ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: AUTOMATYKA z. 14 Nr kol. 267

Jerzy Kuźnik
Katedra Urządzeń
i Układów Automatyki

5.2. UWAGI O REGULATORACH PNEUMATYCZNYCH PAP-FALENICA

W Katedrze Urządzeń i Układów Automatyki przeprowadzono badania 10 różnych typów przyrządów automatyki pneumatycznej produkowanych przez PAP Falenica na licencji firmy Siemens. Badania te obejmowały między innymi regulator pneumatyczny P typ R 151-003 oraz regulator pneumatyczny PID typ TRPIDW. Są to regulatory mieszkowe działające na zasadzie porównania momentów.

Badania obejmowały:

1. Pomiary charakterystyk statycznych z których określono błąd podstawowy, błąd histerezy, zmienność wskazań, próg czułości, stałość zera, odporność na wstrząsy, stałość charakterystyki na zmiany temperatury w granicach $+5^{\circ} \div 50^{\circ}C$, odporność na zmiany ciśnienia zasilającego, odporność na przeciążenia.

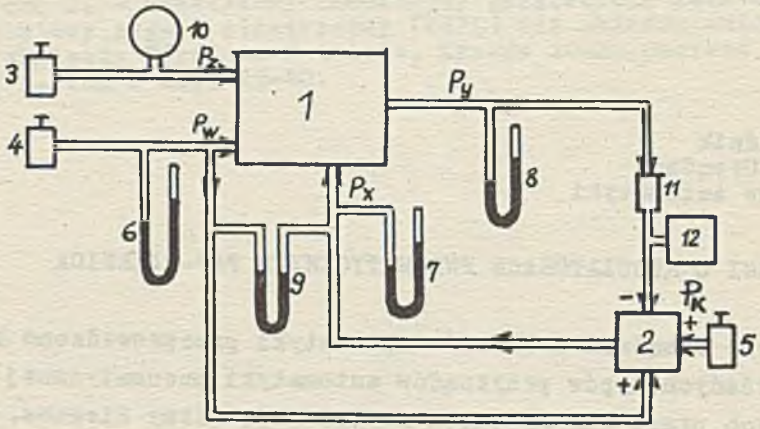
2. Pomiary charakterystyk dynamicznych a więc charakterystyk amplitudowo-fazowych i odpowiedzi na skok jednostkowy.

3. Pomiary pyłoszczelności, zużycia własnego powietrza, obciążalności wyjścia w stanie ustalonym.

4. Pomiary trwałości przyrządu.

Podstawowym przyrządem pomiarowym była U-rurka rtęciowa. Poziom rtęci w jej ramionach odczytywano przy pomocy katetometru z dokładnością 0,1 mm Hg. Błąd pomiaru ciśnienia przy pomocy U-rurki rtęciowej odniesiony do maksymalnego zakresu zmian sygnału równego 0,8 at wynosił poniżej 0,1%.

Pomiary charakterystyk statycznych regulatora PID przeprowadzono w układzie zamkniętym. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1

Na rysunku tym:

P_x - ciśnienie wejściowe,

P_w - ciśnienie zadane,

P_y - ciśnienie wyjściowe,

P_k - ciśnienie dodatkowe przesuwające,

1 - badany regulator,

2 - sumator,

3, 4, 5 - zadajniki ciśnienia,

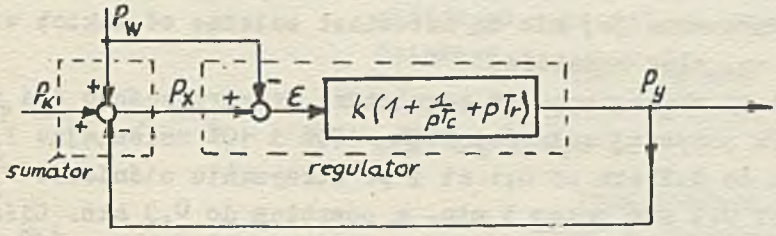
6, 7, 8 - U-rurki rtęciowe

9 - U-rurka wodna,

10 - manometr sprężynowy,

11, 12 - opór pneumatyczny i komora zapewniająca stabilną pracę układu.

W tym układzie pomiarowym U-rurka wodna 9 mierzy bezpośrednio błąd δ węzła sumacyjnego regulatora. Ponieważ ciśnienie wyjściowe P_y można było zmieniać przez zmianę ciśnienia dodatkowego P_k podawanego do sumatora, więc mierzono charakterystykę $\delta = f(P_y)$. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawia rys. 2.



Rys. 2

Na podstawie tego schematu można napisać następujące równania:

- dla sumatora:

$$P_k - P_y + P_w = P_x + \delta_1 \tag{1}$$

gdzie:

δ_1 - błąd sumatora

- dla węzła sumacyjnego regulatora:

$$P_x - P_w = \varepsilon + \delta \tag{2}$$

gdzie:

δ - błąd węzła sumacyjnego regulatora

- dla regulatora:

$$P_y = K(1 + \frac{1}{pT_c} + pTr) \cdot \varepsilon \tag{3}$$

Łącząc te równania i podstawiając p = 0 dla stanu ustalonego otrzymuje się

$$P_x - P_w = \delta \tag{4}$$

czyli U-rurka wodna mierzy tylko błąd węzła sumacyjnego regulatora. Wskazania jej nie są natomiast zależne od takich wielkości jak np. błąd sumatora.

Pomiary charakterystyk regulatora przeprowadzono dla trzech zakresów proporcjonalności 300%, 100% i 10% zmieniając P_y od 0,3 atn do 0,9 atn co 0,1 at i po utrzymaniu ciśnienia P_y na wartości 0,9 atn przez 5 min. z powrotem do 0,3 atn. Ciśnienie zadane P_w utrzymywano na wartości 0,6 atn.

Z pomiarów wynika, że błąd δ wzrastał przy zmniejszaniu zakresu proporcjonalności i wynosił maksymalnie 1,1% pełnego zakresu zmian sygnału, czyli 0,8 at. Natomiast błąd histerezy, czyli maksymalna różnica wskazań przy ciśnieniu wyjściowym rosnącym i ciśnieniu wyjściowym malejącym dla tego samego punktu pomiarowego wyniosła 0,1%. Zmierzono też wpływ zmian ciśnienia zadanego i zmian czasu całkowania na błąd regulatora. Wpływ ten był minimalny w granicach kilku mm H_2O.

Charakterystyki statyczne regulatora P mierzono w układzie otwartym, czyli mierzono bezpośrednio zależność $P_y = f(P_x)$ przy stałym ciśnieniu zadanym P_w. Błąd podstawowy obliczono jako maksymalną różnicę między charakterystyką rzeczywistą i idealną (obliczeniową) (rys. 3) ze wzorów

$$\delta = \frac{(P_{y\,rz} - P_{y\,obl.})_{max}}{P_{ymax} - P_{ymin}} \cdot 100\% \qquad (5)$$

gdzie:

$P_{yrz.}$ – rzeczywista zmierzona wartość sygnału wyjściowego,

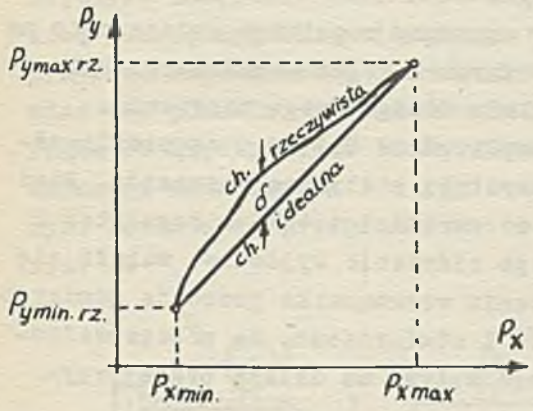
$P_{yobl.}$ – idealna wartość sygnału wyjściowego obliczona ze wzoru

$$P_{y\,obl.} = P_{y\,min.rz.} + \frac{P_{ymax.\,rz} - P_{y\,min.\,rz}}{P_{xmax} - P_{x\,min}} \cdot P_x \qquad (6)$$

we wzorze (6)

$P_{y\ max\ rz.}$ i $P_{y\ min.\ rz}$ – wartość sygnału wyjściowego przy skrajnych wartościach sygnału wejściowego $P_{x\ min}$ i $P_{x\ max}$

$P_{y\ max} - P_{y\ min}$ – znamionowy zakres sygnału wyjściowego czyli 0,8 at.



Rys. 3

Przy pomiarach zauważono, że regulator był wewnętrznie niestabilny już przy zakresach proporcjonalności wyższych od 50%. Dopiero po podłączeniu na wyjściu pojemności 3 l regulator był stabilny dla całego zakresu zmian zakresu proporcjonalności. Badany egzemplarz regulatora posiadał wadę, wskutek której jego charakterystyki robocze były bardzo nieliniowe dla zakresów proporcjonalności niższych od 100%. Błąd podstawowy wyliczony ze wzoru (5) przekraczał 5%. Błąd histerezy nie przekraczał natomiast 1%.

Zmienność wskazań (powtarzalność) regulatorów określono w wyniku pięciokrotnego pomiaru charakterystyk statycznych, z których pierwsze dwa wykonuje się bezpośrednio po sobie, trzeci w 2 godz. po drugim, czwarty w 4 h po trzecim, piąty w 24 h po czwartym, przy czym w tym ostatnim okresie wyczekiwania utrzymuje się w regulatorze ciśnienie wejściowe i zadane równe $\frac{2}{3}$ atn. Maksymalna różnica między wartościami ciśnienia nie przekraczała błędu podstawowego, czyli regulatory spełniały pod tym względem wymagania URS.

Próg czułości mierzono w ten sposób, że powoli zwiększano sygnał wejściowy aż do wystąpienia zauważalnej zmiany sygnału wyjściowego. Ta zmiana sygnału wyjściowego odniesiona do pełnego zakresu zmian tego sygnału jest progiem czułości tego

przyrządu. Wartości progu czułości dla regulatorów nie przekraczały wartości 0,1 błędu podstawowego wymaganej przez przepisy URS.

Przy pomiarze stałości zera odczytywano wartość sygnału wyjściowego P_y przy stałych wartościach ciśnienia wejściowego P_x i zadanego P_y na początku pomiaru oraz po upływie 12, 24, 36 i 48 h. Maksymalna różnica wartości sygnału wyjściowego nie przekraczała 0,5 błędu podstawowego.

Przy badaniu odporności na wstrząsy regulator umieszczono na wstrząsarce w ten sposób, że kierunek drgań wstrząsarki był zgodny z płaszczyzną ruchu układu dźwigniowego przyrządu. Przyrząd poddano drganiom o amplitudzie 0,1 mm i częstotliwości 25 Hz i zmierzono charakterystyki statyczne przyrządu. Błąd regulatora PID zwiększył się do wartości 1,43%, a regulator P nie działał prawidłowo, bo jego ciśnienie wyjściowe wahało się w granicach 0,1 at. Po wyłączeniu wstrząsarki ponownie pomierzono charakterystyki regulatorów i stwierdzono, że przeprowadzone badania nie wywarły ujemnego wpływu na dalszą pracę przyrządów.

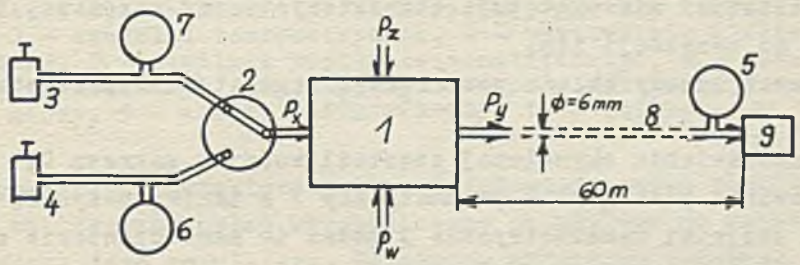
Badania stałości charakterystyki na zmiany temperatury przeprowadzono w ten sposób, że przyrząd umieszczono w komorze klimatycznej, ustalono temperaturę wnętrza, odczekiwano 2 godz. po czym zdejmowano charakterystyki statyczne. Badania takie przeprowadzono dla temperatury +5°C i 50°C. Z pomierzonych charakterystyk obliczono błąd dodatkowy na 10°C. Nie przekraczał on wartości 0,5%.

Przy badaniu na przeciążenie kolejno ustawiono sygnały: wejściowy, zadany i wyjściowy na wartości 1,25 atn i utrzymywano przez 15 min. Następnie przeprowadzono ponowny pomiar charakterystyk statycznych. Błąd podstawowy regulatorów wskutek tej próby nie uległ zwiększeniu.

Dla regulatora PID przeprowadzono jeszcze pomiary zgodności nastaw. Rzeczywisty zakres proporcjonalności różnił się od zakresu nastawionego tylko o kilka %. Pomiar czasu całkowania przeprowadzono podając skokowe zmiany sygnału wejściowego przy zakresie proporcjonalności 100% i czasie zróżniczkowania równym zeru. Przy pomiarze czasu różniczkowania nastawiono zakres

proporcjonalności na wartość 100%, a czas całkowania na wartość maksymalną i podawano na wejście sygnał liniowo narastający. Nie mierzono tu więc wpływu interakcji. Rzeczywista wartość czasu całkowania różniły się znacznie od wartości nastawianych szczególnie dla dużych wartości tych czasów.

Regulatory przechodziły dwa rodzaje badań dynamicznych. Najpierw zmierzono czas odpowiedzi badanego przyrządu na skokową zmianę sygnału wejściowego w pełnym zakresie, gdy badany przyrząd współpracował ze standartową linią pneumatyczną. Pomiar ten pozwala na oszacowanie przydatności badanego przyrządu do współpracy z linią pneumatyczną. Orientuje nas o wydajności wzmacniacza i o jego wewnętrznym oporze pneumatycznym. Badania te przeprowadzono w układzie pomiarowym jak na rys. 4.



Rys. 4
1 - przyrząd badany, 2 - przełącznik pneumatyczny, 3, 4 - zadajniki ciśnienia, 5, 6, 7 - manometry sprężynowe, 8 - linia pneumatyczna, 9 - 0,5 l. pojemność

Na wejście badanego przyrządu podawano poprzez przełącznik pneumatyczny 2 najpierw ciśnienie z jednego a potem drugiego zadajnika. Regulator był podłączony do linii pneumatycznej o długości 60 m i średnicy wewnętrznej 6 mm, na której końcu był podłączony manometr sprężynowy oraz komora o pojemności 0,5 l. Stoperem mierzono czas, gdy sygnał wskazywany manometrem osiągnie 63% wartości ustalonej sygnału wyjściowego. Zgodnie z wymaganiami URS czas ten powinien być mniejszy od 7 sek. Regulatory miały czas odpowiedni rzędu 3-4 sekund.

Drugim rodzajem badań był pomiar charakterystyk amplitudowo-fazowych regulatorów. Pomiary te powinny przede wszystkim pozwolić na określenie rzędu częstotliwości przenoszonych praktycznie bez przesunięcia fazy i stłumienia amplitudy, a także bez niekształceń. Jako wskaźnika można tu użyć tzw. częstotliwości granicznej fgr. Częstotliwość graniczna określona jest jako najniższa częstotliwość, przy której punkt charakterystyki amplitudowo-fazowej badanego przyrządu różni się od punktu odpowiadającego zależności statycznej o 10° kątowych różnicy fazy lub o 10% w stosunku amplitud (mniejsza wartość). Zgodnie z zaleceniami częstotliwość graniczna przyrządów pneumatycznych powinna być nie mniejsza niż 0,05 Hz.

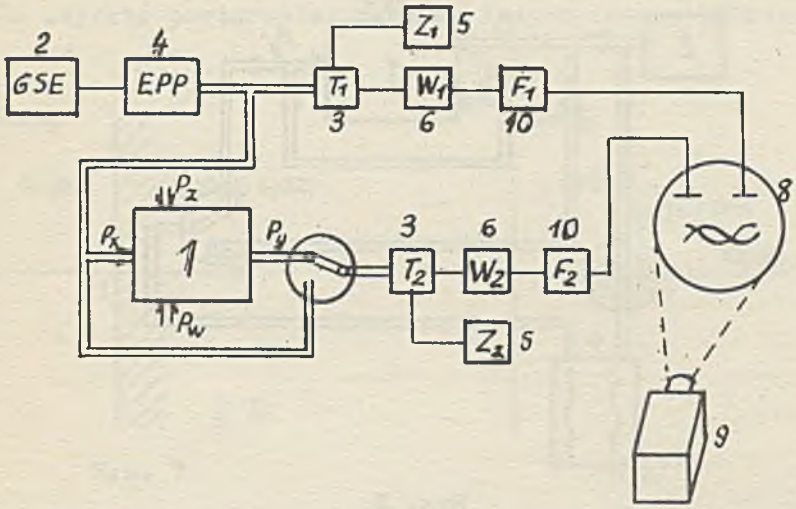
Oprócz wyznaczenia częstotliwości granicznej pomiary charakterystyk amplitudowo-fazowych pozwalają zorientować się: jak tłumione są niskie częstotliwości, czy w zakresie niskich częstotliwości nie występuje charakterystyczny rezonans, tendencje do oscylacji itp.

Schemat ideowy układu pomiarowego regulatora P przedstawia rys. 5.

Po nastawieniu określonej częstotliwości z zakresu 0,1 - 8 Hz ustawiono przełącznik pneumatyczny 7 w takiej pozycji, aby na oba czujniki tensometryczne 3 podać to samo ciśnienie z przetwornika elektropneumatycznego.

Następnie aparaturą mostkową i filtrami korekcyjnymi ustawiamy takie wzmocnienie obu kanałów i ewentualne przesunięcie fazowe, aby oba strumienie elektronowe na oscyloskopie pokryły się. Następnie nie zmieniając wzmocnienia wzmacniaczy i nie przestawiając filtrów przestawiono przełącznik. Wtedy ciśnienie wyjściowe badanego przyrządu było podawane na wejście drugiego czujnika tensometrycznego. Po uzyskaniu odpowiednio ostrych i niezakłóconych przebiegów wykonano zdjęcia na filmie o zwiększonej czułości.

Ze zdjęć określono poszczególne punkty charakterystyki amplitudowo-fazowej i naniesiono na wykres. Częstotliwość graniczna regulatora P była większa od zalecanej i wynosiła 0,2 Hz.

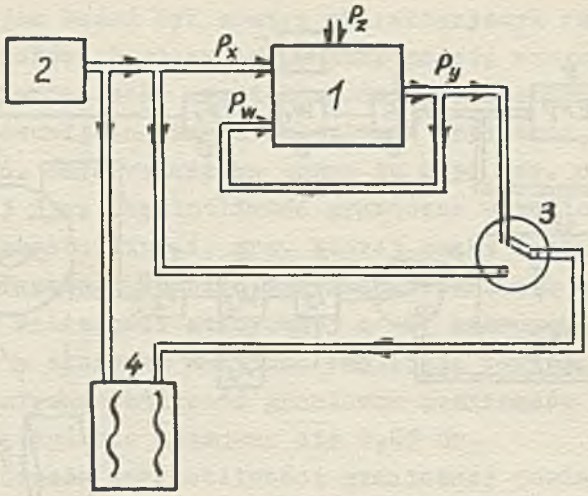


Rys. 5
1 - regulator P, 2 - generator elektryczny sygnałów sinusoidalnych, 3 - czujniki tensometryczne, 4 - przetwornik elektropneumatyczny, 5 - zasilacz mostka tensometrycznego, 6 - wzmacniacz, 7 - przełącznik pneumatyczny, 8 - oscyloskop dwustrumieniowy, 9 - aparat fotograficzny, 10 - filtry

Przy pomiarach charakterystyk amplitudowo-fazowych regulatora PID zastosowano układ zmodyfikowany ze względu na działanie całkujące tego regulatora. Regulator objęto tu sztywnym sprzężeniem zwrotnym przez połączenie ciśnienia wyjściowego z ciśnieniem zadanym. Unika się w ten sposób dryftu sygnału wyjściowego spowodowanego nawet nieznaczną asymetrią sygnału wejściowego. Schemat ideowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 6.

Jeśli przez $K_r(j\omega)$ oznaczymy transmitację częstotliwością regulatora, to przez objęcie go sztywnym sprzężeniem zwrotnym transmitancja układu będzie

$$K_z(j\omega) = \frac{K_r(j\omega)}{1 + K_r(j\omega)}$$



Rys. 6
1 - regulator PID, 2 - generator pneumatyczny sygnałów sinusoidalnych niskiej częstotliwości, 3 - przełącznik pneumatyczny, 4 - rejestrator dwukanałowy

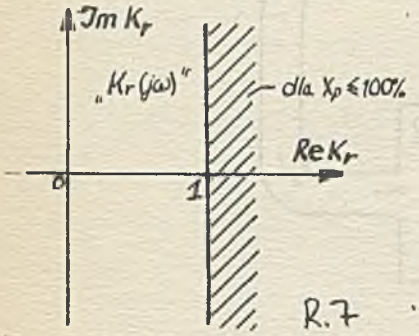
Jest to przypadek odwzorowania konforemnego mającego te własności, że przekształca proste lub okręgi z płaszczyzny $K_r(j\omega)$ na okręgi(lub proste będące szczególnym przypadkiem okręgu o $R = \infty$) na płaszczyźnie $K_z(j\omega)$. Zapisując równanie idealnego regulatora PID w postaci:

$$K_r\ (j\omega) = K_r \left[1 + \frac{1}{j\omega T_c} + j\omega T_r\right]$$

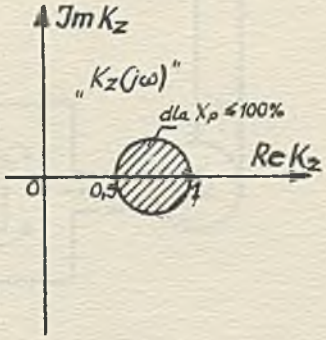
gdzie: $K_r = \frac{1}{X_p}$; X_p - zakres proporcjonalności w %, to dla takiego regulatora obszar możliwych punktów charakterystyki amplitudowo-fazowej dla $X_p \leqslant 100\%$, stanowi obszar $R_e\ K_r(j\omega) \geqslant 1$. Przedstawiono to na rys. 7. Na rys. 8. przedstawiono natomiast odpowiadający temu $K_r(j\omega)$ obszar na płaszczyźnie $K_z(j\omega)$.

Jednak dokładność wyznaczenia charakterystyki amplitudowo-fazowej w układzie zmodyfikowanym nie jest duża, bo jak widać z rys. 8 obszar się znacznie zawęża. Pomiary przeprowadzone tą metodą pozwalają jednak oszacować możliwości nastaw i ich po-

wtarzalność. Wynika z nich, że badany egzemplarz regulatora pozwala uzyskać powtarzalne nastawy dużych czasów całkowania



Rys. 7



Rys. 8

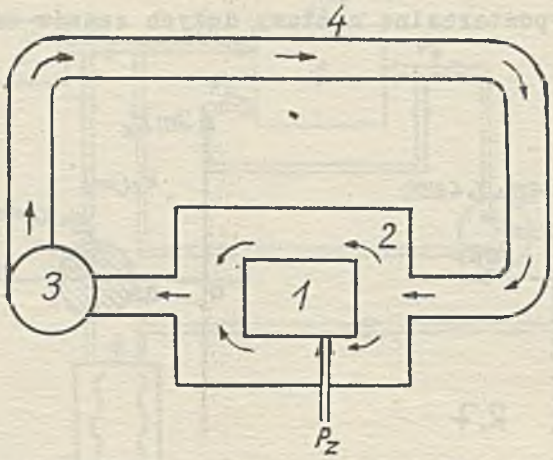
i różniczkowania. Gdy jednak nastawione wartości są porównywalne, to istnieje znaczny wpływ interakcji nastaw i ograniczenie obszaru nastaw.

Celem badań pyłoszczelności było stwierdzenie, czy w czasie pracy przyrządu w atmosferze zanieczyszczonej istnieje możliwość dostania się pyłu do wnętrza przyrządu. Badany przyrząd umieszczono w komorze o objętości 100 l i wprowadzono do komory proszek lycopodium w ilości ok. 0,1 l. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 9.

Komorę zamykano i przez uruchomienie dmuchawy zapewniano obieg powietrza w układzie, przy czym średnia prędkość powietrza w komorze wynosiła 5 m/sek. Przez cały czas pomiaru, a więc 15 min. do przyrządu doprowadzono ciśnienie zasilania 1,4 atn. Po upływie czasu wyłączono dmuchawę, wyjmowano przyrząd z komory i badano jego wnętrza. Wewnątrz obudowy regulatorów stwierdzono ślady lycopodium, czyli obudowa tych przyrządów nie zapewniała dostatecznej pyłoszczelności.

Dla obydwu regulatorów zmierzono zużycie własne powietrza w stanie ustalonym. Wynosiło ono ok. 300 Nl/h.

Pomiar obciążalności wyjścia pozwala zorientować się, jak duże trwałe natężenie przepływu powietrza można pobrać z wyjścia przyrządu bez znacznego obniżenia jego dokładności. Po-



Rys. 9
1 - badany regulator, 2 - komora, 3 - dmuchawa, 4 - rurociąg

miar przeprowadzono w ten sposób, że zwiększono pobór powietrza na wyjściu do momentu, aż ciśnienie wyjściowe zmieniło się o wartość błędu podstawowego w porównaniu z wartością ciśnienia wyjściowego przy nieobciążonym przyrządzie. Obciążalność wyjścia dla regulatorów wynosiła około 700 Nl/h.

Pomiary trwałości przyrządu stanowiły pewną formę próby "na zmęczenie". Dla normalnego doboru wykonanego przyrządu badanie powtarzającym się cyklicznie sygnałem próbnym powinno być nieistotne w porównaniu z wytrzymałością zmęczeniową badanego przyrządu. Próba taka może jednak pozwolić na wykrycie przypadkowych lub powtarzających się wad materiałowych i wad montażu. Badany regulator był pobudzany cyklicznie zmieniającym się sygnałem zapewniającym zmiany sygnału wyjściowego w granicach od 30% do 80% górnej granicy sygnału. Po pięciu tysiącach cykli przyrząd poddawany był skróconym badaniom statycznym. Następnie przyrząd przechodził jeszcze dwie takie próby, tak że musiał wytrzymać działanie 15 000 cykli. Badane regulatory zniosły tę próbę bez zastrzeżeń.

Z przeprowadzonych pomiarów wynikało, że badane regulatory spełniały większość wymagań URS, pomijając nieliniowość regulatora P spowodowaną jego wadą oraz dostatecznej pyło-

szczelności. Wszystkie badane przyrządy nie działały prawidłowo przy badaniach odporności na wstrząsy. Należałoby się zastanowić nad tym, czy warunki tych badań nie są zbyt ostre.