

Zbigniew PIETRUSIŃSKI
Przemysłowy Instytut
Automatyki i Pomiarów PIAP
W a r s z a w a

REGULATOR MRP-42C ORAZ WSPÓŁCZESNE REGULATORY MIKROPROCESOROWE DO AUTOMATYZACJI PROCESÓW CIĄGŁYCH

Artykuł zawiera omówienie tendencji rozwojowych współczesnych regulatorów mikroprocesorowych, przeznaczonych do automatyzacji wolnozmiennych ciągłych procesów technologicznych i na tym tle prezentację rozwiązania układowego i własności funkcjonalnych mikroprocesorowego regulatora MRP-42C, opracowanego w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w Warszawie. Jest to dwukanałowy, swobodnie programowalny regulator, zawierający szereg oryginalnych rozwiązań sprzętowych i programowych, takich jak: pseudoseparacja sygnałów analogowych, programowalny zadajnik sygnałów analogowych i dyskretnych, automatycznie dobierane lub programowalne charakterystyki linearyzacyjne, autostrojenie parametrów dynamicznych regulatora oraz specjalizowane algorytmy regulatorów nieliniowych. Bardziej szczegółowo zostały omówione algorytmy bloków regulacyjnych.

1. WSTĘP

Elektroniczne regulatory PID stanowią najważniejszy element centralnej części uniwersalnych blokowych systemów automatycznej regulacji. Są one przeznaczone do budowy układów automatyki w wielu różnych gałęziach przemysłu. Od początku swego istnienia przeżywają ciągły, dynamiczny rozwój zarówno w zakresie rozwiązań sprzętowych, jak i możliwości funkcjonalnych. Rozwój systemów mikroprocesorowych stwarza coraz lepsze możliwości realizacji skomplikowanych algorytmów działania, a także zwiększenia miniaturyzacji urządzeń i polepszenia ich parametrów metrologicznych.

Tendencje rozwojowe daje się zaobserwować u wszystkich liczących się producentów aparatury kontrolno-pomiarowej, takich jak: Siemens, Hartmann & Braun, Honeywell, Fenwal, Fisher, Micon itp. [3]. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP (Warszawa) od szeregu lat prowadzi prace z zakresu regulatorów i systemów automatyki. PIAP posiada wieloletnią tradycję w tej dziedzinie sięgającą lat sześćdziesiątych. Wiele opracowanych w Instytucie urządzeń stanowiło stanowiąc bazę do realizacji układów automatyki w energetyce i innych gałęziach gospodarki. Powszechnie stosowane w kraju i w inwestycjach eksportowych systemy automatyki analogo-

wej, w których opracowaniu PIAP odgrywał rolę wiodącą, takie jak: URS, URS-II, INTELEKTRAN, INTELEKTRAN-S, podlegały ciągłym zmianom i unowocześnieniom stanowiąc dla użytkownika zawsze atrakcyjną ofertę. Począwszy od lat osiemdziesiątych prace Instytutu z tego zakresu związane są głównie z regulatorami mikroprocesorowymi. Opracowane przez PIAP regulatory mikroprocesorowe serii EFTRONIK M zostały wdrożone do produkcji w Przedsiębiorstwie Automatyki Przemysłowej PAP-Falenica, a wielofunkcyjny jednokanałowy regulator parametryczny MRP-41 produkowany jest w Zakładach Automatyki ELAM we Wrocławiu. Najnowszym regulatorem mikroprocesorowym opracowanym w PIAP jest dwukanałowy regulator parametryczny MRP-42C, produkowany w Instytucie począwszy od 1994 r.

2. TENDENCJE ROZWOJOWE REGULATORÓW MIKROPROCESOROWYCH

W charakterystyce tendencji rozwojowych regulatorów mikroprocesorowych główna uwaga zostanie poświęcona sprawom sprzętu i oprogramowania.

Tendencje sprzętowe

Zasadnicze tendencje sprzętowe można scharakteryzować następująco:

- Stosowanie nowoczesnych, na ogół 16-bitowych mikroprocesorów, specjalnie przeznaczonych do zastosowań w aparaturze przemysłowej, takich jak 80C188EB - INTEL lub 68C020 - MOTOROLA.
- Zwarta konstrukcja, zmniejszenie głębokości zabudowy aparatów w pulpitach, zmniejszenie poboru mocy głównie dzięki stosowaniu elementów wykonanych w technice CMOS, zmniejszenie wagi, poprawa niezawodności.
- Wyjścia analogowe, realizowane w układach modulacji wypełnienia, przy zapewnieniu separacji galwanicznej drogą optoizolacji.
- Przetwarzanie a/c i c/a z rozdzielczością 12 do 16 bitów.
- Bezpośrednie wejścia parametryczne z czujników pomiarowych.
- Układ „watch dog” oraz nieulotna pamięć danych (typu EEPROM lub CMOSRAM z podtrzymaniem baterijnym) w celu zapewnienia bezzakłócenowego wznowienia pracy przy zanikach napięcia zasilania lub silnych zakłóceniach zewnętrznych.
- Kontrola wyjść analogowych i binarych.
- Stosowanie dwóch kanałów transmisyjnych do współpracy z urządzeniami zewnętrznymi, z których jeden przewidziany jest do komunikacji poziomej, tj. do wymiany informacji pomiędzy urządzeniami obiektowymi (np. TOKENBUS),

a drugi do sprzężenia z warstwą nadrzędną (PROFIBUS, HART). Prędkość transmisji dochodzi do 500 kbit/s.

- Prezentacja danych na wyświetlaczach cyfrowych, bargrafach, a także na alfanumerycznych i graficznych wyświetlaczach matrycowych, przeważnie ciekłokrystalicznych - LCD.

Firmy dążą do zapewnienia redundancji urządzeń, co najczęściej realizuje się za pośrednictwem interfejsu komunikacyjnego. Stosuje się procedury szybkiego wykrywania stanów awaryjnych i zgłaszania odpowiednich alarmów optycznych i komunikatów, które wpływają na zapewnienie wysokiej niezawodności pracy całego systemu automatyki. Urządzenia w wykonaniu aparatomym i modułowym (PLC) rozwijają się mniej więcej jednakowo intensywnie, przy czym żadne z wykonanych nie uzyskuje wyraźnej przewagi. Wykonanie modułowe jest przeznaczone głównie do bardziej złożonych systemów regulacyjnych. Aparaty mają z reguły wymiary czoła 72×144 mm.

Tendencje w zakresie oprogramowania

W zakresie oprogramowania obserwuje się rozszerzanie propozycji o nowe, bardziej złożone algorytmy pracy, takie jak: algorytmy autostrojenia i adaptacji parametrów dynamicznych o różnej złożoności i jakości działania, algorytmy programowalnych zadajników sygnałów analogowych i dyskretnych, algorytmy linearyzacji sygnałów analogowych, algorytmy regulacji progresywnej, algorytmy do analitycznego i logicznego przetwarzania sygnałów i graficznej prezentacji wyników itp.

Obserwuje się próby standaryzacji w zakresie oprogramowania. w 1992 r. została przyjęta norma IEC 1131, której cz. 3 dotyczy języków programowania. Niezależnie od prostych języków programowania (assembler, Pascal) norma jest próbą standaryzacji także w zakresie bloków funkcjonalnych stosowanych w układach automatycznej regulacji. Bardziej szczegółowe wymagania zawiera norma VDI/ VDE, obejmująca 67 bloków funkcjonalnych. Pracami normalizacyjnymi objęte są także języki programowania sterowników sekwencyjnych (SFC), w których do niedawna istniała duża różnorodność, tak że praktycznie każdy producent oferował swój własny język programowania. Niektóre firmy (np. HIMA) oferują pakiety logiki bezpiecznej. Sterownik bezpieczny powinien mieć atest na oprogramowanie oraz zapewnić stany bezpieczne w wypadku awarii. Istnieją firmy badające i opiniujące zgodność oprogramowania oferowanego przez producenta, z obowiązującą w tym zakresie normą. Firmy oferują także narzędzia programowe do wizualizacji, monitorowania, sterowania nadrzędnego a także do graficznej konfiguracji systemu regulacji (np. VIZCON).

3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA REGULATORA MRP-42C

Regulator MRP-42C jest nowoczesnym mikroprocesorowym regulatorem PID, opracowanym w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów, w ramach realizacji projektu celowego [1]. Aparat jest docelowo przeznaczony do produkcji w Zakładach Automatyki Elam we Wrocławiu, jednak aktualnie produkcję i sprzedaż regulatorów prowadzi PIAP Warszawa. MRP-42C jest regulatorem dwukanałowym, o swobodnie programowanej strukturze funkcjonalnej, przeznaczonym do realizacji układów automatycznej regulacji wolnozmiennych procesów technologicznych. Jest on przystosowany do pracy w układach regulacji stałwartościowej, stosunku lub regulacji kaskadowej w których realizuje działanie regulacyjne krokowe, trójpołożeniowe albo ciągle typu P, PI, PD oraz PID. Przyłączająca większość parametrów technicznych regulatora jest zgodna z tendencjami przedstawionymi w rozdziale 2.

Podstawowe parametry techniczne

Wejścia analogowe, w tym jedno wejście niskiego poziomu dla:	8 wejść (0) 4...20 mA lub (0) 2...10 V
czujnika termoelektrycznego	2,7 mV do 37,3 mV
lub czujnika termometru rezystancyjnego	Pt100, Ni100
lub nadajnika potencjometrycznego	1 k Ω , 10 k Ω
Przetwarzanie a/c	rozdzielczość 12 bitów plus bit znaku, pseudoseparacja galwaniczna
Wyjścia analogowe	2 wyjścia 4...20 mA, R < 500 Ω
Przetwarzanie c/a	rozdzielczość 12 bitów, separacja galwaniczna
Wejścia dyskretne	6 wejść 0/24 V albo zwarcie lub rozwarcie zestyków, separacja galwaniczna
Wyjścia dyskretne	7 wyjść tranzystorowych, w tym jedno wyjście sygnalizacji awarii sprzętowej, separacja galwaniczna
Wyjścia krokowe	2 kompletne wyjścia (+) i (-) tyrystorowe 220 V, 50 Hz 100 VA albo przekaźnikowe, separowane galwanicznie

Pomocnicze napięcie dla zasilania przetworników pomiarowych	22...24 V, $I < 100$ mA
Interfejs szeregowy do współpracy z komputerem nadrzędnym	RS 232C albo RS 485
Zasilanie	220 V, -15 %...+10 %, 50 Hz
Pobór mocy	≤ 15 VA
Wymiary	72×144×225 mm
Temperatura otoczenia	+5...55 °C

Struktura funkcjonalna

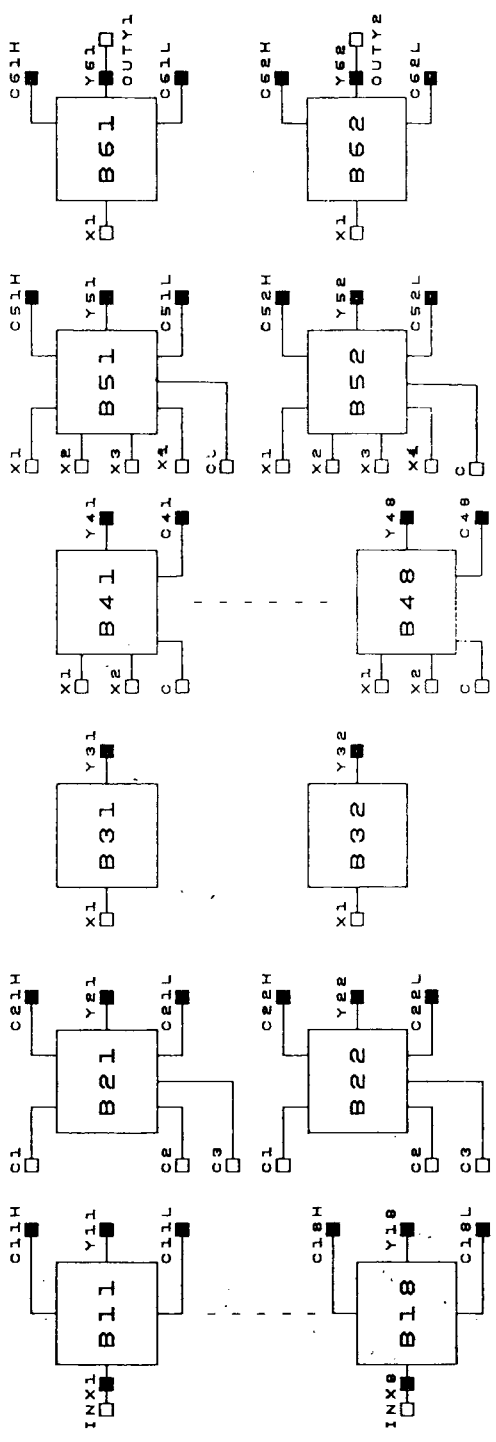
Oprogramowanie regulatora MRP-42C pozwala na zrealizowanie układu automatycznej regulacji o średnio złożonej strukturze, zawierającej dwa regulatory i szereg pomocniczych bloków funkcjonalnych, typowych dla części centralnej układu regulacji. Struktura funkcjonalna regulatora (rys.1) przedstawia się dla użytkownika jako zbiór 24 bloków podzielonych na 6 grup nazwanych umownie warstwami. Oprócz tego wyróżnia się 3 grupy sygnałowe zawierające sygnały obiektowe i wewnętrzne pomocnicze.

Bloki warstwy 1. są na stałe połączone z analogowymi sygnałami wejściowymi i realizują proste algorytmy przetwarzania pojedynczego sygnału analogowego, takie jak: przeniesienie sygnału z wejścia na wyjście z inwersją lub bez, filtracja sygnału, potęgowanie, pierwiastkowanie, linearyzacja wejść temperaturowych sygnałów niskiego poziomu. Bloki te umożliwiają również przeliczanie sygnału na jednostki fizyczne oraz sygnalizację przekroczeń. Warstwa 2. zawiera dwa bloki programowanego zadajnika sygnałów analogowych i dyskretnych. Bloki warstwy 3. zawierają algorytm, nastawianej przez użytkownika, wieloodcinkowej charakterystyki linearyzacyjnej, przeznaczonej do linearyzacji dowolnych sygnałów analogowych.

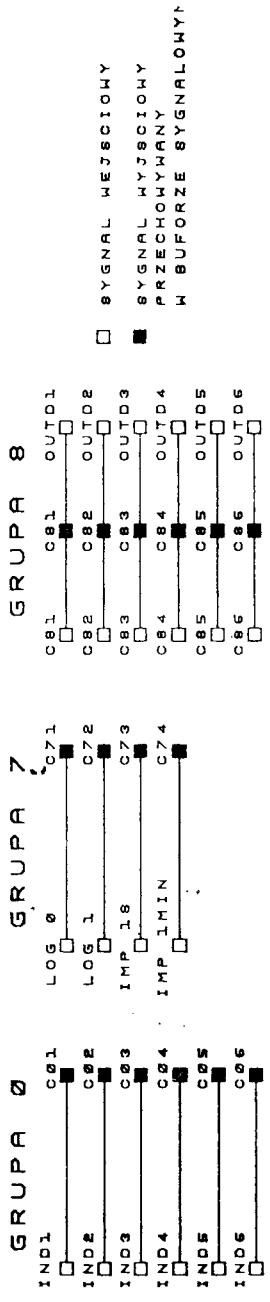
Bloki warstwy 4. są przeznaczone dla algorytmów przetwarzających dwa sygnały analogowe lub dyskretny. Umożliwiają one realizację takich operacji na sygnałach analogowych jak: suma, różnica, iloczyn, iloraz, pierwiastek sumy, pierwiastek różnicy, pierwiastek iloczynu, pierwiastek ilorazu, wybierak ekstremum, człon korekcyjny przyspieszający typu LEAD-LAG. Na sygnałach dyskretnych możliwe są do realizacji operacje typu: AND, NAND, OR, NOR, EXOR, EXNOR, INHIBIT, IMPLIKATION, przerzutniki RS i D, generator programowalny, uniwibrator. Warstwa 5. zawiera dwa bloki regulatorów typu PID: ciągły, krokowy, trójpołożeniowy, kaskada regulatorów ciągłych oraz specjalne algorytmy regulacyjne, takie jak autostrojenie lub suboptymalna regulacja progresywna. Bloki warstwy 6. przeznaczone są do przeniesienia analogowego sygnału regulacyjnego z wyjścia warstwy 5. na wyjście fizyczne regu-

BLOKI FUNKCJONALNE REGULATORA MRP-42C

WARSTWA 1 WARSTWA 2 WARSTWA 3 WARSTWA 4 WARSTWA 5 WARSTWA 6



SYGNALY POMOCNICZE



Rys. 1. Schemat rozwiązania struktury funkcjonalnej regulatora

latora (wprost lub z inwersją). Umożliwiają one nastawę dopuszczalnych zmian sygnału wyjściowego z sygnalizacją nastaw przekroczeń tego sygnału. Kodowanie struktury funkcjonalnej odbywa się drogą wprowadzania odpowiednich słów konfiguracyjnych wg sformalizowanej procedury za pośrednictwem pulpitu regulatora lub przez łącze transmisji szeregowej z urządzenia nadrzędnego.

4. ALGORYTMY REGULATORÓW

Algorytmy regulatorów stanowią najważniejszą warstwę aparatu i w związku z tym zostaną omówione bardziej dokładnie. Regulator MRP-42C pozwala na realizację następujących typów regulatorów:

- regulatora ciągłego,
- regulatora krokowego,
- regulatora trójpołożeniowego z pozycjonerem i bez pozycjonera,
- dwóch typów regulatorów ciągłych o działaniu progresywnym,
- regulatora ciągłego z autostrojeniem.

Poniżej zostaną dokładniej omówione trzy podstawowe rodzaje regulatorów, tj. regulator ciągły, krokowy i trójpołożeniowy.

Ogólna charakterystyka algorytmów regulacyjnych

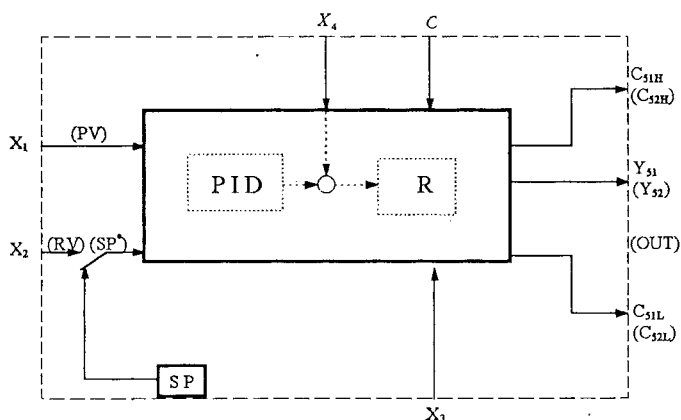
Bloki regulacyjne umożliwiają realizację różnych typów regulatorów PID z wyjściem ciągłym lub dyskretnym. Ogólny, uproszczony schemat regulatora przedstawiony jest na rys. 2.

Regulator posiada 4 wejścia analogowe, przy czym

- X_1 - jest zwykle zmienną procesu (PV),
- X_2 - oznacza zdalną wartość zadaną (RV), tzn. jest to sygnał wprowadzony z innego bloku programowego, który pełni rolę wartości zadanej,
- X_3 - jest sygnałem położenia elementu wykonawczego istotnym dla algorytmów regulacji krokowej i trójpołożeniowej, ze sprzężeniem od pozycjonera,
- X_4 - oznacza sygnał korekcji zakłóceń.

Każdy regulator posiada również wewnętrzną wartość zadaną (SP). Aktualna wartość zadana SP^* regulatora równa jest X_2 lub SP, w zależności od wybranego przez operatora rodzaju wartości zadanej (klawisz EXT na pulpicie). Sygnał wyjściowy Y_{st} (Y_{st}^*) obliczany jest przez algorytm na podstawie sygnałów wejściowych i parametrów regulatora. Wejście sygnałowe X_4 umożliwia realizację tzw. struktury "feed forward", która pozwala na bezpośrednią kompensację mierzalnych zakłóceń

oddziałujących na obiekt regulacji. Sygnał proporcjonalny do zakłóceń dodawany jest bezpośrednio do sygnału wyjściowego regulatora, z pominięciem bloku działania dynamicznego PID regulatora.



Rys. 2. Ogólny uproszczony schemat bloków regulacyjnych (warstwy 5).

Algorytm pracy może być modyfikowany przez sygnał dyskretny, wprowadzany na wejście dyskretne C . Przeważnie sygnał ten służy do przełączania regulatora na wartość bezpieczną. Jeśli opcja ta nie jest wykorzystywana, to na wejście C regulatora powinien być na stałe podawany sygnał Lo, odpowiadający wartości logicznej „0”. Najprościej można to osiągnąć wykorzystując sygnał logiczny LOG 0, o adresie 71, z grupy sygnałów pomocniczych 7.

Zakresy sygnałów

Dopuszczalne zakresy pracy dla sygnałów wejściowych X_1 , X_2 , X_3 , X_4 oraz dla sygnału wyjściowego Y_{31} (Y_{32}) wynoszą od -12,5 % do +112,5 % standardowego zakresu zmian sygnałów ciągłych. Dla sygnału wewnętrznej wartości zadanej SP oraz polaryzacji *Pol.* sygnału wyjściowego (występującego w algorytmach regulacyjnych nie zawierających składowej całkowitej działania dynamicznego) zakres nastaw wynosi 0,00 % do 100,0 %. Sygnałem dyskretnym C może być sygnał pochodzący z dyskretnych wejść obiektowych lub wybrane sygnały dyskretnych wyjść bloków programowych. Jeśli wykorzystuje się wyjście dyskretne sygnałów alarmowych, to w procesie kodowania należy podać czy chodzi o sygnał przekroczenia górnej granicy (Hi), czy dolnej granicy (Lo) nastawionego zakresu.

Wyświetlanie sygnału w jednostkach fizycznych umożliwia bezpośrednią prezentację na pulpicie operatora wartości sygnału wejściowego X_1 danego bloku regulacyjnego w jednostkach fizycznych. Operator określa górny i dolny zakres sygnału po

przeliczeniu na jednostki fizyczne (odpowiadające odpowiednio wartościom 100 % i 0 % sygnału standardowego) oraz położenie kropki na wyświetlaczu przy wyświetlaniu sygnałów fizycznych.

Odchyłka regulacji może być obliczana i wyświetlana wprost ($E = X_1 - SP'$) lub z inwersją. Kodowana jest również rozdzielczość wskazań odchyłki na bargrafie diodowym, znajdującym się na pulpicie operatorskim.

Alarm odchyłki regulacji

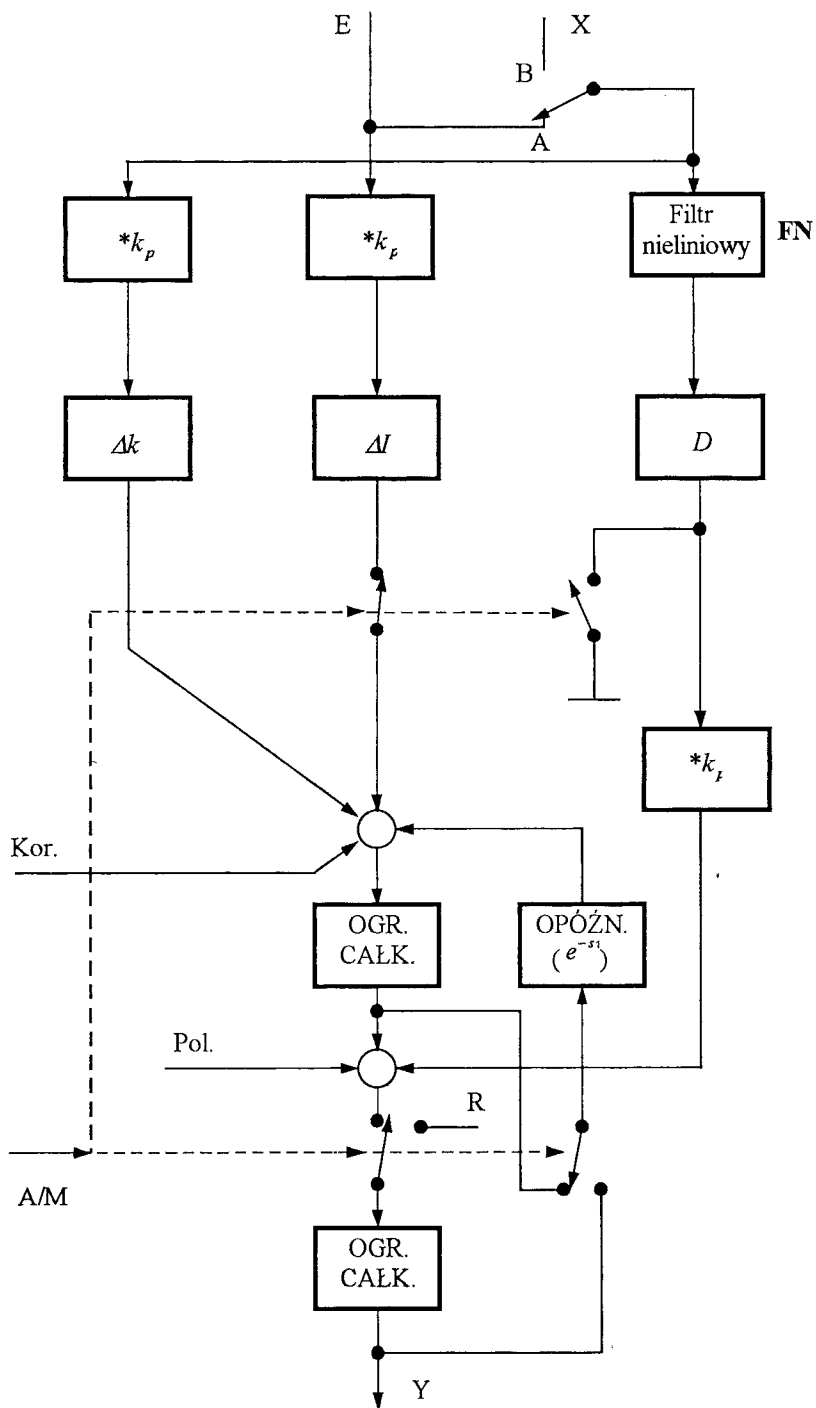
Bloki regulatorów mają możliwość sygnalizacji przekroczenia nastawionych dopuszczalnych wartości granicznych przez odchyłkę regulacji ($E = X_1 - SP'$). Użytkownik na etapie programowania struktury może decydować o rodzaju alarmu. Istnieje możliwość zgłaszania alarmu tylko na pulpicie operatorskim oraz/lub na obiektowych wyjściach dyskretnych regulatora. Użytkownik może wybrać, czy wyprowadza na wyjście dyskretne tylko alarm przekroczenia od góry lub od dołu, czy też oba te alarmy na dwa różne wyjścia dyskretne, względnie też łącznie na jedno wyjście (należy wówczas podać ten sam numer wyjścia dla obu alarmów). Niezależnie od tego alarmy zgłaszane są zawsze na pulpicie operatorskim oraz wyprowadzane na wyjścia dyskretne bloku regulatora: sygnał przekroczenia od góry na wyjście C_{51H} (C_{52H}), a sygnał przekroczenia od dołu na wyjście C_{51L} (C_{52L}). Alarm zgłaszany jest tak długo, dopóki sygnał odchyłki regulacji E nie znajdzie się w dopuszczalnym polu pracy zmniejszonym o nastawioną wartość strefy histerezy H_s .

Rodzaj pracy po zaniku zasilania jest wstępnie kodowany przez użytkownika. w zależności od wybranego kodu parametru, po powrocie zasilania możliwe jest przełączenie rodzaju pracy na sterowanie ręczne lub pozostawienie poprzedniego rodzaju pracy.

Filtracja sygnałów

Bloki wejściowe nie mają programowalnych członów filtracji sygnałów wejściowych. Jednak w celu zmniejszenia niekorzystnych efektów związanych ze wzmacnianiem fluktuacji sygnałów wejściowych, przez człon proporcjonalny i różniczkujący w regulatorach zastosowano nieliniowy człon filtracyjny. Człon ten tłumia ok. 4-krotnie fluktuacje sygnału, których amplituda nie przekracza ok. 1 %. Większe zmiany sygnału nie podlegają tłumieniu. Dzięki temu człon filtracji nie wpływa na pogorszenie własności dynamicznych obwodu regulacji, co mogłoby mieć miejsce w przypadku szybkich przebiegów przejściowych.

Charakterystykę filtru można opisać następująco:



Rys. 3. Uproszczony schemat rozwiązania strukturalnego regulatora ciągłego PID

$$X_F(i) = \begin{cases} 0.25 X(i) + 0.75 X_F(i-1) & \text{dla } |X(i) - X_F(i)| \leq 1\% \\ X(i) & \text{dla } |X(i) - X_F(i)| > 1\% \end{cases}$$

gdzie:

$X(i)$, $X_F(i)$ - oznaczają odpowiednie wartości sygnałów: wejściowego X i wyjściowego filtra X_F w chwili próbkowania "i".

Filtracji podlega sygnał wejściowy członu o działaniu P i członu o działaniu D regulatora.

Równoważenie sygnałów dotyczy sygnału wyjściowego regulatora i sygnału wartości zadanej. Zmiana rodzaju sterowania ze sterowania ręcznego (M) na automatyczne (A) odbywa się bezzakłóceniuowo, tj. bez zmiany wartości sygnału wyjściowego regulatora. Oprócz równoważenia sygnału wyjściowego algorytmy regulacyjne mogą realizować równoważenie sygnału wewnętrznej wartości zadanej, która w czasie sterowania ręcznego może nadążać za sygnałem wejściowym.

Rozwiązania strukturalne bloków dynamicznych

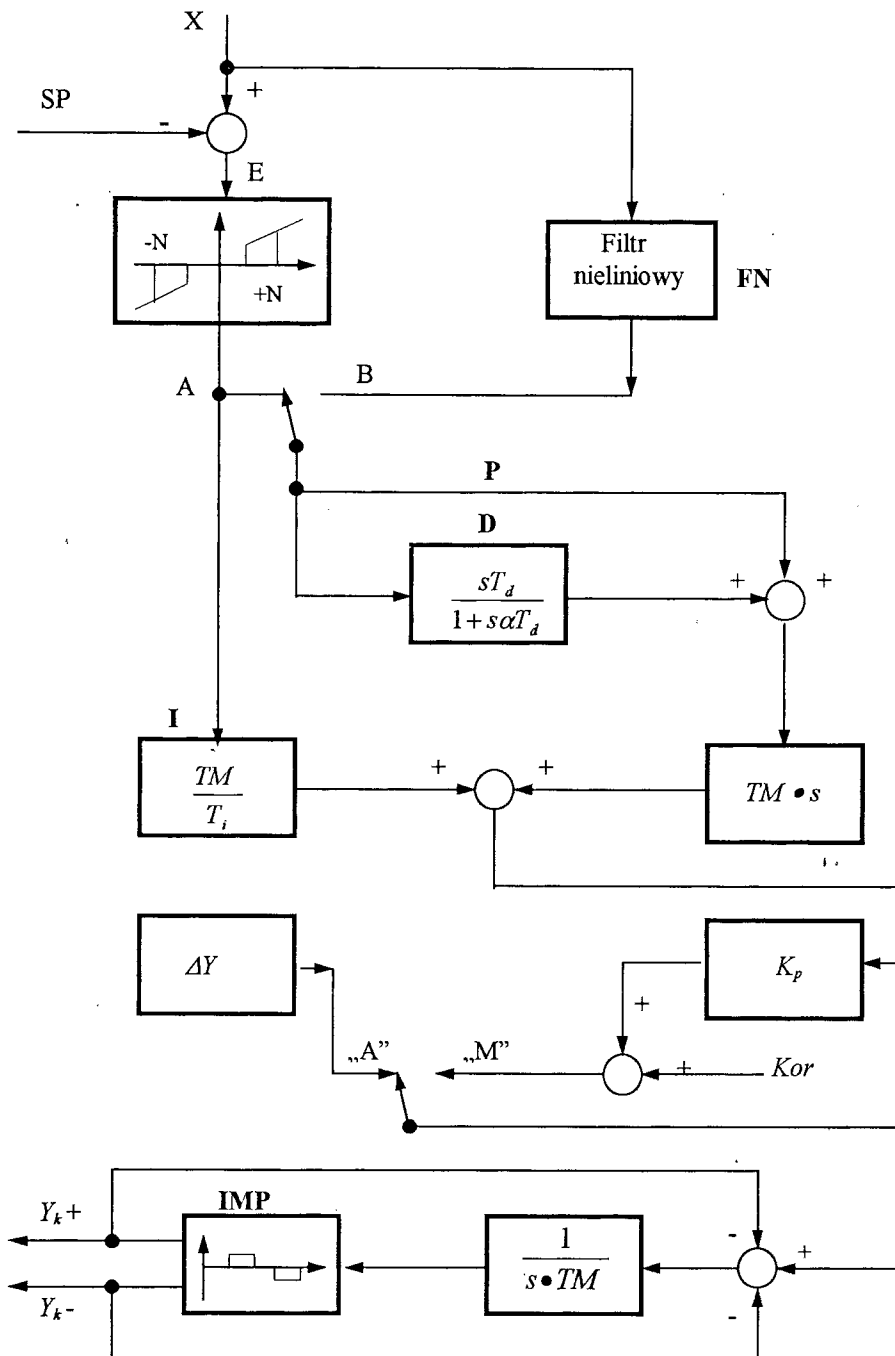
Rozwiązanie strukturalne regulatora ciągłego pokazano na rys. 3. Struktura regulatora jest równoległa i zawiera 3 składowe działania dynamicznego: proporcjonalną P, całkową I i różniczkową D. Składowe P i I obliczane są w sposób przyrostowy, a składowa różniczkowa D w sposób pozycyjny. Bloki Δk i ΔI na rys. 3 oznaczają odpowiednie przyrosty sygnałów P i I w ciągu jednego okresu próbkowania. Poszczególne składowe mogą być wyłączane drogą podania przez użytkownika wartości nastaw wykraczających poza roboczy zakres pracy. W ten sposób otrzymuje się uproszczone wersje algorytmu PID, np. P, I, PD.

Istnieją dwie możliwości realizacji działania dynamicznego regulatora:

- **algorytm A**, w którym wszystkie trzy składowe działania dynamicznego P, I, D realizowane są na sygnale odchyłki regulacji E wg zależności:

$$Y(s) = k_p * \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + s\alpha T_d}\right) * E(s) + K_{or} + Pol$$

- **algorytm B**, w którym na sygnał odchyłki regulacji zrealizowana została jedynie składowa działania I, a pozostałe składowe P i D zrealizowane są na zmiennej procesu X :



Rys. 4. Schemat rozwiązania strukturalnego regulatora krokowego

$$Y(s) = k_p * \left\{ \left(1 + \frac{sT_d}{1 + s\alpha T_d} \right) * X(s) + \frac{1}{sT_i} * E(s) \right\} + Kor + Pol$$

gdzie:

k_p - współczynnik wzmocnienia,

T_i - stała czasowa zdwojenia,

T_d - stała czasowa wyprzedzenia,

$\frac{1}{\alpha}$ - współczynnik wzmocnienia różniczkowania $\frac{1}{\alpha} = 8$,

Kor - sygnał korekcji zakłóceń,

Pol - wartość polaryzacji sygnału wyjściowego OUT regulatora dla algorytmów regulacji typu P i PD.

Algorytmy regulatorów z wyjściem ciągłym zawierają układ ograniczenia całkowania, zrealizowany na sygnale Y_{PI} (suma sygnałów działania P oraz I). Działanie układu ograniczenia polega na takiej modyfikacji składowej całkowej, aby sygnał Y_{PI} nie wykraczał poza nastawione granice. Układ ograniczenia całkowania jest wyłączony dla algorytmów nie zawierających działania całkowującego. Sygnał wyjściowy Y_{PID} może przybierać wartości wykraczające poza nastawy ograniczenia całkowania z uwagi na to, że jest on sumą ograniczonego co do wartości sygnału Y_{PI} i sygnału Y_D członu różniczkowania D, który nie jest ograniczany. Sumaryczny sygnał Y_{PID} jest ograniczany na wyjściu bloku do zakresu -12,5 % ... +112,5 %. Do tego samego zakresu ograniczany jest sygnał sterowania ręcznego.

Rozwiązanie strukturalne regulatora krokowego przedstawione jest na rys. 4. Realizowane przez regulator krokowy funkcje mają postać:

- **algorytm A:**

$$Y(s) = k_p * T_M * s * \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + s\alpha T_d} \right) * E(s) + Kor$$

- **algorytm B:**

$$Y(s) = k_p * T_M * s * \left\{ \left(1 + \frac{sT_d}{1 + s\alpha T_d} \right) * X(s) + \frac{1}{sT_i} * E(s) \right\} + Kor$$

gdzie:

T_M - czas przestawiania elementu wykonawczego.

Odchyłka regulacji E jest podawana na blok dynamiczny PID poprzez blok strefy nieczułości. Strefa nieczułości jest nastawiana symetrycznie względem zera +N, -N, a odpowiadająca jej strefa histerezy wynosi połowę nastawy N. Dla algorytmu typu B wyliczona wartość mierzona jest wprowadzana na blok dynamiczny regulatora poprzez układ filtracji nieliniowej FN. Regulator ma również nastawę czasu najkrót-

szego impulsu na wyjściu Y_{K+} i Y_{K-} . Algorytm regulatora krokowego zawiera układ blokady impulsowania w kierunku „+” i „-”. Istotnym parametrem algorytmu jest czas trwania najkrótszego impulsu T_{MIN} . Nastawa T_{MIN} spełnia analogiczną rolę co nastawa histerezy w regulatorach tradycyjnych. Strefa histerezy w regulatorze MRP-42C jest stała i wynosi $h=0.5N$ (tj. $h=0.25*2N$).

Algorytm regulatora krokowego, a także algorytmy innych regulatorów z wyjściem trójpołożeniowym umożliwiają operatorowi dobranie odpowiedniej fazy sygnału w pętli regulacji przez zapewnienie inwersji (lub jej brak) na sygnale odchyłki regulacji E.

Struktura regulatora trójpołożeniowego prostego (bez pozycjonera) jest przedstawiona na rys. 4. Jest ona analogiczna do struktury regulatora ciągłego, z tym, że sygnał wyjściowy regulatora po zsumowaniu z sygnałem przesunięcia X_p zostaje w bloku impulsatora przetworzony na sygnał impulsowy wyprowadzany na wyjścia dyskretne Y_{K+} , Y_{K-} . Impulsator ma nastawiany czas impulsowania, a wypełnienie impulsów zależy od wartości sygnału wprowadzonego na jego wejście. W regulatorze trójpołożeniowym sygnał odchyłki regulacji E nie jest bezpośrednio wprowadzony na wejście bloku dynamicznego PID, ale przechodzi jeszcze przez blok strefy nieczułości o nastawianej szerokości N. Histereza równa jest połowie strefy nieczułości. Regulator trójpołożeniowy bez pozycjonera jest faktycznie regulatorem dwustanowym zawierającym dwa wyjścia przeznaczone do bezpośredniego załączania elementu wykonawczego, np.: grzanie - chłodzenie lub grzanie częścią mocy/grzanie pełne.

Sygnał wyjściowy wytwarzany jest zgodnie z algorytmem PID (łącznie z uproszczonymi wersjami P, PI, PD), tak jak w przypadku regulatora ciągłego, z tym że każde z wyjść może znajdować się tylko w jednym z dwóch stanów: załączony lub wyłączony. Rzeczywista wartość średnia sygnału wyjściowego regulatora jest określana jako współczynnik wypełnienia impulsów w stosunku do okresu impulsowania:

$$\text{współczynnik wypełnienia} = \frac{\text{czas załączania wyjścia}}{\text{czas załączania} + \text{czas wyłączenia}}$$

Okres impulsowania jest nastawianym (kodowanym) parametrem regulatora, zakres nastaw wynosi $T_{IMP} = 0.5 \dots 100.0$ s. Kodowany jest również czas minimalnego załączenia w zakresie $T_{MIN} = 0.02 \dots 0.50$ s. Zakres zmian sygnału wyjściowego 0 ...100 % podzielony jest na dwie części: od 0 do X_p i od X_p do 100 %, z których każda odpowiada jednemu z wyjść dwustanowych tj. odpowiednio Y_{K+} oraz Y_{K-} . Dla regulatora trójpołożeniowego bez korekcji wartość sygnału X_p nastawiana jest przez użytkownika za pomocą sygnału polaryzacji *Pol* w zakresie 0.0 do 100.0 %. Współczynnik

wypełnienia sygnału dla każdego z wyjść, w czasie pracy regulatora, może zmieniać się w granicach 0 .. 1 (tj. 0 .. 100 % sygnału wyjściowego).

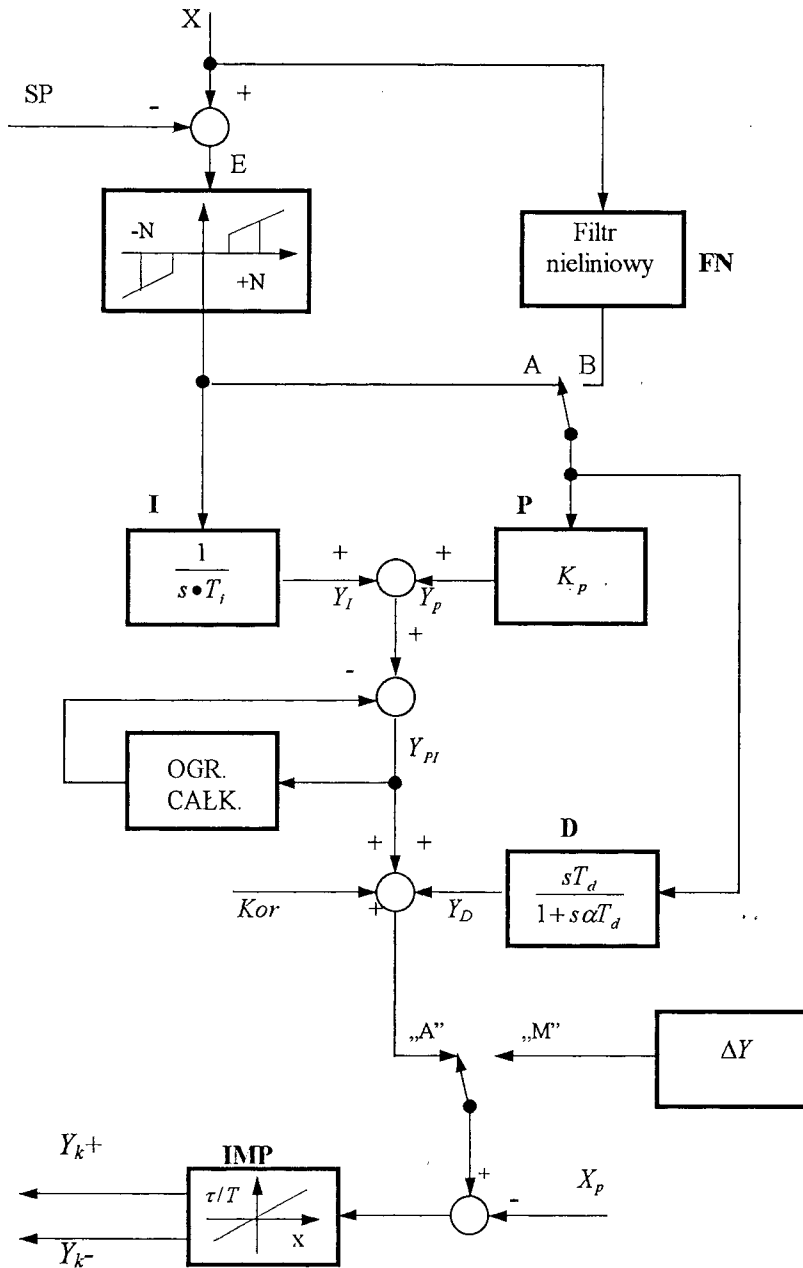
Algorytm regulatora trójpołożeniowego z pozycjonerem jest niemal identyczny z rozwiązaniem strukturalnym regulatora trójpołożeniowego prostego. Zasadnicza różnica polega na tym, że sygnał przesunięcia X_p nie jest równy nastawionemu sygnałowi polaryzacji Pol lecz sygnałowi X_3 , pochodzącemu z przetwornika elementu wykonawczego. Element wykonawczy zostaje w ten sposób objęty ujemnym sprzężeniem zwrotnym przez impulsator o wyjściach Y_{K+} i Y_{K-} , tworząc układ pozycjonera. Wzmocnienie w pętli pozycjonera może być regulowane poprzez nastawę okresu impulsowania T_{IMP} . Należy jednak pamiętać, że im większa jest wartość nastawy okresu impulsowania, tym większy jest czas opóźnienia wnoszony przez nią do pętli regulacyjnej. z tego względu regulator trójpołożeniowy z pozycjonerem powinien pracować przy minimalnych wartościach nastaw czasu T_{IMP} rzędu 0.5 .. 2.0 s. Zwiększenie nastawy T_{IMP} powoduje rzadsze wyprowadzanie impulsów wyjściowych przy zbliżaniu się do strefy nieczułości (w zakresie odchyłek zawartych w granicach N do N+3 %), wprowadza jednak zwłokę w reakcji regulatora na zmiany sygnału wejściowego. Dla odchyłek z pozycjonera od wartości pożądanej przekraczających N+3 % algorytm generuje ciągły wyjściowy sygnał sterujący, a w zakresie N do N+3 % długość impulsu zmienia się liniowo od zakodowanej wartości minimalnej T_{MIN} do impulsu ciągłego. Pozwala to na łagodne wejście członu nastawczego w zakres objęty strefą nieczułości N.

5. WYBRANE ALGORYTMY FUNKCJONALNE

Poniżej zostanie omówiony pokrótce sposób realizacji innych wybranych algorytmów funkcjonalnych [2].

Autostrojenie

Istniejąca procedura autostrojenia oparta jest na zmodyfikowanym eksperymencie Zieglera-Nicholsa. Na polecenie operatora następuje wywołanie procedury automatycznego doboru nastaw parametrów dynamicznych regulatora ciągłego PID. Proces strojenia jest sygnalizowany światłem migowym diody dla danego kanału regulacji. Użytkownik określa rodzaj kryterium jakości regulacji, według którego dobierane są nastawy. W PIAP prowadzone są prace nad opracowaniem nowej metody autostrojenia zapewniającej quasi-ciągły automatyczny dobór nastaw parametrów regulatora, odpowiedni zarówno dla charakterystyki obiektu regulacji, jak i zakłóceń na niego oddziałujących [5].



Rys. 5. Rozwiązanie strukturalne regulatora trójpołożeniowego

Regulacja progresywna suboptymalna

Realizacja algorytmu oparta jest na wykorzystaniu prac prowadzonych w tym zakresie na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej PW [4, 7]. W oparciu o analizę wartości sygnału odchyłki regulacji oraz jej pierwszej i drugiej pochodnej, do ciągłego algorytmu PID, zostaje dodane silne działanie forsujące w przypadku rozpoznania przez algorytm tendencji wzrostu odchyłki regulacji. Regulatory progresywne pozwalają na jednoczesną poprawę niemal wszystkich wskaźników jakości regulacji. Możliwe jest np. kilkukrotne zmniejszenie odchyłki regulacji przy jednoczesnym znacznym skróceniu czasu regulacji.

Zadajnik programowalny

Użytkownik może zakodować z pulpitu operatorskiego 50-odcinkową charakterystykę kształtowania analogowego sygnału sterowania w funkcji czasu. Kodowanie rozpoczyna się od kroku zerowego, w którym ustala się wartość początkową sygnału analogowego i/lub jednego albo dwóch sygnałów dyskretnych. Ponadto można wprowadzić liczbę repetycji przebiegu zadajnika (do 99). Kodowanie kroków pierwszego i dalszych polega na wprowadzaniu wartości sygnału i czasu trwania kroku. Sygnał analogowy zmienia się liniowo między zakodowanymi wartościami. Czas trwania kroku wybiera się z przedziału 1s do 99 godz. 59 min 59 s. Realizacja programu zadajnika może być kontrolowana z pulpitu operatora lub zdalnie przez wejście dyskretne.

Programowane charakterystyki linearyzacyjne

Algorytm umożliwia przetworzenie sygnału analogowego wg dowolnej nastawionej charakterystyki statycznej. Użytkownik określa punkty załamania charakterystyki (co 5 % wartości sygnału wejściowego), przy czym przebieg charakterystyki między punktami załamania jest liniowy.

Automatyczna linearyzacja wejść temperaturowych

Sygnały wejściowe pochodzące z czujników termoelektrycznych lub rezystancyjnych mogą podlegać automatycznej programowej linearyzacji. Użytkownik podaje kod czujnika i zakres pomiarowy, a algorytm dobiera na tej podstawie najbardziej optymalną charakterystykę linearyzacyjną.

Interfejs komunikacyjny

Interfejs szeregowy służy do komunikacji z komputerem nadrzędnym (typu IBM PC). Umożliwia on zdalny dostęp do sygnałów wewnętrznych regulatora, wykorzystując protokół komunikacyjny MODBUS-RTU lub PROFIBUS. Wymiana informacji i/lub

poleceń inicjowana jest z komputera (Master-Slave). Interfejs pozwala na zmianę nastaw, parametrów, trybu pracy oraz na kontrolę sygnałów wejściowych i wyjściowych regulatora z lokalnego albo oddalonego stanowiska dyspozytorskiego. Oferowany jest jeden z dwu standardów interfejsu RS 232C lub RS 485. Regulatory z interfejsem RS 485 mogą pracować w sieci lokalnej, złożonej z max. 32 szt. aparatów, przy zasięgu sieci do 1200 m.

Funkcje operatorskie

Pulpit operatorski regulatora może znajdować się w jednym z trzech podstawowych rodzajów (trybów) pracy, tzn. może on pełnić jedną z niżej wymienionych funkcji:

- funkcję stacyjki operatorskiej,
- funkcję urzędnika konfigurowania struktury i zadawania parametrów,
- funkcję urzędnika serwisowego.

Podczas normalnej pracy regulatora na pulpicie operatorskim wyświetlane są na diodach LED informacje niezbędne dla nadzoru, tzn. tryb pracy, rodzaj wartości zadanej i sygnalizacja alarmowa w obydwu kanałach regulacyjnych. Ponadto na bargrafach wyświetlana jest wartość odchyłki regulacyjnej i wartość sygnału wyjściowego dla kanału wybranego przez operatora. Dwa czteropozycyjne wyświetlacze cyfrowe służą do wyświetlania wartości sygnałów wyjściowych lub przetworzonych. Oprócz typowych czynności operatorskich i konfiguracyjnych aparat umożliwia obejrzenie wartości dowolnego wewnętrznego sygnału analogowego lub dyskretnego, a także zawartości pamięci RAM i EPROM. Przy braku zainteresowania operatora wartościami sygnałów wyświetlanymi na wyświetlaczach cyfrowych regulator przechodzi do stanu pracy energooszczędnej. Po czasie ok. 2 minut od momentu wciśnięcia ostatniego klawisza następuje wygaszenie wyświetlaczy cyfrowych.

6. ROZWIĄZANIE UKŁADOWE

Układ elektroniczny regulatora MRP-42C został zrealizowany w oparciu o mikroprocesor 80C188EB f-my INTEL. Jest to nowoczesny mikroprocesor (wprowadzony do produkcji w 1990 r.) o stosunkowo rozbudowanych urządzeniach peryferyjnych, wzbogaconym zestawie instrukcji i obniżonym poborze prądu w stosunku do tradycyjnych układów INTEL 80188. Pozostałe układy scalone są również prawie wyłącznie wykonane w technice CMOS. Regulator posiada 8 wejść i 2 wyjścia analogowe, 6 wejść i 7 wyjść dyskretnych oraz 2 regulacyjne wyjścia nieciągłe. Wejścia analogowe posiadają pseudoseparację galwaniczną [6], a pozostałe sygnały (w tym również interfejs komunikacyjny) pełną separację galwaniczną w stosunku do centralnej części urządzenia.

Literatura

- [1] Dokumentacja techniczno ruchowa dwukanałowego mikroprocesorowego regulatora MRP-42C. PIAP 1994.
- [2] Kazimierski G., Pietrusiński Z.: Mikroprocesorowy regulator wolnozmiennych procesów technologicznych MRP-42C. Prace II Krajowej Konferencji Naukowo- Technicznej MECHATRONIKA'94. Warszawa, wrzesień 1994 s. 53-56.
- [3] Trybus L.: Tendencje rozwojowe regulatorów mikroprocesorowych. Referat na seminarium PIAP- Warszawa z dnia 22.11.1994 r.
- [4] Niewczas W., Rączkowski J.: Nowe nieliniowe regulatory ogólnego działania. Pomiary Automatyka Kontrola 1990 nr 12 s. 251-253.
- [5] Pietrusiński Z.: Koncepcja realizacji algorytmu samostrojenia i adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych w oparciu o analizę charakterystyki częstotliwościowej sygnału odchyłki regulacji. Biuletyn PIAP nr 5-169/93 s. 3-35.
- [6] Pietrusiński Z., Korytkowski J., Goszczyński T.: Układ pseudoseparacji galwanicznej elektronicznych sygnałów analogowych. Opis patentowy Nr 150618. Urząd Patentowy RP. Opublikowano 1990.10.31.
- [7] Pietrusiński Z., Rączkowski J.: Realizacja algorytmów nieliniowej progresywnej regulacji PID w uniwersalnym regulatorze przemysłowych wolnozmiennych procesów technologicznych EFTRONIK M. Pomiary Automatyka Kontrola 1990 nr 12 s. 254-256.