30 sekund (!)** z roztworu węglanu amonowego *I* do przygotowanego roztworu mączki o stężeniu około 10% suchej substancji. W momencie $\tau = 30$ s dokonać ponownego odczytu wskazań obu mierników analizatora i wężyk ssący pompki dozującej, po opłukaniu wodą destylowaną, **umieścić ponownie** w butli z roztworem węglanu amonowego *I*. Kontynuować odczytywanie wskazań mierników co 30 sekund przez 10 minut i następnie co 2 minuty przez 20 minut. Zwrócić uwagę na włączenie alarmu (świecenie lampki "*alarm*") po przekroczeniu wartości 1,0 jednostek na mierniku "*cukier*" i odwołanie alarmu po spadku wskazań tego miernika.



10.6. ZAKOŃCZENIE ZADANIA

Po wykonaniu pomiarów należy przepłukać aparat, przekładając wężyk ssący pompki dozującej do zlewki z **dużym** zapasem wody destylowanej. Grzejnika aparatu nie wyłączać! Wodę dozować z wydajnością 600 cm³/godz, aż wskazania obu mierników ustalą się przy minimalnych wartościach (w pobliżu zera). Nie zwiększać wydajności pompki dozującej, ponieważ grozi to zalaniem kolumny rektyfikacyjnej i nie przyspieszy przepłukiwania aparatu!

Nie zatrzymując pompki dozującej wodę destylowaną wyłączyć grzejnik, a następnie cały aparat. Po 15 minutach (ostygnięcie grzejnika) wyłączyć pompkę dozującą i zamknąć dopływ wody chłodzącej.

10.7. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

10.7.1. SPRAWNOŚĆ ODPĘDZANIA WĘGLANU AMONOWEGO

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 10.5.1, sporządzić we wspólnym układzie współrzędnych (na tym samym rysunku) wykres zależności wskazań obu mierników analizatora (c i w) od czasu. Zaznaczyć na wykresie moment włączenia grzejnika. Określić ustalone wartości wskazań obu mierników analizatora przy wyłączonym, a następnie włączonym grzejniku.

Dla ustalonego przebiegu destylacji, obliczyć sprawność odpędzania węglanu amonowego z roztworu o większym stężeniu (II), korzystając ze wzoru:

$$\eta = \left(1 - \frac{c_{gII}}{c_{zII}}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (10.1)$$

w którym c_{zII} jest ustaloną wartością wskazywaną przez miernik "cukier" bez włączonego grzejnika, natomiast c_{gII} jest ustaloną wartością wskazań tego miernika z włączonym grzejnikiem (po oddestylowaniu znacznej części węglanu).



10.7.2. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ZWIĄZKÓW AMONOWYCH

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 10.5.2, sporządzić wykres odpowiedzi analizatora na skokowy wzrost stężenia związków amonowych (zależność wskazań miernika w od czasu τ w formacie A-4). Wyznaczyć metodą graficzną zastępczy czas opóźnienia τ_{oz} oraz zastępczą stałą czasową T_z (patrz [1], rozdz. 16.3.2, rys. 16.20).

Obliczyć opóźnienie transportowe doświadczalnego układu pomiarowego τ_{ot} związane z czasem transportu roztworu przez wężyk pompki dozującej o długości $L = 2,5$ m, średnicy wewnętrznej $d = 2$ mm i przy objętościowym natężeniu przepływu cieczy $\dot{V} = 600$ cm³/godz. Obliczyć rzeczywisty czas opóźnienia pomiaru stężenia soli amonowych z równania:

$$\tau_o = \tau_{oz} - \tau_{ot} \quad (10.2)$$

10.7.3. ODPOWIEDŹ ANALIZATORA NA SKOKOWY WZROST STĘŻENIA ROZTWORU SACHAROZY

Korzystając z wyników doświadczeń z punktu 10.5.3, sporządzić wykres odpowiedzi analizatora na wymuszenie impulsowe stężenia cukru - zależności wskazań miernika c od czasu τ , po wykonaniu wymuszenia. Rysunek wykonać w pionowym formacie A-4, zostawiając spory zapas miejsca na przedłużenie osi rzędnych.

Stosowanie wymuszenia skokowego nie jest możliwe w takich przypadkach, kiedy powoduje duże odchylenia wielkości wyjściowej, niekorzystne dla badanego procesu technologicznego (zwłaszcza w obiektach astatycznych, łatwo wprowadzanych w zakres nasycenia). Wykorzystuje się wówczas wymuszenie impulsowe. Wymuszenie to, o czasie trwania τ_i , można potraktować jako dwa kolejne wymuszenia skokowe o tej samej wielkości skoku ΔX lecz o przeciwnym kierunku, przesunięte o czas τ_i . Na wyjściu układu otrzymamy odpowiedź:

$$Y(\tau) = Y_s(\tau) - Y_s(\tau - \tau_i) \quad (10.3)$$

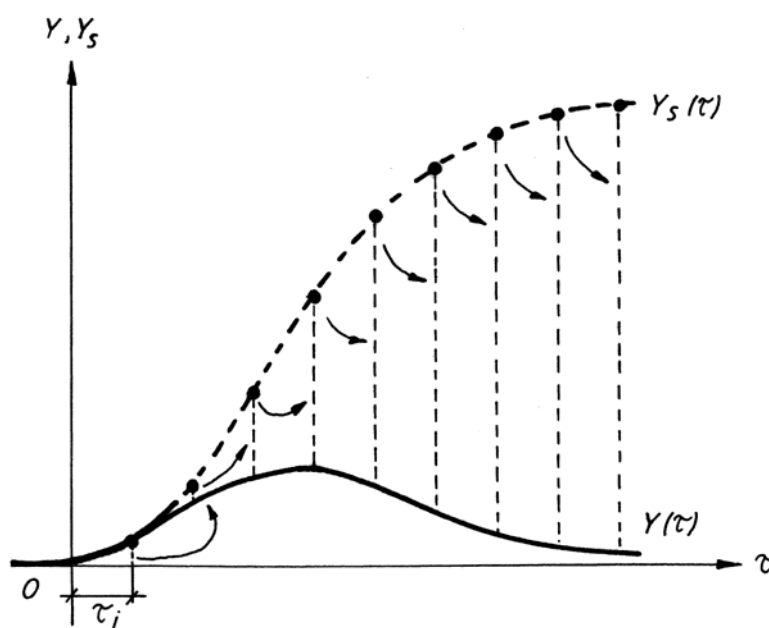
gdzie $Y_s(\tau)$ jest szukaną charakterystyką skokową badanego układu.



Z równania 10.3 wynika zależność:

$$Y_s(\tau) = Y(\tau) + Y_s(\tau - \tau_i) \quad (10.4)$$

pozwalająca wyznaczyć graficznie, punkt po punkcie, charakterystykę skokową układu z jego charakterystyki impulsowej. Przykład takiego wyznaczenia charakterystyki skokowej układu inercyjnego przedstawia rysunek 10.2. Do czasu $\tau = \tau_i$, odpowiedzi $Y(\tau)$ i $Y_s(\tau)$ pokrywają się. Następne punkty $Y_s(\tau)$ otrzymujemy dodając do odpowiedzi $Y(\tau)$ wartości $Y_s(\tau - \tau_i)$.



Rys. 10.2. Graficzne wyznaczanie charakterystyki skokowej układu inercyjnego z jego charakterystyki impulsowej

Z przebiegu odpowiedzi na wymuszenie impulsowe wyznaczyć przebieg charakterystyki skokowej podaną wyżej metodą (patrz też [1], rozdz. 23.1.2.B), przyjmując czas trwania wymuszenia impulsowego τ_i wynosił 30 s. Ze względu na dużą stromość charakterystyki skokowej, wystarczy wyznaczyć tylko jej 6 ÷ 8 punktów początkowych!

Prawidłowe funkcjonowanie analizatora skroplin jest zależne od szybkości jego reagowania na pojawienie się roztworu sacharozy w kondensacie. Z tego względu podstawowym parametrem dynamicznym aparatu jest czas opóźnienia, natomiast wartość stałej czasowej nie jest tu tak istotna. Korzystając z narysowanego wykresu charakterystyki skokowej, wyznaczyć metodą graficzną zastępczy czas opóźnienia τ_{oz} pomiaru stężenia sacharozy (patrz [1], rozdz. 16.3.2, rys. 16.20). Znając opóźnienie transportowe τ_{ot} obliczone w punkcie 10.7.2, obliczyć rzeczywisty czas opóźnienia pomiaru stężenia cukru w skroplinach według równania 10.2.

10.7.4. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z wykonania zadania powinno zawierać:

- prosty schemat analizatora skroplin z krótkim opisem,
- tabele z wynikami pomiarów,
- obliczenie sprawności odpędzania węglanu amonowego wraz z wykresem $c_w = f(\tau)$,
- wykres odpowiedzi na wymuszenie skokowe, wyznaczenie τ_{oz} i T_z oraz obliczenie τ_{ot} i τ_o pomiaru stężenia związków amonowych,
- wykres charakterystyki impulsowej i skokowej pomiaru stężenia cukru, wyznaczenie τ_{oz} i obliczenie τ_{ot} pomiaru stężenia sacharozy,
- wnioski dotyczące **wszystkich** wykonanych doświadczeń i wyników obliczeń.

10.8. LITERATURA

Podstawowymi źródłami umożliwiającymi poszerzenie materiału zawartego w instrukcji są notatki z wykładów "Pomiary i automatyka" z II roku studiów na Wydziale Chemii Spożywczej i Biotechnologii 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@snack.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 fotokopiuowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych nośników informacji, bez pisemnej zgody autora.

Copyright © 2004
All rights reserved

