

mgr inż. Andrzej Bogucki
mgr inż. Krystyna Lipowicz-Judycka
Przemysłowy Instytut
Automatyki i Pomiarów MERA-PIAP
Warszawa

BADANIA DYNAMIKI KOLUMNY KARBONIZACYJNEJ NA MASZYNIE WAT 1001

1. Wstęp

Przedmiotem niniejszego artykułu jest odtworzenie w drodze modelowania analogowego mechanizmu powstawania drgań w kolumnie karbonizacyjnej osadczą zasilanej solanką ze zbiornika naporowego z przelewem, wyposażonej w układ automatycznej regulacji temperatury gazu odlotowego.

Potrzeba tych badań wyniknęła w trakcie prac nad automatyzacją kompleksową procesu otrzymywania sody na skutek niestabilnej pracy kolumn karbonizacyjnych w tym procesie. W kolumnie karbonizacyjnej osadczą płyną w przeciwnym kierunku: strumień cieczy (solanki amoniakalnej wstępnie skarbonizowanej, a następnie zawiesiny kryształu wodorowęglanu sodu), skierowany ku dołowi i strumień gazu (CO_2 z domieszką powietrza), skierowany ku górze.

W trakcie barbotażowego przepływu gazu solanka amoniakalna absorbuje zawarty w nim CO_2 , wskutek czego jej stopień karbonizacji ρ wzrasta od wartości ρ_0 , w solance zasilającej kolumnę, do wartości ρ_k w cieczy skarbonizowanej opuszczającej kolumnę. Jednocześnie stężenie CO_2 w gazie maleje od wartości S_G w gazie zasilającym kolumnę do wartości S_g w gazie odlotowym.

W stanie ustalonym określonymu stosunkowi stechiometrycznemu natężeń przepływu solanki i CO_2 odpowiada określony rozkład stopnia karbonizacji wzdłuż kolumny. Zmianie stosunku stechiometrycznego natężenia przepływu CO_2 do natężenia przepływu solanki towarzyszy przemieszczanie się rozkładu stopnia karbonizacji i taka zmiana stężenia CO_2 w gazie odlotowym, przy której ponownie dochodzi do równowagi stechiometrycznej między natężeniem użytecznego strumienia CO_2 a natężeniem strumienia solanki. W celu podkreślenia dyna-

micznego charakteru rozkładu stopnia karbonizacji wzdłuż kolumny, rozkład ten będziemy nazywać również czołem fali karbonizacji.

2. Model dynamiczny kolumny

Jako miarę położenia fal karbonizacji o różnym kształcie czoła przyjęto położenie czoła zastępczej (prostokątnej) fali karbonizacji 100% [1].

Definicja. Zastępczą (prostokątną) falą karbonizacji 100% nazywać będziemy taki dwuwartościowy ($\varrho = \varrho_0$; $\varrho = 1$) rozkład stopnia karbonizacji, przy którym ilość CO_2 zaabsorbowanego w cieczy znajdującej się w kolumnie jest taka sama, jak przy rozkładzie rzeczywistym.^{x/}

Uwaga. Ponieważ w kolumnie karbonizacyjnej osadycznej mamy do czynienia z cieczą nagazowaną, podczas gdy natężenia przepływu solanki i cieczy skarbonizowanej odnoszą się do cieczy nienagazowanej, należy objętość cieczy w kolumnie sprowadzić do cieczy nienagazowanej. Osiągamy to wprowadzając pojęcie poziomu zredukowanego L:

$$L = \frac{L^*}{1+G} \quad /1/$$

gdzie:

L^* - poziom cieczy nagazowanej;

G - stopień nagazowania cieczy.

Położenie L_ϱ czoła zastępczej fali karbonizacji względem podstawy kolumny wyraża się wzorem:

$$L_\varrho = \frac{1}{1 - \varrho_0} \int_0^L \varrho dh \quad /2/$$

gdzie

L - poziom zredukowany cieczy w kolumnie

^{x/} Ma to szczególne znaczenie przy określaniu położenia fali karbonizacji względem lustra solanki, przy zmienności poziomu cieczy w kolumnie.

Jednocześnie położenie czoła zastępczej fali karbonizacji musi spełniać zależność o charakterze dynamicznym:

$$\frac{dL_g}{dt} = \frac{1}{S} (F_{GR}^* - F_{GR} - F_B) \quad /3/$$

gdzie:

S - powierzchnia przekroju kolumny;

F_{GR}^* - równoważnik objętościowy (w przeliczeniu na solankę) natężenia strumienia CO_2 zasilającego kolumnę;

F_{GR} - równoważnik objętościowy (w przeliczeniu na solankę) natężenia strumienia CO_2 w gazie odlotowym;

F_B - wydatek cieczy skarbonizowanej opuszczającej kolumnę.

Położenie H_g czoła zastępczej fali karbonizacji względem lustra solanki wyraża się wzorem:

$$H_g = L - L_g \quad /4/$$

przy czym poziom L wynika z zależności:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{S} (F_S - F_B) \quad /5/$$

Przyjęto /1/, że między rozkładem stopnia karbonizacji wzdłuż kolumny a położeniem H_g czoła zastępczej fali karbonizacji zachodzi zależność o charakterze empirycznym:

$$g = f(H_g, h) \quad /6/$$

W dalszym ciągu wprowadzono następujące założenia:

- Z1. Gaz odlotowy ma temperaturę równą temperaturze najwyższej położonej warstwy cieczy.
- Z2. U szczytu kolumny istnieje przestrzeń, w której na skutek intensywnego mieszania następuje uśrednienie temperatury cieczy, nazywana dalej strefą mieszania.
- Z3. Ciecz opuszczająca strefę mieszania ma taki stopień karbonizacji, jaki miałby miejsce w przypadku, gdyby ciecz w tej strefie przemieszczała się ruchem tłokowym.

Definicja. Umownym gradientem karbonizacji w strefie mieszania nazywać będziemy taki gradient karbonizacji, jaki powstałby na odcinku kolumny odpowiadającym tej strefie, w przypadku tłokowego ruchu cieczy.

Z4. Na odcinku odpowiadającym strefie mieszania umowny gradient karbonizacji ma stałą wartość.

Z5. Strumienie ciepła dostarczanego do strefy mieszania w drodze konwekcji oraz traconego w drodze wypromieniowania i przewodzenia są pomijalne w stosunku do strumienia ciepła wywiązującego się w wyniku absorpcji CO_2 .

Z6. Objętość strefy mieszania nie maleje nigdy poniżej pewnej minimalnej objętości V_{\min} .

Ponadto przyjęto dodatkowe założenie upraszczające:

Z7. W stanie ustalonym wydatek objętościowy F_B cieczy skarbonizowanej z kolumny równa się natężeniu objętościowemu F_S dopływu do kolumny solanki amoniakalnej wstępnie skarbonizowanej

$$F_{B0} \approx F_{S0}$$

Na podstawie założeń Z5 i Z7, przyjmując temperaturę solanki zasilającej kolumnę jako temperaturę odniesienia, możemy bilans cieplny cieczy w strefie mieszania wyrazić w postaci:

$$\frac{dQ}{dt} = qV - C_w F_B \vartheta \quad /7/$$

gdzie:

- Q - ilość ciepła zawarta w cieczy znajdującej się w strefie mieszania,
- q - natężenie strumienia ciepła wywiązującego się w jednostce objętości cieczy w strefie mieszania,
- V - objętość cieczy w strefie mieszania,
- C_w - ciepło właściwe solanki,
- ϑ - temperatura cieczy w strefie mieszania.

Z kolei

$$q = k_{\Phi} F_G \left. \frac{d\phi}{dh} \right|_{h_0} \quad /8/$$

$$F_G = F_G^* - F_G \quad /9/$$

gdzie:

k_{ϕ} - współczynnik proporcjonalności,

F_G - natężenie użytecznego strumienia CO_2 ,

F_G^* - natężenie strumienia CO_2 zasilającego kolumnę,

F_G - natężenie strumienia CO_2 w gazie odlotowym,

$\left. \frac{d\phi}{dh} \right|_{h_0}$ - umowny gradient stopnia karbonizacji w strefie mieszania określony w odległości h_0 od lustra solanki.

Uwaga. Przy posługiwaniu się jednostkami względnymi

$$F_G^* = F_{GR}^*$$

oraz

$$F_G = F_G R$$

Zależność umownego gradientu stopnia karbonizacji w strefie mieszania od położenia H czola zastępczej fali karbonizacji względem lustra solanki znajdziemy różniczkując zależność /6/ względem h i podstawiając $h = h_0$:

$$\left. \frac{d\phi}{dh} \right|_{h_0} = g(H_g, h_0) \quad /10/$$

Natężenie strumienia strat CO_2 w gazie odlotowym można wyrazić jako:

$$F_G = \phi \cdot F_G \quad /11/$$

przy czym

$$\phi = \frac{(1 - S_G) S_G}{S_G - S_G} \quad /12/$$

gdzie:

S_G - stężenie CO_2 w gazie zasilającym kolumnę;

S_G - stężenie CO_2 w gazie odlotowym.

Między stężeniem CO_2 w gazie odlotowym a umownym gradientem stopnia karbonizacji w strefie mieszania zachodzi związek:

$$S_G = k_s \left. \frac{d\phi}{dh} \right|_{h_0} \quad /13/$$

gdzie:

k_s - współczynnik proporcjonalności zależny od temperatury.

Odzwierciedleniem założenia Z6 jest zależność:

$$V = \begin{cases} S(L - L_1) & \text{dla } L \geq L_1 + \frac{V_{\min}}{S} \\ V_{\min} & \text{dla } L \leq L_1 + \frac{V_{\min}}{S} \end{cases} \quad /14/$$

3. Sprzężenia zwrotne

Rozpatrujemy układ, w którym poziom cieczy w kolumnie jest regulowany przez przelew, a regulator temperatury gazu odlotowego steruje wydatkiem cieczy skarbonizowanej z kolumny.

Natężenie dopływu solanki w funkcji poziomu cieczy w kolumnie wyraża się wzorem:

$$F_S = \begin{cases} k_R \sqrt{L_2^* - L_1^*} & \text{dla } L \leq L_1 \\ k_R \sqrt{L_2^* - L_1^* - (L - L_1)} & \text{dla } L_1 \leq L \leq L_1 + (L_2^* - L_1^*) \\ 0 & \text{dla } L \geq L_1 + (L_2^* - L_1^*) \end{cases} \quad /15/$$

gdzie:

L_1^* - poziom otworu wlotowego solanki,

L_2^* - poziom przelewu w zbiorniku naporowym solanki,

L - poziom zredukowany cieczy w kolumnie,

L_1 - poziom zredukowany otworu wlotowego solanki,

k_R - współczynnik zależny od oporności rurociągów.

W skład układu automatycznej regulacji temperatury gazu odlotowego wchodzi:

a) przetwornik temperatury (zazwyczaj termometr oporowy lub termometr gazowy), co do którego zakładamy, że ma charakterystykę dynamiczną członu inercyjnego pierwszego rzędu:

$$\dot{v}_T + T \frac{d v_T}{dt} = v \quad /16/$$

gdzie:

- \dot{v} - temperatura gazu odlotowego,
- \dot{v}_T - sygnał z przetwornika temperatury,
- T - stała czasowa przetwornika temperatury.

b) regulator temperatury o charakterystyce PI:

$$F_B = F_{Bo} + K_p (\dot{v}_T - \dot{v}_o) + \frac{K_p}{T_i} \int_{t_0}^t (\dot{v}_T - \dot{v}_o) dt \quad /17/$$

gdzie:

- \dot{v}_o - wartość zadana temperatury gazu odlotowego,
- K_p - współczynnik proporcjonalności regulatora,
- T_i - czas zdwojenia regulatora.

4. Schemat blokowy modelu kolumny

Na podstawie równań przedstawionych w pkt.2 zestawiono schemat blokowy modelu kolumny, zilustrowany na rys.1. Model ten został opracowany dla przeprowadzenia analizy stabilności kolumny, w związku z czym uwzględnia wyłącznie wejścia sterujące. Wejścia zakłócające nie są rozpatrywane, gdyż dla potrzeb analizy stabilności zakładamy pełną stabilizację zakłóceń.

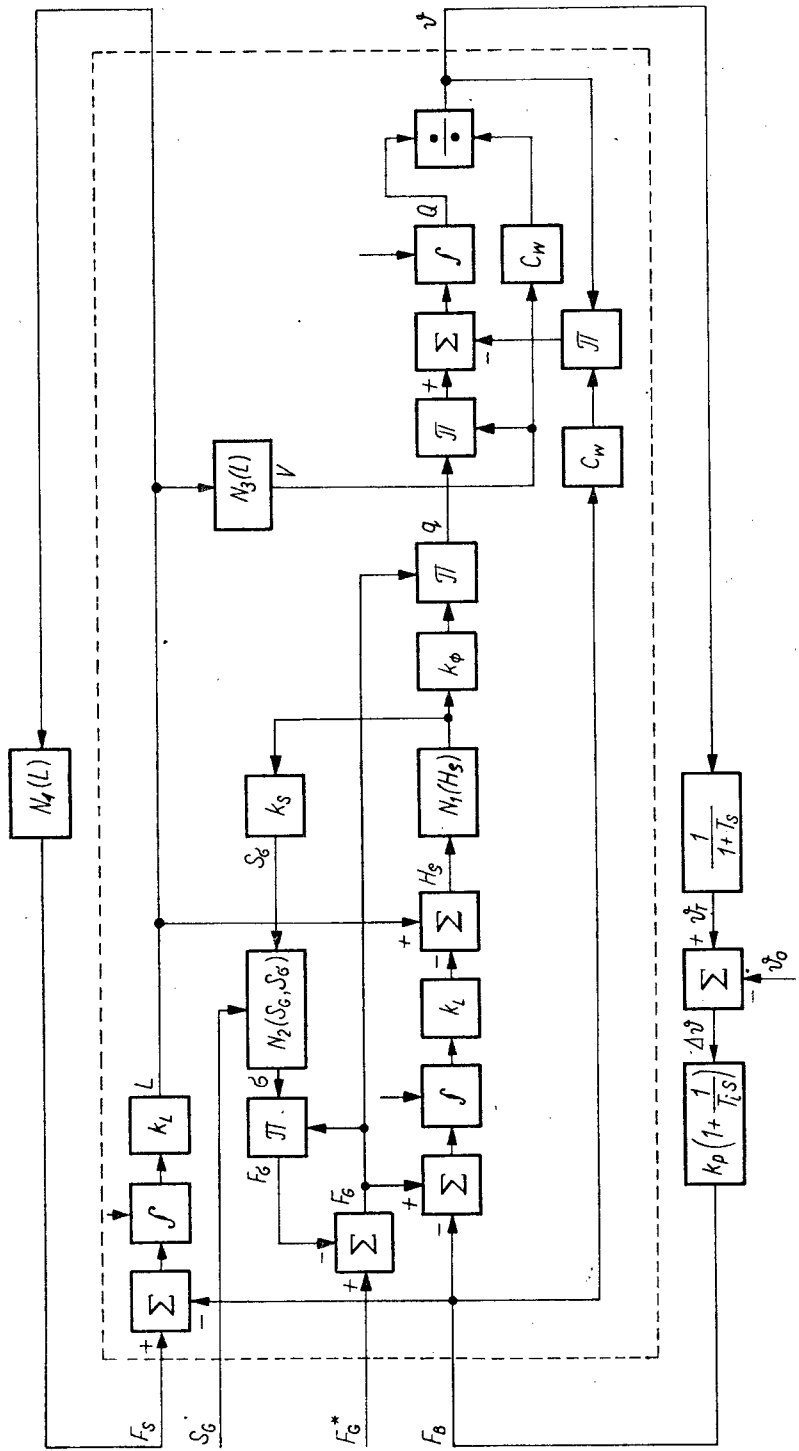
Wejściami sterującymi są:

- F_S - natężenie dopływu solanki,
- F_B - wydatek cieczy skarbonizowanej,
- F_G^* - natężenie strumienia CO_2 zasilającego kolumnę,
- S_G - stężenie CO_2 w gazie zasilającym kolumnę.

Wielkościami wyjściowymi są:

- L - poziom cieczy w kolumnie,
- \dot{v} - temperatura gazu odlotowego.

Zakładamy również, że wejścia F_G^* i S_G są całkowicie stabilizowane, przy czym wartość zadana F_{Go}^* natężenia strumienia CO_2 określa punkt pracy modelu. Zależnościom /10/, /12/, /14/ odpowiadają w schemacie blokowym nieliniowości oznaczone odpowiednio N_1, N_2, N_3 . W schemacie blokowym uwzględniono



sprężenia zwrotne opisane w pkt.3, przy czym zależności /15/ odpowiada nieliniowość N_4 .

5. Badania modelu na maszynie WAT 1001

Na podstawie schematu blokowego sporządzono schemat maszynowy przedstawiony na rys.2. W schemacie tym pominięto, ze względu na przejrzystość, standardowe sygnały sterujące i oznaczenia współczynników maszynowych.

W schemacie maszynowym, w torze wydatku cieczy skarbonizowanej, wprowadzono ograniczenie $F_B \geq 0$, dla odzwierciedlenia faktu, że zasysanie cieczy skarbonizowanej z kolektora do kolumny jest fizycznie niemożliwe.

W zrealizowanym na maszynie WAT 1001 programie przeprowadzono badania, które miały na celu:

- porównanie odpowiedzi skokowej modelu kolumny w układzie otwartym (bez regulatora temperatury) z odpowiedzią kolumny rzeczywistej;
- zbadanie obszarów stabilnej i niestabilnej pracy w układzie zamkniętym;
- zbadanie cyklu granicznego drgań i wyjaśnienie mechanizmu jego powstawania.

5.1. Układ otwarty

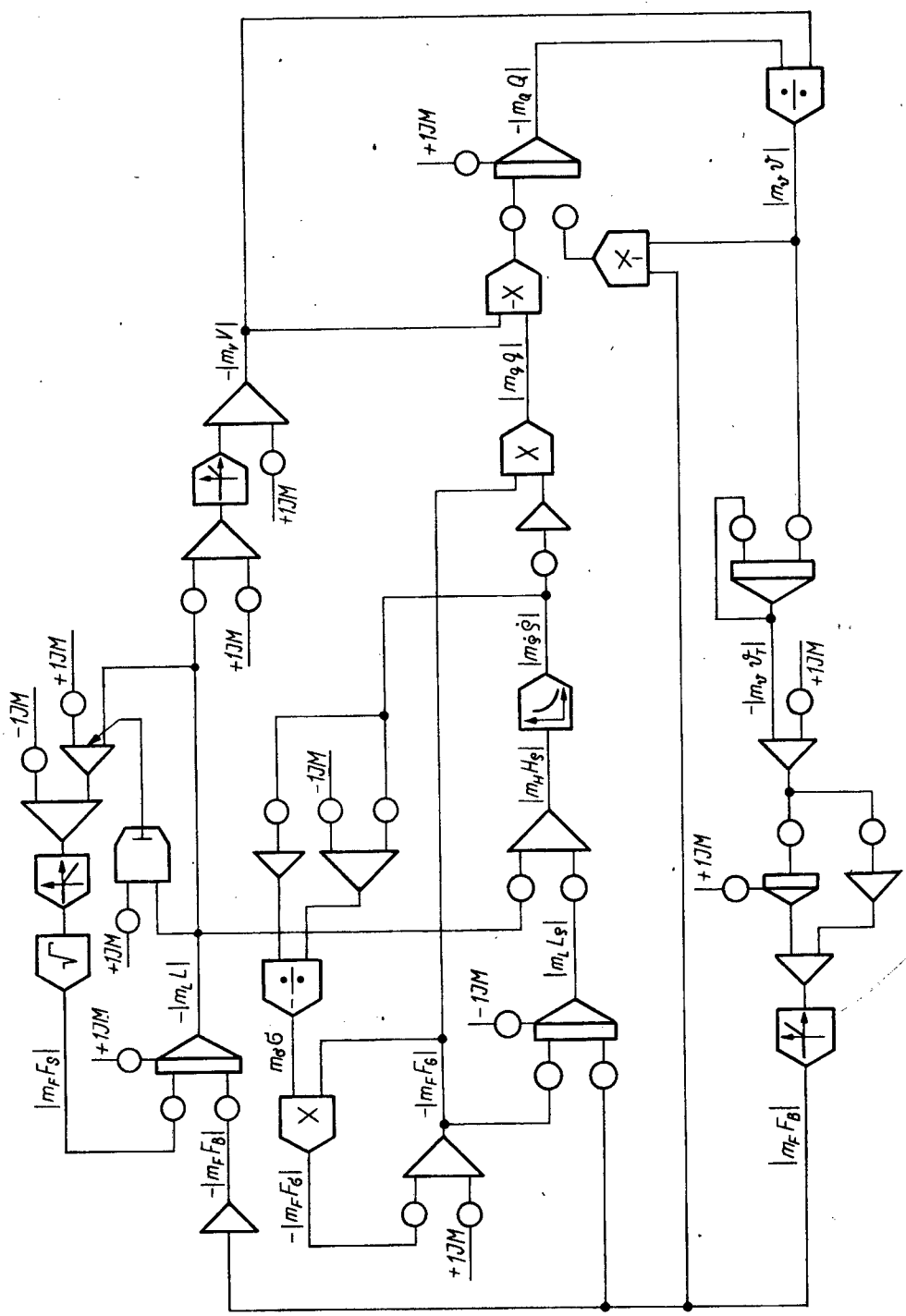
Badano odpowiedź modelu kolumny na wymuszenie skokowe w postaci zmniejszenia wydatku cieczy skarbonizowanej z kolumny kolejno o 5 % i 10 % wydatku znamionowego.

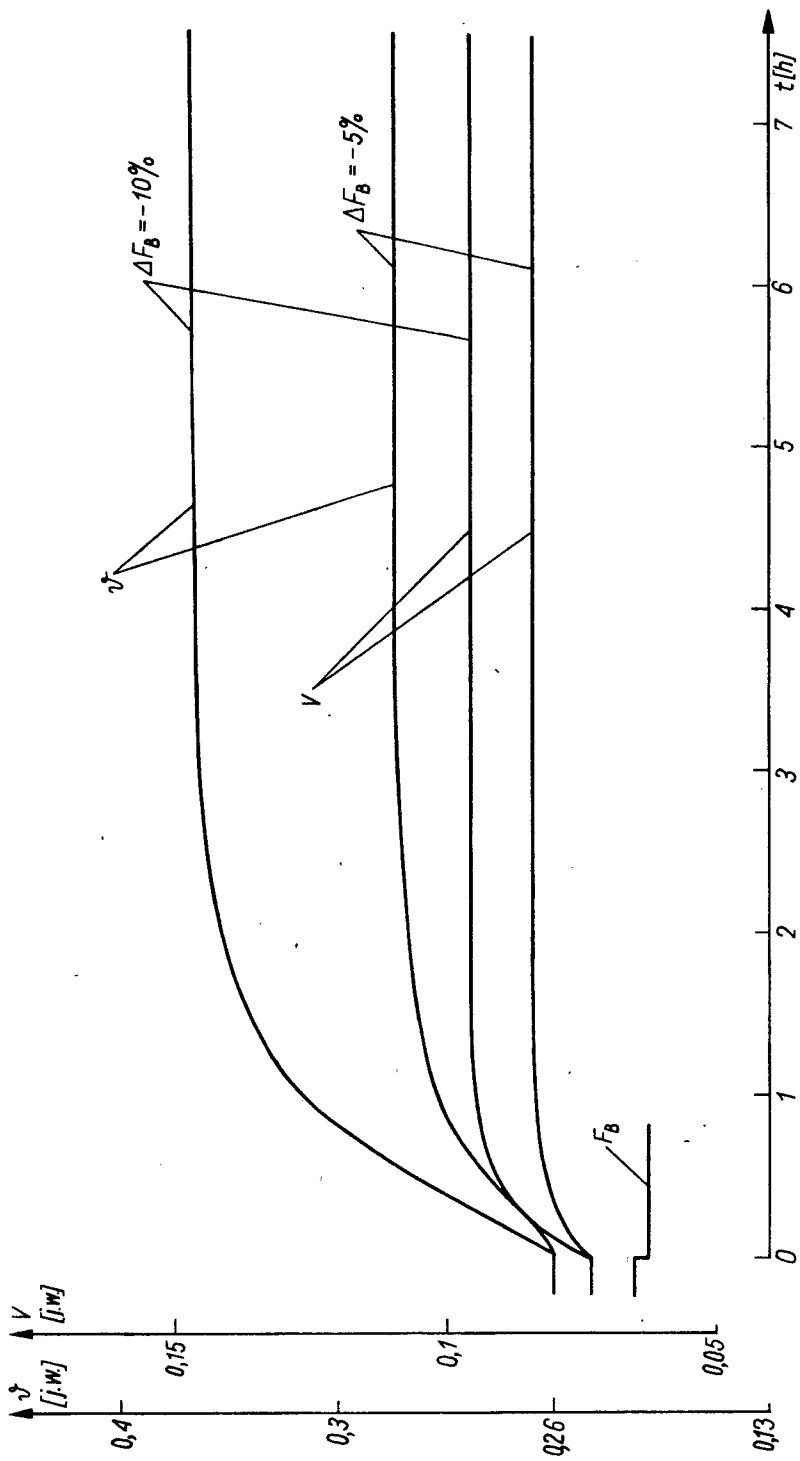
Zarejestrowano przebieg temperatury \mathcal{T} i objętości V cieczy w strefie mieszania (rys.3). Ponadto zdjęto charakterystyki amplitudowo-fazowe modelu kolumny, używając w tym celu analizatora transmitancji ANTRA 20.

Do wejścia F_B modelu (rys.1) doprowadzono z analizatora wymuszenie sinusoidalne o regulowanej amplitudzie i pulsacji, a do wejścia analizatora doprowadzono odpowiedź modelu w postaci sygnału wyjściowego \mathcal{T} .

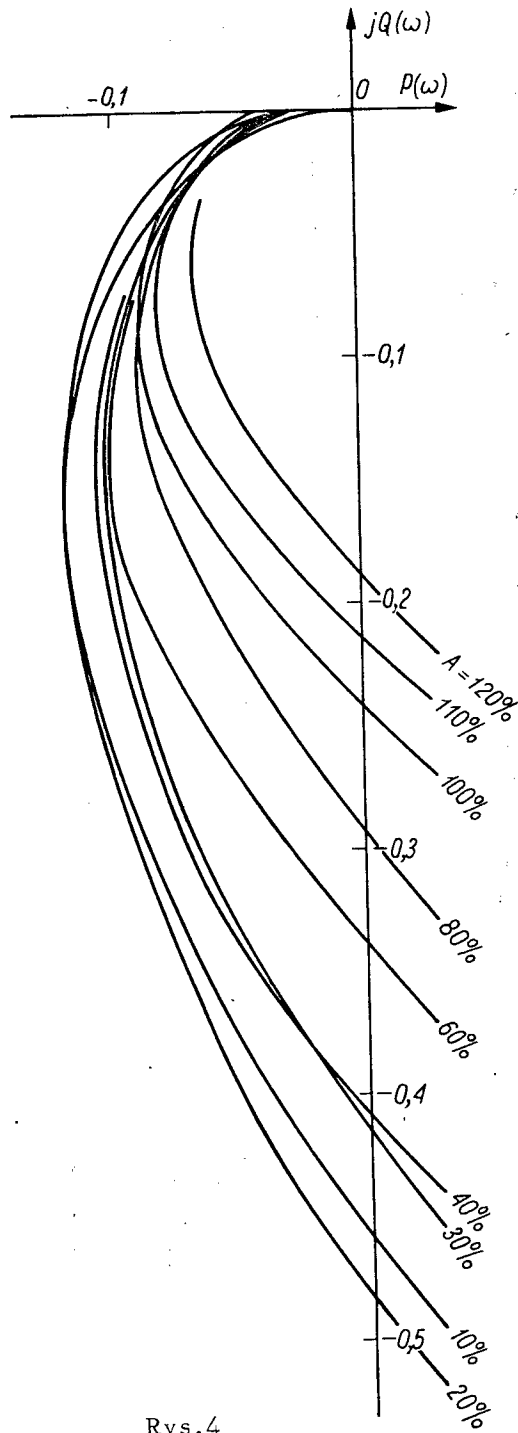
Wartości transmitancji obiektu dla kolejnych wartości pulsacji określono, odczytując z mierników analizatora składowe transmitancji - rzeczywistą i urojoną.

Pomiarów dokonano w kilku seriach, różniących się amplitudą wymuszenia sinusoidalnego, otrzymując rodzinę charakterystyk amplitudowo-fazowych (rys.4). Charakterystyki te posłużyły następnie do badania mechanizmu ustalenia się granicznego cyklu drgań metodą funkcji opisującej.





Rys.3



Rys.4

5.2. Układ zamknięty

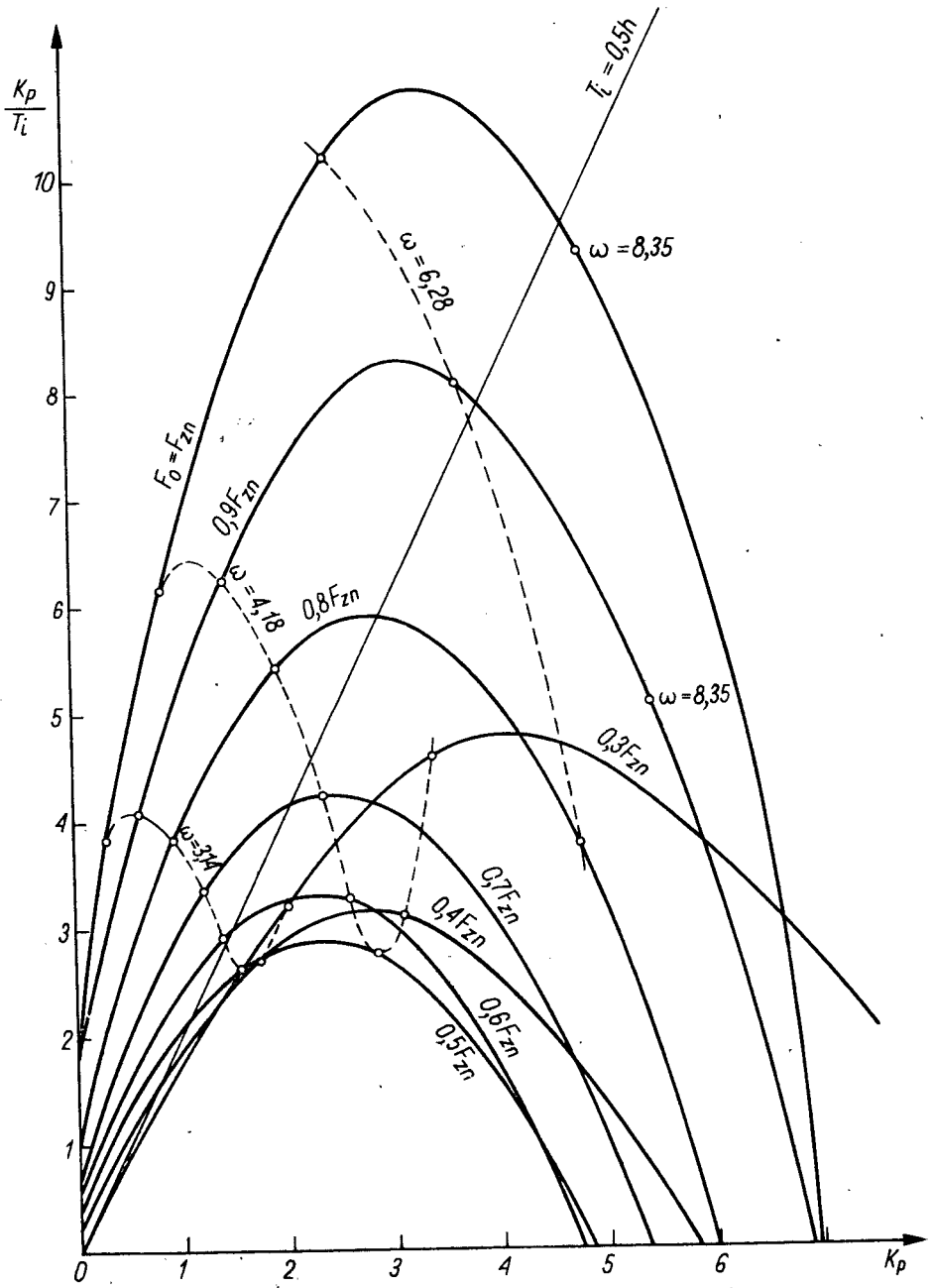
Zdjęto charakterystyki stabilności układu, tzn. wyznaczono na płaszczyźnie nastaw regulatora $\frac{K_P}{T_i} = f(K_P)$ miejsce geometryczne nastaw, przy których układ znajduje się na granicy stabilności. Badania te przeprowadzono dla różnych wartości obciążenia F_B kolumny, dla różnych wartości stałej czasowej T przetwornika temperatury i dla różnych wartości współczynnika k_R . Na rysunku 5 pokazano przykładowo wykresy $\frac{K_P}{T_i} = f(K_P)$ dla kilku wartości obciążenia. Następnie badano odpowiedź modelu kolumny na skok natężenia strumienia CO_2 , przy różnych nastawach regulatora.

Na rysunku 6 pokazano położenie zrealizowanych nastaw regulatora i charakterystykę stabilności układu przy obciążeniu znamionowym. Nastawy nr 1 są położone w obszarze stabilności, nastawy nr 2 - na granicy stabilności, nastawy nr 3, 4, 5 - w obszarze niestabilności. Przebiegi nieustalone parametrów procesu pokazano na rys. 7 i 8 przy czym numeracja oscylogramów odpowiada numeracji nastaw regulatora z rys. 6.

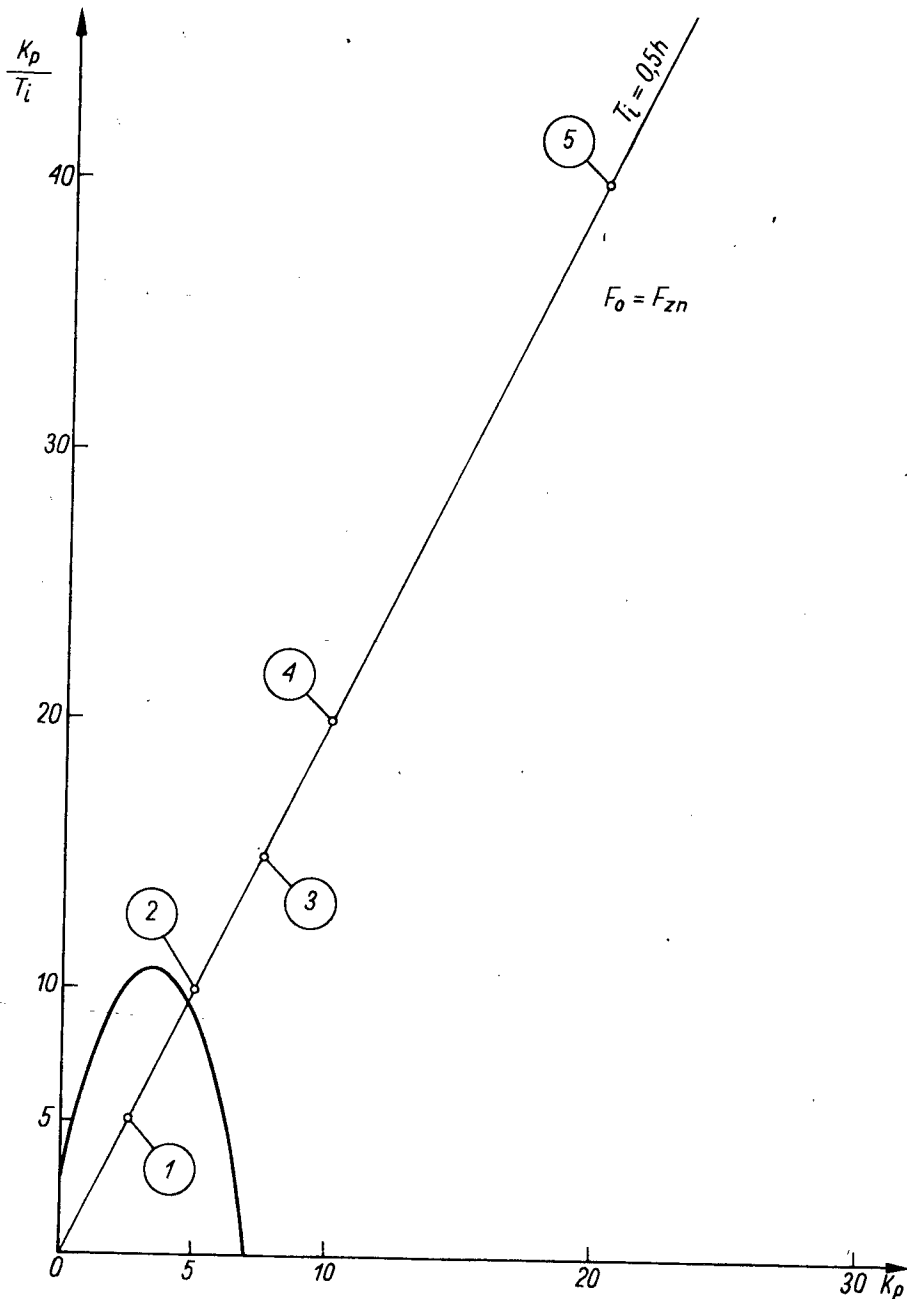
Z przytoczonych przebiegów widać, że na zewnątrz obszaru stabilności w układzie ustala się cykl graniczny drgań i że w miarę wzrostu nastawy proporcjonalnej K_P częstotliwość drgań rośnie.

W celu zbadania, które z nieliniowości zawartych w modelu są odpowiedzialne za powstawanie granicznego cyklu drgań, przeprowadzono próby kolejnej linearyzacji poszczególnych nieliniowości. Jako kryterium przyjęto zachowanie się układu zmodelowanego na maszynie. Jeżeli po linearyzacji danej nieliniowości w układzie nadal utrzymują się drgania ustalone o identycznym lub zbliżonym charakterze, to nieliniowość tę uważamy za nieistotną. Jeżeli w wyniku linearyzacji danej nieliniowości drgania nie wchodzą w cykl graniczny lub różnią się znacznie od istniejących poprzednio, to nieliniowość tę uważamy za istotną.

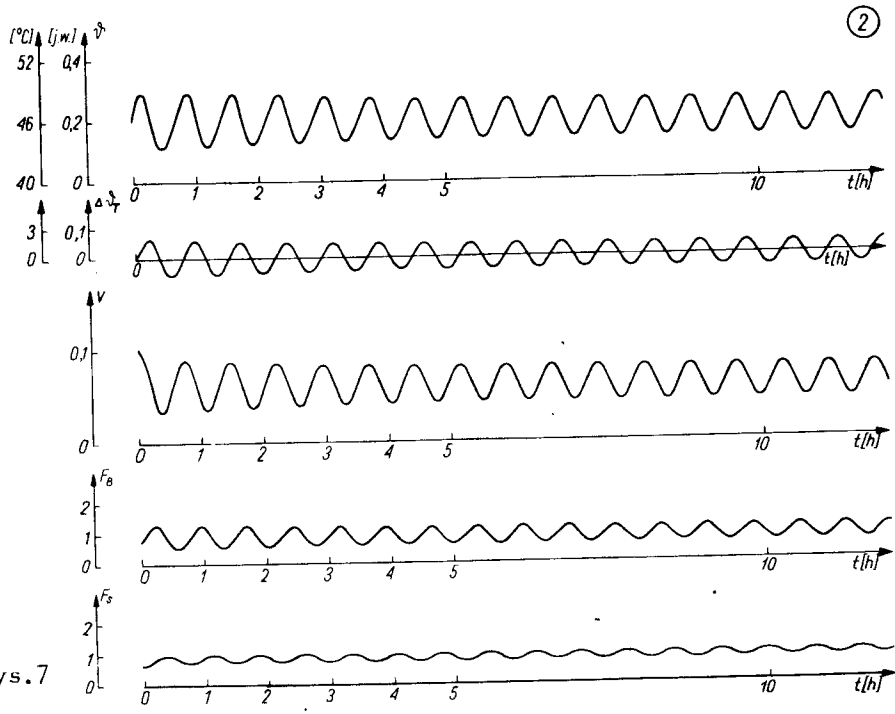
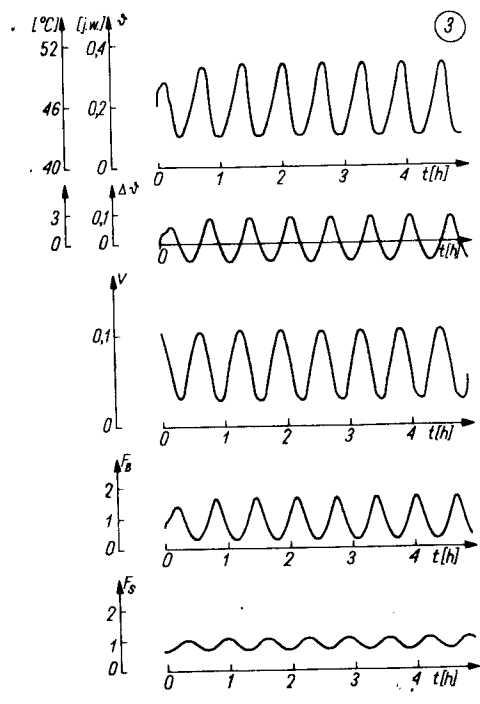
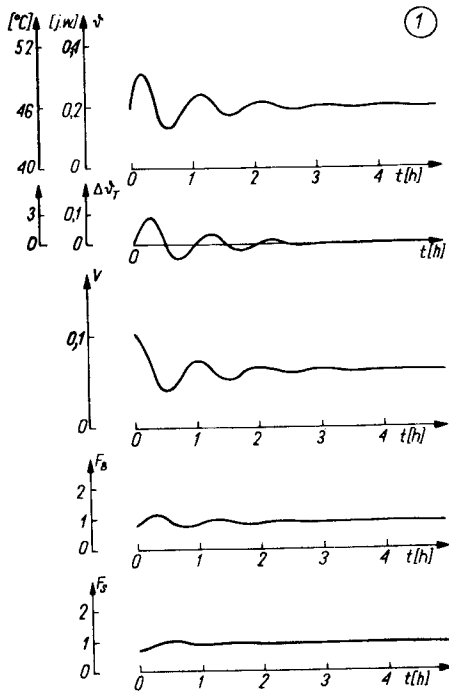
Na tej drodze stwierdzono, że istotną rolę w mechanizmie ustalania się granicznego cyklu drgań odgrywają nieliniowości N_3 i N_4 (rys. 1), związane z istnieniem minimalnej objętości strefy mieszania i z charakterystyką urządzenia przelewowego.



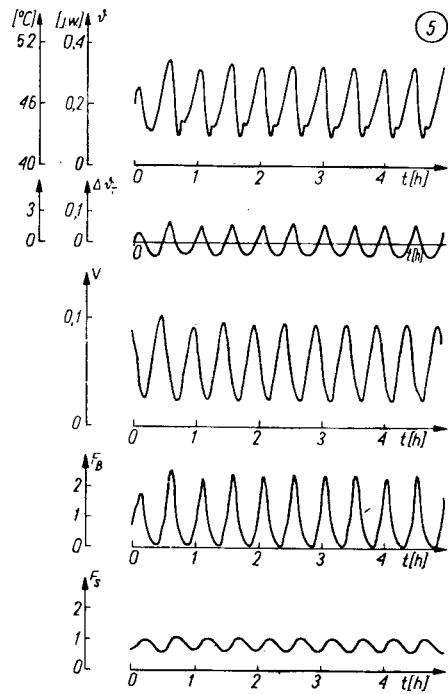
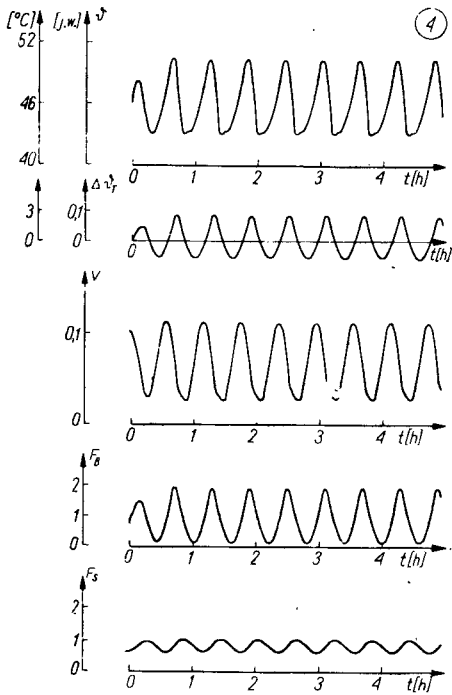
Rys.5



Rys.6



Rys. 7



Rys.8

6. Omówienie wyników i wnioski

1. Prawidłowość modelu maszynowego została potwierdzona przez zgodność rozwiązania uzyskanego na maszynie WAT 1001 z rozwiązaniem uzyskanym na drodze analitycznej dla wybranego przypadku. Przy określaniu granicy stabilności na płaszczyźnie nastaw regulatora uzyskano błąd względny $\leq 0,2\%$ w stosunku do rozwiązania analitycznego.
2. Z porównania odpowiedzi układu otwartego na skoki o różnych amplitudach ($\Delta F_B = 5\%$ i $\Delta F_B = 10\%$ obciążenia znamionowego) wynika, że stałe czasowe znacznie się różnią w funkcji amplitudy wymuszenia, co dowodzi silnej nieliniowości układu. Odpowiedź skokowa modelu wykazuje wystarczającą zgodność z odpowiedzią kolumny rzeczywistej.
3. Jak wykazała analiza stabilności, istniejący układ z regulatorem PI jest "warunkowo niestabilny strukturalnie", tzn. przy istniejącym ograniczeniu

realizowanych nastaw czasu zdwojenia konwencjonalnych regulatorów przemysłowych $T_i \leq 0,5$ h nie można dobrać takich nastaw regulatora, które zapewniłyby stabilność układu w całym zakresie obciążeń eksploatacyjnych kolumny.

4. Zmniejszenie stałej czasowej T przetwornika temperatury przynosi decydującą poprawę stabilności układu przy znamionowym obciążeniu kolumny.
5. Opierając się na zdjętych charakterystykach amplitudowo-fazowych modelu kolumny można w sposób zadowalający wyjaśnić mechanizm ustalania się granicznego cyklu drgań w układzie. Decydującą rolę w tym mechanizmie odgrywają, jak już wspomniano, nieliniowość charakterystyki statycznej urządzenia przelewowego oraz nieliniowość związana z ograniczeniem od dołu objętości strefy mieszania.
6. Fakt ustalania się granicznego cyklu drgań umożliwia dobieranie nastaw regulatora spoza obszaru stabilności, przy czym ze wzrostem nastawy proporcjonalnej wzrasta częstotliwość drgań. Tłumaczy to, zaobserwowaną na obiekcie tendencję obsługi do nastawiania maksymalnej wartości wzmocnienia regulatora, co - przy istniejącej dużej stałej czasowej przetwornika temperatury ($T = 8$ min) - prowadzi do zmniejszenia amplitudy składowej zmiennej sygnału wyjściowego \dot{V}_T tego przetwornika, który to sygnał jest rejestrowany jako podstawowy parametr procesu.
7. Amplituda i częstotliwość drgań własnych modelu kolumny dla nastaw tkwiących głęboko w obszarze niestabilności pokrywają się z amplitudą i częstotliwością drgań zarejestrowanych dla kolumny rzeczywistej. W obu przypadkach ze zmniejszeniem się częstotliwości drgań pojawiają się podobne odkształcenia przebiegów w postaci wysmuklenia górnych półokresów, co potwierdza prawidłowość modelu.
8. Wnioski wyciągnięte z badań modelu kolumny pozwoliły zaproponować przeniesienie przetwornika temperatury z gazu do cieczy i właściwe usytuowanie punktu pomiarowego. Rozwiązanie to zostało wypróbowane na jednej z kolumn karbonizacyjnych w Janikowskich Zakładach Sodowych i doprowadziło do jej stabilizacji, a obecnie jest powielane na pozostałych kolumnach. Rozwiązanie to jest przedmiotem wniosku patentowego.

Literatura

- [1] Bogucki A.: Model matematyczny i analiza drgań recyklu CO_2 w procesie produkcji sody. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1974.
- [2] Bogucki A.: Analiza drgań w recyklu CO_2 w procesie produkcji sody w Janikowskich Zakładach Sodowych. Archiwum PIAP nr rejestr.1345.