

## 12. SAMOSTROJENIE, ADAPTACJA, PROGRAMOWA ZMIANA NASTAW

*Samostrojanie*, albo samonastrajanie, jest operacją samoczynnego doboru nastaw PID na podstawie danych pomiarowych pochodzących z eksperymentu inicjowanego przez operatora. *Adaptacja* służy temu samemu, ale dane pomiarowe regulator wybiera automatycznie z przebiegów regulacyjnych pracującego układu.

Celem samostrojania i adaptacji jest wyznaczenie nastaw PID zapewniających szybki zanik błędu regulacji  $e$ , a zarazem takich, że przebiegi  $e(t)$  mają zadane przeregulowanie zapewniając odpowiednie tłumienie zakłóceń.

Przebiegi mogą być gładkie (aperiodyczne) lub oscylacyjne. Przy przebiegach oscylacyjnych regulator lepiej tłumí zakłócenia, ale kosztem większej aktywności sterowania.

Samostrojanie i adaptacja są możliwe tylko dla sterowania ciągłego i 3-pozycyjnego ze sprzężeniem ( $OUT=CONT, 3POS$ ). Eksperymentem służącym do standardowego samostrojania jest *sterowanie przekaźnikowe*. RF-537 może również przeprowadzić samostrojanie precyzyjne, podczas którego bada reakcję układu na bramkowe sygnały testujące i odpowiednio koryguje nastawy. Adaptację wykorzystuje się do sterowania procesami, których dynamika z czasem ulega zmianom. RF-537 bierze jednak pod uwagę tylko takie przebiegi  $e(t)$ , których wartości wyraźnie przekraczają poziom szumu pomiarowego. Programowa zmiana nastaw pozwala uzależnić nastawy od punktu pracy wyznaczonego przez określony sygnał. Krzywe, według których następuje uzależnienie są parabolami. Wyznacza się je przez 3-krotne samostrojanie w różnych punktach zakresu.

### 12.1. Przełączniki i parametry

Tryby nastawiania bloków  $PID_1, PID_2$ , tzn.: wyłącznie przez operatora  $CNST$ , samostrojanie  $SELF$ , programowa zmiana nastaw  $GAIN$ , adaptacja  $ADPT$ , określają:

#### *Przełączniki konfiguracyjne*

- $MOD1$  - tryb nastawiania bloku  $PID_1$ :  $CNST, SELF, GAIN, ADPT$        $SELF$
- $MOD2$  - j.w. ale  $PID_2$ :  $CNST, SELF, GAIN$

Wartością pierwotną (*default*) jest  $SELF$ , co wskazuje na samostrojanie jako podstawowy sposób nastawiania. Wchodzi ono zresztą również w skład  $GAIN$  i  $ADPT$ . Blok  $PID_2$ , czyli regulator podrzędny w układzie kaskadowym, nie może pracować w trybie  $ADPT$ .

Parametry trybów  $SELF$  i  $ADPT$ , podane w kolejności w jakiej pojawiają się na wskaźniku, są następujące

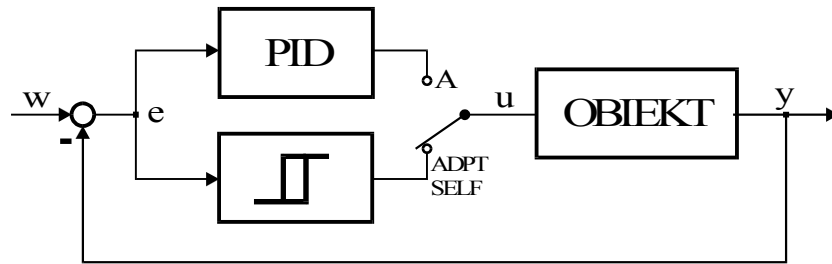
(.1 dotyczy  $PID_1$ , .2 -  $PID_2$ ):

#### *Parametry on-line (dane)*

- |         |   |         |
|---------|---|---------|
| $UO.1$  | - początkowa amplituda przekaźnika ( $PID_1$ ): 3...10% | $UO.1$  |
| $LIM$   | - strefa martwa urządzenia wykonawczego: 0.1...5%       | $LIM$   |
| $OVS.1$ | - przeregulowanie $e(t)$ : $stnd, 0.0...0.7$            | $OVS.1$ |
| $Over$  | - reakcja na 4-krotną zmianę nastaw: $no, warn, clmp$   | $OVER$  |

Accp - akceptacja po samostrojeniu: no, yes  
 UO.2, OVS.2 -j.w. ale PID<sub>2</sub>

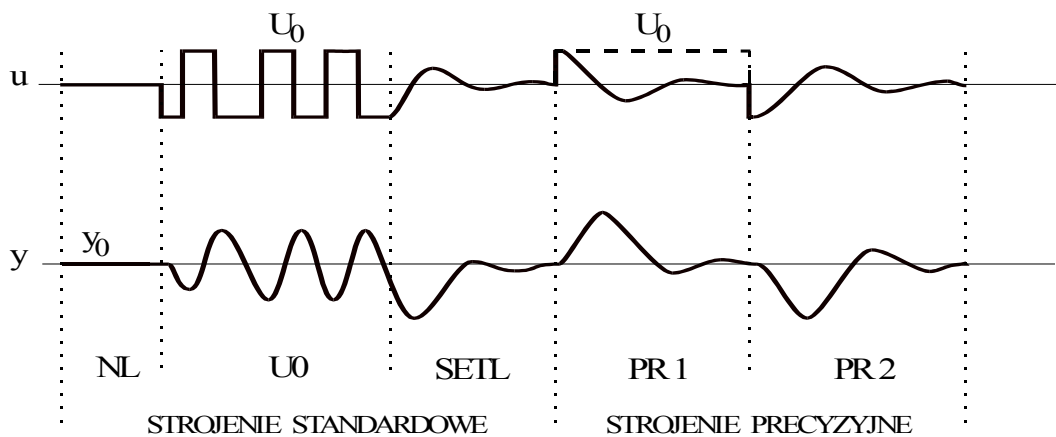
Accp  
 UO.2



Rys.12.1. Układ sterowania podczas samostrojzenia SELF

Znaczenie parametrów wyjaśniamy w odniesieniu do układu jednoobwodowego.

**UO.** Podczas SELF blok PID zostaje zastąpiony przez przełącznik, jak na rys.12.1. Amplitudą przełącznika jest  $U_o$ . Pozostaje ono również amplitudą impulsów bramkowych podczas strojenia precyzyjnego (rys. 12.2) oraz testowania adaptacji (p. 12.5).



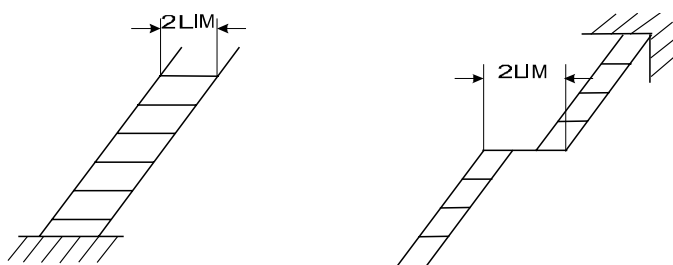
Rys. 12.2. Typowe przebiegi samostrojzenia SELF

**LIM.** Urządzenie wykonawcze powinno mieć jedną z charakterystyk pokazanych na rys. 12.3. W SELF i ADPT wzmocnienie  $K_p$  jest ograniczone do takiej wartości, że pozostałości szumu pomiarowego w sygnale sterującym mieszczą się w przedziale ### LIM (*limit*). W przeciwnym razie szum oddziaływałby na urządzenie wykonawcze. Jeżeli dla sterowania 3-pozycyjnego ( $OUT=3POS$ ) zachodzi warunek

$$LIM > LIM_{3POS} = \frac{t_p}{T_u} \cdot 100\%$$

gdzie  $t_p$  jest minimalnym czasem włączenia siłownika, a  $T_u$  czasem przestawiania (p.10.4), regulator bierze pod uwagę  $LIM_{3POS}$  a nie  $LIM$ .

Jeżeli użytkownik ma trudności z określeniem dokładnej wartości LIM charakteryzującej urządzenie wykonawcze, wtedy powinien ustawić ją z *nadmiarem*, a nie z *niedomiarem*.

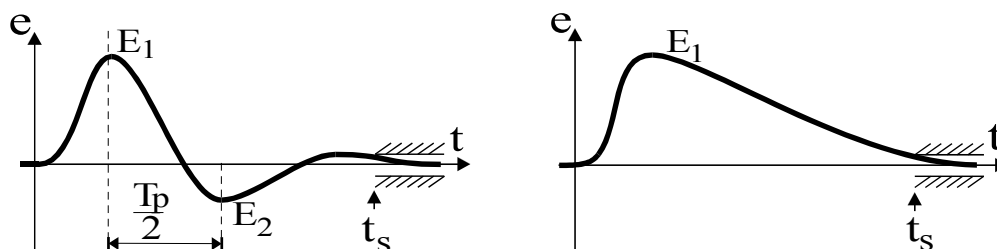


Rys. 12.3. Charakterystyka urządzenia wykonawczego

**OVS.** Przeregulowanie OVS (*overshoot*) są zdefiniowane jako

$$OVS = -\frac{E_2}{E_1}$$

za pomocą „pików”  $E_1$ ,  $E_2$  przebiegu błęd  $e(t)$  po skokowej zmianie zakłócenia (rys. 12.4). Dla przebiegu gładkiego (rys.12.4b), w którym  $E_2=0$ , mamy oczywiście  $OVS=0$ . Jak podano na wstępie, *celem SELF i ADPT jest doprowadzenie do przebiegu o zadanym przeregulowaniu OVS i możliwie krótkim czasie ustalania  $t_s$  (settling time).*



Rys.12.4. Typowe przebiegi błęd  $e(t)$  przy zakłóceniach skokowych: a) oscylacyjny -  $OVS > 0$ , (trzeci pik na ogół nie jest widoczny na tle szumu), b) gładki -  $OVS = 0$

Ustawienie  $OVS=stnd$  (*standard*) oznacza, że układ nie wymaga precyzyjnego nastrojenia. W takim wypadku RF-537 kończy SELF lub ADPT po uzyskaniu przebiegu, w którym faktyczne przeregulowanie mieści się w przedziale  $0...0.4$ . Przebieg ten może być albo gładki, albo słabo oscylacyjny.

**Over.** Parametr ten dotyczy wyłącznie adaptacji ADPT. Jeżeli jedna lub więcej nastaw PID zmieniła 4-krotnie wartość w stosunku do początkowej ustawionej wcześniej w SELF, wtedy RF-537 może:

- nie reagować -  $Over = no$
- alarmować, ale nie wstrzymując dalszych zmian -  $Over = warn$
- wstrzymać dalsze zmiany, jednocześnie alarmując -  $Over = clmp$  (*clamping*).

Jeśli trzeba, nowe wartości początkowe można ustawić w parametryzacji PARM (jako KP.0, Ti.0 itd. p. 12.5), albo określić je ponownie przechodząc do SELF.

**Accp.** Jeżeli nastawy PID wyznaczone w SELF mają być zaakceptowane przed zapisem do pamięci EEPROM (zob. następny punkt), wówczas ustawia się  $Accp = yes$ . W przeciwnym razie zostaną zapisane automatycznie ( $Accp = no$ ), po czym regulator przejdzie do stanu Auto podejmując według nich sterowanie.

## Uzupełnienia

**PID, PI.** Na podstawie poziomu szumu  $NL$ , własności dynamiczne obiektu oraz strefy martwej  $LIM$ , RF-537 ustala, czy zastosować działanie PID, czy PI ( $T_d=off$ ). Wiadomo, że działanie PI jest korzystniejsze przy znacznym poziomie szumu, dla obiektów inercyjnych bez opóźnień, obiektów o znacznym opóźnieniu oraz regulatora podrzędnego w kaskadzie.

$OUT=CONT$ , 3POS. Jak podano na wstępie, SELF i ADPT są możliwe tylko przy sterowaniu ciągłym CONT i 3-pozycyjnym 3POS (ze sprzężeniem). Sterowanie krokowe 3STP na to nie pozwala, ponieważ nie wiadomo, czy siłownik jest w stanie wykonać ruch zadany przez regulator. Z kolei przy sterowaniu dwupołożeniowym 2POS (p.11.2) ustawienie znacznego okresu fali prostokątnej  $T_w$  powoduje, że po przejściu przez obiekt wygląda ona jak stosunkowo silne zakłócenie periodyczne, którego filtr zmiennej procesowej nie jest w stanie usunąć.

Układ *kaskadowy*. Regulator podrzędny  $PID_2$  jest zawsze typu PI (w SELF i ADPT). Strojenie  $PID_2$  należy przeprowadzać w stanie Man. W stanie Auto jest strojony  $PID_1$ . W tym przypadku amplituda  $UO.I$  zmiany wielkości zadanej dla  $PID_2$ . Oczywiście najpierw należy nastroić  $PID_2$ , a potem  $PID_1$ .

*Nieczułość A*. Parametry OVS określa wymagane przeregulowanie dla układu bez strefy nieczułości A (p.9.1). Jeżeli więc ustawiono niezerowe  $A$ , to podczas SELF regulator tymczasowo przyjmuje  $A=0$ . Po SELF  $A$  wraca do poprzedniej wartości, co naturalnie redukuje działanie regulacyjne tym silniej im mniejszy błąd  $e$ . Zamiast przebiegów oscylacyjnych występują więc przebiegi gładkie i dopiero przy znacznych błędach  $e$  faktyczne przeregulowanie zbliży się do wymaganego.

## 12.2. Obsługa, przebieg i wynik samostrojania

Przed przystąpieniem do samostrojania należy upewnić się, czy stała czasowa  $AI.T$  filtru wejścia analogowego zmiennej procesowej jest odpowiednia. W układzie regulacji stosunku lub nadążnym należy także sprawdzić stałe czasowe filtrów tych wejść, które określają wielkość zadaną. Następnie trzeba:

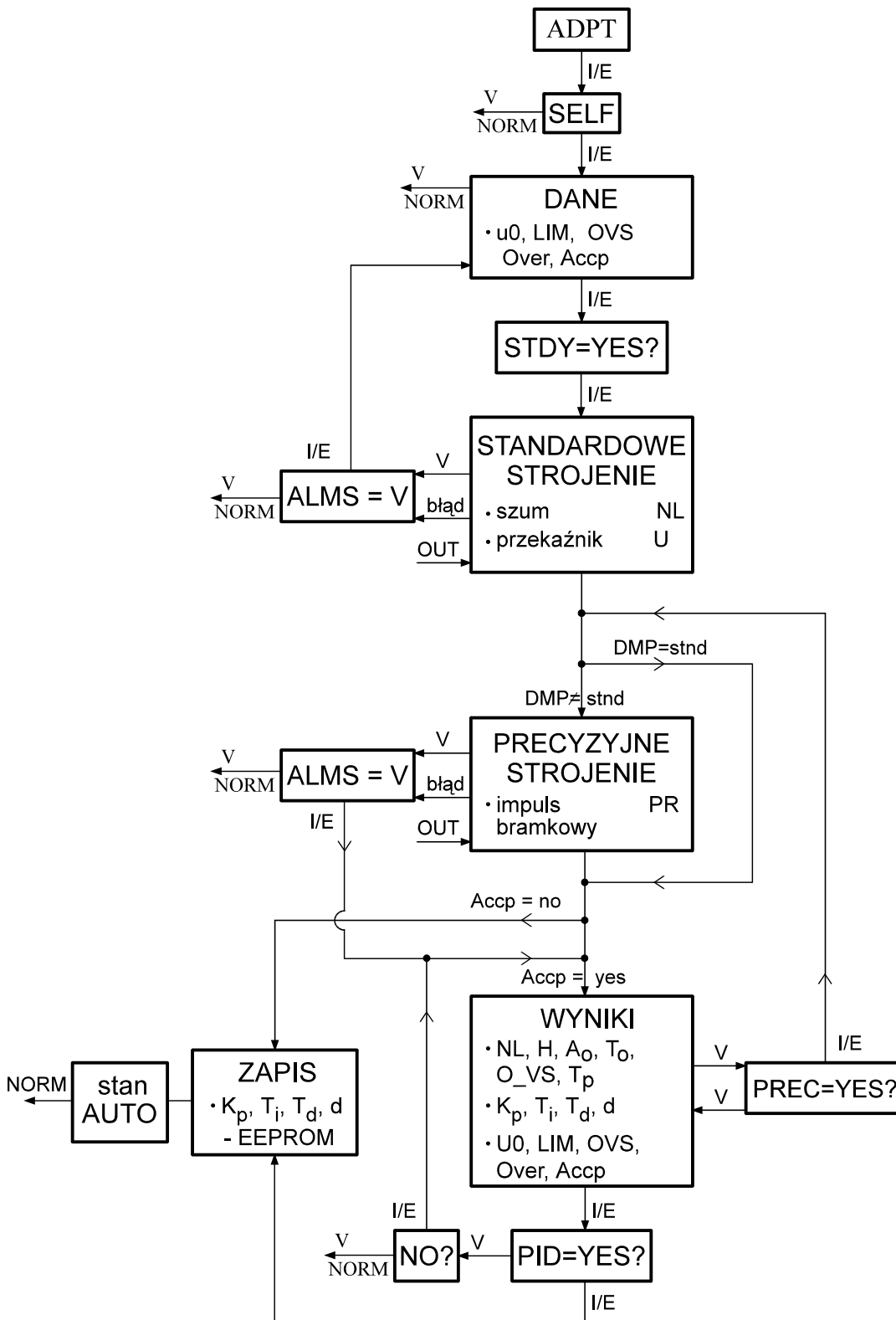
Doprowadzić proces do stanu ustalonego.

Jest to dla SELF warunek konieczny, którego ew. niespełnienie spowoduje alarm. Nie ma znaczenia, czy doprowadzenie do stanu ustalonego następuje w stanie Man, czy w Auto. Teraz na wskaźniku należy ustawić ADPT za pomocą przycisku V (p. 4.2). Po naciśnięciu I/E pojawia się napis SELF potwierdzający gotowość przejścia do następnego kroku (*Input/Enter*). Gdyby jednak nacisnąć V, RF-537 powróci do normalnej pracy NORM wyświetlając na wskaźniku wartość zmiennej wiodącej *NORI*. Podobnie będzie w następnych krokach, tzn.

Za pomocą przycisku I/E przechodzi się do kolejnych kroków SELF. Przycisk V umożliwia powrót do NORM.

Pełny schemat SELF podano na rys. 12.5. Operacje wykonywane w kolejnych krokach omówiono niżej.

**Dane.** Pierwszą *dana*, czyli parametrem, który pojawia się po następnym naciśnięciu I/E jest amplituda przekaźnika  $U_o$  prezentowana w cyklu *nazwa/wartość* (3+1s), podobnie jak podczas parametryzacji PARM. Znaczenie *danych*  $U_o$ , LIM, OVS, Over i Accp omówiono w poprzednim punkcie. Dane można przeglądać i ewentualnie zmieniać za pomocą przycisku A/M (*Alter/Move*) oraz przycisków trójkątnych (jak w PARM). Po naciśnięciu I/E przechodzimy do następnego kroku.



Rys. 12.5. Schemat samostrojzenia SELF

**STDY=YES?** Przełączane napisy STDY i YES? należy rozumieć jako ponowne pytanie o to, czy proces znajduje się już w stanie ustalonym (*steady*), a więc można rozpoczynać eksperyment. Naciśnięcie I/E oznacza odpowiedź pozytywną.

**Strojenie standardowe.** Przebiegi sterowania  $u$  i wejścia  $y$  podczas SELF pokazano poprzednio na rys. 12.2. Przez pierwsze 3 minuty regulator nie zmienia sterowania śledząc poziom szumu pomiarowego, którego ślady pozostały jeszcze w  $y$  pomimo filtracji. Na wskaźniku widnieje wtedy napis NL (*noise level*). Po 3 minutach RF-537:

- 1) wybiera strefę histerezy przekaźnika H, tak aby z dostatecznym zapasem objęła NL
- 2) ustawia tymczasem wielkość zadaną  $w$  na wartość  $y_0$  będącą średnią z  $y$  określaną w ciągu minionych 3 minut,

a następnie rozpoczyna *sterowanie przekaźnikowe*. Trwa ono aż drgania się ustalą, co zwykle wymaga 4 do 6 przełączeń. Przebieg błędu  $e(t)$  jest zapisywany do bufora RAM.

Na wskaźniku widnieje UO, a po nim numer przełączenia, tzn. UO 1, UO 2, itd. Gdy drgania się ustalą, regulator rejestruje ich amplitudę  $A_o$  i okres  $T_o$  oraz na podstawie wartości  $e(t)$  zapisanych w buforze wybiera algorytm PID lub PI określając nastawy zmodyfikowaną metodą Zieglera-Nicholsa (p. 12.4). Po określeniu nastaw przekaźnik jest zastępowany przez blok PID, który sprowadza błąd regulacji do zera (rys. 12.2). Z przebiegu zanikania określa się *aktualne przeregulowanie*  $O\_VS$  i okres  $T_p$  (rys. 12.4). Jeżeli przebieg jest gładki,  $T_p$  reprezentuje zastępczą stałą czasową. W momencie włączenia PID na wskaźniku pojawia się napis SETL (*settling*). Jeżeli RF-537 ma być nastrojony standardowo ( $OVS=stnd$ ), na SETL eksperyment się kończy. W przypadku gdy  $Accp=no$ , nastawy PID zostają zapisane do pamięci EEPROM, RF-537 przechodzi do stanu Auto i podejmuje sterowanie.

**Strojenie precyzyjne.** Jest przeprowadzane, jeżeli parametrowi  $OVS$  nadano konkretną wartość liczbową, np. 0.3, a nie *stnd*. Utrzymując nadal  $w=y_0$  regulator zmienia skokowo sygnał wytworzony przez blok PID o wartość  $U_o$  i sumę  $u=u_{PID}+U_o$  podaje na obiekt (ew.  $u_{PID}-U_o$ , p.12.5). Skutek jest więc taki, jakby rzeczywiście pojawiło się zakłócenie skokowe. Z rejestrowanego przebiegi  $e(t)$  regulator określa nowe  $O\_VS$  i  $T_p$ , po czym tak koryguje nastawy, aby następny przebieg osiągnął wymagane przeregulowanie zanikając przy tym możliwie szybko. Po pewnej zwłoce, która następuje po każdej zmianie nastaw, impuls bramkowy zostaje zakończony (rys. 12.2), czyli  $u=u_{PID}$ . Dla bloku PID wygląda to znów jak zakłócenie skokowe, tyle że w przeciwnym kierunku. RF-537 ponownie rejestruje przebieg, określa  $O\_VS$ ,  $T_p$  i po raz drugi koryguje nastawy. Jeżeli ostatnie  $O\_VS$  jest dostatecznie bliskie zadanemu  $O\_VS$  strojenie pozycyjne zostaje zakończone. Jeżeli nie, RF-537 generuje drugi impuls bramkowy. Należy podkreślić, że nastawy są korygowane dwukrotnie.

Ten sam algorytm jest stosowany w adaptacji (p. 12.5). Podczas strojenia precyzyjnego na wskaźniku widnieje PR wraz z numerem kolejnego skoku (PR 1, PR 2 itd.).

Liczba impulsów bramkowych jest ograniczona do dwóch. Gdyby drugi impuls nie doprowadził do precyzyjnego nastrojenia, regulator samoczynnie ustawia  $OVS=stnd$  generując jednocześnie ostrzeżenie  $warn=stnd$  (tabl. 12.3). Po potwierdzeniu ostrzeżenia naciśnięciem I/E automatycznie przechodzi do wyników.

Jeżeli strojenie precyzyjne zakończyło się pomyślnie, o dalszym postępowaniu decyduje flaga *Accp*.

**Wyniki.** Jeżeli  $Accp=yes$ , po zakończeniu strojenia standardowego lub precyzyjnego na wskaźniku pojawia się NL na przemian ze swą wartością (cykl 3+1s). Za pomocą przycisków trójkątnych można przeglądać wszystkie *wyniki bezpośrednie*, czyli

$NL, H, A_o, T_o, O\_VS, TP$

O<sub>VS</sub> i TP dotyczą ostatniego przebiegu  $e(t)$ . Wyników tych nie można zmieniać (przycisk A/M nieaktywny). Po nich można odczytać wartości ostatnich nastaw, które określiło SELF, czyli

$K_p, T_i, T_d, d$  - SELF, ADPT, GAIN

Pozostałe parametry bloku PID, tzn.  $u_o, A, ul, uH, c_3$  (p. 9.1) nie są objęte samostrojeniem, adaptacją ani programową zmianą nastaw. W przeciwieństwie do wyników bezpośrednich, nastawy  $K_p, T_i, T_d, d$  można ew. zmieniać (przycisk A/M aktywny, na razie nastawy rezydują jeszcze w pamięci RAM). Można także zmienić dane -  $U_o, LIM, OVS, OVER, Accp$ , co przydaje się, gdy strojenie precyzyjne ma być powtórzone. W normalnych przypadkach po przeglądnięciu wyników naciskamy I/E.

**PID=YES?** Przelączane napisy *PID, YES?* należy rozumieć jako żądanie potwierdzenia zapisu nastaw do EEPROM i zakończenia SELF z przejściem do Auto (rys. 12.5). Naciśnięcie I/E oznacza potwierdzenie. W Auto wielkość zadana w przyjmuje wartość odpowiadającą skonfigurowanej strukturze STR (rozdz.8).

**NO?** Jeżeli podczas wyświetlania *PID=YES?* naciśniemy V, RF-537 zinterpretuje to jako polecenie odrzucenia wyników. Pyta wtedy pulsującym *NO?*, czy rzeczywiście ma tak uczynić. Jeżeli naciśnięcie V było przypadkowe, po naciśnięciu I/E regulator wraca do wyników. Natomiast ponowne naciśnięcie V usuwa wyniki z pamięci powodując powrót do

**NORM**  
**PREC=YES?** Naciśnięcie V podczas wyświetlania wyników jest traktowane jako żądanie strojenia precyzyjnego (być może ponownego). Ponieważ wydłuży to SELF, regulator oczekuje na potwierdzenie pytając *PREC=YES?*. Po potwierdzeniu naciśnięciem I/E, RF-537 generuje impuls bramkowy  $U_o$  (rys. 12.2), wyświetla PR 1 itd. Ponowne naciśnięcie V podczas *PREC=YES?* powoduje powrót do wyników. Z *PREC=YES?* korzysta się na ogół wtedy, gdy po nastrojeniu standardowym i przeglądnięciu wyników uznano, że potrzebne jest jednak strojenie precyzyjne.

**V - przerwanie SELF.** Samostrojenie można w każdej chwili przerwać naciskając V, na co RF-537 reaguje alarmem  $ALMS=V$  (rys. 12.6, *alarm SELF*). Ponowne zaciśnięcie V powoduje powrót do NORM. Jeżeli jednak naciśniemy I/E, regulator wraca do *danych* lub wyników zależnie od tego, czy zostało przerwane strojenie standardowe, czy precyzyjne. RF-537 sam przerywa SELF, gdy wykrył błąd, np. niedoprowadzenie do stanu ustalonego, albo gdy sterowanie  $u$  zostało odłączone od wyjścia (*OUT*). W takim przypadku po  $ALMS$  pojawia się nie V, ale właściwy kod błędu (tabl. 12.2). Reakcja na naciśnięcie V lub I/E pozostaje taka sama.

Po naciśnięciu V regulator wraca w NORM do tego spośród stanów Man, Auto, w którym był przed SELF

## Uwagi

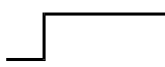


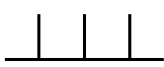
### 45 sekund. Jeżeli podczas wyświetlania napisów ADPT, SELF lub *danych* w ciągu 45 sekund nie zostanie naciśnięty żaden aktywny przycisk, to regulator wraca do NORM, podobnie jak w VIEW, LAMP, czy PARM (p. 4.2). Przez ostatnie 15 sekund wyświetlany napis pulsuje.

### SELF, RUN, STOP. Podczas wyświetlania ADPT, co 3 sekundy na moment pojawia się SELF (3+1s). Jeżeli regulator został skonfigurowany jako adaptacyjny, to oprócz SELF może pojawić się także RUN lub STOP (p. 12.5).

### LED Adapt, przycisk A/M i LED-y A, M

*Adapt.* Zachowanie LED-a Adapt w SELF ilustruje tabl. 12.1a. Podczas prezentacji *danych i wyników* Adapt *świeci*, a podczas strojenia standardowego i precyzyjnego *pulsuje*. Zachowanie po zakończeniu SELF zależy od trybu *MOD* (p. 12.1). Dla *MOD=CNST, SELF, GAIN* LED Adapt jest zgaszony, a dla *MOD=ADPT* *świeci* albo *pulsuje* (p. 12.5).

Tabl. 12.1. Zachowanie LED-ów podczas SELF: a) LED Adapt, b) LED-y A,M

Dane Wyniki	Strojenie	LED M	LED A
			

*A/M.* Podczas SELF przycisk A/M służy do przeglądania i ew. zmiany *danych i wyników*. W pozostałych krokach jest nieaktywny. Nie ma bowiem potrzeby dokonywania przełączeń Auto/Man, ponieważ z góry wiadomo, że po pomyślnym zakończeniu SELF regulator automatycznie przejdzie do Auto. Aby to wyraźniej zaznaczyć, LED M w SELF pozostaje *zgaszony*, a LED A *błyska* co kilka sekund. Gdyby po SELF pożądanym był stan Man, wówczas w *danych* należy ustawić *Accp=yes*, a po potwierdzeniu *PID=YES?*, gdy regulator znajdzie się w Auto i LED A zacznie *świecić*, należy od razu przejść do Man naciskając A/M.

Powtórzmy, że w przypadku kaskady blok PID<sub>2</sub> nastraja się przechodząc do SELF w stanie Man, a PID<sub>1</sub> - w Auto.

## 12.3. Alarmy i ostrzeżenia

### Alarmy

RF-537 przerywa samostrojenie, jeśli stwierdza, że przy aktualnych *danych*, poziomie szumu, zakłóceniach, właściwościach obiektu itp. przeprowadzany eksperyment nie da zadowalających *wyników*. Sytuację taką sygnalizuje alarmem *ALMS* podając jednocześnie kod błędu. Jak podawano, *ALMS* potwierdza się naciskając V lub I/E. Po V regulator przechodzi do NORM, a po I/E do *danych* lub *wyników* (rys. 12.5).

Listę alarmów *ALMS* podano w tabl.12.2 wraz z zalecanymi czynnościami zapobiegawczymi. Niżej podano, w których fazach samostrojenia mogą pojawić się poszczególne alarmy, co zarazem wskazuje na mechanizmy zabezpieczające, w jakie jest wyposażony SELF. Alarm *ALMS=V* wywołany naciśnięciem V omówiono poprzednio.

Alarmy *HNL* i *NSTS* mogą pojawić się w ciągu początkowych 3 minut, z tym, że *NSTS* raczej dla obiektów „szybkich” (np. regulacja przepływu). Podczas 2 pierwszych przełączeń mogą wystąpić *NREA, DIR, UOS* i *SLOW*. *SLOW* może także pojawić się później, wraz z *FAST, ASYM* i *9SWI*. *ASYM* dotyczy na ogół „wolnych” obiektów, których stan nieustalony nie zdążył się ujawnić na początku (regulacja temperatury). *uLH* i *OUT* mogą oczywiście wystąpić zarówno podczas strojenia standardowego jak i precyzyjnego.



Tabl. 12.2. Alarmy sygnalizowane podczas samostrojania SELF

Kod	Przyczyna	Czynność zapobiegawcza
V	naciśnięcie przycisku V	—
HNL	wysoki poziom szumu pomiarowego -ponad $\pm 1\%$ ( <i>high noise level</i> )	zwiększyć stałą czasową <i>AI.T</i> filtra zmiennej procesowej
NSTS	proces nie znajduje się w stanie ustalonym ( <i>not at steady-state</i> )	doprowadzić do stanu ustalonego
NREA	obiekt nie reaguje na sterowanie $U_o$ w ciągu 1 godziny ( <i>no reaction</i> )	sprawdzić połączenia kabli i sprawność urządzenie wykonawczego
DIR	reakcja obiektu w kierunku odwrotnym niż <i>DIR</i> ( <i>norm, revs</i> ) ze względu na: 1) błędne połączenie ( <i>direction</i> ) 2) obiekt nietypowy (np. nieminimalnofazowy)	1) zmienić ustawienie przełącznika <i>DIR</i> 2) samostrojanie i adaptacja niemożliwe
U0S	zbyt słaba reakcja obiektu na sterowanie $U_o$ w stosunku do poziomu szumów ( <i>U_o small</i> )	zwiększyć amplitudę $U_o$ , ewentualnie zwiększyć <i>AI.T</i>
SLOW	przełączenie przekaźnika nie nastąpiło w ciągu 2 godz. - obiekt zbyt „wolny”	samostrojanie i adaptacja niemożliwe
FAST	przełączenia zbyt częste - obiekt zbyt „szybki”	samostrojanie i adaptacja możliwe po zwiększeniu <i>AI.T</i> i poprzestając na <i>OVS=stnd</i>
ASYM	asymetria czasów włączenia w kierunkach +,- ze względu na: 1) stan nieustalony, 2) obiekt nietypowy	1) doprowadzić do stanu ustalonego 2) samostrojanie i adaptacja niemożliwe
9SWI	sterowanie przekaźnikowe nie ustaliło się pomimo 9 przełączeń ze względu na zwiększony szum lub zakłócenia ( <i>9 switchings</i> )	zwiększyć $U_o$ , usunąć źródło zakłóceń, ew. zwiększyć <i>AI.T</i>
uLH	sterowanie ograniczone przez $u_L$ lub $u_H$	zwiększyć odstęp między $u_L$ a $u_H$
OUT	sygnał z bloku PID został odłączony od wyjścia przez wejścia binarne S, Mr, T, D, R lub zablokowany przez uBL, SVFL (zob. rozdz. 11)	usunąć przyczynę odłączenia lub blokady
HFu	wzrost poziomu szumów wysokoczęstotliwościowych, które zaczęły oddziaływać na sterowanie ( <i>high frequency at u</i> )	zwiększyć stałą czasową <i>AI.T</i> , powtórzyć strojenie precyzyjne ( <i>PREC=YES?</i> ) poprzestając ew. na <i>OVS=stnd</i>
RAMP	przebieg gładki aperiodyczny, który w wymaganym czasie nie ustalił się ze względu na: 1) zakłócenia 2) zmiany własności dynamicznych obiektu	1) usunąć źródło zakłóceń, powtórzyć strojenie precyzyjne poprzestając ew. na <i>OVS=stnd</i> 2) jeżeli zmiany nadal spodziewane, przejść na sterowanie adaptacyjne z <i>OVS=stnd</i>
APER	przebieg gładki o silnie zróżnicowanych stałych czasowych (niekorzystne) z powodów jak RAMP	jak RAMP 
OOSC	przebieg jednostronnie oscylacyjny z powodów jak RAMP ( <i>one-sided oscillations</i> )	jak RAMP 
UNST	przebieg „niestabilny” spowodowany przez: 1) „dudnienia” o częstotliwości w zakresie pracy regulatora ( <i>unstable</i> ) 2) silne ciągłe zmiany właściwości obiektu	1) usunąć źródło „dudnień”, powtórzyć strojenie precyzyjne, ew. <i>DMP=stnd</i> 2) samostrojanie i adaptacja niemożliwe

Pozostałe alarmy, tzn. *HFu*, *RAMP*, *APER*, *OOSC* i *UNST* dotyczą ustalania (*SETL*) po sterowaniu przekaźnikowym lub strojenia precyzyjnego (*PR*). Występują one jednak tylko wówczas, gdy pomimo prób regulatorowi nie udało się doprowadzić do zadowalających przebiegów. Zdarza się to przy silnych zakłóceniach, zmianach właściwości dynamicznych obiektu, albo gdy obiekt nie należy w ogóle do typowych dla automatyzacji procesów technologicznych. Nieudane próby są sygnalizowane jako ostrzeżenia (*warn*). Jest ich jednak nie więcej niż 3. Po 4-tej nieudanej próbie RF-537 sygnalizuje *ALMS* i przerywa SELF.

### Ostrzeżenia

W sytuacjach, gdy SELF daje *wyniki* tylko częściowo zgodne z oczekiwaniami, albo eksperyment się przeciąga, RF-537 reaguje ostrzeżeniem (*warning*) postaci *warn = stnd*, *HFu*, *RAMP* itd. Samostrojenie nie jest przerywane, ale *warn* i kod pulsują, aż do momentu *naciśnięcia* I/E. Nawet, gdy SELF się zakończy i regulator przejdzie do Auto (*Accp=no*), to i tak ostrzeżenie nadal oczekuje na potwierdzenie.

Listę ostrzeżeń podano w tabl.12.3 wraz z przyczynami. *warn=stnd* może pojawić się po strojeniu precyzyjnym. Ostrzeżenia *HFu*, *RAMP*, *APER*, *OOSC* i *UNST* świadczą o zwiększeniu szumu, zakłóceniach lub zmianie właściwości obiektu. Mogą one wystąpić podczas ustalania po sterowaniu przekaźnikowym lub podczas strojenia precyzyjnego, ale ich liczba jest ograniczona do 3 (potem pojawia się *ALMS*).

Tabl.12.3. Ostrzeżenia *warn* mogące pojawić się w SELF

Kod	Przyczyna
stnd	nie udało się uzyskać zadanego przeregulowania <i>OVS</i> (zbyt małe $U_o$ ), wobec czego ustawiono $OVS=stnd$
HFu	wzrost poziomu szumów wysokoczęstotliwościowych, które zaczęły oddziaływać na sterowanie <i>u</i>
RAMP	przebieg gładki, który w wymaganym czasie nie ustalił się
APER	przebieg gładki o silnie zróżnicowanych stałych czasowych
OOSC	przebieg jednostronnie oscylacyjny
UNST	przebieg „niestabilny”

Jeżeli wystąpiło nowe ostrzeżenie, a poprzednie nie zostało jeszcze potwierdzone, to po potwierdzeniu nowego poprzednie jest przywoływane i trzeba je również potwierdzić. Jak widać, informacje o nieprawidłowościach nie giną, ale są zapamiętywane. W sytuacji, gdy najpierw pojawiały się ostrzeżenia, których jednak nie potwierdzano, a potem alarm przerywający SELF, to po naciśnięciu V lub I/E ostrzeżenia również są przywoływane. Dopiero po ich potwierdzeniu RF-537 przechodzi do *danych* lub *wyników* (por. rys.12.5).

## 12.4. Nastawy $T_d$ , $d$ . Filtr $T_w$ . Obliczenia

### Nastawy $T_d$ , $d$

Jeżeli wobec niewielkiego poziomu szumu RF-537 został w SELF nastrojony jako PID, to nastawy  $T_d$ ,  $d$  są określone jako:

$$T_d = 0.23T_i, \quad d=5.2$$

Można się o tym przekonać obserwując *wyniki*.  $T_d = 0.23T_i$  odpowiada z grubsza znanym

nastawom Zieglera-Nicholsa<sup>1</sup>, zaś  $d$  o wartości 5 jest typowe dla automatyzacji procesów.

### Filtr wielkości zadanej - $T_w$

Filtr ten usuwa przeregulowania zmiennej procesowej przy skokowych zmianach wielkości zadanej  $w$ . Podczas SELF stała czasowa  $T_w$  pełni tylko rolę flagi wskazującej, czy  $w$  będzie filtrowane -  $T_w \neq \text{off}$ , czy nie -  $T_w = \text{off}$ .

Jeżeli  $T_w \neq \text{off}$ , SELF ustawia  $T_w$  na wartość  $T_i$ .

(Tzn. jak czas całkowania regulatora). Po zakończeniu SELF  $T_w$  można ew. zmienić przechodząc do PARM. Nie ma jednak sensu zmniejszać wartości  $T_w$  w trybie ADPT, bo tam każda zmiana nastaw pociąga za sobą ustawienie  $T_w = T_i$  (jeśli  $T_w \neq \text{off}$ ).

### Obliczenia

Niżej w celu zorientowania użytkownika scharakteryzujemy krótko obliczenia, które regulator wykonuje podczas standardowego strojenia wyznaczając nastawy dla ustalania SETL (rys.12.2). Pojawiają się one w *wynikach*, o ile  $OVS = \text{stnd}$  i nie wystąpiło ostrzeżenie. Istotną rolę odgrywa bufor pamięci RAM, w którym regulator rejestruje kolejne przebiegi.

*Poziom szumu.* Z przebiegu zarejestrowanego w ciągu początkowych 3 minut RF-537 określa średnią  $y_o$  i odchylenie standardowe  $\sigma$ . Średnia jest wartością zadaną w SELF. Poziom szumu NL przyjmuje się jako  $3\sigma$ , a histerezę  $H$  o połowę większą.

*Sterowanie przekaźnikowe.* Z przebiegu drgań ustalonych dysponując okresem  $T_o$ , regulator wyznacza amplitudę pierwszej harmonicznej  $A_1$  ( $A_1$  jest mniejsze niż  $A_o$  prezentowane w *wynikach*). Na podstawie  $A_1$  i  $H$  jest wyznaczana wartość funkcji opisującej przekaźnika, a następnie wartość transmitancji obiektu  $G_o(j\omega_o)$  dla częstotliwości  $\omega_o = 2\pi/T_o$ .

*Nastawy dla SETL.* Dwie faktycznie niezależne nastawy  $K_p$  i  $T_i$  są wyznaczane z warunków

$$R(j\omega_o)G_o(j\omega_o) = 0.5e^{j135^\circ},$$

w którym  $R$  oznacza transmitancję PID lub PI. W przypadku PID regulator uwzględnia  $T_d = 0.23T_i$  i  $d = 5.2$ . Warunek powyższy pochodzi z pracy *Industrial adaptive controllers based on frequency response techniques* (T. Hägglund, K. J. Åström, Automatica, 1991). Jeżeli wyznaczone wzmocnienie  $K_p$  przekracza wartość  $a \cdot LIM / (d + 1)NL$  dla PID i  $a \cdot LIM / NL$  dla PI, gdzie  $a$  jest pewnym współczynnikiem, wówczas  $K_p$  jest odpowiednio zredukowane. Uniemożliwia to szumowi pomiarowemu oddziaływanie na urządzenie wykonawcze.

## 12.5. Adaptacja

### Charakterystyka ogólna

Podczas adaptacji regulator RF-537 dostosowuje się automatycznie do zmiennych właściwości dynamicznych obiektu dążąc do minimalizacji czasu trwania przebiegów przy zachowaniu zadanego przeregulowania OVS. Bierze jednak pod uwagę tylko takie przebiegi, gdzie pierwsza amplituda  $E_1$  przynajmniej kilkakrotnie przekracza poziom szumu  $NL$  lub strefę nieczuło-

<sup>1</sup>Dla  $T_d = 0.23T_i$ ,  $d = 5.2$  transmitancja PID ma postać (w przybliżeniu):  $K_p 6.2 (s + z)^2 / s(s + 10z)$ ,  $z = 1.9 / T_i$  zatem w liczniku występuje pierwiastek podwójny. Podobnie jest w przypadku nastaw Zieglera-Nicholsa, gdzie wprowadzicie  $T_d = 0.25T_i$ , a  $d = \infty$  (różniczkowanie bez filtracji).

ści *A*. Wymaga to oczywiście dostatecznie silnego zakłócenia lub wyraźnej skokowej zmiany wielkości zadanej (co na ogół nie zdarza się często).

Przebieg  $e(t)$  spełniający te warunki jest rejestrowany w RAM. RF-537 określa aktualne prze-regulowanie  $O\_VS$  i okres  $T_p$ . Jeżeli przebieg jest gładki,  $T_p$  reprezentuje zastępczą stałą czasową. Na podstawie różnicy między OVS a  $O\_VS$  oraz stosunku  $T_p$  do  $T_i$ , który stanowi informację częstotliwościową, regulator koryguje  $K_p$ ,  $T_i$ . W przypadku PID ustawia jednocześnie  $T_d=0.23T_i$  ( $d=5.2$ ).

Niezależnie od oczekiwania na znaczny błąd  $e$ , RF-537 śledzi stale poziom szumu w paśmie przewyższającym zakres pracy układu interpretując go jako aktualne NL. Bierze to pod uwagę przy korekcji nastaw. Przy wyraźnym wzroście NL szum może przedostać się na wyjście przekraczając strefę martwą LIM, o czym świadczą szybkie ruchy urządzenia wykonawczego. RF-537 wykrywa taką sytuację i automatycznie zmniejsza o połowę wzmocnienie  $K_p$ .

### **Obsługa adaptacji**

Jak podano w p.12.1, warunkiem adaptacji jest ustawienie przełącznika konfiguracyjnego *MOD1* na *ADPT* (w układzie kaskadowym tylko regulator wiodący może pracować jako adaptacyjny). Adaptacja musi być poprzedzona samostrojeniem SELF dostarczającym nastaw początkowych  $K_p^o$ ,  $T_i^o$ ,  $T_d^o$ ,  $d^o$ . Dla adaptacji wystarcza strojenie standardowe,  $OVS=stnd$ , bo i tak zmiany w obiekcie naruszają z czasem precyzyjnie ustawione przeregulowanie.

Procedura adaptacji może znajdować się w jednym z trzech stanów:

- *SELF* - samostrojenie dostarczające nastaw początkowych
- *RUN* - praca adaptacji, z tym, że korekta nastaw następuje tylko w Auto
- *STOP* - zatrzymanie adaptacji przez operatora.

W RUN-Man adaptacja jest zawieszona - nastawy nie są korygowane, ale po naciśnięciu A/M, czyli przejściu do RUN-Auto, zostaje automatycznie uruchomiona. Przewodzenia adaptacji ze stanu STOP do RUN może dokonać tylko operator.

Obsługę adaptacji ilustruje schemat z rys 12.6. Po ustawieniu ADPT za pomocą V i naciśnięciu I/E na wskaźniku pojawia się napis RUN, STOP lub SELF reprezentujący aktualny stan. Jeżeli nastawy początkowe nie zostały jeszcze określone, stanem aktualnym jest SELF. Przejście z SELF do RUN lub STOP jest wtedy niemożliwe.

Po normalnym zakończeniu SELF, czyli przejściu do Auto, adaptacja zostaje automatycznie aktywowana - RUN.

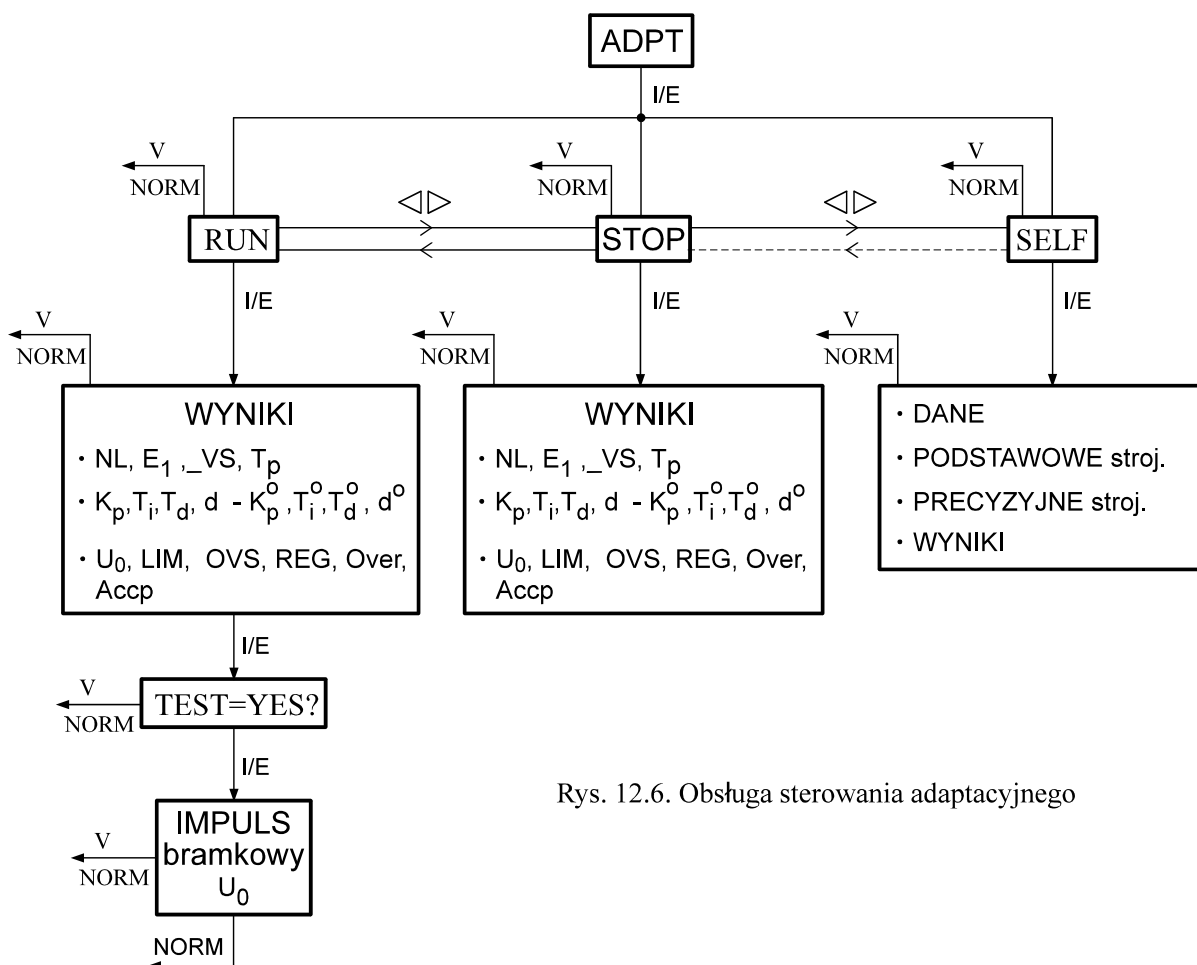
Sygnalizuje to świecący LED Adapt.

**Wyniki.** Jeżeli przy RUN na wskaźniku naciśniemy I/E, procedura adaptacji przechodzi do prezentacji aktualnych *wyników*. Składają się na nie:

- *pomiary bezpośrednie* -  $NL, E_l, O\_VS, T_p$
- *aktualne nastawy* -  $K_p, T_i, T_d, d$
- *nastawy początkowe* -  $K_p^o, T_i^o, T_d^o, d^o$
- *dane* -  $U_o, LIM, OVS, REG, OVER, Accp$ .

$NL$  jest aktualnym poziomem szumu, natomiast  $E_l$ ,  $O\_VS$ ,  $T_p$  dotyczą ostatnio zarejestrowanego przebiegu.

Zerowe wartości  $E_1$  i  $O_{VS}$  oznaczają, że ostatnią korektą nastaw była redukcja wzmocnienia  $K_p$  ze względu na szum, który przenosił się na urządzenie wykonawcze.



Rys. 12.6. Obsługa sterowania adaptacyjnego

Podobnie jak poprzednio, jeśli RF-537 pracuje jako regulator PID, zmiana nastaw jest możliwa tylko w odniesieniu do  $K_p$ ,  $T_i$ , lub  $K_p^o$ ,  $T_i^o$ . Próba zmiany  $T_d$  lub  $d$  inicjowana naciśnięciem A/M powoduje pulsowanie wskaźnika. Podczas adaptacji dotyczy to również parametryzacji PARM.

Nie ma ograniczeń w odniesieniu do zmian danych  $U_0$ , LIM itd. W przypadku wyników przeglądanych w STOP pomiary są takie, jak w momencie przejścia do STOP (łącznie z NL).

**RUN-STOP-SELF.** Jeżeli nastawy początkowe zostały w SELF wytworzone, po czym regulator znalazł się w stanie RUN-Auto, to po ustawieniu ADPT i naciśnięciu I/E na wskaźniku pojawi się RUN. Gdyby adaptację w międzyczasie zatrzymano, zamiast RUN pojawiłoby się STOP.

Za pomocą przycisków trójkątnych można ustawiać RUN, STOP lub SELF.

Nie oznacza to jednak jeszcze natychmiastowej zmiany stanu adaptacji. Dopiero:

Po naciśnięciu V, I/E lub 45 sekundach procedura adaptacji przyjmuje stan ustalony na wskaźniku.

Jeżeli naciśnięto V lub minęło 45 sekund, regulator przechodzi do NORM, a jeżeli I/E - do *wyników*. Przez ostatnie 15 z 45-ciu sekund wskaźnik pulsuje.

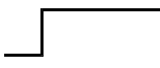

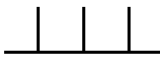
**TEST=YES?**. W przypadku, gdy błąd  $e$  przez dłuższy czas pozostaje nieznaczny, a zachodzi przypuszczenie, że obiekt zmienił właściwości dynamiczne, adaptację można pobudzić za pomocą bramkowego impulsu testującego o amplitudzie  $U_o$ , jak przy strojeniu precyzyjnym (rys. 12.2). Jeżeli podczas przeglądania *wyników* w RUN naciśniemy I/E, na wskaźniku pojawia się pytanie TEST=YES? (rys. 12.6). Ponowne naciśnięcie I/E powoduje dodanie do sygnału  $u_{PID}$  wartości  $+U_o$  lub  $-U_o$  i skierowanie na obiekt sumy  $u=u_{PID}\pm U_o$ . Trwa to dopóty, aż regulator po analizie wynikowego przebiegu dokona pierwszej korekty nastaw (por. p. 12.2). Po tym następuje powrót do  $u=u_{PID}$ , analiza drugiego przebiegu i ponowna korekta nastaw. Rezultat testu można ocenić wracając do *RUN-wyniki*.

Określając kierunek impulsu bramkowego regulator dąży do zmniejszenia prawdopodobieństwa naruszenia ograniczeń sterowania  $u_L$ ,  $u_H$  podczas drugiego przebiegu. Podczas pierwszego przebiegu prawdopodobieństwo to jest większe, ale dzięki temu druga korekta może być „precyzyjniejsza”. Jeżeli więc w momencie naciśnięcia I/E aktualne  $u$  jest bliższe  $u_H$  niż  $u_L$ , a obiekt reaguje wzrostem  $y$  na wzrost  $u$  ( $DIR=norm$ ), wówczas  $u_{PID}$  jest zwiększane o  $U_o$ , tzn.  $u=u_{PID}+U_o$ . W przeciwnym razie mamy  $u=u_{PID}-U_o$ . Według tej samej reguły określa się kierunek impulsu przy strojeniu precyzyjnym (p. 12.2)<sup>2</sup>.

Przez kilka sekund od momentu naciśnięcia I/E regulator wyświetla na wskaźniku U0 lub -U0 sygnalizując rozpoczęcie testu. Niedługo potem LED Adapt zaczyna pulsować wskazując, że błąd  $e$  narasta (zob. niżej).

Jeżeli podczas wyświetlania *TEST=YES?* naciśniemy V, RF-537 powróci do NORM nie generując impulsu. Impuls można przerwać naciskając V w trakcie wyświetlania U0 (rys. 12.6)

Tabl. 12.4. Zachowanie LED-a Adapt podczas adaptacji

Adapt	Znaczenie
	RUN - błąd $e$ mały, <i>nastawy nie korygowane</i>
	RUN - błąd $e$ znaczny lub urządzenie wykonawcze aktywowane przez szum, <i>nastawy korygowane</i>
	STOP - adaptacja zatrzymana

**LED Adapt.** Zachowanie LED-a Adapt ilustruje tabl.12.4. W przypadku znacznych wartości  $e$  Adapt pulsuje sygnalizując, że trwa rejestracja przebiegu. Zakończenie pulsowania świadczy zwykle o skorygowaniu nastaw, co można stwierdzić przeglądając *wyniki*. Pulsowanie rozpoczyna się od momentu, gdy błąd  $e$  2-krotnie przekracza poziom szumu  $NL$  lub nieczułość  $A$  (ściślej - większą z tych wartości). Pulsowanie występuje również, gdy urządzenie wykonawcze przez 3 minuty wykonywało szybkie ruchy spowodowane wzrostem szumu i regulator zmniejszył wzmocnienie (pulsowanie trwa przez następne 3 minuty). Stan STOP jest sygnalizowany błyskaniem Adapt w kilka sekund, co wskazuje na gotowość regulatora do wznowienia adaptacji. W tym celu operator powinien: 1) doprowadzić do STOP na wskaźni-

<sup>2</sup> Praktycznie nie ma to jednak znaczenia, bo i tak naruszenie ograniczeń powoduje alarm  $ALMS=uLH$  (Tabl. 12.2) i regulator przerywa strojenie.

ku, 2) przyciskami trójkątnymi ustawić RUN, 3) nacisnąć V lub I/E, albo zaczekać 45 sekund por. rys. 12.6).

**Alarm AAOV.** Gdy przynajmniej jedna z aktualnych nastaw  $K_p$ ,  $T_i$  zaczyna 4-krotnie różnić się od początkowej  $K_p^o$ ,  $T_i^o$ , a daną *Over* ustawiono na *yes* lub *clmp*, RF-537 zaczyna alarmować pulsującym napisem *AAOV* (*alarm - adaptation - over*). Potwierdza się go naciskając V, podobnie jak pozostałe alarmy (p.11.4). Jeżeli *Over=clmp*, dalsza zmiana nastawy nie następuje, co widać w *wynikach*. Alarm *AAOV* pojawia się również, gdy nastawa osiągnie granicę zakresu, np.  $K_p=0.1$ .

**Nastawy początkowe  $K_p^o$ ,  $T_i^o$ .** Sa one wynikiem strojenia SELF ( $T_d^o = 0.23T_i^o$ ,  $d^o = 5.2$ ). Jeżeli *MOD1=ADAPT*, nastawy początkowe pojawiają się w PARM z nazwami *KP.0*, *Ti.0*, *d.0*. Dotyczą one zawsze bloku PID<sub>1</sub>, bo tylko on podlega adaptacji.  $K_p^o$ ,  $T_i^o$  można w razie potrzeby zmienić, np. po pojawieniu się alarmu AAOV. Wartości  $T_d^o$  nie można zmienić, RF-537 dostosowuje ją automatycznie.  $d^o$  jest zawsze równego 5.2.

**$T_w \neq \text{off}$ .** Jak podano w p.12.4, ustawienie  $T_w$  na konkretną wartość liczbową a nie *off* powoduje, że podczas adaptacji wielkość zadana  $w$  jest filtrowana ze stałą czasową  $T_i$  ( $T_w$  pełni rolę flagi). Przebiegi  $e(t)$  po zmianach  $w$  są wówczas gładkie, nawet gdy reakcja na zakłócenie jest związana z oscylacjami. Dlatego dla  $T_w \neq \text{off}$  przebiegi po zmianach  $w$  są ignorowane. LED Adapt nie rozpoczyna pulsowania nawet gdy  $e$  przekracza 2NL.

**Nieczułość A.** Wprowadzenie strefy nieczułości  $A$  powoduje efektywną redukcję działania regulacyjnego w stopniu zależnym od stosunku  $e$  do  $A$ . Jedynie przy  $e$  wielokrotnie przekraczającym  $A$  można liczyć, że kształt przebiegu będzie bliski temu, jaki wynika z wymagań DMP, OVS. Przy mniejszych błędach przebiegi są gładkie lub słabo oscylacyjne. Procedura adaptacji nie wzmacnia jednak wtedy działania regulacyjnego, aby gdy silne zakłócenie wystąpi, układ nie uległ destabilizacji.

### Obliczenia

Scharakteryzujemy krótko obliczenia, które RF-573 wykonuje podczas adaptacji i strojenia precyzyjnego. W odniesieniu do obiektów o transmitancjach typowych dla automatyzacji procesów, tzn.

$$G_o(s) = \frac{k_o}{T_S + 1} e^{-\tau s}$$

można przeprowadzić badania symulacyjne przebiegów błędu regulacji  $e(t)$  przy zakłóceniach skokowych dla rozmaitych nastaw  $K_p$ ,  $T_i$  ( $T_d=0.23T_i$ ,  $d=5.2$  w przypadku PID). Każdy przebieg oscylacyjny jest scharakteryzowany przez pewne przeregulowanie *OVS*, okres  $T_p$  i czas ustalania  $t_s$ . Jeżeli  $K_p$  i  $T_i$  nie są zbyt duże, przebiegi mają postać jak na rys. 12.4a i można je aproksymować operatorową funkcją 2-go rzędu

$$E(s) \sim \frac{c}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

gdzie

$$\xi = \frac{\ln OVS}{\sqrt{\pi^2 + \ln OVS}}, \quad \omega_n = \frac{2\pi}{T_p \sqrt{1 + \xi^2}}, \quad (OVS > 0, \xi < 1)$$

( $c$  jest nieistotne). Analogiczne wzory dla  $\xi$ ,  $\omega_n$  można podać dla przebiegu aperiodycznego (rys. 12.4b) biorąc oprócz  $E_1 = e(t_1)$  wartość błędów  $e(t_a)$ ,  $e(t_b)$  odczytane w dwu różnych momentach czasu  $t_a \neq t_b \neq t_1$  (w zasadzie dowolnych).

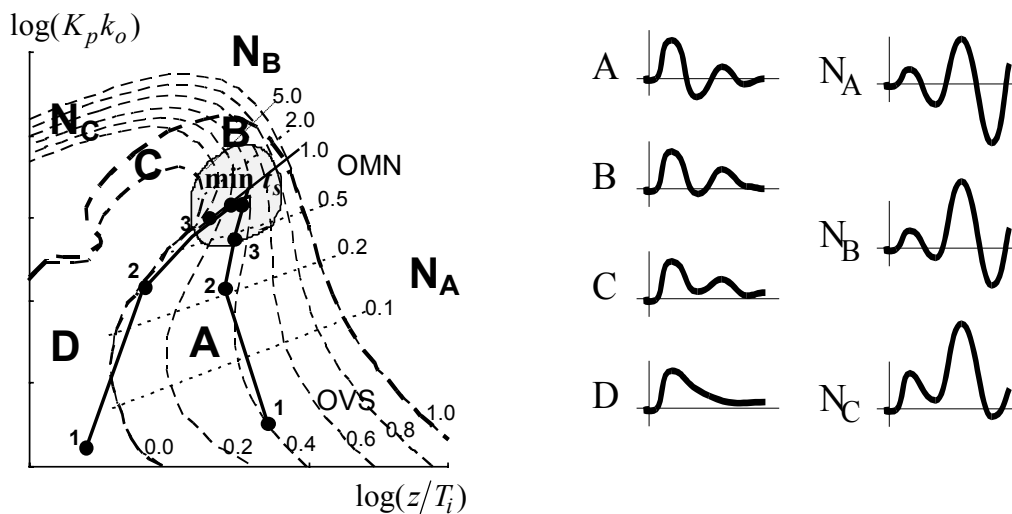
Na podstawie tak wyznaczonego  $\omega_n$  określamy *względną częstotliwość układu*

$$OMN = \begin{cases} \frac{\omega_n T_i}{1.9} & \text{dla PID} \\ \omega_n T_i & \text{dla PI} \end{cases}$$

Punkty płaszczyzny o osiach  $\log(K_p k_o)$  i  $\log(\tau/T_i)$ , w których  $OVS = const$  i  $OMN = const$ , można połączyć otrzymując 2 rodzaje *poziomic*. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 12.7a. W obszarach A, B, C przebiegi są oscylacyjne, takie że:

$$\begin{aligned} A: & OVS > 0, & OMN < 1 \\ B: & OVS > 0, & OMN > 1 \\ C: & OVS < 0 & OMN > 1. \end{aligned}$$

W obszarze D przebiegi są aperiodyczne. Granicę stabilności stanowi pogrubiona linia przerywana ograniczająca od góry obszar A ( $OVS < 1.0$ ) i obszar C ( $E_3 = E_1$ ,  $OVS < 0$  -  $E_3$  jest 3-cim pikiem). Powyżej tej linii układ staje się niestabilny (obszary  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_C$ ). Kształty przebiegów  $e(t)$  w poszczególnych obszarach podano na rys. 12.7b.



Rys.12.7. (a) Poziomice  $OVS$  oraz okolica minimalnego czasu ustalania  $t_s$ , (b) przebiegi błędów  $e(t)$  w odpowiednich obszarach

Z rysunku 12.7 wynika, że celem adaptacji i strojenia precyzyjnego powinno być dotarcie do punktu, w którym poziomica zadanego przeregulowania  $OVS = OVS^*$  przecina poziomice jednostkowej częstotliwości  $OMN = 1.0$  (tutaj  $OVS^*$  oznacza zadane przeregulowanie, p. 12.1). Jeżeli  $OVS^* = stnd$ , punktem docelowym może być dowolny punkt na odcinku poziomicy  $OMN = 1.0$ , ograniczonym przez przeregulowania  $OVS = 0.0$  i  $OVS = 0.4$ . Trudność polega jednak na tym, że nie wiadomo z góry, w której części płaszczyzny  $\log(K_p k_o)$ ,  $\log(\tau/T_i)$  leżą poziomice, ponieważ parametry  $k_o$ ,  $\tau$  określające wartości na osiach nie są znane. Okazuje się ponadto, że nachylenie i odstęp poziomicy w poszczególnych obszarach zależy w pewnym stopniu od stosunku  $T/\tau$ .



Regulator RF-537 unika kłopotliwej identyfikacji  $k_o$ ,  $\tau$  zakładając, że obiekt będzie zachowywał się z grubsza tak jak *wzorzec*

$$G^*(s) = \frac{1}{s+1} e^{-s}$$

Opóźnienie wzorca jest takie samo jak stała czasowa. RF-537 ma zapisaną w pamięci EPROM *mapę poziomnic*  $Ovs=const$ ,  $OMN=const$  dotyczącą wzorca, podobną do pokazanej na rys. 12.7a. Po takiej mapie „wykonuje kroki” dążąc do punktu przecięcia poziomnic  $OVS=OVS^*$  i  $OMN=1.0$ .

W związku z tym obliczenia wykonywane przez RF-537 podczas analizy przebiegu  $e(t)$  są następujące:

- *Określenie aktualnego punktu.* Na podstawie wartości  $O\_VS$  i  $T_p$  i ew.  $E_3$  charakteryzujących  $e(t)$  (bądź wartości  $E1$ ,  $e(ta)$ ,  $e(tb)$ ) jest określana aktualna względna częstotliwość  $OMN$ , a następnie obszar A, B, ...,  $N_C$ , w którym układ pracuje. Przecięcie poziomnic  $OVS=O\_VS$  oraz  $OMN=O\_MN$  na wzorcowej mapie określa położenie aktualnego punktu, tzn. współrzędne  $\log(K_p k_o)$ ,  $\log(\tau/T_i)$ . Reprezentują go kolejne kropki na przykładowych trajektoriach zbieżności na rys. 12.7a (1, 2).
- *Nowe nastawy.* Wzorcowa mapa określa również współrzędne punktu docelowego, tzn. przecięcie poziomnic  $OVS=OVS^*$  oraz  $OMN=1.0$ . Na podstawie odległości między punktem aktualnym a docelowym są wyznaczane korekty nastaw  $\Delta K_p$ ,  $\Delta T_i$ . Korekty te zostają wprowadzone, a  $T_d$  dostosowane odpowiednio (dla PID). Pozostałe czynności mają drugorzędne znaczenie.

Jeżeli opóźnienie sterowanego obiektu jest rzeczywiście równe stałej czasowej, to przy braku szumów RF-537 w jednym kroku dochodzi do punktu docelowego. Dwa kroki są potrzebne, gdy opóźnienie przekracza stałą czasową, bo wtedy faktyczna mapa poziomnic niewiele odbiega od wzorcowej. Gdy opóźnienie jest mniejsze od stałej czasowej, co zdarza się najczęściej, RF-537 potrzebuje kilku kroków. W celu ochrony układu przed nadmiernymi oscylacjami, regulator stopniowo zwiększa  $K_p$  i redukuje  $T_i$ . Ilustrują to trajektorie 1, 2 na rys. 12.7a.

Jeżeli przebieg został zakwalifikowany do obszaru C, wówczas nastawy zmieniane są w ustalonej proporcji i kierunku, tak aby wejść do D. Podobnie jest w przypadku punktu leżącego „głęboko” w D, albo w  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_C$ , z tym że proporcje i kierunki są w każdym przypadku różne.

### Uwagi

**Szum NL.** Podczas pracy w stanie RUN-Auto regulator podaje błąd  $e$  na górnoprzepustowy filtr cyfrowy o częstotliwości odcięcia powyżej zakresu pracy regulatora. Wyjście filtru po odpowiednim przeskalowaniu określa poziom szumu  $NL$ .

**Ruchy urządzenia wykonawczego.** Analogiczny filtr przetwarza sterowanie  $u$  generowane przez blok PID. Jeżeli wartość wyjścia filtru przez 3 minuty przekracza  $LIM$  regulator uznaje, że szum przedostał się do urządzenia wykonawczego powodując niepotrzebne ruchy, które gdyby trwały nadal mogłyby spowodować uszkodzenie. W tej sytuacji wzmocnienie  $K_p$  jest zmniejszane o połowę.

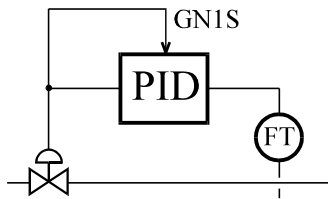
**LIM a redukcja czułości.** Jeżeli po adaptacji czułość regulatora okazuje się nadmierna, o czym świadczy bardzo aktywne sterowanie, to można ją zredukować zmniejszając wartość parametru  $LIM$  (strefa martwa urządzenia wykonawczego, p. 12.1). Punkt docelowy znajduje się wtedy nie na poziomie  $OMN=1.0$ , ale niżej, w obszarze A, gdzie  $OMN < 1.0$ .

**Plik E3.** Gdy poziom szumu NL jest nieznaczący, wówczas często udaje się miarodajnie określić wartość 3-go pikę  $E_3$ . Wtedy przebieg błędu jest aproksymowany funkcją 3-go rzędu  $c / [(s + \alpha)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)]$ , co daje trafniejsze wartości  $\xi$ ,  $\omega_n$ . Krok wykonywany przez regulator jest wtedy nieco dłuższy, a więc zbieżność do punktu docelowego szybsza.

**Poziomice w obszarze D.** W obszarze A każdej wartości przeregulowania  $OVS > 0$  odpowiada określona wartość współczynnika  $\xi < 1$ . Poziomicom  $OVS = const$  można więc przyporządkować odpowiednie poziomicę  $\xi = const$ . W obszarze D pojęcie poziomic OVS nie ma sensu, ale bez trudu można utworzyć poziomicę  $\xi = const \geq 1$ . Wraz z poziomiami  $OMN = const$  tworzą one w D wzorcową mapę, po której „kroczy” RF-537<sup>3</sup>.

## 12.6. Programowa zmiana nastaw

Regulator RF-537 umożliwia programową zmianę nastaw PID wraz z punktem pracy wyznaczonym przez odpowiedni sygnał (*gain scheduling*). Najczęściej sygnałem tym jest sterowanie  $u$ , jak w przykładzie z rys 12.8, albo zmienna procesorowa  $y$ . Programowa zmiana nastaw, czyli GAIN, jest przydatna przy sterowaniu procesów nieliniowych lub z wykorzystaniem nieliniowych elementów nastawczych, ponieważ niemal w każdych warunkach zapewnia podobną jakość regulacji. Nieliniowość musi mieć jednak charakter statyczny, tzn. nie zależeć od czasu. Procesy gdzie nieliniowości zmieniają się z czasem powinny być sterowane adaptacyjnie.



Rys 12.8. Układ regulacji przepływu uzależniającego nastawy PID od pozycji zaworu (sterowania)

W RF-537 charakterystyki, według których sygnał wyznaczający punkt pracy „programowo” oddziałuje na nastawy są *parabolami* poprowadzonymi przez 3 punkty określone podczas parametryzacji. Blok PID stosuje GAIN, jeżeli ustawiono  $MOD = GAIN$  (p. 12.1). Ponadto należy ustawić:

### Przełączniki konfiguracyjne

- $GN1S$  - sygnał określający GAIN w bloku PID<sub>1</sub>:  $y_1, w_1, \dots, F6$
- $GN2S$  - j.w. ale PID<sub>2</sub>

$GN1S$   
 $GN2S$

### Parametry on-line

- $GA.1$  - współrzędna punktu A parabol dotyczących PID<sub>1</sub>: 7.5...33.3%
- $GB.1$  - j.w. ale punkt B: 33.4...66.6%
- $GC.1$  - j.w. ale C: 66.7...92.5%
- $GA.2, GB.2, GC.2$  - j.w. ale PID<sub>2</sub>
- $mK1.A$  - mnożnik wzmacnienia  $K_p$  bloku PID<sub>1</sub> dla punktu A: 0.1...10.0

$GA.1$   
 $GB.1$   
 $GC.1$   
 $GA.2$   
 $mK1.A$

<sup>3</sup> Faktycznie w pamięci EEPROM regulatora znajduje się tylko wzorcowa mapa  $\xi = const$ ,  $OMN = const$ , po której sa wykonywane kroki. Zadane  $\xi^*$  jest obliczane na podstawie  $OVS^*$ . Jeżeli  $OVS^* = 0$ , to  $\xi^* = 1$  (przebieg aperiodyczny krytyczny).

- $mK1.C$  - j.w. ale punkt C
- $mI1.A$  - j.w. ale czas całkowania  $T_i$  i punkt A
- $mI1.C$  - j.w. ale C
- $mK2.A, \dots, mI2.C$  - j.w. ale blok  $PID_2$ .

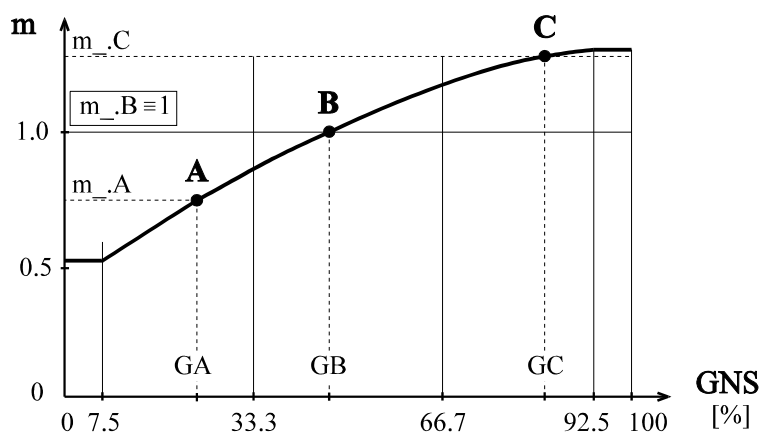
$$\begin{array}{l} \Pi_{H1}.C \\ \Pi_{I1}.A \\ \Pi_{I1}.C \\ \Pi_{H2}.A \end{array}$$

Przeważnie parametry te są określane automatycznie po przeprowadzeniu samostrojenia SELF w 3 częściach zakresu sygnału  $GNS$ . Można je jednak również ustawić lub korygować w PARM.

**Parabola.** Efektywną wartość nastawy określa iloczyn *nastawa w punkcie B*  $\times$  *mnożnik*, np.

$$K_{p,eff}(GNS) = K_p \cdot mK(GNS)$$

gdzie  $K_p$  jest wzmocnieniem w B, a  $mK(.)$  charakterystyką mnożnika, tzn. *parabolą* poprowadzoną przez punkty o współrzędnych (GA,  $mK.A$ ), (GB, 1.0), (GC,  $mK.C$ ). Pokazano ją na rys. 12.9. Na początku (7.5%) i końcu (92.5%) mnożnik jest obcinany. Zwracamy uwagę, że w punkcie B (środkowym) wszystkie *mnożniki mają wartość 1* więc dlatego nie ma ich wśród parametrów. Analogiczny wzór określa czas całkowania  $T_{i,eff}(GNS)$ .



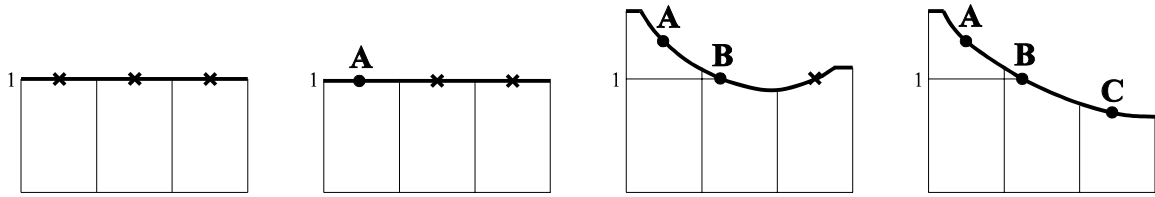
Rys.12.9. Mnożnik  $m$  jako paraboliczna funkcja sygnału  $GNS$

**$T_d$  i  $d$ .** Są to nastawy zależne podobnie jak w adaptacji, tzn.  $T_{d,eff} = 0.23T_{i,eff}$ ,  $d = 5.2$ .

**GAIN i SELF.** Wszystkie parametry GAIN można *automatycznie określić* przeprowadzając SELF wewnątrz każdego z trzech przedziałów wartości sygnału  $GNS$ , tzn. A: 7.5...33.3%, B: 33.4...66.6%, C: 66.7...92.5%. Po trzecim SELF komplet parabol jest gotów. Jeżeli  $MOD = GAIN$ , RF-537 *stale* realizuje programową zmianę nastaw.

Dla zorientowania użytkownika podamy krótko, w jaki sposób RF-537 określa wartości parametrów. Współrzędne GA, GB, GC są wyznaczone jako średnie sygnału  $GNS$  w ciągu początkowych 3 minut odpowiednich strojów SELF. Na rys. 12.10 pokazano jak powstaje parabola mnożnika  $m$  przyjmując dla uproszczenia, że strojenia SELF są przeprowadzane w kolejnych przedziałach. Krzyżyk oznacza, że w danym przedziale strojenie SELF jeszcze się odbyło, a kropka, że zostało już przeprowadzone. Jeżeli żaden SELF jeszcze się nie odbył mnożniki  $m$  mają wartości 1 (pierwszy rysunek) i w całym zakresie  $GNS$  obowiązują nastawy, których wartości występują w PARM. Pierwszy SELF - A daje nastawy  $K_{pA}$ ,  $T_{iA}$ , które nie zmieniają mnożników (drugi rysunek), ale za to przechodzą do PARM zastępując dotychczasowe. Teraz więc one obowiązują w całym zakresie  $GNS$ . Drugi SELF - B, przeprowadzony w środkowym przedziale, wytwarza nastawy  $K_{pB}$ ,  $T_{iB}$ , które *na stale* przechodzą do PARM i służą do określenia nastaw efektywnych. Mnożniki dla punktu A, a więc parametry GAIN, przyjmują *wartości*  $mK.A = K_{pA}/K_{pB}$ ,  $mI.A = T_{iA}/T_{iB}$ . Mnożniki w C nadal zachowują wartość 1

więc parabola wygląda jak na rysunku trzecim. Trzeci SELF - C daje nastawy  $K_{pC}$ ,  $T_{iC}$ , z których mamy  $mK.C = K_{pC}/K_{pB}$ ,  $mI.C = T_{iC}/T_{iB}$  oraz finalną parabolę (czwarty rysunek).



Rys.12.10. Tworzenie paraboli mnożnika  $m$  podczas kolejnych strojeń SELF - A, B, C

Powtórzenie SELF w którymkolwiek przedziale powoduje odpowiednią modyfikację mnożników. Nastawy dla SELF przeprowadzonego w środkowym przedziale pozostają w PARM.