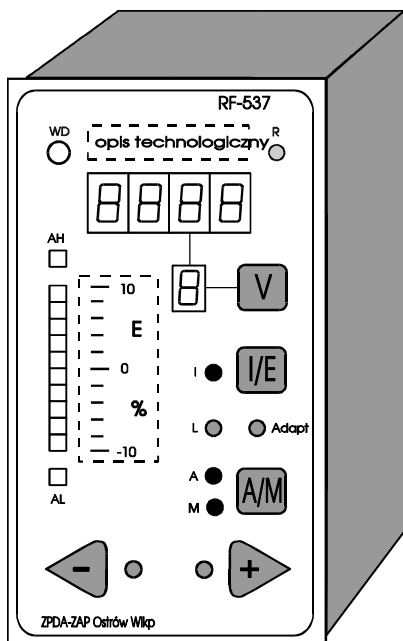


Regulator RF-537 – wybrane informacje

1. PRZEZNACZENIE



Regulator RF-537 jest uniwersalnym regulatorem PID o różnorodnych funkcjach, przeznaczonym do automatyzacji procesów technologicznych w energetyce, ciepłownictwie, hutnictwie, przemyśle maszynowym, chemicznym, materiałów budowlanych i innych. Realizuje wszystkie typowe struktury regulacyjne, tj. regulację stałowartościową, stosunku, kaskadową, sterowanie nadrzędne itd. Sygnał sterujący może być ciągły, 3-pozycyjny ze sprzężeniem lub bez sprzężenia od położenia siłownika oraz 2-pozycyjny typu załącz/wyłącz, jakiego wymaga m.in. grzejnictwo elektryczne. Algorytm PID o dwóch stopniach swobody zapewnia dobre

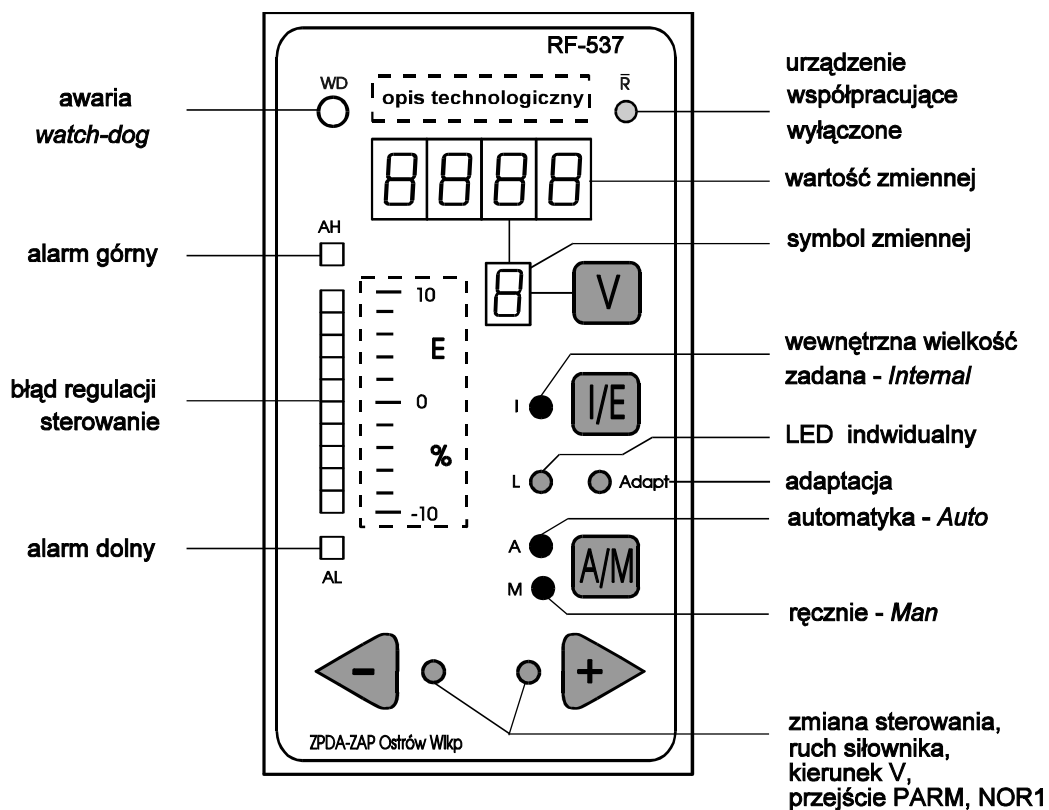
tłumienie zakłóceń i minimalny czas regulacji. Nastawy można uzależnić od punktu pracy, co jest potrzebne dla sterowania procesami nieliniowymi, jak np. stabilizacja pH w instalacjach chemicznych i ochronie środowiska. Wartości wszystkich wejść analogowych są prezentowane w jednostkach fizycznych, a więc RF-537 pracuje jednocześnie jako regulator i stacja pomiarowa (4-sygnałowa). Dzięki wielofunkcyjnym wejściom i wyjściom binarnym RF-537 może współpracować ze stacją wielkości zadanej, stacją sterowania ręcznego lub sterownikiem PLC. Regulator kontroluje pracę siłownika 3-pozycyjnego - reakcję na sterowanie, wyłączniki krańcowe, przeciążenie. Jest przystosowany do pracy w układach redundancyjnych zarówno jako regulator podstawowy jak i rezerwowy, np. w układzie stabilizacji poziomu wody walczaka kotła energetycznego. RF-537 jest przeznaczony do pracy w rozproszonym systemie automatyki komunikując się z komputerem nadrzędnym w standardzie RS-485 lub RS-232C według protokołu TRANS. Kanał komunikacyjny posiada redundancję.

2. OBSŁUGA *ON-LINE*

Regulator RF-537 może znajdować się w stanie *on-line* prowadząc sterowanie obiektem, lub w stanie *off-line*, w którym jest konfigurowany. Stany te są nazywane WORK - praca i CONF - konfiguracja. W ramach stanu WORK jest możliwe 5 trybów:

- NORM - praca normalna
- VIEW - przeglądanie zmiennych
- LAMP - test wskaźników i LED-ów
- PARM - parametryzacja *on-line*
- ADPT - samonastrajanie i adaptacja.

Panel czołowy. Funkcje przycisków określają opisy na rys.2.1. Podstawową funkcją V jest przełączanie zmiennych na wskaźniku (*Variable*). I/E dokonuje przełączeń wielkości zadanej *Internal/External*, a A/M przełączeń stanów *Auto/Man*. Przyciski +, - służą do zmiany wielkości zadanej *w*, sterowania *u* oraz ew. innych wielkości.



Rys.2.1. Funkcje elementów panelu czołowego regulatora RF-537 w trybach NORM, VIEW

Utrzymywanie wciśniętego przycisku V powoduje cykliczne wyświetlanie zmiennych najpierw co 1 sekundę, a potem ze stopniowanym przyspieszeniem. Jeżeli przycisk V zostanie zwolniony, po 45 sekundach wskaźnik wraca do zmiennej wiodącej.

Przy dostatecznie długim naciskaniu V, po wartościach zmiennych pojawiają się napisy, z których ostatnim jest PARM.

Natychmiastowe przejście do parametryzacji PARM następuje przy wciśniętych V, + i naciśnięciu –.

PARM. W trybie PARM można odczytać i ew. zmienić wartości parametrów typu *on-line*.

WORK a CONF. Aby przejść do stanu konfiguracji należy najpierw ustawić na wyświetlaczu napis CONF (wcisnąć V, + i nacisnąć –, pojawi się napis PARM, następnie naciskając V ustawić napis CONF.), a następnie nacisnąć dwukrotnie I/E. Zapytanie *YES ?* pojawiające się po pierwszym naciśnięciu przypomina, że obsługa procesu zostanie przerwana.

3. KONFIGURACJA I PARAMETRYZACJA

Stan CONF składa się z sześciu faz wymienionych niżej. Ustawia się w nich następujące wielkości:

- SWIT - przełączniki konfiguracyjne *switch*
- ONPA - początkowe wartości parametrów *on-line*
- OFPA - parametry *off-line*
- PRST - struktura początkowa *preset*
- GAIN - mnożniki nastaw zależne od punktu pracy *gain scheduling*
- CALC - kalkulator procesowy z blokami funkcyjnymi (od wersji 2.0).

Przechodzenie z WORK do CONF omówiono wyżej

Pierwszą fazą, która zgłasza się po przejściu do CONF jest SWIT.

Do faz wchodzi się naciskając I/E, a wychodzi naciskając V.

Podobnie było z trybami w WORK. *Gotowość wejścia do fazy sygnalizuje LED I (Enter-Input), a wyjścia - świecąca kropka na identyfikatorze (Exit)*. Tak więc przy operacjach na poziomie nadrzędnym LED I jest zapalony, a wewnątrz fazy zgaszony. Kropka identyfikatora zachowuje się odwrotnie - wewnątrz fazy świeci, na poziomie nadrzędnym pozostaje zgaszona.

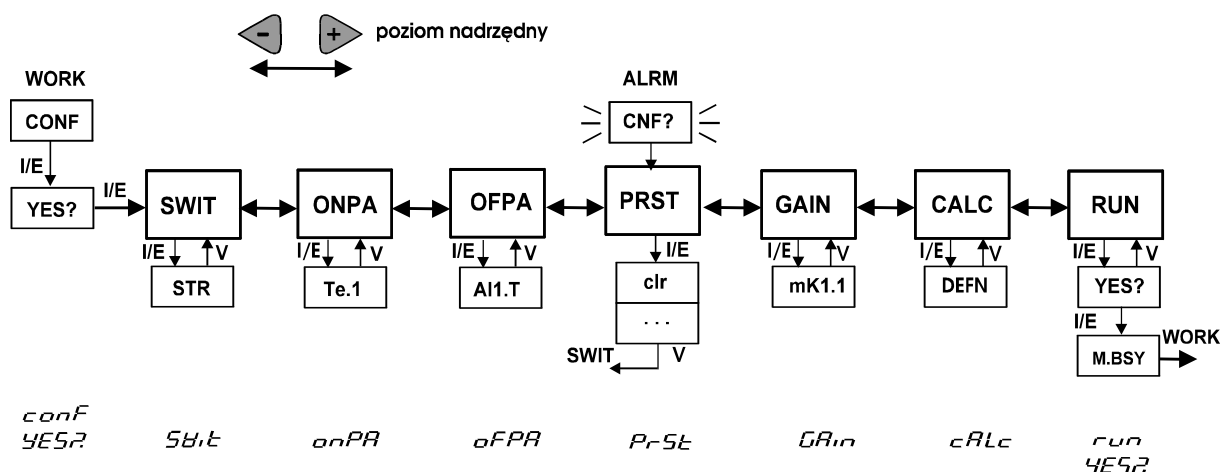
Przyciski +, - służą do zmiany fazy na poziomie nadrzędnym. Wewnątrz fazy, czyli po naciśnięciu I/E, służą albo do zmiany przełącznika, parametru, struktury (M●), albo do zmiany wartości (A●).

O aktualnym przeznaczeniu przycisków +, - informują LED-y A, M .

M sygnalizuje możliwość przejścia do następnego przełącznika, parametru, struktury (Move), A - możliwość zmiany wartości (Alter).

Naciskanie A/M zmienia przeznaczenie przycisków +, - (*Alter / Move*).

Wszystkie fazy konfiguracji pokazano na rysunku 3.1. Wybranie fazy RUN powoduje przejście do pracy normalnej regulatora WORK i rozpoczęcie regulacji.



Rys. 3.1. Fazy konfiguracji CONF

4. STRUKTURY REGULACYJNE

Regulator RF-537 może realizować 13 struktur regulacyjnych - 8 jednoobwodowych, 4 kaskadowe i 1 strukturę wskaźnika procesowego. Są one następujące:

- | | | | |
|---------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| • <i>FSP</i> | - regulacja stałowartościowa | <i>fixed set-point</i> | <i>FSP</i> |
| • <i>2SP</i> | - dwie wielkości zadane | <i>two set-points</i> | <i>2SP</i> |
| • <i>DSP</i> | - zależne wielkości zadane | <i>dependent set-points</i> | <i>dSP</i> |
| • <i>DDC</i> | - bezpośrednie sterowanie cyfrowe | <i>direct digital control</i> | <i>ddc</i> |
| • <i>RDN</i> | - rezerwa redundancyjna | <i>redundant control</i> | <i>r-dn</i> |
| • <i>ESP</i> | - regulacja nadażna | <i>external set-point</i> | <i>ESP</i> |
| • <i>FRTO</i> | - stałowartościowa regulacja stosunku | <i>fixed ratio</i> | <i>F_rt_o</i> |
| • <i>ERTO</i> | - nadażna regulacja stosunku | <i>external ratio</i> | <i>E_rt_o</i> |
| • <i>FSPC</i> | - kaskadowa regulacja stałowartościowa | <i>fixed set-point cascade</i> | <i>FSP_c</i> |
| • <i>ESPC</i> | - nadażna regulacja kaskadowa | <i>external set-point cascade</i> | <i>ESP_c</i> |
| • <i>FCRT</i> | - kaskadowa stałowart. regul. stosunku | <i>fixed cascade ratio</i> | <i>F_cr_t</i> |
| • <i>ECRT</i> | - kaskadowa nadażna regul. stosunku | <i>external cascade ratio</i> | <i>E_cr_t</i> |
| • <i>PIND</i> | - wskaźnik procesowy | <i>process indicator</i> | <i>P_ind</i> |

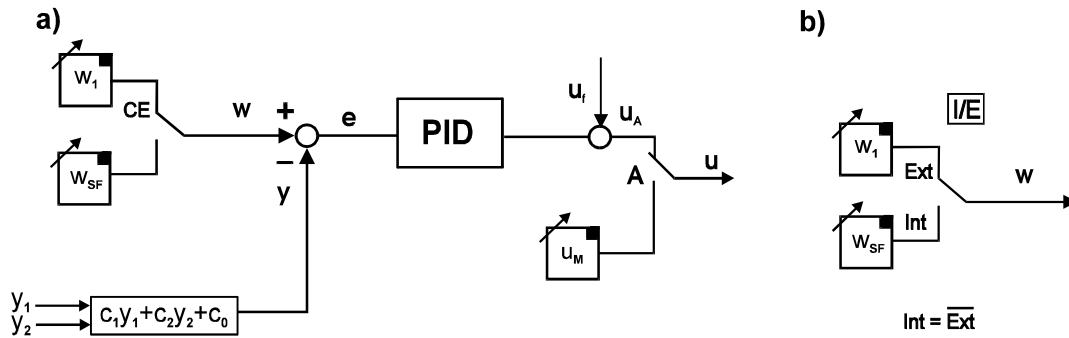
Regulacja nadażna jest nazywana często regulacją z zewnętrzną wielkością zadaną. Strukturę wybiera się za pomocą głównego przełącznika konfiguracyjnego *STR*. Znaczna liczba struktur zapewnia szeroki zakres zastosowań regulatora RF-537.

5. REGULACJA STAŁOWARTOŚCIOWA FSP

Schemat blokowy układu regulacji FSP pokazano na rys 5.1a. Zależnie od pozycji przełącznika CE wielkość zadana w może przyjmować wartość generowaną przez zadajnik w_1 (CE=1) lub wartość bezpieczną w_{SF} (CE=0) będącą parametrem *on-line*. Zmienna procesowa y jest średnią ważoną sygnałów y_1, y_2 z przesunięciem punktu początkowego, tj.

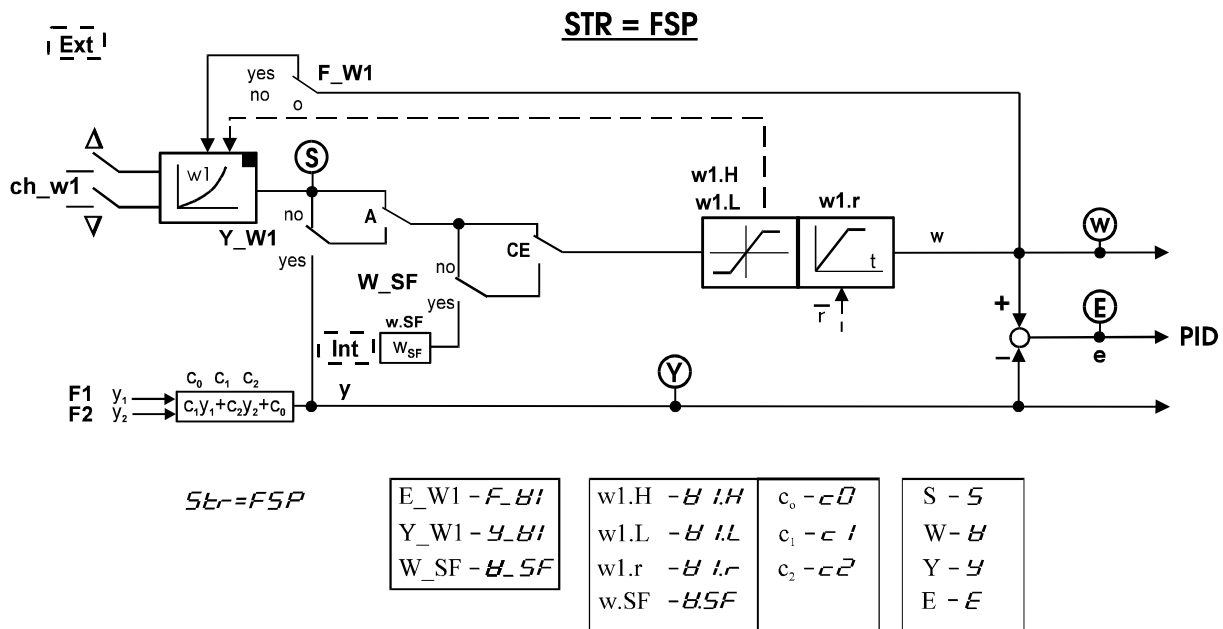
$$y = c_1 y_1 + c_2 y_2 + c_0$$

Dwa sygnały obiektowe występują w niektórych układach regulacji temperatury, np. jako pomiary po lewej i prawej stronie kotła lub pieca.



Rys. 5.1. Struktura FSP: a) schemat uproszczony, b) przypadek z ER=1

Schemat pełny dla regulacji FSP pokazano na rys.5.2. Końcowy sygnał w jest nazywany faktyczną wielkością zadaną.



Rys. 5.2. Regulacja stałowartościowa FSP - schemat pełny

Symbole podane w okręgach: S, Y, W, E oznaczają odpowiednio – surową wartość zadaną, zmienną procesową, wartość zadaną, uchyb regulacji. Wartości tych zmiennych można oglądać podczas normalnej pracy regulatora w fazie NORM oraz VIEW (zob. dalej).

Z rysunku widać, że ustawianie wartości zadanej w praktycznych zastosowaniach jest ograniczane co do szybkości i zakresu jej zmian. Uniemożliwia to operatorowi wprowadzania zbyt gwałtownych zmian wartości zadanej oraz przekraczania jej maksymalnej, dozwolonej technologicznie, wartości (lub ustawiania wartości zbyt małej).

Przełączniki konfiguracyjne

- F_{WI} - śledzenie faktycznej wielkości zadanej w_I przez zadajnik w_I podczas sterowania ręcznego: *no, yes* F_{HI}
- Y_{WI} - zmienna procesowa y zamiast w_I podczas sterowania ręcznego: *no, yes* Y_{HI}
- W_{SF} - bezpieczna wartość zadana potrzebna: *no, yes*. W_{SF}

Parametry on-line

- $wI.H$ - górne ograniczenie wielkości zadanej: $-199.9...199.9\%$ W_{HI}
- $wI.L$ - dolne ograniczenie jw. W_{LI}
- $wI.r$ - dopuszczalna prędkość zmiany wielkości zadanej: *off, 1...1000s/100%* W_{Ir}
- $w.SF$ - bezpieczna wartość zadana: $-199.9...199.9\%$ W_{SF}
- c_0 - współczynnik uniwersalny: $-1.999...9.999$ c_0
- c_1 - jw. c_1
- c_2 - jw.

Przełączanie bezuderzoniowe

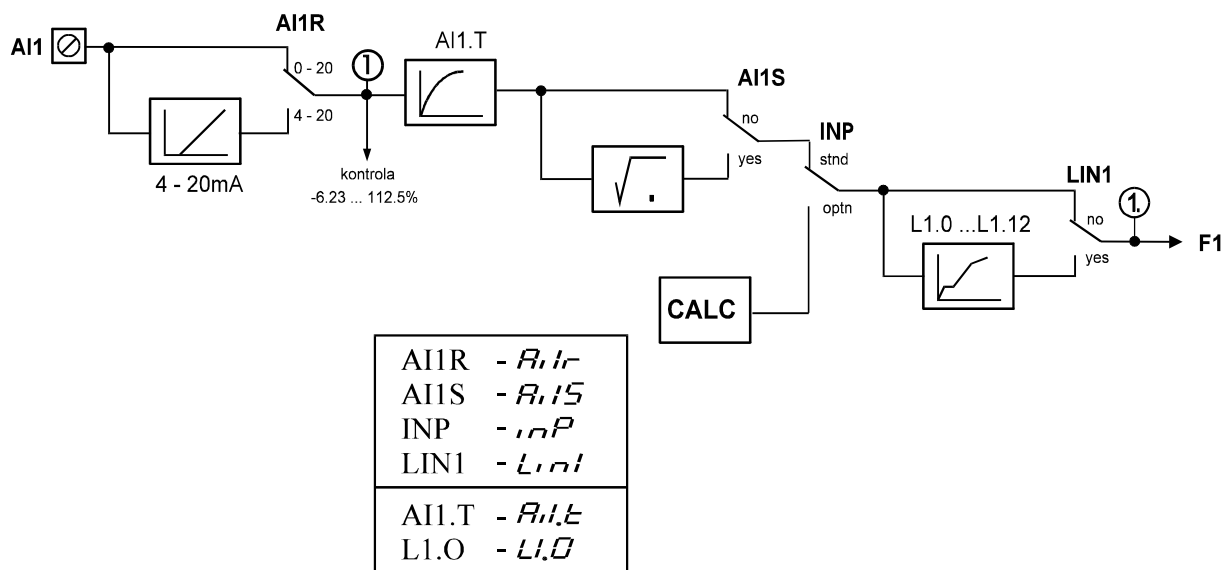
Ustawienie $Y_{WI}=yes$ sprawia, że w stanie *Man* faktyczną wielkością zadaną staje się zmienna procesowa y . Błąd e jest wtedy zerowy więc nie może generować alarmów. Jeżeli ponadto $F_{WI}=yes$, po powrocie do *Auto* wartość początkowa w_I odpowiada ostatniej wartości y . Zapobiega to „uderzeniom” przy przełączeniach *Auto/Man*, ale wyklucza utrzymanie stałej wielkości zadanej.

6. WEJŚCIA ANALOGOWE

Tor każdego z wejść zawiera filtr cyfrowy oraz bloki pierwiastkowania i linearyzacji. W danej strukturze regulacyjnej przeznaczenie kolejnych wejść jest ściśle określone. Uszkodzenie toru pomiarowego powoduje alarm oraz ew. przejście na sterowanie ręczne. Wyjście sterujące pozostaje wtedy na dotychczasowym poziomie. Scharakteryzowano również kontrolę wyjść analogowych przez wejścia. Rozbieżność między wartością odczytaną a ustawioną powoduje alarm i ew. przejście na sterowanie ręczne.

Regulator RF-537 posiada 4 wejścia analogowe o zakresie 0/4...20 mA. Obwód każdego wejścia zawiera wzmacniacz separujący oraz filtr szumów pomiarowych (*anti-aliasing*). Przetwornik A/C i multiplexer wchodzi w skład mikrokontrolera 80C537. Dokładność przetwarzania wynosi 10 bit, ale dzięki wielokrotnemu odczytywaniu i uśrednianiu wzrasta do 12...13 bit (0.02%).

Tor przetwarzania wejścia analogowego AI1 pokazano na rys.6.1. Składa się on z bloku zakresu



Rys. 6.1. Tor przetwarzania wejścia analogowego AI1

4-20 mA, dolnoprzepustowego filtru cyfrowego oraz bloków pierwiastkowania i linearyzacji. Filtr występuje zawsze, natomiast bloki 4-20 mA, pierwiastkowania i linearyzacji są włączane przez przełączniki. Kalkulator CALC prowadzi przetwarzanie opcjonalne. Tory wejść AI2, 3, 4 wyglądają identycznie.

Wejście analogowe 0/4...20 mA jest przetwarzane na liczbę z przedziału (0,1) interpretowanego jako 0...100%.

Przełączniki konfiguracyjne i parametry toru AI1 są następujące:

Przełączniki konfiguracyjne

- *INP* - rodzaj przetwarzania: *std, optn* inP
- *AI1R* - zakres wejścia AI1: *0-20, 4-20 mA* $R_{i,r}$
- *AI1S* - pierwiastkowanie: *no, yes* $R_{i,s}$
- *LIN1* - linearyzacja: *no, yes.* $Lin1$

Parametr off-line

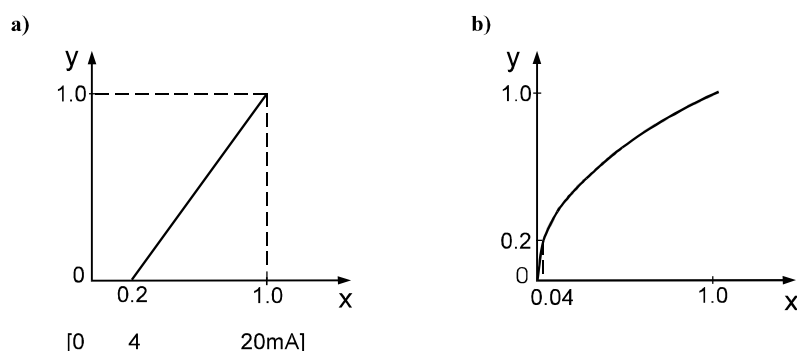
- *L1.0, ..., L1.12* - współrzędne linearyzacji wejścia AI1: *-199.9... 199.9%* $L.O$

Parametr on-line

- *AI1.T* - stała czasowa filtru AI1: *off, 1....1000s*

\bar{H} , \bar{I}_E

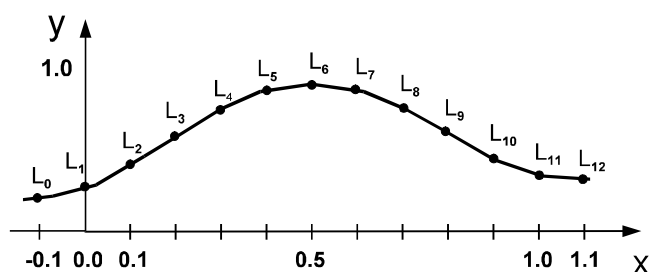
INP jest jednym z trzech podstawowych przełączników konfiguracyjnych regulatora RF-537 (obok *STR* i *OUT*). Jak widać, przełączniki i parametry torów AI1 do AI4 różnią się tylko cyfrą w nazwie. Zwrócimy także uwagę, że *sygnały wyjściowe torów przetwarzania analogowego są oznaczone F1 do F4. Kalkulator CALC generuje dodatkowo sygnały F5 i F6.* Charakterystykę bloku 4-20 mA pokazano na rys. 6.2a.



Rys. 6.2. Charakterystyki bloków: a) zakresu 4-20 mA, b) pierwiastkowania

Pierwiastkowanie. Jest potrzebne przy pomiarach przepływu za pomocą kryz i zwężek. Charakterystykę bloku pierwiastkowania pokazano na rys.6.2b. Dla sygnałów mniejszych niż 0.04 (4%) krzywą pierwiastkującą $y = \sqrt{x}$ zastępuje prosta $y=5x$. Ogranicza to wpływ szumu pomiarowego.¹⁾

Linearyzacja. Stosuje się ją m. in. przy pomiarach temperatury za pomocą czujników rezystancyjnych lub termoelementów z przetwornikami R/F lub U/I. Funkcja linearyzująca jest łamaną 12-odcinkową pokazaną na rys.6.3, z punktami wyznaczonymi co 0.1 (10%). Współrzędne L_0, \dots, L_{12} są parametrami $L1.0, \dots, L1.12$ (dla toru AI1).



Rys. 6.3. Charakterystyka bloku linearyzacji

Konwencja oznaczeń. Na schemacie z rys. 3 oraz na następnych schematach obowiązuje następująca konwencja:

¹⁾ Podobne rozwiązanie jest stosowane w regulatorach Philipsa.

1. Przełączniki są narysowane w położeniu pierwotnym (*default*). Nazwy ich i wartości podano obok.
2. Parametry danego bloku są podane nad nim.
3. Sygnały występujące w NORM i VIEW są oznaczone kółkiem z wewnętrznym symbolem, pojawiającym się na identyfikatorze.

Przeznaczenie wejść analogowych

Sygnały F1 do F4 wytwarzane przez tory pomiarowe mają ustalone przeznaczenie w strukturach regulacyjnych, wyjściowych oraz w algorytmie PID. Jeżeli $INP=std$, dotyczy to automatycznie również wejść AI1 do AI4. Wprowadź struktury i algorytm PID będą szczegółowo omówione później, ale już tutaj dla orientacji podamy przeznaczenie wejść. Sygnały F1 do F4 będą również oznaczone jako

$$y_1 = F1, \quad y_2 = F2, \quad y_3 = F3, \quad u_T = F4$$

Dla uproszczenia nazywa się je także wejściami. Przeznaczenie określa tab. 6.1.

Tab.6.1. Przeznaczenie wejść analogowych regulatora RF-537 ($INP=std$)

AI	Syg	Układ regulacji (struktura)							
		jednoobwodowy		stosunek		kaskadowy		kaskad. stosunku	
		stałwart i podobne	nadażny	stałwart	nadażny	stałwart	nadażny	stałwart	nadażny
1	y_1	zmienna procesowa		stosunek		wiodąca zmienna procesowa			
2	y_2	$y=c_1y_1+c_2y_2+c_0$		$\frac{y_1 - c_0}{y_2}$		podrzędna zmienna procesowa		stosunek podrz.	
3	y_3	kompens zakłóc.	wielkość zadana	kompens zakłóc.	wielkość zadana	kompens zakłóc.	wielkość zadana	$\frac{y_2-c_0}{y_3}$	
4	u_T	Sygnał śledzony lub położenie siłownika							

Jak widać, y_1 i y_2 określają zmienną lub zmienne procesowe, bądź stosunek. y_3 reprezentuje kompensowane zakłócenie, wielkość zadaną w układzie nadażnym, albo wraz z y_2 określa stosunek podrzędny. u_T jest sygnałem śledzonym przez regulator lub położeniem siłownika 3-pozycyjnego. W pierwszym przypadku chodzi zwykle o zdalne sterowanie ręczne.

7. WYJŚCIA STERUJĄCE

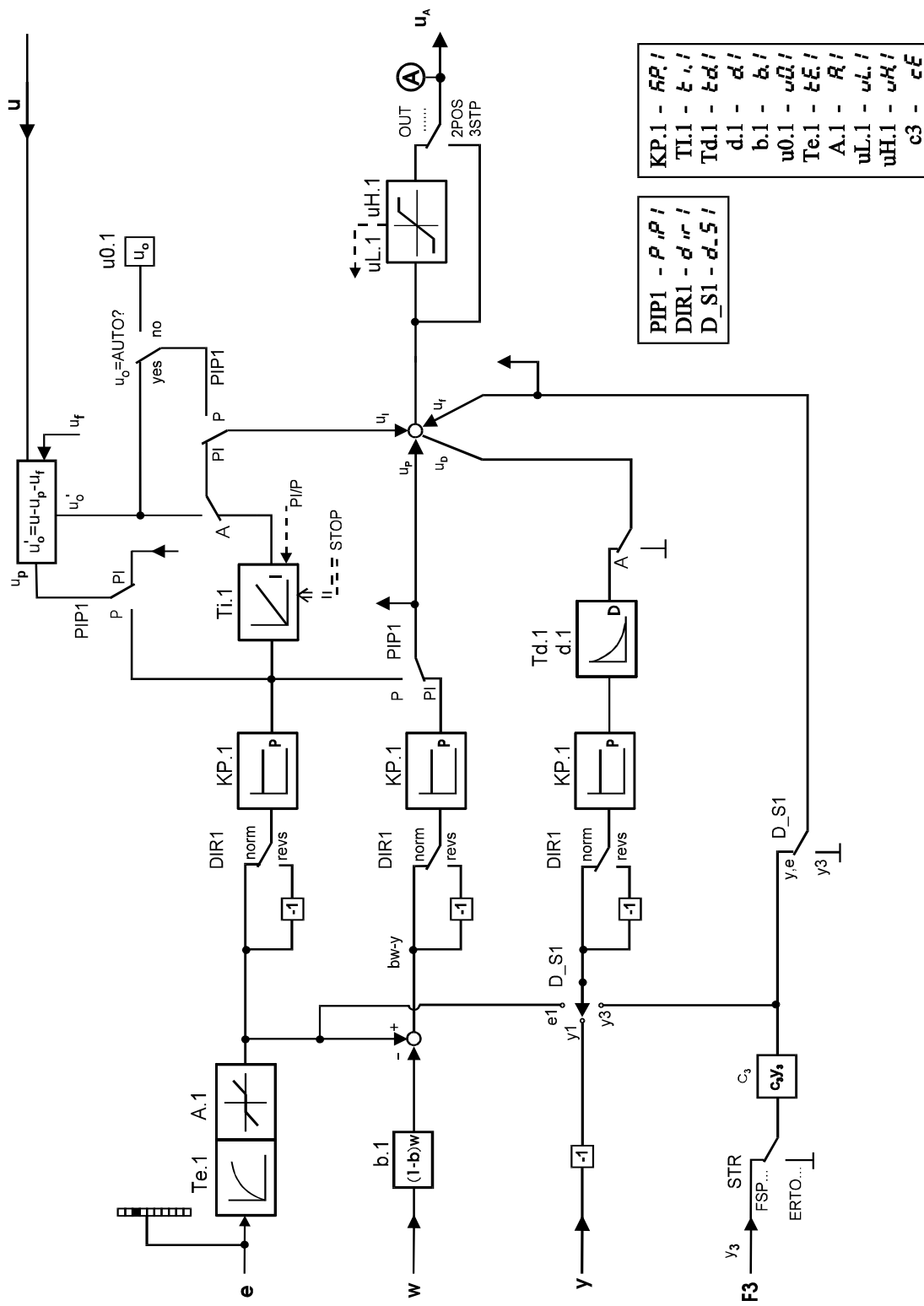
Drugim po *STR* podstawowym *przełącznikiem konfiguracyjnym* regulatora RF-537 jest *OUT* określający rodzaj wyjścia sterującego. Możliwości są następujące:

- *CONT* - sterowanie ciągłe (*continuous*) *cont*
- *2POS* - sterowanie 2-pozycyjne z modulacją szerokości impulsów *2POS*
- *3POS* - sterowanie 3-pozycyjne ze sprzężeniem od położenia siłownika *3POS*
- *3STP* - sterowanie 3-pozycyjne bez sprzężenia (inaczej krokowe, *step*) *3STEP*

Układy obsługi wyjść generują odpowiednie sterowania na podstawie sygnału otrzymanego z bloku PID lub jednego z dwu zadajników sterowania ręcznego. Pierwszy zadajnik jest sterowany przez przyciski panelu, drugi zdalnie - ze stacyjki sterowania ręcznego, sterownika PLC lub komputera nadrzędnego. W razie nagłej potrzeby sygnał sterujący można przełączyć na wartość bezpieczną lub zablokować na dotychczasowej wartości. Drugie z wyjść analogowych może zamiennie przekazywać dwa sygnały, czego wymagają niektóre stacyjki. Układy wyjściowe prowadzą ponadto śledzenie wejścia analogowego oraz obsługują sterowanie DDC i RDN. W ramach sterowania 3-pozycyjnego są możliwe dwa warianty sterowania ręcznego, *dir* - bezpośrednio włączanie/wyłączanie siłownika z pominięciem zadajnika i pozycjonera (*direct*) oraz *indr* - pośrednie za pomocą zadajnika i pozycjonera (*indirect*).

8. BLOK PID

Schemat bloku PID_1 występującego w strukturach jednoobwodowych pokazano na rys.9.1. Schemat z rys.6 ma typową strukturę równoległą z torami: P - drugi od góry, I - pierwszy, D - trzeci, oraz torem kompensacji zakłócenia - dolny. W torze pierwszym występuje filtr błędu regulacji oraz blok ze strefą nieczułości. Tor ten staje się torem P, jeżeli w algorytmie nie występuje składowa całkująca I. Suma składowych $u_P + u_I + u_D + u_f$ po przejściu przez ogranicznik staje się sygnałem u_A . Jest to sygnał sterujący regulatora w stanie *Auto*. W fazie VIEW u_A występuje z identyfikatorem A. Fragment schematu obok bloku I obsługuje bezuderzeniowe przełączanie *Auto*↔*Man*.



Rys.9.1. Schemat bloku PID, gdzie $OUT = \dots$ oznacza $OUT = CONT, 3POS$.
 Podobnie: $STR = FSP, \dots$ - $STR = FSP, 2SP, DSP, DDC, RDN, ESP, FRTO, FSPC$
 $STR = ERTO, \dots$ - $STR = ERTO, ESPC, FCRT, ECRT$

Sygnal zwrotny u pochodzi z obwodu wyjściowego i jest finalnym sygnałem sterującym, dotyczącym zarówno stanu *Man*, jak i *Auto*.

PID. Jeżeli $PIP=PI$, a więc w algorytmie występuje składowa całkująca I, wzór określający sterowanie u_A ma postać (operatorową)

$$u_A = K_p \left[(bw - y) + \frac{1}{T_i s} e - \frac{T_d s}{T_d s + 1} y \right]$$

gdzie $e=w-y$.

Reduktor b . Modyfikacja algorytmu PID, którą wzorem regulatora Toshiba zastosowano polega na wprowadzaniu dodatkowego parametru $b \leq 1$ redukującego wpływ wielkości zadanej w w torze P. Ustawiając $b < 1$ można niemal w każdym przypadku wyeliminować lub przynajmniej zmniejszyć przeregulowanie zmiennej procesowej y występujące po skokowej zmianie w . *Odpowiedź na skok zakłócenia obiektowego nie ulega przy tym zmianie. W konwencjonalnym algorytmie PID, gdzie $b \equiv 1$, dla nastaw K_p , T_i , T_d dających pożądaną odpowiedź zakłóceniovą - zazwyczaj oscylacyjną, odpowiedź na skok wielkości zadanej jest również oscylacyjna, ze znacznym przeregulowaniem. Z drugiej strony, dla nastaw dających pożądaną odpowiedź na wielkość zadaną - zwykle aperiodyczną krytyczną lub z niewielkim przeregulowaniem, odpowiedź zakłóceniovą jest również aperiodyczna. Wygasa ona jednak powoli dopuszczając do znacznego odchylenia zmiennej procesowej od stanu nominalnego. Ustawienie odpowiedniego $b < 1$ eliminuje lub redukuje przeregulowanie odpowiedzi na wielkość zadaną przy nastawach K_p , T_i , T_d optymalizujących odpowiedź zakłóceniovą.*

W szczególności odpowiedź na wielkość zadaną może wyglądać prawie jak aperiodyczna krytyczna (minimalizując czas regulacji). Ze względu na możliwość niemal niezależnego ukształtowania obydwu odpowiedzi wzór (9.1) jest nazywany „algorytmem o dwu stopniach swobody”. Warto dodać, że w regulatorach Honeywella występuje algorytm z $b=0$, który daje odpowiedź aperiodyczną - bez przeregulowania, ale nie krytyczną. Stabilizuje się ona oczywiście wolniej niż krytyczna.

Technika nastawiania. Dobór parametrów bloku PID wymaga odpowiedniego doświadczenia. Jeżeli występuje składowa I, powinno się najpierw dobrać nastawy K_p , T_i , T_d kształtując odpowiedź na skok zakłócenia. Zazwyczaj chodzi tu o dostatecznie małą pierwszą amplitudę, ponieważ reprezentuje ona maksymalne odchylenie, ale jednocześnie o w miarę szybkie tłumienie następnych oscylacji. Mając dobrane K_p , T_i , T_d , w następnym kroku

określa się reduktor $b < 1$, tak aby odpowiedź na skok wielkości zadanej była aperiodyczna krytyczna, ewentualnie z niewielkim przeregulowaniem.

Alternatywą dla nastawiania ręcznego jest nastawianie automatyczne, inaczej samonastawianie (*self-tuning*), gdzie regulator w wyniku podobnych prób sam określa nastawy (faza ADPT). Wskaźnikami są zadany stopień tłumienia oscylacji zakłóceń (określający również pierwszą amplitudę) oraz wymóg aperiodycznej krytycznej odpowiedzi na skok wielkości zadanej, bądź jej zadane przeregulowanie.