

JOZEF SENKALA

Katedra Automatykacji
Procesów PrzemysłowychNIEKTÓRE PROBLEMY REGULACJI TEMPERATURY
W REAKTORACH CHEMICZNYCH

Streszczenie. W artykule wyznaczono w sposób analityczny własności dynamiczne reaktora chemicznego ochłodzonego wymiennikiem ciepła, w którym następuje odparowanie cieczy. Otrzymana zależność pozwala na dyskusję wpływu różnych rozwiązań na własności dynamiczne, a o to się z tym wiąże - także na własności eksploatacyjne reaktora. Opisano także wypadek, gdy nieprawidłowość pracy układu automatycznej regulacji, której zewnętrzne objawy nie wydawały się groźne, doprowadziła w konsekwencji do dużych strat ekonomicznych.

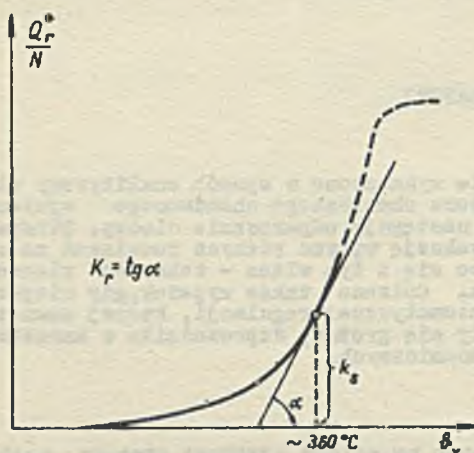
Jedną z istotnych cech rzutuujących na walory użytkowe aparatu technologicznego (np. reaktora) jest podatność tego aparatu na regulację, tj. łatwość uzyskania dużej dobroci regulacji w różnych możliwych warunkach. Pewne problemy związane z tym zagadnieniem można przedstawić na przykładzie regulacji temperatury w reaktorze fluidalnym do produkcji bezwodnika kwasu ftalowego.

Istotne znaczenie dla dalszych rozważań ma fakt, że reakcja jest silnie egzotermiczna, ilość wydzielanego ciepła w zależności od temperatury katalizatora przy ustalonych pozostałych parametrach ma przebieg jak na rys. 1 oraz że ze względu na uboczne, szkodliwe reakcje trzeba utrzymywać temperaturę dosyć dokładnie i to tuż powyżej kolana krzywej z rys. 1 (ok. 360°C, przy czym wahania $\pm 5^{\circ}\text{C}$ wyraźnie pogarszają jakość produktu).

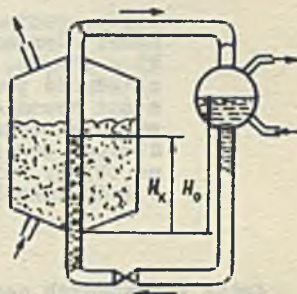
W praktyce okazało się, że omawiane reaktory sprawiają sporo kłopotu. W wypadku wzrostu temperatury ponad pewną wartość, ilość wydzielanego ciepła wzrasta do tego stopnia, że układ regulacji staje się bezradny i w ciągu kilku minut temperatura osiąga wartości groźące zniszczeniem urządzeń. Z kilku reaktorów o podobnych z punktu widzenia technologii parametrach, obsługa na podstawie kilkuletnich obserwacji potrafi wskazać jednostki szczególnie trudne do prowadzenia, tzn. takie, które łatwo wypadają poza zakres regulacji temperatury.

Przyczyn znacznych różnic w zachowaniu się reaktorów może być bardzo wiele i trudno byłoby dyktować wszystkie możliwości, warto jednak zwrócić uwagę na problem wpływu konstrukcji aparatu i rozwiązania układu automatycznej regulacji (UAR) na podatność tego aparatu na regulację. W tym

celem trzeba zbadać własności dynamiczne reaktora. Analityczne rozwiązanie tego problemu jest możliwe tylko po przyjęciu daleko idących założeń upraszczających. Ale już na podstawie analizy tak uproszczonego problemu można wyciągnąć cenne wnioski co do kierunku badań nad ulepszeniem konstrukcji aparatu. Budowę reaktora schematycznie przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Orientacyjny przebieg ilości ciepła wydzielonego z jednostki masy surowca w zależności od temperatury w reaktorze. Charakterystyka ta ulega przesunięciu i deformacji wraz ze zmianami aktywności i granulacji katalizatora oraz czasu kontaktowania. Górne szczytowanie odpowiada ciepłu spalania naftalenu do CO_2



Rys. 2. Uproszczony model reaktora

Zasadnicze założenia upraszczające są następujące:

1. Punkcje nieliniowe rozwinięto w szereg Taylora wokół ustalonego punktu pracy (parametry z indeksem zero), trzecie i dalsze wyrazy rozwinięcia pominięto. Wobec tego wyniki będą słuszne tylko w dostatecznie bliskim otoczeniu ustalonego punktu pracy reaktora.

2. Przyjęto idealne mieszanie katalizatora. Istotnie, nawet w stanach przejściowych różnice temperatur rejestrowanych na różnych poziomach złoża, nie przekraczają ok. 4°C na poziomie 360°C przy temperaturze surowców rzędu 190°C .

3. Pominięto pojemność cieplną rur wymiennika (grubość ścianki 4 mm. Po kilkuletniej pracy niektóre rurki miały ok. 1 cm grubą warstwę kamienia kotłowego).

4. Założono, że wrzenie wody rozpoczyna się zawsze na tym samym poziomie wymiennika. Jest to możliwe w dwóch wypadkach:

- a) kondensat jest podgrzany do temperatury nasycenia,
 b) natężenie strumienia ciepła jest tak duże, że występuje wrzenie powierzchniowe.

Ponieważ nie spełnienie tego założenia może prowadzić do znacznych różnic jakościowych, więc w wypadkach wątpliwych należy zachować ostrożność.

5. Pominięto ciepło idące na przegrzanie pary.
 6. Odparowanie następuje jedynie na pionowych odcinkach rur wymiennika.
 Opory kolektorów są pomijalnie małe.
 7. Ciśnienie pary w obiegu chłodniczym jest stabilizowane.
 8. Ciśnienie w reaktorze jest stałe.

Wprowadzono następujące oznaczenia:

Q_r^*	- ciepło wydzielone w reakcji,
Q_w^*	- ciepło odprowadzone przez wymiennik,
ϑ_x	- temperatura katalizatora,
ϑ_w	- temperatura wrzenia w wymienniku,
N	- sumaryczne masowe natężenie przepływu reagentów,
i_B	- entalpia surowców,
i_p	- entalpia produktów
G_p^*	- masowe natężenie przepływu pary,
G_k^*	- masowe natężenie przepływu kondensatu,
Q_m	- zastępcza gęstość mieszanki parowo-wodnej,
Q_o	- gęstość kondensatu
R_k	- opory przepływu kondensatu,
R_p	- opory przepływu pary,
P_{str}	- sumaryczna strata ciśnienia w obiegu chłodniczym,
H_x	- wysokość słupa mieszanki parowo-wodnej,
H_o	- wysokość słupa kondensatu,
U	- zastępczy obwód rur wymiennika,
S	- sumaryczna powierzchnia przekroju wewnętrznego rur,
c_p	- ciepło parowania kondensatu,
M	- masa katalizatora
c_k	- ciepło właściwe katalizatora,
r_o, r_1, r_{-1}	- parametry nastaw regulatora,
A, B, C, T_1 i T_2	- zastępcze współczynniki zdefiniowane wzorami (11),

a, b, c - zastępcze współczynniki zdefiniowane wzorami (13')

k_w - współczynnik przenikania ciepła od katalizatora do wody.

$$K_T = \frac{1}{N} \left. \frac{\partial Q_T^*}{\partial v_X} \right|_{v_X = v_{X0}} \quad (\text{por. rys. 1})$$

$$K_B = \left. \frac{\partial Q_T^*}{\partial N} \right|_{N=N_0} \quad (\text{por. rys. 1})$$

$$K_P = \left. \frac{d i_P}{d v_X} \right|_{v_X = v_{X0}}$$

$$K_{QG} = \left. \frac{\partial Q_M}{\partial G_P^*} \right|_{G_P^* = G_{P0}^*}$$

$$K_{QH} = \left. \frac{\partial Q_M}{\partial H_X} \right|_{H_X = H_{X0}}$$

Równania opisujące proces:

Ciepło wydzielone w reakcji:

$$Q_T^* = \varphi(N, v_X) \approx N \cdot f(v_X)$$

Dla przyrostów po uwzględnieniu założenia 1:

$$\Delta Q_T^* = \frac{\partial Q_T^*}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial Q_T^*}{\partial v_X} \Delta v_X$$

Po wykonaniu działań 1 przejściu na postać operatorową:

$$\Delta Q_T^* = K_B \Delta N(p) + N_0 K_T \Delta v_X(p) \quad (1)$$

Bilans ciepła dla reaktora:

$$N \cdot i_B dt + Q_{T0}^* dt = N \cdot i_P dt + Q_W^* dt + M \cdot c_K dv_X$$

Po podstawieniu przyrostów i uwzględnieniu, że i_P i Q_W^* zależą od v_X otrzymujemy:

$$(N_0 + \Delta N) i_B + Q_{T0}^* + \Delta Q_T^* = (N_0 + \Delta N) (i_{P0} + \Delta i_P) + Q_{W0}^* + \Delta Q_W^* + \\ + M \cdot c_K \cdot \frac{d}{dt} (v_{X0} + \Delta v_X)$$

Po wykonaniu działań, pominięciu iloczynów przyrostów jako małych wyższego rzędu i uwzględnieniu związków w stanie ustalonym, otrzymuje się:

$$(i_s - i_{p0}) \Delta H + \Delta Q_w^* = \Delta Q_w^* + N_0 K_p \Delta v_x + M \cdot c_k \frac{d}{dt} (\Delta v_x)$$

ostatecznie po przejściu na postać operatorową i skorzystaniu z równania (1), otrzymuje się:

$$(K_s + i_s - i_{p0}) \Delta H(p) = \Delta Q_w^*(p) + [N_0(K_p - K_r) + pM \cdot c_k] \Delta v_x(p) \quad (2)$$

Ponieważ ΔQ_w^* może być skorelowane z Δv_x , więc z równania (2) nie można wyznaczyć transmitancji $\frac{\Delta v_x(p)}{\Delta H(p)}$. Do tego celu potrzebna jest jeszcze znajomość równań opisujących wymiennik. Przy poczynionych założeniach muszą być dla wymiennika w każdej chwili spełnione następujące zależności:
Bilans ciepła dla medium chłodzącego:

$$Q_w^* = c_p G_p^* \quad (3)$$

Równanie przenikania ciepła

$$Q_w^* = U \cdot H_x \cdot K_w (v_x - v_w) \quad (4)$$

Równowaga ciśnień w obiegu chłodniczym

$$g(H_o c_o - H_x c_m) = G_p^* \cdot R_p + G_k^* \cdot R_k \quad (5)$$

Bilans masy medium chłodzącego

$$G_k^* dt - G_p^* dt = Sd(c_m \cdot H_x) \quad (6)$$

W równaniu (5) celowo założono liniową zależność spadku ciśnienia od natężenia przepływu. Nie jest to zgodne z rzeczywistością, ale zapobiega się w ten sposób wprowadzeniu dodatkowych współczynników, utrudniających interpretację otrzymanych zależności.

W równaniach (3)-(6) zmiennymi niezależnymi mogą być R_k , H_o i v_x . Zmiennymi zależnymi są: Q_w^* , G_p^* , H_x , K_w , G_k^* , c_m . Wpływ spadku ciśnienia $G_p^* \cdot R_p$ na c_p jako niezmiernie mały pominięto. Brakujące dwa równania otrzymuje się po wyznaczeniu zależności:

$$K_w = f(v_x - v_w) \quad (7)$$

$$c_m = f(G_p^*, H_x) \quad (8)$$

lub

$$\varphi_m = \varphi(q, H_x) \quad (8)$$

Nie można przyjąć $k_w = \text{const.}$, gdyż współczynnik odbierania ciepła przez wrzącą ciecz zmienia się dosyć silnie (por. [1]). Z kolei wygodniejsza do interpretacji jest zależność (8), w której $q = \frac{Q_w}{H_x}$ jest proporcjonalne do intensywności odparowania z jednostki objętości. Bliższe informacje o zagadnieniu zmienności φ_m można znaleźć w [2]. Po zlinearyzowaniu zależności (3)-(8) i przejściu z nimi na postać operatorową oraz wykorzystaniu zależności (7) i (8), otrzymamy:

$$\begin{aligned} \alpha_p \Delta G_p^*(p) - \Delta Q_w^*(p) &= 0 \\ U \cdot k_{wo} (\nu_{xo} - \nu_w) \Delta H_x(p) - \Delta Q_w^*(p) + U \cdot H_{xo} \left[k_{wo} + \right. \\ &+ \left. (\nu_{xo} - \nu_w) \frac{d k_w}{d \nu_x} \right] \Delta \nu_x(p) = 0 \\ \varepsilon(\varphi_{mo} + H_{xo} k_{oH}) \Delta H_x(p) + (R_p + \varepsilon H_{xo} K_{oG}) \Delta G_p^*(p) + \\ &+ R_{ko} \Delta G_k^*(p) = g \varphi_o \Delta H_o(p) - G_{ko}^* \Delta R_k(p) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} PS(\varphi_{mo} + H_{xo} k_{oH}) \Delta H_x(p) + (1 + PS H_{xo} K_{oG}) \Delta Q_p^*(p) - \\ - \Delta G_k^*(p) = 0 \end{aligned}$$

Wymacszając z układu równań (9) $\Delta Q_w^*(p)$ otrzymuje się wyrażenie typu

$$\Delta Q_w^*(p) = A \frac{1+PT_1}{1+PT_2} \Delta \nu_x(p) + B \frac{1}{1+PT_2} \Delta H_o(p) - C \frac{1}{1+PT_2} \Delta R_k(p) \quad (10)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} A &= G_{ko}^* \alpha_p \left(\frac{1}{\nu_{xo} - \nu_w} + \frac{1}{k_{wo}} \frac{d k_w}{d \nu_x} \right) \frac{\alpha - \varepsilon H_{xo} G_{ko}^* K_{oG}}{\alpha + P_{str}} \\ B &= G_{ko}^* \alpha_p \frac{\varepsilon \varphi_o}{\alpha + P_{str}} \\ C &= G_{ko}^* \alpha_p \frac{G_{ko}^*}{\alpha + P_{str}} \\ T_1 &= \frac{R_{ko} S}{\varepsilon} \\ T_2 &= T_1 \frac{\alpha}{\alpha + P} \end{aligned} \quad (11)$$

z kolei

$$\alpha = \varepsilon H_{X0} \left[Q_{m0} + H_{X0} k_{QH} + G_{ko}^* k_{\varphi G} \right] \quad (11')$$

lub korzystając z zależności (8)

$$\alpha = \varepsilon H_{X0} \left[Q_{m0} + H_{X0} \frac{\partial(q, H_X)}{\partial H_X} \right] \quad (11'')$$

Są podstawy do przypuszczeń, że dla $q = \text{const.}$ wpływ H_X na Q_m jest mały i można go pominąć. Wtedy

$$\alpha = \varepsilon H_{X0} Q_{m0}$$

zaś

$$A = G_{ko}^* \sigma_p \left(\frac{1}{v_{X0} - v_w} + \frac{1}{k_{wo}} \frac{dk_w}{dv_x} \right) \frac{1 - \frac{k_{wo}(v_{X0} - v_w)}{Q_{m0}} \frac{\partial Q_m}{\partial q}}{1 + \frac{P \tau_r}{\varepsilon H_{X0} Q_{m0}}} \quad (12)$$

Wstawiając (10) do (2) otrzymuje się ostatecznie, że

$$\Delta v_x(p) = \frac{(k_w + 1 - g - 1 - p\tau_2)}{ap^2 + bp + c} \Delta N(p) - \frac{B}{ap^2 + bp + c} \Delta H_0(p) + \frac{C}{ap^2 + bp + c} \Delta R_x(p) \quad (13)$$

gdzie:

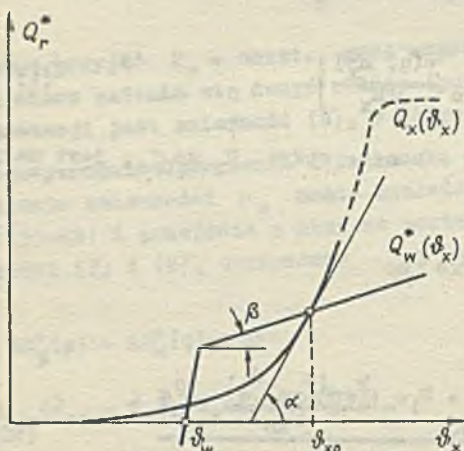
$$a = T_2 \cdot M \cdot c_k \quad b = M \cdot c_k + AT_1 + T_2 N_0 (k_p - k_r) \quad c = A + N_0 (k_p - k_r) \quad (13)$$

Ponieważ dla omawianego procesu $k_r \gg k_p$, a jak wynika z (11) $T_2 \leq T_1$, więc dla transmitancji (13) możliwie są trzy sytuacje:

- I $c > 0$ - dwa pierwiastki rzeczywiste ujemne,
- II $c < 0$, $b > 0$ - jeden z pierwiastków rzeczywisty dodatni,
- III $c < 0$, $b < 0$ - jeden z pierwiastków rzeczywisty dodatni.

W wypadku I reaktor posiada tzw. samowyrównanie, tzn. że po wytrąceniu z równowagi wraca do poprzedniego stanu, jeśli zakłócenie znikło. Ze względu na nieliniowości, obszar w którym reaktor posiada samowyrównanie jest

ograniczony. W wypadku II i III reaktor nie ma samowyrównania i po wytrąceniu z równowagi reaktor gaśnie lub "zapala się". Stwierdzenie to można



Rys. 3. Ciepło wydzielone w reakcji i ciepło odprowadzone przez wymiennik w zależności od temperatury katalizatora (przy wyłączonych regulatorach). (Charakterystyki statyczne)

zilustrować graficznie (rysunek 3) $N_{O_2} k_r$ - jak wynika z definicji jest to tangens nachylenia stycznej do charakterystyki $Q_r^* = f(T_x)$ w punkcie pracy ($\tan \alpha$). A - jest to tangens nachylenia charakterystyki statycznej wymiennika $Q_w^* = f(T_x)$ przechodzącej przez punkt pracy, i zależy od konstrukcji wymiennika oraz struktury UAR. $N_{O_2} k_p$ - jest to tangens nachylenia charakterystyki: ciepło odprowadzone przez produkty reakcji w funkcji temperatury. Jeżeli przez punkt pracy przeprowadzić prostą tak, aby $\tan \beta = A + N_{O_2} k_p$, to w wypadku $c < 0$ otrzymamy sytuację jak na rys. 3. Jak widać, w wyniku jakiegokolwiek wzrostu temperatury, więcej ciepła się wydzielili niż zostanie odprowadzone czyli temperatura dalej

wzrasta (dodatnie sprzężenie zwrotne). Dla $c > 0$ sytuacja jest odwrotna. Aby w wypadku $c < 0$ zmusić reaktor do stabilnej pracy w punkcie T_{x0} , niezbędne jest dodatkowe uzależnienie Q_w^* od T_x np. oddziałując w zależności od T_x na R_k lub H_o . Charakterystykę $Q_w^* = f(T_x)$ można wtedy uczynić dowolnie stromą, a w wypadku gdy regulator ma idealnie działającą część I - otrzymamy linię pionową. Mamy więc tutaj przykład gdzie UAR jest konieczny nawet w wypadku braku zakłóceń, gdyż ma on za zadanie zmienić własności statyczne (a przy okazji także własności dynamiczne) urządzenia. N.b. Omawiane reaktory usiłowano uruhozić bez UAR temperatury, gdyż istotnie nie ma tam większych zakłóceń. Oczywiście skończyło się to niepowodzeniem.

Ponieważ stabilne przecięcie charakterystyk statycznych jest warunkiem koniecznym, ale nie dostatecznym stabilności, więc należy jeszcze dodatkowo określić warunki stabilności. Wyjątkowo prosta forma transmitancji umożliwia w tym wypadku zastosowanie kryterium Hurwitza. Bardziej właściwe do dyskusji wpływu różnych efektów byłoby kryterium Nyquista, gdyż możnaby przy okazji oszacować przebieg tzw. dynamicznego współczynnika regulacji, mówiącego o dobroci UAR. Kryterium to jest jednak w tym wypadku mniej dogodne [4].

Pomijając opóźnienia pomiarowe i zakładając idealny regulator o transmitancji $K_r(p) = r_0 + r_1 p + r_{-1} p^{-1}$ otrzymujemy równanie charakterystyczne

$$1 + K_{\text{obiekту}}(p) \cdot K_r(p) = 1 + \frac{c}{ap^2 + bp + c} (r_0 + r_1 p + r_{-1} p^{-1}) = 0$$

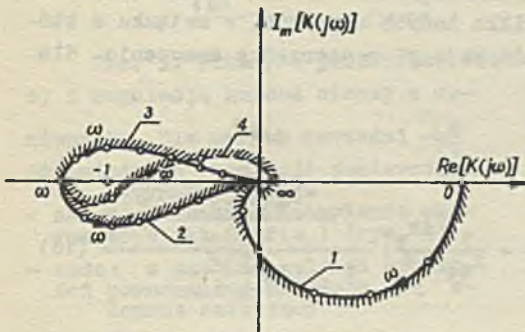
(wielkość sterująca - otwarcie zaworu na dopływie kondensatu do wymiennika).

Po przekształceniu:

$$ap^3 + (Cr_1 + b)p^2 + (Cr_0 + c)p + Cr_{-1} = 0 \tag{14}$$

Wyznaczone z kryterium warunki stabilności są następujące:

$$r_1 > -\frac{b}{c} \quad r_0 > -\frac{c}{a} \quad r_{-1} < \frac{(Cr_1 + b)(Cr_0 + c)}{ac} \tag{15}$$



Rys. 4. Przebieg charakterystyk amplitudowo-fazowych układu otwartego z regulatorem typu P, dla następujących warunków: (por. 13)

1. $c > 0$
2. $c < 0$ $b > 0$
3. $c < 0$ $b < 0$
4. $c < 0$ $b > 0$ plus czas martwy

Jak widać w wypadku gdy $b < 0$ nieodzowne dla stabilności jest działanie różniczkujące regulatora. Natomiast udział całki winien być możliwie mały. Jeżeli uwzględnić zawsze istniejące opóźnienia pomiarowe i inne, to przy $c < 0$ charakterystyka amplitudowo-fazowa obiektu ma przebieg jak na rys. 4. Nastawami regulatora trzeba ją tak zdeformować, aby punkt $(-1, j0)$ znalazł się w obszarze stabilnym (należy pamiętać, że mamy do czynienia z obiektem niestabilnym w stanie otwartym - inaczej można wyodądzać błędne wnioski). Przy odpowiednio dużym opóźnieniu nie da się

tego osiągnąć przy pomocy regulatora typu PID. Można się o tym przekonać analizując układ z szeregowo włączonym członem o transmitancji $(1+pT)^{-n}$. Przy $c < 0$ można dobrać odpowiednio T i n tak, aby niektóre wyrazy równania charakterystycznego były ujemne niezależnie od nastaw regulatora. Jak więc widać w urządzeniach tego typu istnieje potencjalna możliwość niestabilności strukturalnej. Na podstawie zależności (11)-(13) można dysku-

tować wpływ cech konstrukcyjnych aparatu na jego własności regulacyjne. W szczególności należy dążyć do osiągnięcia możliwie dużej wartości współczynnika c (13). Jeżeli $c < 0$, to nawet w sytuacji gdy warunki (15) (lub podobne) są spełnione, w realnym układzie występują oscylacje parametrów. Są one wynikiem istnienia w UAR strefy nieczułości, histerezy itp. efektów. Poza tym w realnych warunkach ze względu na wahania własności dynamicznych obiektu, trudno trafić na nastawy regulatora zapewniające stałe stabilność. Istotnie, niemal wszystkie (7 szt.) z omawianych reaktorów miały momenty, kiedy pracowały niestabilnie (cykl graniczny o zmiennych amplitudach $\pm 2^\circ\text{C} - \pm 5^\circ\text{C}$. Ogranicznikiem na ogół był zawór). Wahania temperatury o takiej amplitudzie nie niepokoiły technologów, jednak konsekwencje ich istnienia są dosyć kosztowne. Okazuje się, że już przy tak małych amplitudach oscylacji - zawory regulacyjne na niektórych reaktorach pracują dwupołożeniowo. Wszystkie reaktory zasilane są kondensatem ze wspólnej pompy. W tej sytuacji pompa, której wydajność jest wystarczająca dla średnich poborów nie jest w stanie sprostać zadaniu, gdy na kilku reaktorach występuje chwilowy, większy pobór kondensatu. W konsekwencji temperatura w niektórych reaktorach gwałtownie wzrasta, co zmusza do obniżenia obciążeń (produkcji), a w wypadku nieuwagi obsługi grozi uszkodzeniem urządzeń. Można by wskazać jeszcze kilka innych aspektów, w związku z którymi samowyrównawcze własności aparatu mają pierwszorzędne znaczenie dla użytkownika.

Ponieważ jak to wynika z (12) i (13)

$$c = H_0 (K_p - K_r) + G_{ko}^2 o_p \left(\frac{1}{\beta_{xo} - \beta_w} + \frac{1}{K_{wo}} \frac{dk_w}{d\beta_x} \right) \frac{1 - \frac{K_{wo} (\beta_{xo} - \beta_w)}{\epsilon_{mo}} \frac{\partial \epsilon_m}{\partial q}}{1 + \frac{P_{str}}{g H_{xo} \epsilon_{mo}}} \quad (16)$$

więc zwiększenie c można osiągnąć różnymi sposobami:

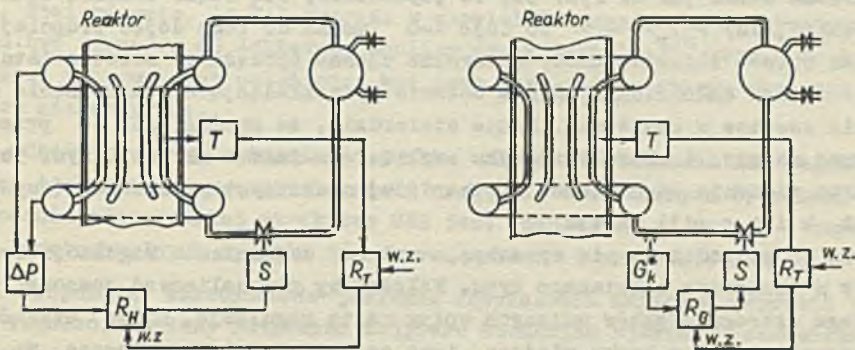
- a) przez dobór odpowiedniego reżimu pracy urządzeń
 - zwiększenie w reagentach inertów (wzrost k_p)
 - zmiana ciśnienia w obiegu chłodniczym (zmiana β_w i o_p , a stąd zmiany: G_{ko}^* , H_{xo} , ϵ_{mo} , k_{wo} itp.)
- b) przez odpowiednią konstrukcję reaktora
 - zmiana wymiarów wymiennika (ilość i wymiary rur). Zmieniają się:

$$H_{xo}, \epsilon_{mo}, \frac{\partial \epsilon_m}{\partial q}, P_{str} \text{ itp.}$$

- zmiana usytuowania zbiornika naporowego (związana z tym konieczna zmiana R_k ,

- c) stosując odpowiednią strukturę UAR.

Przeanalizujemy zachowanie się obiektu. Np. wzrost produkcji powoduje wzrost Q_T^* i co za tym idzie wzrost β_X . W wyniku tego rośnie G_p^* . Ciecze w wymienniku ubywa, czyli $g_{H_X} \cdot \rho_m$ maleje. Ten efekt powoduje wzrost G_K^* , co daje ujemne sprzężenie zwrotne. W ostatecznym rozrachunku, o ile tylko $R_K R_p > 0$, to zasób cieczy w wymienniku maleje, ale ilość odparowanej cieczy, a co za tym idzie ilość odprowadzonego ciepła wzrasta dając ocharakterystykę statyczną o nachyleniu $\beta = \arctg A$.



Rys. 5. Układy z pomocniczą wielkością regulowaną (kaskadowe)

- a) Z regulacją zasobu cieczy w wymienniku. Dla małych wartości $\frac{\partial \rho_m}{\partial q}$ odpowiada to regulacji powierzchni wymiany ciepła
- zaleta: wzrasta nachylenie charakterystyki $Q^* = f(\beta_X)$ (rys. 3)
 - wada: w pętli regulacji wielkości pomocniczej znajduje się element całkujący

- b) Z regulacją natężenia dopływu kondensatu. Odpowiada to regulacji ilości odprowadzanego ciepła
- wada: likwiduje naturalne ujemne sprzężenie zwrotne w obiegu chłodniczym, w wyniku czego temperatura reaktora rozbiega się szybciej
 - zaleta: praktycznie biorąc szybciej niż układ z rys. a wykrywa i likwiduje zakłócenia na dopływie kondensatu

Gdyby teraz zainstalować jak na rys. 5a szybko działający regulator różnicy ciśnień, to ponieważ zasób cieczy w wymienniku nie może się zmienić, okaże się, że taka sama zmiana temperatury jak poprzednio da większą zmianę ilości odprowadzonego ciepła. Ponieważ regulator R_H sprawia iż zasób cieczy w wymienniku $SH_X \rho_m$ jest niezależny od natężeń przepływu pary i kondensatu w obiegu chłodniczym, więc z punktu widzenia regulatora R_T zachowanie obiektu (wejście - wartość zadana R_H , wyjście - β_X) jest identyczne z zachowaniem obiektu bez regulatora R_H , ale za to pozbawionego oporu R_K i R_p . Sterowanie odbywałoby się przez zmienną H_0 . Dzięki zastosowaniu regulacji z pomocniczą wielkością regulowaną $g_{H_X} \cdot \rho_m$ uzyskuje się taki efekt jakby $P_{str} = 0$. Jak widać ze wzoru (12) tangens nachylenia charakterystyki statycznej wymiennika z regulatorem R_H jest równy

$$A_H = G_{ko}^* c_p \left(\frac{1}{\beta_{xo} - \beta_w} + \frac{1}{k_{wo}} \frac{\partial k_w}{\partial \beta_x} \right) \left[1 - \frac{k_{wo} (\beta_{xo} - \beta_w) \partial \varrho_m}{\varepsilon_{mo} \partial q} \right] \quad (17)$$

Ponieważ $A_H > A$ więc zgodnie z (16) α wzrosło, co jak powiedziano ułatwia regulację. Przy okazji regulator R_H likwiduje nam w zarodku niektóre zakłócenia jak np. zmiana H_o , R_k lub R_p .

Gdyby zaś w obawie np. przed wpływem wahań H_o na temperaturę zaproponowano układ jak na rys. 5b, to popełniliby się błąd. Obecnie efekt byłby taki jakby $P_{str} \rightarrow \infty$ co daje $A=0$ (można do tego dojść prościej). W ten sposób zlikwidowanoby naturalne ujemne sprzężenie zwrotne istniejące w obiegu chłodniczym, które osłabia przeszkadzające nam dodatnie sprzężenie zwrotne w reaktorze. Można stwierdzić, że analogiczna do przedstawionej na rys. 4 charakterystyka amplitudowo-fazowa układu z rys. 5b ma z punktu widzenia regulatora R_T bardziej niekorzystny przebieg (współczynniki b i α z (13) maleją).

To co powiedziano nie wyczerpuje całości zagadnienia regulacji temperatury w reaktorze omawianego typu. Należałoby przeanalizować jeszcze wpływ całego szeregu efektów mających wpływ na tą regulację. Kilka efektów nie przeanalizowano z braku miejsca, inne są jeszcze nie rozwiązane. Np. m.in. brak danych pozwalających wyznaczyć zależność ϱ_m od geometrii i warunków panujących w wymienniku. W metodach opisanych w literaturze pewne istotne wielkości trzeba przyjąć szacunkowo. Następnie należałoby przeanalizować problem schłodzenia lub powrotnego nagrzania reaktora, którego temperatura znacznie odbiegła od zadanej. Wystąpić tu mogą niepoznane dokładnie procesy zmiany rodzaju wrzenia [1].

Na zakończenie warto może podać praktyczną metodę oseny celowości zastosowania rozwiązania jak na rys. 5a. Rury wymiennika pokryte kamieniem, też dają pewną zwłokę w przekazywaniu informacji. Aby zastosowanie kaskady z R_H dało istotne korzyści, ciśnienie $g H_x \varrho_m$ musi się zmienić prędzej niż R_T zdąży utworzyć zawór. Aby to sprawdzić należy zakłócać temperaturę np. przez zmianę dopływu surowca. Obserwować miernik $H_x \varrho_m g$ lub sygnał sterujący i przepływ kondensatu. Jeżeli przy wzroście obciążenia $H_x \varrho_m g$ najpierw maleje, a dopiero później rośnie, to R_H przyspieszając interwencję, poprawi jakość regulacji. W przeciwnym razie R_H jest na ogół zbędny, gdyż tylko powtarza sygnały za R_T (chyba, że chodzi o przeciwdziałanie zakłóceniom w przepływie kondensatu). W praktyce okazało się, że nawet tak prymitywny eksperyment sprawia poważne kłopoty, gdyż na efekt celowo wywołany nakładają się wahania parametrów wywołane cyklem granicznym w pracy reaktora, zakłóceniami itp.

Na podstawie omówionego przykładu można m.in. stwierdzić, że:

1. Zastosowanie automatycznej regulacji pozwala niekiedy znacznie uprościć budowę aparatu technologicznego. Jako ciekawostkę można podać, że za

granica dla omawianego procesu były robione próby ochłodzenia reaktorów wrzącą rtęcią [5]. Zastosowanie UAR pozwala przejść na ochłodzenie wodą, z tym jednak, że w razie awarii UAR prowadzenie procesu jest niemożliwe (regulacja ręczna ze względu na rozbieganie się reaktora jest bardzo uciążliwa i ryzykowna).

2. W wypadku niestabilności obiektu w układzie otwartym, istnieje potencjalna możliwość niestabilności strukturalnej (z typowymi regulatorami PJD), a co najmniej trudno trafić na nastawy stabilne.

3. Stwierdzenie, iż UAR pracuje z niewielkim nawet cyklem granicznym, winno być sygnałem do dokładnej analizy pracy instalacji, gdyż konsekwencje tych ignorowanych wahań mogą być przy odpowiednim zbiegu okoliczności bardzo niekorzystne.

4. Choć zbudować optymalny z punktu widzenia podatności na regulację aparat technologiczny, warto zwrócić uwagę, iż w niektórych wypadkach zastosowanie odpowiedniej struktury UAR jest równoważne ze zmianą parametrów konstrukcyjnych aparatu (por. pracą układu z rys. 5a).

5. Proponując zastosowanie jakiegoś rozwiązania mającego poprawić dobroć regulacji należy rozpoznać najpierw mechanizm zjawisk zachodzących wewnątrz urządzenia. W przeciwnym wypadku można popełnić błąd (por. zachowanie się układu z rys. 5a i 5b).

LITERATURA

- [1] Staniszewski B. - Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne, PWN 1963.
- [2] Wróblewski T., Perłowski A., Górecki H. - Urządzenia kotłowe, PWT 1960
- [3] Campbell D.P. - Dynamika procesów, PWN 1962.
- [4] Oppelt W. - Poradnik techniki regulacji, PWT 1958.
- [5] Badawczo-Doświadczalny Ośrodek Automatyzacji - Model matematyczny procesu konwersji naftalemu do bezwodnika ftalowego w reaktorze fluidalnym. Cz. I - Opis procesu technologicznego i cz. III - Pasywa identyfikacja fluidalnego reaktora przemysłowego na podstawie danych ruchowych - Nie publikowane. 1966 r.
- [6] Katedra Urządzeń i Układów Automatyki Pol. Śl. - Sprawozdanie z prac nad pomiarowym zdjęciem charakterystyk statycznych reaktora fluidalnego do produkcji bezwodnika ftalowego (Dla BDOA). Nie publikowane. 1967.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 2.IV.1969 r.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

Резюме

В статье определено аналитическим способом динамические свойства химического реактора охлаждаемого теплообменником, работающим по принципу испарения жидкости. Полученные формулы дают возможность провести анализ влияния разных конструктивных решений на динамические и соответственно на эксплуатационные свойства реактора.

Описав случай, когда неправильная работа системы регулирования температуры, внешне признаки которой казались мало опасными, привела к большим экономическим потерям.

CERTAIN PROBLEMS IN THE TEMPERATURE CONTROL IN CHEMICAL REACTORS

Summary

The paper presents an analytical way of appointment of dynamic properties for the chemical reactor cooled by heat exchanger with internal liquid evaporation. The received function allows to discuss an influence of different reactor constructions and for dynamic exploitation properties.

An accident when abnormality in control system work which seems nondangerous gives as a consequence great economical losses, was described.