

Dr inż. Zbigniew Świder
Prof. dr h. inż. Leszek Trybus
Mgr inż. Lucjan Pelc
Politechnika Rzeszowska

BADANIA OBIEKTOWE SAMOSTROJENIA I ADAPTACJI REGULATORA RF-537

Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych i przemysłowych algorytmów samostrojzenia i adaptacji zastosowanych w uniwersalnym regulatorze kaskadowym RF-537. Celem jest uzyskanie przebiegów o zadanym przeregulowaniu i krótkim czasie regulacji. Badania doprowadziły do takiego rozszerzenia oprogramowania, że obecnie RF-537 stał się dostatecznie „przyjazny” i odporny.

SELF-TUNING AND ADAPTIVE CONTROL FIELD TRIALS OF RF-537 CONTROLLER

Results of lab and field trials of self-tuning and adaptive control algorithms implemented in RF-537 general purpose cascade controller are presented. Objective is to obtain responses with prescribed overshoot and short settling time. The trials have resulted in extension of RF-537 software, such that the controller have become sufficiently user-friendly and robust.

1. WPROWADZENIE

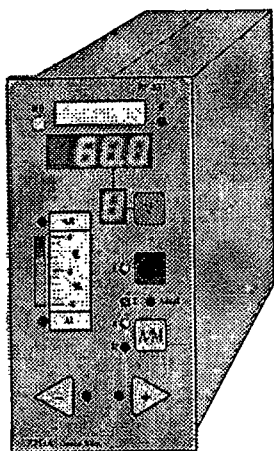
Regulatory i sterowniki aparaturowe można podzielić na jednoobwodowe, kaskadowe i wielofunkcyjne. Regulatory kaskadowe są z reguły regulatorami uniwersalnymi, zawierającymi kilkanaście prekonfigurowanych struktur układów automatyki odpowiednich dla większości procesów. Przykładami mogą być SIPART DR 22 - Siemens, Protronic 100 i Digitric 500 - Hartmann-Braun, UDC 6300 - Honeywell, Commander 355 - ABB, 763C - Foxboro. Każdy z nich ma możliwość samostrojzenia, ale tylko UDC 6300 i 763C są regulatorami adaptacyjnymi. Krajowym kaskadowym regulatorem adaptacyjnym jest RF-537¹ z ZPDA Ostrów Wlkp., którego oprogramowanie opracowano w Politechnice Rzeszowskiej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań obiektowych algorytmów samostrojzenia i adaptacji zastosowanych w RF-537. Samostrojzenie jest prowadzone metodą przekąźnikową [1], a adaptacja metodą „kroczenia” po wzorcowych powierzchniach przeregulowania i częstotliwości [2]. Badania ujawniły kilka nowych problemów, które musiały być rozwiązane, aby regulator stał się dostatecznie „przyjazny” i odporny. Przez odporność rozumie się stabilną pracę w sytuacjach, które mogą się zdarzyć w automatyzacji procesów przemysłowych.

¹ Regulator powstał w ramach projektu KBN T11A 006 96 C/2889

2. REGULATOR RF-537

Podstawowymi cechami aktualnej wersji RF-537 są (por. [3]):



Rys.1. Regulator RF-537

- wejścia/wyjścia: 4 AI + 2 AO, 6 BI + 7 BO (AI - wejścia analogowe, BO - wyjścia binarne itp.)
- 13 prekonfigurowanych struktur: stałowartościowa, stosunku, kaskadowa, DDC, SPC itd.
- sygnał sterujący: ciągły, 3-pozycyjny ze sprzężeniem lub bez, 2-pozycyjny modulowany
- współpraca ze stacją sterowania ręcznego lub PLC, kontrola siłownika, praca redundancyjna
- samostrojenie, adaptacja, programowa zmiana nastaw; komunikacja MODBUS
- mikrokontroler SAB 80C537, 128K EPROM, 32K RAM, 4K EEPROM, RTC.

W skład oprogramowania uzupełniającego dla komputera PC wchodzi symulator regulatora RF-537, konfigurator graficzny prezentujący na ekranie schematy struktur oraz program do transmisji danych konfiguracyjnych i wizualizacji przebiegów.

Podczas pracy regulatora w trybie samostrojenia lub adaptacji transmitancja PID ma szczególną postać [3]

$$\text{PID: } k\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{(T_d/D)s + 1}\right) = k_p (D+1) \frac{(s+z)^2}{s(s+vz)} = k_p 6.2 \frac{(s+z)^2}{s(s+10z)}, \quad (1a)$$

gdzie $D = 5.2$, $z = 1.916/T_i$, $T_d/T_i = 0.23$ i $vz = D/T_d$. Jest to więc PID „o podwójnym zerze”. Transmitancja PI ma pojedyncze zero

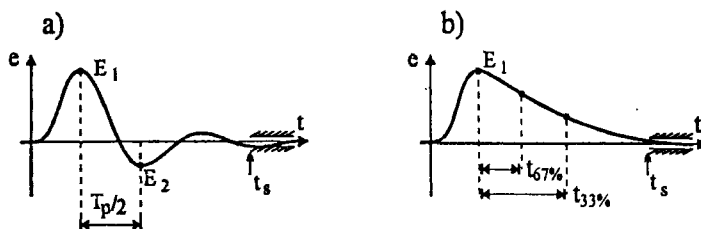
$$\text{PI: } k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = k_p \frac{s+z}{s} \quad (1b)$$

W obydwu przypadkach występują dwie niezależne nastawy - k_p i z . Umożliwia to prowadzenie adaptacji tym samym algorytmem.

Celem samostrojenia i adaptacji jest uzyskanie przebiegów o zadanym przeregulowaniu OVS^* (*overshoot*) i krótkim czasie regulacji t_s (*settling time*). Przeregulowanie jest zdefiniowane jak w znanym algorytmie EXACT Foxboro [1], tj.

$$OVS = -\frac{E_2}{E_1} \quad (2)$$

za pomocą „pików” E_1, E_2 przebiegu błędów $e(t)$ przy skokowym zakłóceniu na wejściu obiektu (rys.2a, $E_2 < 0$). Warto dodać, że w algorytmie Foxboro potrzebny jest jeszcze trzeci pik - E_3 . Oprócz E_1, E_2 regulator RF-537 określa półokres $T_p/2$, a w przypadku przebiegu aperiodycznego (rys.2b), czasy $t_{67\%}$ i $t_{33\%}$, po których błąd maleje odpowiednio do 67% i 33% wartości E_1 .



Rys.2. Typowe przebiegi błędów $e(t)$ przy zakłóceniach skokowych: a) oscylacyjny, b) aperiodyczny

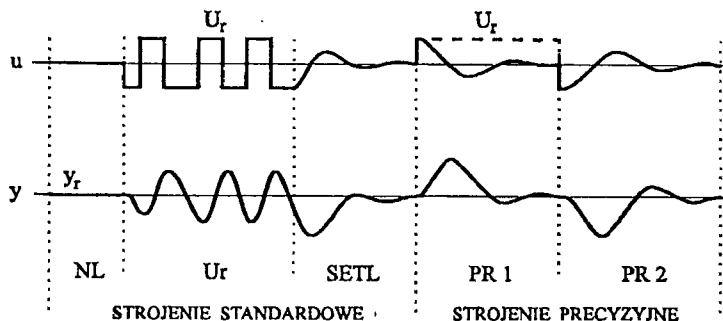
3. PRZEBIEG SAMOSTROJENIA

Najpierw należy doprowadzić proces do stanu ustalonego i dopiero wtedy aktywować samostrojzenie (nazywane SELF w RF-537). Obejmuje ono *strojenie standardowe* i *strojenie precyzyjne*. Typowe przebiegi pokazano na rys.3. Strojenie standardowe składa się z 3 faz:

- określenie poziomu szumu NL (noise level)
- sterowanie przekąźnikowe z amplitudą U_r
- ustalanie SETL z nastawami PID określonymi przez sterowanie przekąźnikowe.

Określanie NL trwa 3 minuty, po czym RF-537 wybiera strefę histerezy H tak, aby z dostatecznym zapasem objęła NL i uruchamia przekąźnik [1]. Na podstawie amplitudy zmian wyjścia, okresu drgań i poziomu NL wybiera algorytm PID lub PI i określa nastawy. Są one podobne jak u Zieglera-Nicholsa, ale z nieco słabszym wzmocnieniem a silniejszym całkowaniem, tzn. $k_p = 0.4k_{cr}$, $T_i = 0.35T_{cr}$, $T_d = 0.23T_i$ dla PID. Wynikowy przebieg jest wtedy na ogół 2-go rzędu (rys.2).

Po wyznaczeniu nastaw, RF-537 zastępuje przekąźnik przez blok PID, który w fazie SETL sprowadza błąd regulacji do zera. Z przebiegu SETL jest określone OVS i półokres $T_p/2$ (lub $t_{67\%}$, $t_{33\%}$). Jeżeli OVS okazuje się dostatecznie bliskie OVS^* , na tym strojenie standardowe się kończy. Tym niemniej, na podstawie różnicy $OVS - OVS^*$ oraz półokresu $T_p/2$ regulator dokonuje jeszcze pewnej korekty nastaw, aby w pełni wykorzystać SETL. Metoda korygowania jest taka sama jak w adaptacji (p.4).



Rys.3. Typowe przebiegi sterowania u i wyjścia y podczas samostrojzenia SELF

Jeżeli OVS uzyskane w SETL odbiega wyraźnie od zadanego OVS^* , RF-537 przeprowadza strojenie precyzyjne PR (na żądanie operatora). Sygnał wytworzony przez blok PID jest

zwiększany o U_r , i suma $u_{PID} + U_r$, podawana na obiekt. Skutek jest taki, jakby rzeczywiście wystąpiło zakłócenie skokowe. Z przebiegu PR1 (rys.3) regulator określa nowe OVS i $T_p/2$, po czym znowu koryguje nastawy, aby uzyskać OVS^* . Następnie dodatkowe U_r zostaje usunięte, co także wygląda jak zakłócenie skokowe, tyle że w przeciwnym kierunku. RF-537 monitoruje przebieg PR2, określa OVS i $T_p/2$, po czym po raz trzeci koryguje nastawy (wliczając SETL). Jeżeli wymaga się szczególnej precyzji, impuls bramkowy $\pm U_r$ można powtórzyć.

4. METODA ADAPTACJI

Metodę tę RF-537 wykorzystuje podczas ustalania SETL, strojenia precyzyjnego PR oraz podczas właściwej adaptacji ADPT. W ADPT bierze pod uwagę tylko takie przebiegi, gdzie E_1 przynajmniej kilkakrotnie przekracza poziom szumu NL . Wymaga to oczywiście dostatecznie silnego zakłócenia lub wyraźnej skokowej zmiany wielkości zadanej (co na ogół nie zdarza się często). Idea metody wygląda następująco [2].

Przebiegi pokazane na rys.2 można opisać funkcją

$$E(s) = \frac{c}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (3a)$$

gdzie

$$\xi = \frac{|\ln OVS|}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 OVS}}, \quad \omega_n = \frac{2\pi}{T_p \sqrt{1 + \xi^2}} \quad (3b)$$

w przypadku przebiegu oscylacyjnego. Jeżeli przebieg jest aperiodyczny, ξ i ω_n wyznacza się na podstawie $t_{67\%}$, $t_{33\%}$. Dysponując wartością ω_n , regulator określa *względna częstotliwość naturalną* OMN jako

$$OMN = \frac{\omega_n}{z}, \quad (4)$$

czyli odnosi ω_n do zera z (zob. (1a, b)). Wartości OVS i OMN służą do tzw. „kroczenia” po wzorcowych powierzchniach.

Podczas korygowania nastaw regulator traktuje każdy obiekt tak samo jak *wzorzec*, którym jest

$$G_o(s) = \frac{k_o}{Ts + 1} e^{-\tau s}; \quad \text{gdzie } T = \tau, \quad (5)$$

czyli *opóźnienie równa się stałej czasowej*. Dla takiego obiektu ma zapisane w pamięci EPROM wartości przeregulowania OVS i względnej częstotliwości OMN jako funkcji dwu zmiennych

$$a = \log(z\tau), \quad b = \log(k_p k_o) \quad (6)$$

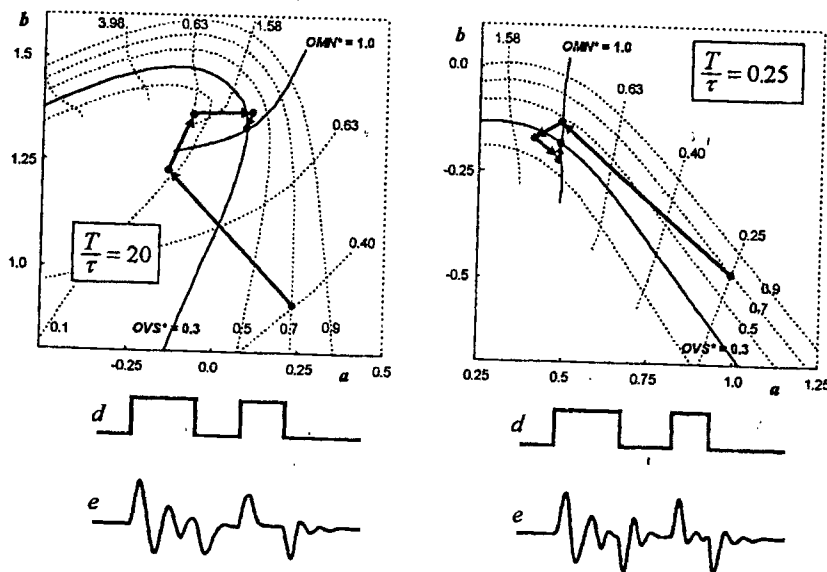
(logarytmy z względnego zera i globalnego wzmocnienia). Można też mówić o *powierzchniach* $OVS(a, b)$, $OMN(a, b)$. Krzywe na płaszczyźnie (a, b) , dla których $OVS = const$ i $OMN = const$, będą nazywane *poziomicami* (por. rys.4). Powierzchnie te otrzymano za pomocą Matlab'a (jedną parę dla PID, drugą dla PI), symulując odpowiedzi na zakłócenia skokowe dla dostatecznie gęstej siatki punktów na płaszczyźnie (a, b) .

W [2] pokazano, że krótki czas regulacji t_r (w pobliżu *min* t_r) uzyskuje się dla $OMN = 1.0$. Dotyczy to nie tylko wzorca z $T = \tau$, ale obiektów o dowolnym stosunku T/τ , zarówno mniejszym, jak i większym od 1. W tej sytuacji przecięcie poziomicy $OVS = OVS^*$ i

$OMN = OMN^* = 1.0$ określa współrzędne docelowego punktu (a^*, b^*) , który zapewnia zadane przeregulowanie i krótki czas regulacji (rys.4). Jeżeli więc dany jest jakikolwiek inny punkt (a', b') na przecięciu poziomicy OVS' , OMN' , to na podstawie odległości $(\Delta a', \Delta b')$ można będzie korygować nastawy. Algorytm wygląda z grubsza następująco.

1. Załóżmy, że dla pewnych nastaw k_p^i , z^i otrzymano przebieg scharakteryzowany przez E_1^i , E_2^i , $T_p^i / 2$ (lub $t_{67\%}^i$, $t_{33\%}^i$), skąd obliczono OVS^i , OMN^i
2. Na podstawie wzorcowych powierzchni $OVS(a, b)$, $OMN(a, b)$ określamy współrzędne (a', b') przecięcia poziomicy OVS^i , OMN^i
3. Wyznaczamy współrzędne (a^*, b^*) punktu docelowego na przecięciu poziomicy OVS^* i $OMN^* = 1.0$
4. Określamy odległości $\Delta a^i = a^* - a'$, $\Delta b^i = b^* - b'$ i nowe nastawy

$$k_p^{i+1} = k_p^i \cdot 10^{\Delta b^i}, \quad z^{i+1} = z^i \cdot 10^{\Delta a^i} \quad (7)$$



Rys.4. Trajektorie zbieżności na płaszczyźnie (a, b) i przebiegi czasowe dla $T/\tau = 20$ i $T/\tau = 0.25$ (d - zakłócenie)

Jeżeli $T/\tau = 1$, a więc jak we wzorcu, algorytm dochodzi do punktu docelowego w jednym kroku (gdy nie ma szumu). Na rys.4 pokazano trajektorie zbieżności dla dwu obiektów zdecydowanie odbiegających od wzorca, jednego z $T/\tau = 20$ - znikome opóźnienie, drugiego z $T/\tau = 0.25$ - dominujące opóźnienie. Punkt startowy wybrano dla $OVS = 0.7$ (silne oscylacje), a docelowy dla $OVS^* = 0.3$. Ponieważ poziomice wzorca $T/\tau = 1$ nie odbiegają zbytnio od poziomicy dla $T/\tau < 1$ (zob. [2]), więc zbieżność dla $T/\tau = 0.25$ nastąpiła szybciej.

5. BADANIA OBIEKTOWE

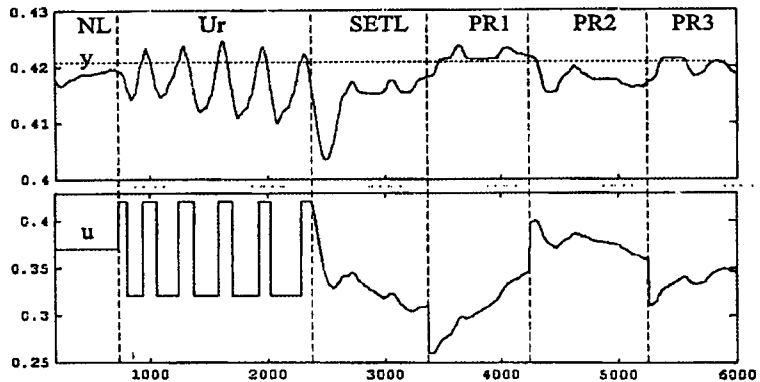
5.1. Charakterystyka ogólna

Regulator RF-537 testowano najpierw dla obiektów symulowanych na sterowniku wielofunkcyjnym PSW. Potem przeprowadzono badania układów regulacji dwu obiektów laboratoryjnych (wyjście - sterowanie, obiekt):

- temperatura radiatora - prąd grzania, model obiektu cieplnego - Lucas-Nülle D
- poziom w zbiorniku - dopływ wody, zestaw Procon - Feedback UK.

Następnym krokiem były obiekty przemysłowe² - wymiennik i kotły w Fabryce Wódek POLMOS Łańcut i Elektrociepłowni Rzeszów, tzn.:

- temperatura za wymiennikiem - dopływ pary, wymiennik 0.3m³/1.6MPa - Łańcut
- podciśnienie w komorze paleniskowej kotła - ustawienie żaluzji w kanale wentylatora odciągu spalin, kocioł parowy OR-10 - Łańcut
- temperatura na wyjściu kotła - sterowanie podmieszaniem, kocioł OR-10 - Łańcut
- zawartość O₂ w spalinach - podmuch do komory spalania (fałownik), kocioł wodny WR-25, Rzeszów
- poziom w zbiorniku odgazowania - dopływ wody, kocioł pyłowy WP-120, Rzeszów.



Rys.5. Przebiegi regulacji temperatury na wyjściu kotła OR-10 podczas samostrojzenia standardowego i precyzyjnego

Testowano zarówno samostrojzenie standardowe jak i precyzyjne. W celu sprawdzenia adaptacji, nastrojony regulator rozstrajano ręcznie zmieniając nastawy, a następnie pobudzając go niewielkimi zmianami wielkości zadanej obserwowano jak ponownie się zaadaptuje. Część układów ze względu na nieliniowości i ciągłe zakłócenia pracowała w warunkach daleko odbiegających od zakładanych. Przykładem mogą być przebiegi regulacji temperatury na wyjściu kotła OR-10 pokazane na rys.5. Warto jednak zwrócić tu uwagę na rzeczywistość nieduże zmiany y - do 1.5%, które zazwyczaj wystarczają regulatorowi RF-537 do samostrojzenia. Jest zrozumiałe, że znacząca zmiana dynamiki była możliwa tylko w przypadku obiektów laboratoryjnych. Powodowała ją wyraźna zmiana punktu pracy lub dodatkowe stałe zakłócenie (chłodzenie radiatora wentylatorem, otwarcie upustu w zbiorniku).

² Autorzy dziękują za pomoc inżynierom Andrzejowi Postawie (Łańcut) i Adamowi Nowosielskiemu (Rzeszów)

Badania obiektowe ujawniły kilka nowych problemów, które należało rozwiązać rozszerzając stopniowo oprogramowanie RF-537.

5.2. Problemy samostrojania

Napotkano na 4 główne problemy:

- małe wzmocnienie obiektu
- trudność doprowadzenia do stanu ustalonego
- dryfowanie
- nieliniowość.

W większości regulatorów samonastrajalnych „milcząco” zakłada się, że wzmocnienie obiektu, tzn. k_o w (5), nie odbiega drastycznie od 1.0 i wynosi np. 0.4...2.5. Z tego względu amplituda U_r sterowania przekąźnikowego jest ograniczona nawet do 10% [1] (również w RF-537). Okazało się tymczasem, że w niektórych, niezbyt szczęśliwie zaprojektowanych obiektach, wzmocnienie bywa nawet 0.2. Regulator powinien więc umożliwiać „sztuczne” zwiększenie wzmocnienia. Wykorzystano w tym celu współczynniki c_i toru określania wyjścia y , który w RF-537 funkcjonuje według wzoru $y=c_1y_1+c_2y_2+c_o$ (y_1, y_2 - wejścia analogowe).

W kotłach OR, WR i WP ze względu na rozmaite interakcje, doprowadzenie do stanu ustalonego okazuje się autentycznie trudne, więc po paru nieudanych próbach użytkownik może się zniechęcić (RF-537 alarmuje, gdy w ciągu początkowych 3 minut rozpozna, że proces nie jest w stanie ustalonym). Oprogramowanie zmodyfikowano więc tak, że gdy druga próba okazała się nieudana, RF-537 przyjmuje *a priori* odpowiednio dużą wartość NL i rozpoczyna sterowanie przekąźnikowe. Informuje jednak, że NL przyjęto z zapasem, co rzutuje na wybór PI lub PID podczas samostrojania. Dla adaptacji nie ma to jednak większego znaczenia, bo obejmuje ona monitorowanie poziomu szumu (zob. niżej).

Dryfowanie błędu $e(t)$ podczas samostrojania, jak to widać na rys.5, jest spowodowane przez wolnozmiennne zakłócenia, których nie da się uniknąć. Procedura określania amplitud podczas sterowania przekąźnikowego musi to tolerować.

Nieliniowość powoduje, że przebiegi $e(t)$ odpowiadające włączaniu/wyłączaniu przekąźnika są niesymetryczne, w sensie amplitudy i czasu (rys.5). Stopień asymetrii bywa nawet kilkakrotny, co powoduje, że wyznaczone nastawy mogą nie dać oczekiwanych przebiegów. Większość regulatorów rezygnuje wtedy z samostrojania. RF-537 poprzez SETL i strojenie precyzyjne jest w stanie, pomimo nieliniowości, w miarę zadowalająco się nastroić.

5.3. Problemy adaptacji

Metodę adaptacji opisaną w p.4 rozszerzono, aby uwzględniała następujące sytuacje:

- zmiana poziomu szumu NL
- niedopuszczenie do gwałtownych ruchów urządzenia wykonawczego
- strefa nieczułości błędu regulacji
- ograniczenia sterowania, zwłaszcza w układzie kaskadowym.

RF-537 stosuje algorytm PID, jeśli zachodzi warunek (por. [4])

$$\text{PID: } k_p(D+1)NL < \frac{2}{3}LIM \quad (8)$$

($D = 5.2$, p.2), gdzie LIM oznacza strefę martwą urządzenia wykonawczego (parametr). Jeśli (8) nie zachodzi, RF-537 stosuje PI. W niektórych obiektach poziom szumu NL ulega zmianie,

zazwyczaj wraz z punktem pracy. Z tego względu regulator został wyposażony w górnoprzepustowy filtr błędu e , który wraz z kilkoma dodatkowymi blokami określa aktualne NL . Wyraźne zmiany NL powodują przejście z PID na PI lub odwrotnie.

W przypadku niedostatecznej filtracji wejść analogowych sygnał sterujący zawiera składową wysokoczęstotliwościową, która gdyby przekroczyła LIM, spowoduje gwałtowne ruchy urządzenia wykonawczego (siłownika). Dotyczy to zwłaszcza obiektów o znikomym opóźnieniu, gdzie wzmocnienie k_p jest duże. Aby temu zapobiec, drugi filtr górnoprzepustowy określa poziom wysokoczęstotliwościowej składowej sterowania, a gdy osiąga ona LIM zmniejsza k_p o połowę (zabezpieczenie takie stosuje Foxboro [5]).

Może się zdarzyć, że użytkownik zamiast usunąć szum filtrem na wejściu analogowym ustawi pewną strefę martwą w torze błędu e . W odniesieniu do przebiegów skutek jest taki, jakby nastąpiła redukcja k_p , ale w stopniu odwrotnie proporcjonalnym do e . RF-537 uwzględniła strefę martwą za pomocą funkcji opisującej Stopień korekty nastaw zależy od wielkości e (małe e - mała korekta).

Ograniczenia sterowania nie są większym problemem w regulacji jednoobwodowej, bo na ogół nie występują często i z korekty nastaw można by wtedy zrezygnować. Nie dotyczy to jednak regulacji kaskadowej, gdzie każde silniejsze zakłócenie lub zmiana wielkości zadanej powoduje, że sterowanie generowane przez regulator wewnętrzny jest przejściowo ograniczane od góry lub od dołu. Podobnie jak wyżej, przebiegi wyglądają wówczas tak, jakby nastąpiła redukcja k_p . RF-537 toleruje ograniczenie sterowania określając stopień redukcji na podstawie stosunku czasu trwania ograniczenia do półokresu $T_p/2$. Uwzględniła to korygując nastawy, mniej więcej tak jak dla nieczułości.

Powierzchnie $OVS(a,b)$ i $OMN(a,b)$, po których „kroczy” regulator zmierzając do celu są wyznaczone dla zakłóceń skokowych. Zdarzają się jednak inne zakłócenia, np. impulsowe lub bramkowe, po których błąd e również osiąga znaczne wartości i aktywuje adaptację. Okazuje się, że w takim przypadku punkt docelowy na powierzchni $OVS(a,b)$ przesuwa się nieco w stronę mniejszych przeregulowań, czyli dalej od granicy stabilności. Jest to oczywiście bezpieczne. Zakłócenie pulsujące, tzw. „dzwonienie”, jest traktowane jako granica stabilności powodując gwałtowną redukcję k_p i z (w ten sam sposób zachowuje się Foxboro [5]).

Jeśli podczas adaptacji jedna z nastaw osiągnęła granicę zakresu, RF-537 w większym stopniu koryguje drugą, ale rozpoczyna alarmowanie wzywając operatora.

(Podsumowanie pominięto z braku miejsca (zob. ew. streszczenie). Zdaniem autorów, czytelnik powinien zwrócić uwagę zwłaszcza na p.5.2 i 5.3.)

LITERATURA

- [1] K.J. Åström, B. Wittenmark: *Adaptive Control* (2nd edn.); Addison-Wesley, Reading, MA, 1995.
- [2] Z. Świder, L. Trybus: *Adaptive tuning of PID controller using template surfaces*; IFAC Workshop on Adapt. Syst. in Control & Signal Proc., Glasgow, August, 1998, 327-332.
- [3] Z. Świder, L. Trybus: *Samostrajanie i adaptacja w regulatorze przemysłowym RF-537*; AUTOMATION'97, marzec, 1997, 221-232.
- [4] M.A. Fertik: *Tuning controllers for noisy processes*; ISA Trans., v.14, no.4, 1975, 292-304.
- [5] B.J. Minter: *A comparison of adaptive controllers: academic versus industrial*; MSc thesis, University of Alberta, Chem. Eng. Dept., Edmonton, 1987.