

# WPLYW PARAMETRÓW UŻYTKOWYCH REGULATORA TEMPERATURY O BEZPOŚREDNIM DZIAŁANIU NA JAKOŚĆ I DOKŁADNOŚĆ REGULACJI

KD:62-533.6 - Regulacja wielkości termicznych  
KD:62-533.65 - Regulacja temperatury  
IF: 4.7.0.1 - Urządzenia automatycznej regulacji i sterowania oraz elementy tych urządzeń  
Regulatory bezpośredniego działania

Opisano znaczenie kryteriów i wskaźników jakości regulacji w odniesieniu do regulatorów temperatury o bezpośrednim działaniu. Scharakteryzowano parametry użytkowe regulatorów i ich wpływ na jakość i dokładność regulacji w czasie przebiegu przejściowego i w stanie ustalonym. Przedstawiono znaczenie właściwości obiektu regulowanego dla prawidłowego doboru regulatora.

## 1. W s t ę p

Efekty techniczno-ekonomiczne stosowania regulatorów temperatury o bezpośrednim działaniu /RTB/ zależą od przystosowania regulatorów oraz obiektów regulowanych do potrzeb poprawnej techniki regulacji, przy czym najważniejszą sprawą jest zapewnienie możliwości właściwego doboru regulatora.

O jakości RTB decydują: funkcjonalność, trwałość i niezawodność. Trwałość i niezawodność zależą od stosowania właściwych materiałów, właściwej technologii wytwarzania oraz od poziomu organizacji produkcji. Funkcjonalność regulatorów zależy głównie od prawidłowego doboru parametrów użytkowych odpowiadającego wymaganiom jakości regulacji, przy czym dobór ten powinien uwzględniać zarówno względy techniczne, jak i ekonomiczne.

## 2. Ocena roli poszczególnych kryteriów jakości regulacji w zastosowaniu do regulatorów temperatury o bezpośrednim działaniu

RTB

Ocena możliwości stosowania RTB powinna opierać się z jednej strony na istniejących rodzajach zapotrzebowania, z drugiej na analizie ogólnych kryteriów jakości regulacji.

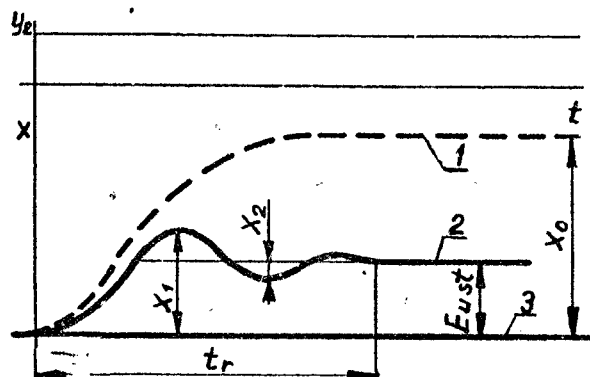
Kryteria jakości regulacji ustala się określając wymagania dotyczące przebiegu przejściowego powstałego po zakłóceniu stanu równowagi układu "obiekt regulowany - regulator".

Astatyczne obiekty regulacji temperatury spotyka się stosunkowo rzadko. Można więc dalsze rozważania ograniczyć do obiektów statycznych /z samowyrównaniem/.

Ogólnie znane są trudności w regulowaniu temperatury, gdy czynnikiem grzejnym jest para, spowodowanw zmianami ciśnienia pary, wynikłymi ze zmian poboru. Zakłócenia te mają zwykle charakter skokowy.

Należy więc rozpatrywać przebiegi przejściowe wywołane zakłóceniem skokowym jako najbardziej uciążliwym przy regulacji spośród możliwych rodzajów zakłóceń. Określenia i definicje, zastosowane poniżej, przyjęto zgodnie z A.P. Kopielowiczem /"Dobór nastaw regulatorów automatycznych", tł. z ros., 1964 r./.

Podstawowe wskaźniki jakości przebiegu przejściowego, które należy rozpatrzyć, to /rys. 1/:



Rys. 1. Przebieg przejściowy przy regulacji: 1 - bez regulatora, 2 - przy włączonym regulatorze, 3 - wartość zadana

- największe odchylenie dynamiczne  $x_1$ ,
- przeregulowanie /stosunek amplitudy drugiego odchylenia o przeciwnym znaku  $x_2$  do amplitudy pierwszego odchylenia  $x_1$ /,
- czas regulacji /czas przebiegu przejściowego/  $t_r$ ,
- uchyb ustalony /pozostający po zakończeniu przebiegu przejściowego/  $E_{ust}$ .

Ocena wskaźników jakości zależy od charakteru przebiegu przejściowego, który w zależności od wymagań regulowanego procesu może mieć jedną z trzech typowych postaci, tzn.:

- granicznego przebiegu aperiodycznego z najmniejszym czasem regulacji  $t_r$ ,
- przebiegu z 20% przeregulowaniem i najmniejszym czasem trwania pierwszego półokresu drgań,
- przebiegu o najmniejszej całce kwadratowej uchybu, czyli  $\min \int x^2 dt$

Graniczny przebieg aperiodyczny charakteryzuje się najmniejszym ogólnym czasem regulacji  $t_r$ , całkowitym brakiem przeregulowania oraz najmniejszym działaniem regulującym. Ta ostatnia cecha może być korzystna wówczas, gdy działanie regulujące wpływa również na inne wielkości regulowane.

Regulatory temperatury o bezpośrednim działaniu stosowane są zwykle w układach jednoparametrowych, oddziaływania na inne wielkości regulowane można więc nie brać pod uwagę. Ogólnie rzecz biorąc, w ciągu technologicznym może znajdować się większa ilość obiektów jednoparametrowych, a więc mogą występować sprzężenia skrośne. Także zmiany poboru pary w jednym punkcie odbiorczym mogą wpływać na zakłócenia poboru w innych układach regulacyjnych. Dla RTB jako regulatorów typu P z uchybem ustalonym można jednak przyjąć, że te wpływy nie będą zwiększały niedokładności regulacji. Zakładając, że dokładność regulacji przy zastosowaniu regulatora typu P powinna być utrzymana zarówno w stanie przejściowym, jak i ustalonym, dopuszczalna wartość maksymalnego odchylenia dynamicznego  $x_1$  nie może wiele przewyższać uchybu ustalonego. Z tego wynika, że wartości dalszych kolejnych amplitud odchylenia występujące przy dużym czasie regulacji  $t_r$  jako znacznie mniejsze od  $x_1$ , nie mają istotnego znaczenia dla dokładności regulacji.

Zaletą granicznego przebiegu aperiodycznego, a mian.  $t_r = \min$ , nie wpływa więc w sposób istotny na poprawę jakości regulacji. Graniczny przebieg aperiodyczny z wyżej przytoczonych względów może nie być brany pod uwagę w dalszych rozważaniach.

Przebieg z 20% przeregulowaniem jest przypadkiem pośrednim. Dopuszczając przeregulowanie, można zmniejszyć największe odchylenie dynamiczne. Najmniejszy czas trwania pierwszego półokresu drgań z największym odchyleniem  $x_1$  jest korzystny w przypadkach, gdy pozostała część przebiegu nie odgrywa istotnej roli.

Przebieg  $\min \int x^2 dt$  odznacza się dużym działaniem regulacyjnym, najmniejszym maksymalnym odchyleniem dynamicznym  $x_1$ , przeregulowaniem 40 ÷ 45% i dużym czasem regulacji. Konieczny jest w przypadkach, gdy  $\min x_1$  musi być osiągnięte za wszelką cenę.

Ogólnie biorąc, względny uchyb ustalony mniejszy jest dla przebiegu  $\min \int x^2 dt$  niż dla przebiegu z 20% przeregulowaniem. Z tego względu jako najbardziej pożądanym przebiegiem regulacji należy

uważać przebieg  $\min \int x^2 dt$  z ewentualną korekcją /zmniejszeniem/ przeregulowania uzależnioną od wymagań i właściwości regulowanego obiektu /warunków technologicznych procesu/.

Z porównania typowych przebiegów przejściowych w odniesieniu do RTB wynika ocena roli wskaźników jakości /określenie ich pożądaných wartości/:

- najmniejsze maksymalne odchylenie dynamiczne  $x_1$ ,
  - najmniejszy uchyb ustalony  $E_{ust}$ ,
  - przeregulowanie możliwie bliskie wartości odpowiadającej
- $$\min \int x^2 dt.$$

### 3. Charakterystyka parametrów użytkowych regulatorów temperatury o bezpośrednim działaniu /RTB/ pod kątem wymagań jakości i dokładności regulacji

#### 3.1. Parametry użytkowe regulatora, związane z jakością i dokładnością regulacji.

Parametry użytkowe RTB, które mogą posiadać wymierny związek ze wskaźnikami jakości oraz dokładnością regulacji, są następujące:

- zakres proporcjonalności  $X_p$  [deg]
- nieczułość  $E_n$  [deg]
- współczynnik przepływu  $K_v$  [m<sup>3</sup>/h]
- histereza  $E_{hn}$  [deg]
- charakterystyka statyczna przepływu czynnika regulującego w funkcji temperatury czujnika  $Q = Q(\theta)$
- dokładność nastawienia  $E_d$  [deg]
- opóźnienie  $T_p$  [s]
- stała czasowa  $T_p$  [s]
- kompensacja termiczna lub dokładność korekcji temperaturowej,
- obciążenie lub kompensacja wpływu ciśnienia na organ wykonawczy,
- przeciek przez zamknięty zawór. [%]

Przeciek przez zamknięty zawór mierzony jest w m<sup>3</sup>/h przepływu czynnika przez zawór albo, jako przeciek względny, w % od przepływu maksymalnego w tych samych warunkach eksploatacyjnych.

Przeciek posiada znaczenie jedynie w przypadkach dużej zmienności obciążenia obiektu regulowanego, gdy wymagana rzeczywista wartość przepływu czynnika przez zawór osiąga chwilowe wartości poniżej wartości przecieku. Projekt Branżowej Normy dla regulatorów bezpośredniego działania [11] przewiduje dla zaworów jednogniazdowych przeciek do 1% a dla dwugniazdowych do 5%.

Przy prawidłowo dobranym i poprawnie działającym RTB zakres przecieków maksymalnych od 1 ÷ 5% nie wpływa na jakość regulacji. Wyjątek stanowią obiekty regulacji o dużej zmienności obciążenia przy równoczesnej zmienności charakterystyki statycznej /np. pralnie wełny/. Pożądany jest wówczas przeciek możliwie najmniejszy, nie przekraczający 0,5 ÷ 1%.

Z pozostałych /poza przeciekiem/ parametrów należy wyodrębnić te, które mają wpływ zarówno na przebieg przejściowy regulacji, jak i na stan ustalony, w odróżnieniu od pozostałych, które mają istotny wpływ na dokładność regulacji w stanie ustalonym układu.

### 3.2. Analiza przebiegu przejściowego regulacji

Do parametrów mających wpływ na przebieg przejściowy regulacji zaliczamy:

- zakres proporcjonalności,
- współczynnik przepływu,
- charakterystykę statyczną,
- opóźnienie,
- stałą czasową.

Opóźnienie RTB wynosi do ok. 2 s /dla czujnika bez osłony/. Stała czasowa wynosi 15 do 100 s, dla regulatorów cieczowych zwykle 60 do 90 s.

Wielkości  $T_p$  i  $T_a$  można odnieść z dostateczną dokładnością nie do całego regulatora, a jedynie do członu pomiarowego /czujnika/ regulatora, traktowanego jako człon statyczny z inercją I rzędu.

Człon pomiarowy można zaliczyć pod względem dynamicznym do regulowanego obiektu, rozpatrując go jako obiekt właściwy o opóźnieniu  $\tau_a$  i stałej czasowej  $T_a$ , szeregowo połączony z członem pomiarowym. Otrzymujemy wówczas równanie obiektu z inercją II rzędu<sup>1/</sup>

$$T_a \cdot T_p \ddot{x} / t / + (T_a + T_p) \dot{x} / t / + x / t / = y [t - (\tau_a + T_p) / ] \quad /1/$$

które można aproksymować do inercji I rzędu metodą przybliżoną<sup>2/</sup>

$T_a > T_p$	$T_a < T_p$
$T = T_a$	$T = T_p$
$\tau = \tau_a + \tau_p + mT_p$	$\tau = \tau_a + \tau_p + mT_a$
$m = f \frac{T_p}{T_a}$	$m = f \frac{T_a}{T_p}$

<sup>1/</sup> [1], str. 180

<sup>2/</sup> [3], str. 88

Wartości  $\tau$  i  $T$  oznaczają odpowiednio opóźnienie i stałą czasową, obiektu zawierającego w sobie człon pomiarowy regulatora.

Wartość  $m$  zmienia się wykładniczo. Można odczytać ją na wykresie lub interpolować z tabeli 1.

T a b e l a 1

$\frac{T_a / p /}{T_p / a /}$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$m$	1,0	0,75	0,65	0,54	0,47	0,43	0,36	0,32	0,28

W tabeli 2 zestawiono przykłady liczbowe dla dwu różnych obiektów.

T a b e l a 2

Obiekt właściwy	Człon pomiarowy	
	$\frac{T_p}{T} = \frac{2}{60} \frac{[s]}{[s]}$	$\frac{T_p}{T} = \frac{2}{90} \frac{[s]}{[s]}$
$\frac{T_a}{T_a} = \frac{60}{300} = 0,2$	$T = T_a = 5 \text{ min}$ $\tau = 95 \text{ s}$ $\frac{\tau}{T} = 0,316$	$T = T_a = 5 \text{ min}$ $\tau = 104 \text{ s}$ $\frac{\tau}{T} = 0,36$
$\frac{T_a}{T_a} = \frac{10}{50} = 0,2$	$T = T_p = 60 \text{ s}$ $\tau = 28 \text{ s}$ $\frac{\tau}{T} = 0,47$	$T = T_p = 90 \text{ s}$ $\tau = 31 \text{ s}$ $\frac{\tau}{T} = 0,34$

Okazuje się, że dla pierwszego obiektu zwiększenie stałej czasowej RTB zwiększa wartość  $\frac{\tau}{T}$  natomiast dla drugiego tę wartość zmniejsza, co pozwala zmniejszyć także  $X_D$ , a w ślad za tym i maksymalne odchylenie dynamiczne oraz uchyb ustalony.

Charakterystyka statyczna RTB przepływu czynnika regulującego w funkcji temperatury czujnika jest charakterystyką złożoną, na którą składają się:

- charakterystyka przesunięcia nastawnika /skoku grzybka zaworu [%] w funkcji temperatury mierzonej [deg,]
- charakterystyka elementu wykonawczego, przepływ [%] w funkcji przesunięcia nastawnika [%].

Charakterystyka przesunięcia nastawnika w funkcji temperatury jest zwykle liniowa o nachyleniu zależnym od zakresu proporcjonalności.

Charakterystyka elementu wykonawczego powinna być dobrana tak, aby w połączeniu z charakterystyką statyczną obiektu właściwego przedstawiała liniową charakterystykę obiektu regulowanego. Z tego względu element wykonawczy zalicza się w teorii regulacji /przy doborze nastaw regulatora/ do regulowanego obiektu jako szeregowo połączony z obiektem właściwym człon wejściowy.

Elementami wykonawczymi RTB są w większości zawory, rzadziej przepustnice / do regulacji przepływu gazów/.

Zawory dławiące posiadają charakterystykę liniową lub logarytmiczną /stałoprocentową/ zależnie od profilu grzybka i gniazda.

Możliwości konstrukcyjne dobrania właściwej charakterystyki otwarcia zaworu, tzn. zależności pomiędzy polem powierzchni przekroju swobodnego przepływu a położeniem trzpienia zaworu są na ogół wystarczające, zważywszy że wg Warunków Technicznych URS dla urządzeń regulacyjnych nie korzystających z energii pomocniczej charakterystyka rzeczywista może różnić się od teoretycznej o +10%. Różnice te powinny być zmniejszone w przypadkach dużego zakresu zmienności temperatury zadanej oraz zmienności obciążenia obiektu.

Trudności konstrukcyjne doboru charakterystyki otwarcia zaworu wzrastają z jednej strony przy zmniejszeniu zakresu proporcjonalności regulatora, z którym wiąże się zmniejszenie skoku trzpienia zaworu, a z drugiej przy wymaganym dużym skoku, z czym wiąże się konieczność zwiększenia objętości czynnika termometrycznego w czujniku.

Niemniej ważne od trudności konstrukcyjnych są trudności właściwego określenia teoretycznej charakterystyki elementu wykonawczego, która byłaby najkorzystniejsza ze względu na właściwości regulowanego obiektu, jak nieliniowość, zmiany warunków zasilania czynnikiem regulującym i przede wszystkim zmiany obciążenia.

Wpływ charakterystyki otwarcia elementu wykonawczego na jakość regulacji przy zmianach obciążenia powinien być określony jakościowo i ilościowo dla typowych obiektów przemysłowych, aby rozważane zagadnienia w całości prowadziły do konstruktywnych wniosków.

Współczynnik przepływu  $K_v$  /wartość przepływu wody przez całko-

wicie otwarty element wykonawczy/ przy spadku ciśnienia na nim  $1 \text{ kg/cm}^2$  decyduje o wartości wzmacnienia  $k_u$  otwartego układu regulacji

$$k_u = k_o \cdot k_r \quad /3/$$

$k_o$  - wzmacnienie obiektu,  $\frac{\text{jednostka miary wielkości wyjściowej}}{\% \text{ przesunięcia nastawnika/}}$   
 $k_r$  - wzmacnienie regulatora,  $\frac{\text{jednostka wielkości regulowanej}}{\% \text{ przesunięcia nastawnika/}}$

Normalny typoszereg RTB zestawiony jest wg średnic nominalnych zaworów, a dla danej średnicy nominalnej przyjmuje się dwie lub trzy wartości  $K_v$  /z pierwszego, drugiego i ewentualnie trzeciego szeregu normalnego/. Warunki Techniczne URS oraz projekt BN dopuszczają rozrzut rzeczywistych wartości  $K_v \pm 10\%$  od wartości nominalnej.

Ze względu na jakość regulacji tak duży rozrzut, który może być równoważny rozrutowi zakresu proporcjonalności  $X_p$  regulatora także o  $\pm 10\%$  dla regulatora typu P o stałym  $X_p$  wydaje się niedopuszczalny. Konstrukcyjne zmniejszenie tego rozrutu nie przedstawia większych trudności.

Określenie właściwej wartości rozrutu  $K_v$  jest związane ze zbadaniem znaczenia zakresu proporcjonalności dla jakości regulacji. Znaczenie pozostałych omawianych wyżej parametrów regulatora również zależy od wpływu na właściwy dobór  $X_p$ .

Zakres proporcjonalności regulatora wynosi:

$$X_p = \frac{1}{k_r} \cdot 100 \text{ [deg]} \quad /4/$$

Regulatory o bezpośrednim działaniu bez wzmacniacza posiadają stały zakres proporcjonalności, bez możliwości wprowadzenia korekcji  $X_p$  podczas eksploatacji.

Projekt BN przewiduje dla RTB ogólnoprzemysłowego zastosowania  $X_p$  w granicach od 4 do 25 deg, przy czym wartości zalecane wynoszą 5, 10, 15 i 20 [deg]. RTB produkcji krajowej i zagranicznej posiadają  $X_p$  dobrany zazwyczaj w sposób przypadkowy, narzucony warunkami konstrukcyjnymi regulatorów, o czym może świadczyć duży rozrzut wartości  $X_p$  dla regulatorów produkcji różnych firm.

Jedną z najczęściej stosowanych średnic nominalnych RTB jest  $D_{nom} 25 \text{ mm}$ . Spotykane  $X_p$  dla  $D_{nom} 25 \text{ mm}$  wynosi 6, 9, 12 i 15 [deg].

Uwzględniając zależność:  $k_r = \frac{100}{X_p} \frac{\%}{\text{deg}}$  otrzymany odpowiednio /tab. 3/:

Regulacja przebiegu  $\min \int x^2 dt$  wymaga wzmocnienia  $k_r$  regulatora P zależnego od właściwości obiektu:

T a b e l a 3

$$k_r \cdot k_o = \frac{1}{\frac{\tau}{T}} \quad /5/$$

$X_p$	6	9	12	15
$k_r$	16,6	11,1	8,3	6,7

Dla powyższej wartości  $k_r$  maksymalne odchylenie dynamiczne  $x_1$  osiąga najmniejszą wartość.

Bezwzględna wartość  $x_1$  zależy od doboru  $k_r$  oraz od właściwości obiektu. Zależność powyższą przedstawia dynamiczny współczynnik regulacji  $R_d$ :

$$R_d = \frac{x_1}{x_o} \quad /6/$$

wyrażający stosunek, w jakim zakłócenie  $x_o$  działające na obiekt bez układu regulacji zmniejszone jest w wyniku działania regulatora.

Potencjalne odchylenie  $x_o$  wynosi:

$$x_o = k_o y_z \quad /7/$$

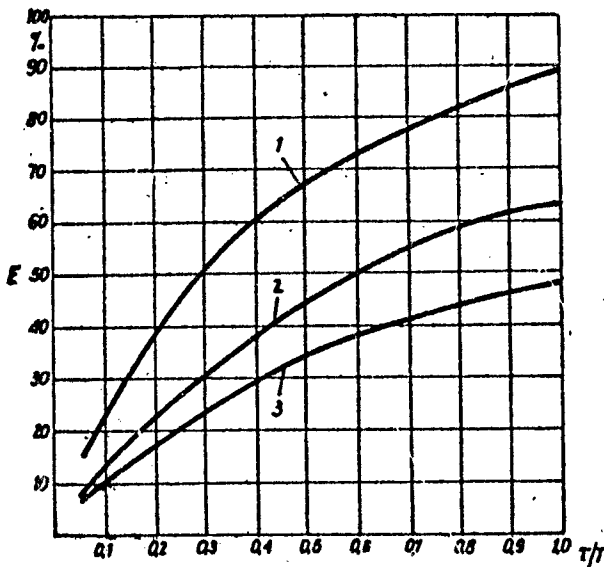
gdzie:

$y_z$  - zakłócenie skokowe, wyrażone w % przesunięcia nastawnika.

Analiza zależności  $R_d$  od rodzaju przebiegu przejściowego, tzn. wartości wzmocnienia wykazuje, że w zakresie  $\frac{\tau}{T}$  od 0,1 do 1 względne zmniejszenie w stosunku do wartości optymalnej wzmocnienia dla przebiegów  $\min \int x^2 dt$  /do 20% przeregulowania /zwiększenie  $X_p$ / powoduje względny wzrost  $x_1$  zgodnie z przybliżoną zależnością:

$$\frac{\Delta x_1}{x_1} = 0,5 \frac{\Delta X_p}{X_p} \quad /8/$$

Przykład. Jeżeli  $x_1$  przy prawidłowo przyjętym  $X_p$  równym 6 deg wynosi 3 deg, to przyjęcie  $X_p = 9$  deg spowoduje wzrost  $x_1$  do ok. 3,8 deg.



Rys. 2. /wg A.P. Koptielowicza/

Uchyb ustalony regulowany  $E_z = \frac{k_0 \text{ ust}}{k_0 \cdot \gamma_z} \cdot 100$  wyrażony w procentach wartości wychylenia potencjalnego  $x_0 = k_0 \cdot \gamma_z$  /bez regulatora/; 1 - przebieg aperiodyczny, 2 - min  $x^2 dt$

Warunki Techniczne URS oraz projekt BN nie określają dopuszczalnych odchyłek  $X_p$ . Można więc przyjąć, że ogólne wymagania, aby rzeczywista charakterystyka statyczna różniła się od teoretycznej nie więcej niż o  $\pm 10\%$  oraz aby wartości współczynnika  $K_v$  różniły się od nominalnej nie więcej niż o  $\pm 10\%$ , prowadzą się również do tego, aby  $X_p$  różniło się od nominalnego nie więcej niż o  $\pm 10\%$ , co odpowiada różnicom  $x_1$  o około  $\pm 5\%$ .

Przy zastosowaniu regulatora P przebieg przejściowy wywołany zakłóceniem skokowym kończy się uchybem ustalonym  $E_z$ , koniecznym do zrównoważenia zaistniałego zakłócenia.

Uchyb ustalony spowodowany zakłóceniem  $y_z$  wynosi:

$$E_z = \frac{k_0}{1 + k_u} y_z \quad \text{/jednostka wielkości regulowanej/} \quad /9/$$

Zależność powyższą dla przebiegu  $\min \int x^2 dt$  można przedstawić następująco:

$$E_z = \frac{1}{k_r} \cdot \frac{1/T}{1 + 1/T} \cdot y_z \quad [\text{deg}] \quad /10/$$

Wartość  $E_z$  zależy więc od wzmacnienia regulatora, właściwości dynamicznych obiektu /stosunku  $\frac{T}{T}$ / oraz od wielkości zakłócenia. Względna zależność  $E_z$  od  $X_p$  wynosi:

$$\frac{\Delta E_z}{E_z} = \frac{\Delta X_p}{X_p} \quad /11/$$

Przykład. Jeżeli  $E_z$  przy prawidłowo przyjętym  $X_p$  równym 6 deg wynosi 1 deg, to przyjęcie  $X_p = 9$  deg spowoduje wzrost  $E_z$  do 1,5 deg, a więc o wartość porównywalną z nieczułością  $E_n$  regulatora.

Należy wspomnieć, że przy rozpatrywaniu układu regulacji w sposób ogólny, uchyb ustalony  $E_{ust}$  jest sumą uchybów:

$$E_{ust} = E_z + E_{x_0} \quad /12/$$

gdzie:

$E_{x_0}$  - uchyb nadążania spowodowany nieidealnym nadążaniem układu za wartością zadaną  $X_0$ . Wartość tego uchybu w przypadku regulacji stałowartościowej typu P jest jednak pomijalnie mała w stosunku do wartości  $E_z$  oraz nieczułości regulatora i praktycznie można jej nie uwzględniać, tzn.

$$E_{ust} \approx E_z \quad /13/$$

### 3.3. Analiza stanu ustalonego

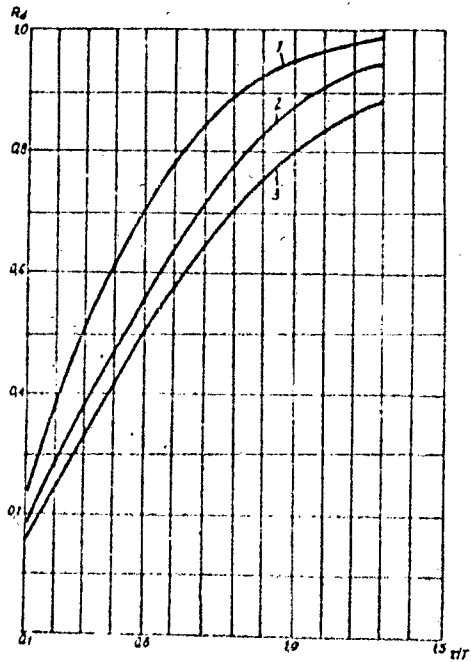
Dokładność regulacji w stanie ustalonym wygodnie jest ocenić przy pomocy pojęć opracowanych w ramach metrologii dla urządzeń pomiarowych, przy czym czujnik należy traktować jako część regulatora a nie obiektu, jak w przebiegu przejściowym.

Rozróżniamy trzy rodzaje błędów w układach regulacyjnych:

- błędy grube, związane z czynnikiem ludzkim /np. różnica między wartością wymaganą a zadaną/,
- błędy systematyczne, wynikające np. z przyjętego sposobu pomiaru wielkości regulowanej,
- błędy przypadkowe, wynikające z działania zakłóceń na obiekt oraz regulator, wpływu tarcia itp.

Pewność układu zależy od wartości wypadkowego błędu przypadkowego, jego poprawność - od wartości wypadkowego błędu systematycznego a dokładność od sumy obu powyższych odmian błędów.

Nie ma wyraźnej granicy między błędami systematycznymi i przypadkowymi. Np. błąd spowodowany wahaniami temperatury otoczenia i czynnika w zaworze może być uznany za błąd systematyczny z uwagi na



Rys. 3. /wg A.P. Kopielowicza/

Dynamiczny współczynnik regulacji w przypadku regulatora P

- 1 - przebieg aperiodyczny, 2 - z 20% przeregulowaniem, 3 - z  $\min f x^2 dt$

dający się z góry przewidzieć wpływ tej temperatury na ciecz termometryczną, znajdującą się w kapilarze oraz siłowniku i jako taki może być teoretycznie wyeliminowany przez odpowiednie skonstruowanie regulatora oraz wprowadzenie kompensacji.

Pozostały błąd można uważać za przypadkowy, zależny od dokładności wykonania urządzeń kompensujących. W przypadku braku kompensacji instrukcje użytkownika przewidują korekcję wartości zadanej przez obsługę w zależności od różnicy między rzeczywistą temperaturą a temperaturą odniesienia /20°C/. Wówczas niedokładność wprowadzenia poprawki stanowi także o wartości błędu przypadkowego.

Histeresa  $E_{hn}$  regulatora tzn. różnica temperatur, odpowiadająca takiemu samemu stopniowi otwarcia elementu nastawczego dla obu części /dla temperatur rosnących i malejących/ pełnej pętli charakterystyki przepływowej, zależy od właściwości sprężystych mieszków, od rodzaju cieczy termometrycznej i dokładności napełnienia nią regulatora. Mierzona jest razem z nieczułością.

Aby wyznaczyć histeresę niezależną od nieczułości, należy przyjąć zależność

$$E_{hn} = \sqrt{E_h^2 + E_n^2} \quad /14/$$

gdzie:

$E_h$  - wartość histeresy bez uwzględnienia wpływu tarcia nieczułości  $E_n$  /, tzn. niezależna od nieczułości.

W projekcie BN dotyczącą regulatorów o bezpośrednim działaniu przyjęto dopuszczalną wartość

$$E_{hn} = 1,5 E_n \quad /15/$$

Spotyka się wymagania ograniczające dopuszczalną histeresę po przegrzaniu o 20° deg powyżej granicznego położenia elementu wykonawczego.

Rozpatrując wpływ histeresy w normalnych warunkach regulacji, możemy założyć, że jeżeli zakłócenia procesu regulowanego nie przekraczają dopuszczalnych założonych wartości /np. 20% przesunięcia nastawnika/, wpływ histeresy  $E_{hn}$  sprowadza się do wpływu nieczułości  $E_n$ .

Dokładność regulacji przy założeniu, że wszystkie błędy mają charakter przypadkowy i są od siebie niezależne, wyraża się zależnością:

---

\* [4], str. 416

$$E = \sqrt{\sum E_i^2} \text{ /deg/}$$

/16/

gdzie:

$E_i$  - maksymalne wartości poszczególnych błędów składowych, do których zaliczamy:

- uchyb spowodowany zakłóceniami  $E_z$
- nieczułość  $E_n$
- niedokładność nastawienia  $E_d$
- niedokładność kompensacji lub korekcji temperaturowej  $E_t$
- uchyb spowodowany niedokładnością odciążenia od spadku ciśnienia czynnika w zaworze  $E_p$ .

Nieczułość regulatora mierzona przy zmianie kierunku ruchu elementu wykonawczego może wynosić według Warunków Technicznych URS oraz projektu Branżowej Normy 0,5, 1, 2,5 deg. Nieczułość zależy od szybkości chłodzenia oraz od nastawionej temperatury. Przyjmuje się szybkość chłodzenia 1 deg/300 s. Nieczułość mierzona w warunkach laboratoryjnych wynosi zwykle od 0,2 do 1,5 deg. Można przyjąć, że w pełni sprawny regulator posiada nieczułość  $E_n \leq 1$  deg.

Niedokładność nastawienia  $E_d$  zależy od dokładności przyrządu pomiarowego, według wskazań którego obsługa dokonuje korekcji nastawy, od precyzji obsługi i podatności rozdzielczej zadajnika oraz od nieczułości zadajnika. W naszych rozważaniach ograniczamy się do precyzji obsługi i podatności rozdzielczej zadajnika, zakładając że nieczułość nastawnika jest mniejsza od tej ostatniej.

Można założyć, że najmniejsze dokonane i zaobserwowane przez obsługę przemieszczenie zadajnika wynosi ok. 1 mm. Jeżeli całemu zakresowi nastawiania odpowiada obrót gałki zadajnika o kąt  $\varphi$  [rad], a średnica gałki wynosi  $d$  mm, to najmniejsze przemieszczenie odpowiada zmianie wartości zadanej o  $\frac{2}{\varphi d}$  całkowitego zakresu. Np. dla

$\varphi = 2\pi$ ,  $d = 50$  mm oraz dla zakresu 30 - 100°C otrzymamy  $E_d = 0,4$  deg. Zwykle konstrukcja zadajnika umożliwia kilka obrotów gałki, można więc przyjąć, że praktycznie osiągalna granica niedokładności nastawiania wynosi:

$$E_d = 0,1 \text{ deg}$$

/17/

Niedokładność kompensacji temperaturowej spowodowana jest rozrzutem właściwości elementów kompensujących /np. wymiarów geometrycznych/, który może wynosić 1 - 10% wartości teoretycznych. Przyjmując ogólnie, że przy zastosowaniu korekcji zgrubnej błąd temperaturowy nie przekracza wartości odpowiadającej 20% przesunięcia na-

stawnika, a równoczesna kompensacja może go zmniejszyć 20-krotnie, otrzymany w wyniku tego wartość  $E_t$  pomijalnie małą w stosunku do  $E_z$  i  $E_n$ .

Niedokładność korekcji temperaturowej zależy od sposobu wprowadzania korekcji. Znając objętość cieczy termometrycznej w czujniku i przy organie wykonawczym, można zestawić tabelę poprawek nastawy zadajnika w zależności od długości kapilary, temperatury otoczenia i temperatury czynnika regulującego, przepływającego przez zawór.

Posługiwanie się tabelą jest uzasadnione przy powolnych zmianach temperatury otoczenia i temperatury czynnika w zaworze.

Dokładność tabeli, sprawdzona badaniami laboratoryjnymi, może być taka, aby niedokładność korekcji  $E_t$  sprowadzić do wartości praktycznie pomijalnej w stosunku do  $E_z$  i  $E_n$ .

Niedokładność odciążenia od różnicy ciśnień działających na element wykonawczy /grzybek zaworu/ ma istotne znaczenie dla regulatorów ze ściśliwym czynnikiem termometrycznym /gazem lub parą/.

Obecnie najbardziej rozpowszechnione są regulatory z czynnikiem termometrycznym cieczowym, praktycznie nieściśliwym. Ważną rzeczą natomiast jest uwzględnienie odkształceń mieszków sprężystych, powstałych pod wpływem wzrostu ciśnienia spowodowanego siłami osiowo ściskającymi /np. wybożenia mieszków/.

Niewłaściwa konstrukcja może doprowadzić do sytuacji, że niedokładność odciążenia  $E_p$  znacznie przewyższy wartości  $E_z$  i  $E_n$ .

Przyjąć należy, że przy właściwej konstrukcji wartości  $E_p$  spowodowana zmianami różnicy ciśnień przed i za zaworem w założonym dopuszczalnym dla danej konstrukcji zakresie, dla zmian stopnia otwarcia organu wykonawczego od 20 do 80% nie powinna przekraczać wartości nieczłości  $E_n$ :

$$E_p = E_n \quad /18/$$

$$\text{Uwzględniając, że } E_d^2 \ll E_n^2 \quad /19/$$

otrzymujemy dokładność regulacji w stanie ustalonym

$$E = \sqrt{E_z^2 + 2 E_n^2} \quad /20/$$

#### 4. Znaczenie właściwości regulacyjnych obiektu regulowanego dla prawidłowego doboru regulatora

Obiekty regulacji temperatury traktowane jako astatyczne inercyjne I rzędu charakteryzowane są przez następujące parametry, stanowiące podstawę doboru regulatora:

- opóźnienie  $\tau$  [s]
- stała czasowa  $T$  [s]
- stosunek  $\frac{\tau}{T}$ , wg którego dobiera się wzmacnienie  $k_u$  układu
- wzmacnienie  $k_o$   $\left[ \frac{\text{deg}}{\%} \right]$

Jeżeli obiekt jest nieliniowy, to względna zmiana wzmacnienia  $k_o$  posiada identyczne znaczenie dla wielkości  $x_1$  i  $E_z$  co względna zmiana  $X_p$  regulatora.

Dopuszczalne dla danego procesu regulowanego zakłócenie  $y_z$  [% przesunięcia nastawnika/decyduje wprost proporcjonalnie o wartości  $x_1$  i  $E_z$ .

Dopuszczalne wartości  $y_z$ ,  $x_1$  i  $E$  decydują o wartości  $X_p$  oraz  $E_n$  regulatora, właściwych dla danego  $\frac{\tau}{T}$  i  $k_o$ .

Jako przykład doboru parametrów RTB może posłużyć zestaw pralnic wełny o pojemności pojedynczej pralnicy ok.  $8,5 \text{ m}^3$ , ogrzewanych przez wtryskiwanie pary o ciśnieniu  $6 \text{ kg/cm}^2$  do temperatury  $40 - 60^\circ\text{C}$ . Zapotrzebowanie pary wynosi  $50 - 350 \text{ kg/godz}$ . Wymagana dokładność regulacji  $\pm 2 \text{ deg}$ , przy założeniu dopuszczalnych zakłóceń skokowych  $y_z = 20\%$ .

Wyznaczono na podstawie zlinearyzowanej charakterystyki skokowej obiektu  $\tau = 2 \text{ min}$  i  $T = 24 \text{ min}$  oraz  $k_o = \frac{1 \text{ deg}}{2\%}$  dla średnicy zaworu  $25 \text{ mm}$ .

Ze względu na duże zmiany obciążenia i nieliniowości obiektu przyjęto przebieg przejściowy z  $20\%$  przeregulowaniem  $\frac{x_2}{x_1} = 20\%$ . Założono  $x_1 = 2 \text{ deg}$  oraz  $E = 2 \text{ deg}$ .

Wartości  $\tau$  i  $T$  dotyczące łącznie pralnicy i termometru rtęciowego przewyższają znacznie  $\tau_p$  i  $T_p$  dlatego te ostatnie pominięto, wyznaczając  $\frac{\tau}{T} = \frac{2}{24} = 0,08$ .

Obliczono dynamiczny współczynnik regulacji:

$$R_d = \frac{x_1}{k_o y_z} = \frac{2}{\frac{1}{2} \cdot 20} = 0,2$$

Z wykresu  $R_d = \frac{T}{T}$  wynika<sup>\*/</sup>, że dla  $\frac{T}{T} = 0,08$ , wartość  $R_d = 0,2$  może być osiągnięta przy użyciu regulatora proporcjonalnego P.

Dla przebiegu z 20% przeregulowaniem należy dobrać wartość wzmocnienia układu

$$k_u = \frac{0,7}{\frac{T}{T}} = 8,3$$

Wówczas

$$k_r = \frac{k_u}{k_o} = 16,6 \text{ \%/deg}$$

$$E_z = \frac{k_o}{1+k_u} y_z = \frac{1/2}{1+8,3} 20 = 1,07 \approx 1,1 \text{ deg}$$

Ostatecznie określamy wymagane parametry użytkowe regulatora  $X_p$  i  $E_n$ :

$$X_p = \frac{100}{k_r} = 6 \text{ deg}$$

$$E_n = \sqrt{\frac{1}{2} (E^2 - E_z^2)} = 1,2 \text{ deg}$$

Instalując w tym przypadku regulator o  $X_p = 15 \text{ deg}$ , zmniejszylibyśmy dokładność regulacji, zwiększając  $E_z$  do wartości 2,3 deg oraz E do 2,9 deg.

## 5. Uwagi końcowe

Z przeprowadzonej analizy wynika, że określenie parametrów obiektu oraz właściwy dobór zakresu proporcjonalności regulatora o bezpośrednim działaniu są nie mniej istotne dla zwiększenia dokładności regulacji niż zmniejszenie nieczułości regulatora. Porównanie wpływu różnych parametrów pozwala na ustalenie hierarchii ważności kierunków dalszych prac konstrukcyjnych.

---

<sup>\*/</sup>[1], str. 115

## L i t e r a t u r a

1. Kosiński A.P.: Dobór nastaw regulatorów automatycznych. WNT. Warszawa, 1964 r.
2. Findeisen W.: Technika regulacji automatycznej. WNT. Warszawa, 1961.
3. Wunsch G.: Podstawy automatyki. PWT. Warszawa, 1961.
4. Wilson E.B.: Wstęp do badań naukowych. PWN. Warszawa, 1964.
5. Szparkowski Z.: Zarys teorii regulacji układów liniowych. PWT. Warszawa, 1960.
6. Wajs K.: Problemy dokładności układu regulacyjnego. PAK nr 3/1966.
7. Białęcki A., Kropaczewski W.: Regulatory o bezpośrednim działaniu. Rodzaje i nowe rozwiązania oraz zastosowanie regulatorów temperatury. Biuletyn PIAP nr 2/1966.
8. Białęcki A.: Doświadczalne obwody regulacyjne P.A.P. w Cukrowni "Chełmża". Automatyka Przemysłowa nr 3/1962.
9. Kropaczewski W., Białęcki A., Borowski J.: Ekspertyza dotycząca regulatorów temperatury o bezpośrednim działaniu zastosowanych do regulacji temperatury w pralnicach wełny. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa, 1967. Zbiór spec. spr. 152.
10. Warunki Techniczne na gałąź URS zawierającą przyrządy i urządzenia pracujące bez użycia energii pomocniczej. MERA - Materiały URS nr 1/1/52/1967.
11. Projekt BN "Automatyka przemysłowa. Regulatory o bezpośrednim działaniu /nie korzystające z energii pomocniczej/. Ogólne wymagania. PIAP, 1967.