

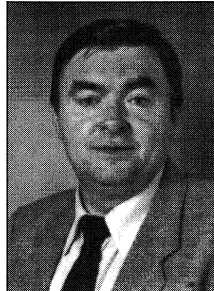
Stanisław PANFIL

KATEDRA ELEKTROTECHNIKI, POLITECHNIKA LUBELSKA

## Analiza konwencjonalnych algorytmów DDC w układach regulacji automatycznej

Mgr inż. Stanisław Panfil

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej oraz doktorantem Instytutu Elektrotechniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej.



### Streszczenie

W artykule przedstawiono praktyczną syntezę algorytmów DDC bezpośredniego sterowania zadaniami ciągłymi. Dyskretne wersje klasycznych algorytmów ciągłych PID, proporcjonalno-całkująco-różniczkujących są obecnie często stosowane w praktyce przemysłowej.

W artykule przedstawiono także, różne formy ich notacji włącznie z formułą powtarzania i wybranych metod technicznej realizacji kontroli pamięci danego komputera.

### Abstract

The paper concerns practical of the synthesios of the algorithms DDC Direct Digital Control of the continous objects.

Discreate version of the classic continous algorithms PID Proportional-Integro-Differential which are nowadays often put in industrial practice are describet. There are various forms of their notation including recurrence formulas and chosem methods of the technical realization inthe memory of the microcomputer control gear given this paper too. As the representative adept in application software LOGICMASTER 90 for PLC made by GE FANUC is presented.

**Słowa kluczowe:** algorytmy przyrostowe, algorytmy prędkościowe, prze-regulowanie całkowite

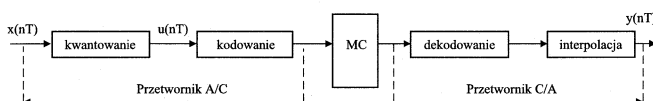
**Keywords:** growth algorithm, speedent algorithm, integral over-regulation

## 1. Wprowadzenie

Zastąpienie przez komputer układu logicznego w układach UAR jest możliwe po spełnieniu określonych warunków. Rodzaj wykonywanej operacji, kolejność jej wykonywania, oraz warunki spełniające zależności wykonywania tej operacji, noszą nazwę algorytmu sterowania.

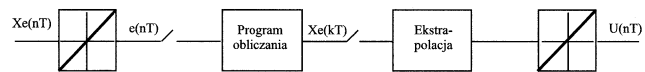
Komputer może wykonywać kolejno kilka operacji jednocześnie zamiast jednej, oraz może zamieniać je na równoważne wytwarzając identyczne sygnały sterujące. Różnice mogą dotyczyć tylko czasu realizacji.

Trudniejszym problemem staje się zastąpienie przez komputer układów analogowych np. regulatorów. Następuje wówczas jakościowa różnica kształtów sygnałów, gdyż zamiast sygnału ciągłego, otrzymujemy sygnał z komputera, który po przetworzeniu na sygnał analogowy ma przeważnie przebieg „schodkowy”, a wartość jego ulega skokowej zmianie w regularnych odstępach czasu przybierając przy tym ograniczoną liczbę poziomów.



Rys. 1. Schemat maszyny cyfrowej jako regulatora  
Fig. 1. Scheme of digital machine engine as regulator

Ciągły sygnał cyfrowy wejściowy np. uchybu  $e(nT)$  jest dyskretyzowany poprzez przetwornik a/c kwantowany i kodowany tzn. przetwarzany przez ciąg liczb dwójkowych. Jako wynik otrzymuje się na wyjściu inny ciąg liczb, który po zdekodowaniu i ekstrapolacji jest przetwarzany na sygnał ciągły  $U(nT)$ . Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy regulatora cyfrowego.



Rys. 2. Schemat blokowy regulatora cyfrowego  
Fig. 2. Block scheme of digital Controllers

Dla obliczenia nowej wartości ciągu wyjściowego jest potrzebny określony czas, aby można było obliczyć  $T_r$ .

Systemy sterowania wyposaża się obecnie w nowoczesny sprzęt komputerowy i oprogramowanie klasy SCADA (ang. *Supervisory Control and Data Acquisition*). Systemy te są stosowane przy realizacji różnorodnych zadań w zakresie sterowania procesami technologicznymi aparatów i urządzeń. Umożliwiają dostęp do informacji o przebiegu danego procesu w sieciach komputerowych. Uczestniczą w korelacjach pomiędzy zgromadzonymi danymi i ich techniczną obróbką oraz wykonują wiele innych zadań opierających się na nowoczesnym sprzęcie komputerowym.

Treścią prezentowanego artykułu jest ogólna analiza i prezentacja bezpośredniego sterowania cyfrowego wykorzystującego algorytm PID regulacji cyfrowej. Nazwa „bezpośrednie sterowanie cyfrowe” wywodzi się z języka angielskiego - w dosłownym tłumaczeniu „direct digital control”, w skrócie DDC.

W prezentowanym artykule, DDC oznaczać będzie realizację oddziaływania zaprogramowanego cyfrowego urządzenia sterującego mikroprocesorowego, w skrócie CUS, np. komputera przemysłowego, regulatorów PID, sterownika PLC itp. [4]. Algorytmy regulacji cyfrowej wykorzystuje się do stabilizacji wielkości wyjściowych obiektów (likwidacja szybkozmiennych zakłóceń), względnie dokładnego nadążania za zadaną wartością wielkości regulowanej podczas rozruchu, przy odstawianiu instalacji lub w zagadnieniach regulacji nadążnej bądź programowej. Działanie regulatora PID jest opisane zależnością matematyczną w postaci algorytmu ciągłego:

$$u = K_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (1.1)$$

gdzie:  $K_p$  - wzmacnienie lub zakres proporcjonalności,

$X_p = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%$ ,  $T_i$  - stała czasowa całkowania,  $T_d$  - stała czasowa

różniczkowania.

## 2. Cyfrowe wersje algorytmu PID

Operacje wykonywane na sygnałach cyfrowych polegają na sumowaniu kolejnych wartości sygnału wejściowego w założonych przedziałach czasowych i różniczkowaniu (obliczaniu różnic kolejnych wartości). Operacje wykonywane na sygnałach cyfrowych w formie dyskretnej aproksymując je otrzymamy następującą postać wzoru rekurencyjnego [6].

$$u(i) = K_p \left\{ e(i) + \frac{T_p}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T_p} [e(i) - e(i-1)] \right\} + u(k) \quad (1.2)$$

gdzie:  $T_p$  - parametr algorytmu cyfrowego okresu próbkowania,  $u(i)$  - średnia wartość sygnału sterującego elementem wykonawczym przy  $e(i)=0$ ,  $T_i$  - stała czasowa całkowania,  $e(i)$  - uchyb regulacji.

Algorytm cyfrowej wersji można przedstawić w postaci transmittancji „(Z)” stosując zasadę przesunięcia

$$D(z) = \frac{X_a(z)}{X_c(z)} = \frac{b_n z^k + b_{n-1} z^{n-1} + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1.3)$$

Program obliczeń  $T_r$  musi być przyczynowy tzn. do obliczenia nowej wartości  $X_a(kT+T_r)$  wielkości wejściowej mogą być wykorzystane oprócz aktualnej wielkości wejściowej  $X_a(kT)$ , tylko poprzednio obliczone i zapamiętane wartości wielkości wejściowych i wyjściowych.

Najbardziej ogólny program przyczynowy ma postać:

$$X_c(kT+T_r) = f[X_c(kT), X_c(kT-T), \dots, X_a(kT-T+T_r), \dots, X_a(kT-2T)] \quad (1.4)$$

Zakładając synchroniczność próbkowania na wejściu i wyjściu  $T \geq T_r$  oraz omijając możliwości kwantyzacji, żądamy aby prawo regulacji (sterowania) było liniowe. Wtedy liniowy algorytm przyczynowy ma następującą postać:

$$X_a(kT) = b_n X_c(kT) + b_{n-1} X_c(kT-T) + b_0 X_c(kT-nT) - a_{n-1} X_a(kT-T) \pm a_0 X_a(kT-nT) \quad (1.5)$$

Równanie (1.5) jest równaniem różnicowym liniowym regulatora cyfrowego, a przyczynowość algorytmu jest zagwarantowana przez współczynnik przy  $X_a(kT)$ , który jest równy 1.

W praktyce przyjmuje się do realizacji algorytm określony transmittancją o równym stopniu licznika i mianownika.

Ze względu na prostą realizację techniczną regulator PID znalazł zastosowanie jako podstawowy typ regulatora ciągłego.

$$PID(s) = K_p + \frac{K_p}{s} + K_D \frac{s}{1+T_i s} = \frac{K_I (K_p + K_I T_i) s (K_D + K_p) s^2}{s(1+T_i s)} \quad (1.6)$$

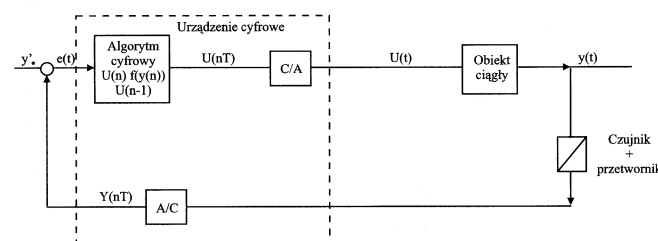
Jeżeli  $T_i$  potraktuje się jako parametr swobodny, to regulator PID jest ogólnym przypadkiem regulatora ciągłego rzędu drugiego.

W transmittancji „Z” 1.3 współczynnik  $Z^n$  jest równy jedności. Zapewnia to jej realizowalność.

Rozsądniej jest wybierać zawsze warunek  $b_n \neq 0$ , gdyż w przeciwnym razie regulator „czeka” przez okres próbkowania, zanim uwzględni nową wartość wyjściową.

Algorytmy bezpośredniego sterowania cyfrowego dzieli się na statyczne i dynamiczne. Ponieważ treścią artykułu jest analiza algorytmów dynamicznych wspomnieć należy, że algorytmy statyczne wykorzystuje się przy prostych procesach technologicznych, tak jak: obliczanie długości, cięcie blachy, określanie dozowania składników w procesach chemicznych, obliczanie stosunku paliwa do powietrza w procesach spawalnictwa.

Algorytmy typu dynamicznego są powiązane z dynamicznym sterowaniem procesu, realizujące stabilizację optymalnych punktów pracy (eliminacja zakłóceń) lub nadążanie za zadaniem sterowania. Algorytmy te mają postać rekurencyjną, a ich podstawą są równania różnicowe. Algorytmy regulacji cyfrowej najczęściej są oparte na aproksymacjach konwencjonalnych analogowych algorytmów PID. Uproszczony schemat pojedynczej pętli regulacji cyfrowej przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat pojedynczej regulacji cyfrowej  
Fig. 3. Scheme of single discrete digital control

Układy DDC charakteryzują się tym, że zmienna regulowana przetwarzana jest przez układ na wejściu analogowym (najczęściej periodycznie) w sygnał cyfrowy, który jest odpowiednio kształtowany zgodnie z zaprogramowanym algorytmem regulacji. Obliczone w wyniku realizacji algorytmu dyskretne wartości zmiennej sterującej są przekształcane w układzie wyjść analogowych, który wysterowuje element nastawczy obiektu regulacji. Ze względu na występowanie opóźnienia w torze pomiarowym rzeczywista wartość sygnału poddanego regulacji nigdy nie jest brana pod uwagę przy wyznaczaniu sygnału odchyłki i dlatego do obliczeń nie brane są wartości bieżące uchybu. Jeżeli okres próbkowania „ $T$ ” jest równy jedności to algorytmu regulacji cyfrowej przedstawić można w postaci dyskretnej zależności rekurencyjnej:

$$U(nT) = f[e(n-1), e(n-2), u(t-1), u(t-2)] \quad (1.7)$$

gdzie:  $U(nT)$  - sygnał wyjściowy regulatora cyfrowego (sterowanie).

### 3. Analiza algorytmów przyrostowych i pozycyjnych

Przy sterowaniu urządzeniami, które mają charakter członów symulacyjnych wykorzystuje się algorytmy przyrostowe. Algorytmy te zwane również prędkościowymi otrzymuje się przy jednokrotnym różnicowaniu odpowiednich algorytmów pozycyjnych. Na etapie praktycznej realizacji, algorytmy prędkościowe posiadają mniej istotnych wad, w odróżnieniu od pozycyjnych. W algorytmach przyrostowych nie istnieje problem przeregulowania całkowego tzn. sytuacji takiej gdy człon wyjściowy jest w nasyceniu natomiast wartość całki w regulatorze nadal wzrasta. Nie istnieje również problem zjawiska uchybu całkowania numerycznego (ang. *integration offset*), itp. [6].

Zjawisko przeregulowania całkowego jest wysoce szkodliwe dla pracy układu (ang. *Windup effect*). Aby temu zapobiec wykonać musimy następujące czynności:

- ograniczyć wartość całki - przy czym poziom ograniczenia ustalany jest przez użytkownika,
- uzależnić współczynnik wzmocnienia  $k_p$  od wartości uchybu,
- wprowadzić dodatkowe wejścia umieszczające sygnał sterujący b bezpośrednio w obiekcie.

Np. dla regulatora typu PI otrzymujemy:

$$m(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \right] \quad (1.8)$$

$$m_n = K e_n + \frac{1}{T_i} \sum_{j=-\infty}^{n-1} e_j T \quad (1.9)$$

względnie  $K_p e_n + K_I \sum_{j=-\infty}^{n-1} e_j T$ , gdzie:  $K_p = K_e$ ;  $K_I = K_e \frac{T}{T_i}$

Algorytm pozycyjny zdefiniujemy w postaci relacji:

$$m_n = K_p e_n + j_n \quad (1.10)$$

$$j_n = I_{n-1} + K_I e_{n-1} \quad (1.11)$$

Regulator z działaniem J posiada stały uchyb całkowania zależny od użytej arytmetyki (stałoprzecinkowa, zmiennoprzecinkowa) i parametrów.

Ten uchyb dla arytmetyki stałoprzecinkowej można zlikwidować modyfikując:

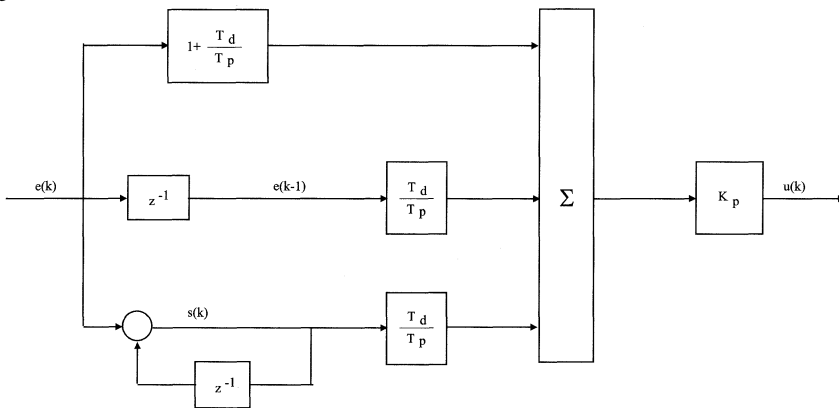
$$J_n = J_{n-1} + e_{n-1} \quad (1.12)$$

$$M_n = K_p e_n + K_I J_n \quad (1.13)$$

Po tej modyfikacji wielkość  $J_n - J_{n-1}$  wzrasta  $1/K_I$  razy.

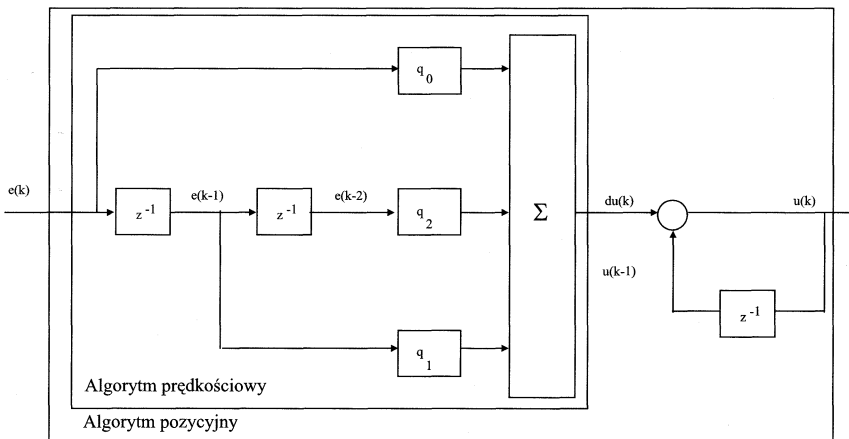
Ze względu na potrzebę zapobiegania przeregulowaniu całkowemu  $J_n$  powinno być ograniczone. Dla arytmetyki stałoprzecinkowej ułamkowej i zmiennoprzecinkowej, skutecznym sposobem jest powiększanie całki  $1/e$  razy, a co za tym idzie uchybu całkowania, które w rezultacie daje wydłużenie słowa maszynowego.

Innym rodzajem algorytmów DDC są algorytmy pozycyjne realizowane w oparciu o prawa regulacji bezpośredniej, gdzie wykorzystuje się transformację „Z”, „X” i jej właściwości. Przy pomocy algorytmów pozycyjnych, można określić pozycje urządzenia wykonawczego sterującego obiektem. Zaletą tego algorytmu jest to, że komputer przechowuje wielkość wyjściową i wówczas możemy dodać sygnał sprzężenia zwrotnego w przód (ang. *feedforward control*) realizując wszystkie operacje w układach nieliniowych [2]. Struktura równoległa, której schemat przedstawiono na rys. 4, realizuje przede wszystkim postać dyskretnego algorytmu pozycyjnego PID, którą można zastosować, gdy regulator sterujący np. silownikiem, posiadający cechy charakterystyczne wzmacniacza, którego zmienna regulowana jest wprost proporcjonalna do zmiennej regulowanej regulatora.



Rys. 4. Schemat struktury równoległej dyskretnego algorytmu PID [10]  
Fig. 4. Scheme of parallel structure of discrete algorithm PID [10]

Oprócz struktury równoległej dyskretnego algorytmu PID istnieje struktura szeregową, która może być stosowana w dwóch postaciach - pozycyjnej i prędkościowej. Schemat blokowy tej struktury przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat struktury szeregowej dyskretnego algorytmu PID [10]  
Fig. 5. Scheme of series structure of discrete algorithm PID [10]

Istnieją inne sposoby modyfikacji przeregulowania całkowego, które można przedstawić za pomocą poniższych relacji:

$$J_n = f_{n-q} + \delta(J_{n-1} - f_{n-1}) \quad (1.14)$$

$$m_n = K_{en} + J_n; \delta = e^{-T/T_I} \quad (1.15)$$

Sygnał  $f$  jest sygnałem wybranym z obiektu lub członu wykonawczego.

Jeżeli  $f=m$ , to nic zasadniczo się nie zmienia. Jeżeli  $f=const.$ , wskutek nasycenia, to wartość liczonej całki też się ustala. Dodatkowe wejście „F” stanowi rodzaj zabezpieczenia przeciw przeregulowaniu całkowemu.

W przyrostowym algorytmie PJ

$$m_n = K_p e_n - e_{n-1} + K_I e_{n-1} \quad (1.16)$$

$K_p$  - zmienna przenoszenia pasma w szerokim zakresie. Działanie proporcjonalne wprowadza się tylko wtedy gdy przyrost wartości uchybu nie przekroczy założonej wartości i ma taki sam znak jak pośrednie całkowanie.

Dla zwielokrotnienia szumów na wejściu komputera wprowadza się człon regulatora D wówczas gdy:

$$m_n = |e| < 0$$

$$m_n = \text{bez ogr. } |e| \geq 0$$

Regulator cyfrowy funkcjonujący na zasadzie bezpośredniego sterowania cyfrowego (ang. *direct digital control*), w skrócie DDC, stanowi szeregowo połączenie członu różniczkującego i całkującego PID.

W przypadku połączenia szeregowego należy zadbać o przeniesienie przez układ różniczkujący składowej stałej.

$$G_o(s) = \frac{T_d s}{1 + T_d s} \quad (1.17)$$

Istnieją różne wersje regulatorów cyfrowych otrzymywane przy zastosowaniu programowego modelowania ciągłych bloków dynamicznych. Jedną z metod stosowaną najczęściej jest metoda operatorowa oparta na aproksymacji operatorem Tustin, z której otrzymujemy cyfrowy algorytm PID w postaci wyrażenia [6]:

$$K_r(z) = \frac{U(z)}{E(z)} + K_p \left[ 1 + \frac{T_p z + 1}{2T_I z - 1} + \frac{2T_d z - 1}{2z - 1 + T_p z + 1} \right] \quad (1.18)$$

Dla wielu procesów, dla których analiza matematyczna jest trudna, znane są doświadczalne nastawy regulatorów PID i mogą być one - po niewielkich weryfikacjach - wykorzystane przez personel niekoniecznie w tym celu kształcony.

Ze względów bezpieczeństwa warto wprowadzić oprzyrządowanie analogowe jako redundancję zawiedzenia komputera. Istnieją więc przyczyny praktyczne przemawiające za stosowaniem modelowania dyskretnego algorytmu PID

np. przyjmując przybliżenie trapezowe

$$s^{-1} = \frac{Z+1}{Z-1} \frac{T}{2}, \text{ stąd}$$

$$\text{PID } z = K_p + \frac{K_I + I}{Z} - \frac{(z+1)}{(z-1)} + K_D \frac{1}{T_I + T(Z+1)/2(Z-1)} \quad (1.19)$$

## 4. Zakończenie

Zasadnicze znaczenie w nowoczesnych systemach wizualizacji, sterowania i kontroli procesów technologicznych w przemyśle gdzie wykorzystywano układy DDC, mają algorytmy regulacji cyfrowej. Sterowniki z oprogramowaniem PLC, wielofunkcyjne regulatory mikroprocesorowe czy komputery przemysłowe są dziś już powszechnie dostępne na rynkach europejskich. Istnieje wiele firm oferujących tego typu programy w językach wysokiego poziomu takich jak C czy BASIC, a ponadto moduły realizujące programowo modyfikację cyfrowych regulatorów PID. Technika cyfrowa stwarza bardzo realne możliwości w dziedzinie realizacji sposobów algorytmów sterowania, a mianowicie:

- algorytmy te nie ograniczają się tylko do układów liniowych,
- istnieje duża krotność realizacji algorytmów ze sprzężeniami skrośnymi dla sterowania obiektów wielowymiarowych,

- nastawy (parametry) mogą być realizowane z dużą dokładnością i są niezmiennie w czasie.

Te możliwości skłaniają do poszukiwania algorytmów optymalnych lub prawie optymalnych i czynią ich stosowanie uzasadnionymi ekonomicznie i realizowalnymi technicznie. Regulacja z wykorzystaniem algorytmów cyfrowych PID w układach DDC daje w porównaniu z idealną realizacją analogową algorytmu, efekt wprowadzenia do układu czystego opóźnienia o wartości  $T_p/2$  ze wszystkimi konsekwencjami. Okres próbkowania w realizacji cyfrowej algorytmu staje się podstawowym parametrem. Zmniejszenie okresu próbkowania polepsza właściwości tłumienia zakłóceń i nadążania. Okres próbkowania powinien być optymalny z punktu widzenia dynamicznych właściwości układu. Zbyt mały okres próbkowania  $T_p$ , może spowodować trudności realizacyjne algorytmu cyfrowego ze względu na narastanie błędów numerycznych, oraz zwiększy koszty obliczeń i czas realizacji. Poprawne działanie cyfrowych wersji regulacji PID zależy w znacznym stopniu od doboru  $T_p$  lub od parametrów analogicznych do tych w regulatorach analogowych. Przypuszczać należy, że w dość krótkim czasie technologie sprzętu informatycznego zastąpią w systemach automatyzacji różne rodzaje sieci neuronowych. Działając w różnych trybach jako jednostki samodzielne, mogą być zaimplementowane jako neuroregulatory, zbudowane z elementów cyfrowych, standardowych bądź specjalizowanych.

## Bibliografia

- [1] Algorithms TDC-2000 Honeywell CB-09-01
- [2] Ackerman J.: „Regulacja impulsowa”, WNT W-wa 1976
- [3] Astrom K.J., Wittenmark B.: „Computer Controlled System” Prentice-Hall 1984
- [4] Firma Foxboro/ Bristol E.A. „Designing and Programming Control Algorithms for DDC Systems” Control Engineering, January 1997
- [5] Cox J.B.: „A Practical Spectrum st DDC Chemical proces Control Algorithms”, ISA. - J October 1986
- [6] Dokumentacja techniczno-ruchowa: Regulator Mikroprocesorowy EFTRONIK - X typ U\$\*^ Mera-Pnefal W-wa wyd. 4.11.1994
- [7] Biuletyn automatyki, nr 2/94 i 2/96, „ASTOR” Kraków
- [8] Kostro J, Manitus A.: „Ogólna charakterystyka bezpośredniego sterowania cyfrowego DDC procesów przemysłowych”, PAK zeszyt 12 s. 546-551
- [9] Niederliński A.: „Systemy komputerowe automatyki przemysłowej”, WNT W-wa 1985
- [10] Dębowski A.: „Procedury regulacyjne sterowników programowalnych”, PAR nr 1, W-wa 2001

**Title:** The analysis conventional algorithms DCC in arrangements of automatic regulation

Artykuł dofinansowany

## ZAPRASZAMY do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2004 roku

### PRENUMERATĘ I KOLPORTAŻ PROWADZĄ:

**Redakcja POMIARY-AUTOMATYKA-KONTROLA,  
ul. Świętokrzyska 14A p. 535, 00-050 Warszawa  
tel./fax: (0-22) 827-25-40, e-mail: pak@data.pl, marketing: dorpak@data.pl**

GARMOND PRESS S.A., ul. Nakielska 3, 01-106 Warszawa  
KOLPORTER S.A., ul. Strycharska 6, 25-659 Kielce  
AS PRESS Andrzej Szlachciuk, Nowa Iwiczna, ul. Krasickiego 11, 05-500 Piaseczno  
C.P. PRESS Ewa Gut, ul. Poznańska 4, 08-110 Siedlce  
G.L.M. GAJEWSKI & MORAWSKI SP.J., ul. Uprawną 3, 02-967 Warszawa  
G.L.M. GDAŃSK S.C., ul. 11-go Listopada 15, 80-180 Gdańsk  
RUCH S.A., Oddział Dolnośląski, ul. Wspólna 8, 45-837 Opole  
RUCH S.A., Oddział Dolnośląski, ul. Kwidzyńska 3, 51-415 Wrocław  
RUCH S.A., Oddział w Rzeszowie, ul. Głowackiego 5, 39-300 Mielec  
RUCH S.A., Oddział Świętokrzyski, ul. Paderewskiego 11, 25-001 Kielce  
RUCH S.A., Oddział w Lublinie, ul. Stefczyka 40, 20-151 Lublin  
RUCH S.A., Oddział Pomorski, ul. Czackiego 3A, 70-216 Szczecin

*Indywidualną sprzedaż prowadzi Centralna Księgarnia Techniczna, 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A  
oraz bezpośrednio Redakcja*