

Projektowanie układu regulacji odpornej wspomaganego algorytmem CDM

Wojciech Giernacki

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, Politechnika Poznańska

Streszczenie: W pracy przedstawiono nową metodę syntezy układu regulacji odpornej. Scharakteryzowano podstawy metody diagramu współczynnikowego (ang. *Coefficient Diagram Method*) w kontekście projektowania układu oraz analizy jego właściwości. Omówiono sposoby poprawy jakości regulacji z wykorzystaniem diagramu współczynnikowego – narzędzia umożliwiającego kompleksową kontrolę odporności, stabilności i dynamiki układu. Zamieszczono przykład syntezy układu regulacji odpornej z obiektem stabilnym minimalnofazowym oscylacyjnym przy użyciu algorytmu CDM i analizę właściwości układu w oparciu o diagram współczynnikowy. Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły skuteczność proponowanego rozwiązania.

Słowa kluczowe: regulacja odporna, sterowanie wielomianowe, metoda diagramu współczynnikowego, stabilność układu, dynamika układu

1. Wprowadzenie i idea algorytmu CDM

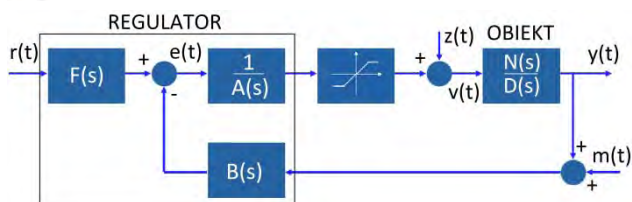
Metoda diagramu współczynnikowego (CDM) zaliczana jest do metod sterowania wielomianowego (metod lokowania pierwiastków zadanego wielomianu charakterystycznego, opisującego zamknięty układ regulacji) [11]. Bazuje ona na idei wykorzystującej związek między uzyskiwanymi charakterystykami czasowymi a rozmieszczeniem pierwiastków tego wielomianu charakterystycznego.

Podstawowa koncepcja algorytmu CDM została opracowana przez prof. Shunji Manabe na początku lat 90. XX wieku. Dotychczas metoda ta pojawiła się na łamach literatury naukowej w Polsce jedynie przy okazji publikacji dotyczących projektowania jednofazowych inwerterów napięcia małej mocy, m.in. [14]. Niniejsza praca ma na celu przybliżyć polskiemu środowisku naukowo-technicznemu pryncypia algorytmu CDM jako alternatywy dla powszechnie stosowanych metod regulacji odpornej, gdyż prace pojawiające się w ostatnim dziesięcioleciu na łamach literatury światowej wykazują wysoką jego skuteczność. Algorytm z sukcesem stosowano w układach regulacji temperatury [9], układach wielowymiarowych kontroli ruchu modelu helikoptera [2], manipulatorów robotów [6], w sterowaniu silnikiem prądu stałego [8], pozycjonowaniu anteny radarowej [5], rozwiązywaniu problemów sterowania sieciami komputerowymi [1] i wielu innych (m.in. [3]).

U podstaw CDM znajduje się rozumowanie, że każde sterowanie jest kompromisem – kładąc na wagę na jednej szali oczekiwaną jakość regulacji, natomiast na drugiej nakład środków sprzętowo-obliczeniowych pozwalających tę jakość zapewnić. W teorii sterowania niezmiennym pozostaje poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób realizować najefektywniejszy, z punktu widzenia jakości regulacji, regulator o najmniej złożonej strukturze w danym, konkretnym zagadnieniu technicznym, przy wyżej wymienionych czynnikach utrudniających projektowanie układu [3]. Algorytm CDM powstał jako odpowiedź na zapotrzebowanie w tej kwestii, formułując syntetyczne prawa określające dobór lokowań pierwiastków wielomianu charakterystycznego i typ regulatora, przy zakłóceniach i ograniczeniu amplitudy sygnału sterującego. CDM stanowi strategię regulacji odpornej, opartej na lokowaniu pierwiastków wielomianu charakterystycznego układu zamkniętego, wspomaganą specjalnym diagramem zwanym diagramem współczynnikowym (CD), wykorzystywanym jako środek do zapewnienia niezbędnej informacji o stabilności i odporności [7].

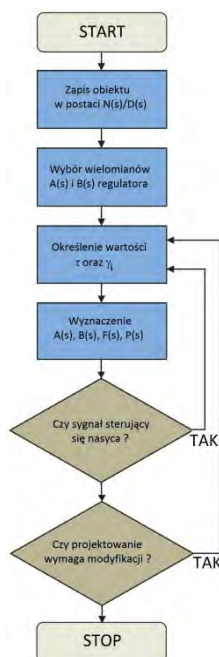
2. Algorytm CDM

Dla układu regulacji z rys. 1 procedura projektowa CDM (rys. 2) wykorzystuje reprezentację operatorową układu, gdzie $F(s)$ – transmitancja filtra wejściowego bloku regulatora, $A(s)/B(s)$ – wielomian mianownika/licznika transmitancji operatorowej regulatora, $N(s)/D(s)$ – wielomian licznika/mianownika transmitancji operatorowej obiektu, $r(t)$ – sygnał referencyjny, $e(t)$ – uchyb regulacji, $v(t)/u(t)$ – sygnał sterujący nieograniczony/ograniczony, $z(t)$ – sygnał zakłócenia na wejściu obiektu, $y(t)$ – sygnał wyjściowy, $m(t)$ – sygnał zakłócenia pomiarowego na wyjściu obiektu.



Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji
Fig. 1. Block diagram of a control system

Wyznaczenie parametrów regulatora oraz wielomianu charakterystycznego układu zamkniętego, w przypadku z ograniczeniem, jak i bez, może zostać realizowane jednokrotnie lub kilkakrotnie. Wariant ponownienia procedury zależy wyłącznie od faktu, czy uzyskano zadowalającą jakość regulacji (wg obranego wcześniej kryterium, np. wielkości przeregulowania, szybkości ustalania się sygnału wyjściowego, określonego zapasu stabilności etc.). W sytuacji, gdy jakość regulacji jest niezadowalająca, wówczas, najczęściej kosztem zmniejszenia zapasu stabilności lub wydłużenia oczekiwanego czasu odpowiedzi skokowej, algorytm zostaje ponowiony.



Rys. 2. Algorytm CDM
Fig. 2. CDM algorithm

Podstawowa procedura projektowa metody diagramu współczynnikowego

- Zapis modelu obiektu za pomocą transmitancji operatorowej:

$$\frac{N(s)}{D(s)} = \frac{n_l s^l + n_{l-1} s^{l-1} + \dots + n_1 s + n_0}{d_m s^m + d_{m-1} s^{m-1} + \dots + d_1 s + d_0} \quad (1)$$

gdzie: l – stopień wielomianu $N(s)$ mniejszy lub równy od m (stopień wielomianu $D(s)$).

W przypadku modelowania obiektów z opóźnieniem celem uzyskania transmitancji modelu (1) wykorzystuje się aproksymację Padé [15].

- Wybór struktury regulatora

Wykorzystując analizę przewidywanych zakłóceń oraz oczekiwań projektanta związanych z dynamiką, stabilnością i odpornością układu, dobiera się strukturę regulatora – stopnie wielomianów $A(s)$ oraz $B(s)$ według tablicy Hamamciego (tab. 1).

Tab. 1. Dobór stopni wielomianów transmitancji operatorowej regulatora ze względu na przewidywany typ zakłócenia [4]

Tab. 1. The choice of transfer function polynomials degrees due to expected type of disturbances [4]

Przewidywany typ zakłócenia	Stopień $A(s)$	Stopień $B(s)$	Stopień $P(s)$	Warunek
Brak	$m-1$	$m-1$	$2m-1$	–
Skokowe	m	m	$2m$	$l_0=0$
Narastające liniowo	$m+1$	$m+1$	$2m+1$	$l_0= l_1=0$
Impulsowe/Sinusoidalne	$m-1$	$m-1$	$2m-1$	–

Jeżeli typ przewidywanych zakłóceń nie może zostać sprecyzowany, lub przewiduje się zakłócenia wielu typów,

to wówczas zaleca się przyjąć regulator wyższego rzędu i stopniowo zmniejszyć stopnie wielomianów modelu regulatora w kolejnych krokach algorytmu. Wielomiany regulatora (stopnia odpowiednio p i q) zapisuje się w postaci:

$$A(s) = \sum_{i=0}^p l_i s^i \quad (2)$$

$$B(s) = \sum_{i=0}^q k_i s^i \quad (3)$$

- Określenie wartości τ oraz γ

W algorytmie CDM wykorzystuje się zależność pomiędzy ekwiwalentem stałej czasowej (τ) – wykorzystywanym do utworzenia wielomianu charakterystycznego celu (P_T) a oczekiwanym czasem ustalania sygnału odpowiedzi skokowej układu (t_s):

$$\tau = t_s / (2,5 \sim 3) \quad (4)$$

Niewątpliwym atutem stosowania proponowanego algorytmu jest tzw. forma standardowa Manabe (5), czyli wektor określający wartości wskaźników stabilności (γ), charakteryzujących stabilność układu na CD i wyznaczających wielomian $P_T(s)$, które należy obrać, by w realizowanym układzie już w pierwszej iteracji algorytmu zapewnić spełnienie wymogów stawianych dynamice układu. Formy standardowe należy traktować jako początkowe nastawy wartości poszczególnych indeksów stabilności, które mogą zostać dostrojone w kolejnej iteracji (szczegółowiej w [7]).

$$\underline{\gamma}_i = [2,5 \quad 2 \quad 2 \quad \dots \quad 2]^T \quad (5)$$

dla $i = 1, \dots, n-1$, a $\gamma_n = \gamma_n = \infty$, gdzie n – stopień wielomianu charakterystycznego.

Chcąc określić rachunkowo i graficznie granicę stabilności układu, wykorzystuje się wzór na limity stabilności (6):

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}} \quad (6)$$

dla $i = 2, \dots, n-2$, a

$$\gamma_1^* = \frac{1}{\gamma_2} \quad \gamma_{n-1}^* = \frac{1}{\gamma_{n-2}}$$

- Wyznaczenie $P(s)$, $F(s)$ oraz $A(s)$ i $B(s)$

Wielomian charakterystyczny układu $P(s)$ określa wzór (7):

$$P(s) = D(s)A(s) + N(s)B(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (7)$$

a wielomian $F(s)$ formuła (8):

$$F(s)|_{s=0} = \frac{P(s)}{N(s)}|_{s=0} \quad (8)$$

Celem wyznaczenia wartości liczbowych współczynników przy odpowiednich potęgach wielomianów projektowanego regulatora l_i oraz k_i , rozwiązuje się równanie diofantyczne (9) powstałe z przyrównania wielomianu charakterystycznego celu (10) do równania utworzonego

z wielomianów modelu obiektu i wielomianów modelu regulatora o nieznanach parametrach (7).

$$P(s) = P_T(s) \tag{9}$$

$$P_T(s) = a_0 \left\{ \sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \tag{10}$$

Jeżeli wartości a_0 , τ oraz γ_i są narzucone z góry, rozważany problem sprowadza się do rozwiązania problemu lokowania biegunów w jego klasycznej postaci.

- Ponowienie algorytmu w przypadku niezadowolającej jakości regulacji lub nasycenia sygnału sterującego

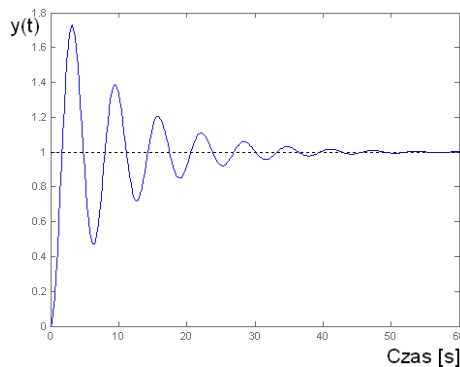
Użycie CD jako narzędzia pomocnego w analizie jakości regulacji pozwala wspomóc podjęcie decyzji o ponowniu algorytmu CDM.

3. Przykład syntezy układu regulacji

Dla przykładu projektowania układu regulacji odpornej (w strukturze z rys. 1), wspomaganego algorytmem CDM, przyjęto model obiektu stabilnego minimalnofazowego oscylacyjnego (SMF) o transmitancji operatorowej (11):

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{1}{s^2 + 0,2s + 1} \tag{11}$$

i odpowiedzi skokowej z rys. 3 [3].



Rys. 3. Odpowiedź modelu SMF na wymuszenie skokowe
Fig. 3. SMF model step response

Wykorzystując tablicę Hamaciego (tab. 1) do doboru stopni wielomianów regulatora (12)–(13), przewidziano możliwość wystąpienia zakłóceń o charakterze skokowym:

$$A(s) = l_2 s^2 + l_1 s \tag{12}$$

$$B(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0 \tag{13}$$

przy czym oczekiwano, by czas odpowiedzi skokowej wyniósł $t_s = 4$ s i nie występowało przeregulowanie. Ekwiwalent stałej czasowej $\tau = 1,6$ wyznaczono ze wzoru (4), a wartości wskaźników stabilności i limitów stabilności wyznaczono odpowiednio w oparciu o formę standardową Manabe (5) i wzór (6) uzyskując:

$$\underline{\gamma}_i = [2,5 \quad 2 \quad 2]^T \tag{14}$$

dla $i = 1, \dots, 3$, a $\gamma_0 = \gamma_4 = \infty$ oraz:

$$\underline{\gamma}_i^* = [0,5 \quad 0,9 \quad 0,5]^T \tag{15}$$

Po podstawieniu równań (12) i (13) oraz transmitancji modelu (11) do równania (7), wielomian charakterystyczny (stopnia $n = 4$) przyjmuje postać (16):

$$P(s) = d_2 l_2 s^4 + (d_2 l_1 + d_1 l_2) s^3 + (d_1 l_1 + d_0 l_2 + k_2 n_0) s^2 + (d_0 l_1 + k_1 n_0) s + k_0 n_0 \tag{16}$$

Filtr wejściowy dla analizowanego przypadku określa wzór:

$$F(s) \Big|_{s=0} = \frac{P(s)}{N(s)} \Big|_{s=0} = k_0 \tag{17}$$

Dla przyjętego $a_0 = k_0 = 1$ ze wzoru (10) określono współczynniki wielomianu charakterystycznego celu (18):

$$P_T(s) = 0,0524 s^4 + 0,3277 s^3 + 1,024 s^2 + 1,6 s + 1 \tag{18}$$

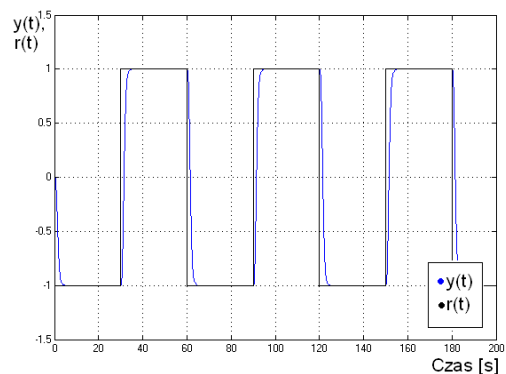
a z przyrównania formuły (16) do (18), rozwiązując równanie diofantyczne, wyznaczono parametry wielomianów regulatora (19)–(21):

$$A(s) = 0,0524 s^2 + 0,3172 s \tag{19}$$

$$B(s) = 0,9081 s^2 + 1,2828 s + 1 \tag{20}$$

$$F(s) = 1 \tag{21}$$

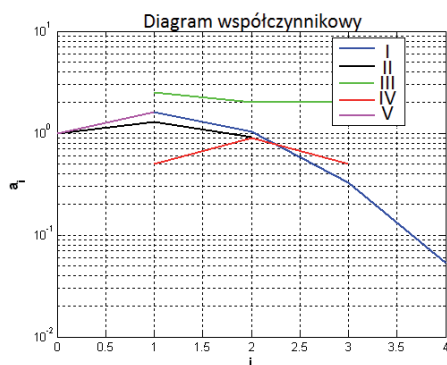
Dla uzyskanego w jednej iteracji algorytmu CDM regulatora (19)–(21) sprawdzono jakość śledzenia sygnału zadanego o amplitudzie równej 1, modulowanego z okresem 60 s w 200 s horyzoncie sterowania (rys. 4). Zarejestrowany przebieg śledzenia potwierdza spełnienie oczekiwań projektowych.



Rys. 4. Śledzenie sygnału zadanego dla modelu SMF
Fig. 4. A tracking of the reference signal for SMF model

4. Diagram współczynnikowy

Analogicznie do wykresów Bodego i Nyquista, diagram współczynnikowy dostarcza niezbędnych informacji o stabilności i dynamice układu. Nadto informuje on o odporności układu [7].



Rys. 5. Diagram (CD) dla układu regulacji z modelem SMF

Fig. 5. Coefficient diagram for the control system with SMF model

W myśl [1] w syntezie i analizie układu regulacji, opartej na algorytmie CDM (w omawianym przypadku dla modelu SMF), wykorzystywany jest półlogarytmiczny diagram współczynnika (rys. 5), na którym na osi poziomej zaznaczono kolejne i -te potęgi wielomianu charakterystycznego P_T , a pionowa oś logarytmiczna wyraża:

- wartości liczbowe współczynników (a_i) przy i -tych potęgach wielomianu charakterystycznego P_T – krzywa 1,
- wartości liczbowe współczynników (k_i) przy i -tych potęgach wielomianu mianownika transmitancji operatorowej regulatora $B(s)$ – krzywa 2,
- i -te wartości wskaźników stabilności (γ) – krzywa 3,
- i -te wartości limitów stabilności (γ^*) – krzywa 4,
- ekwiwalent stałej czasowej – prosta τ .

Z diagramu współczynnika z kształtu krzywej 1 można graficznie ocenić stabilność układu zamkniętego. Stopień nachylenia tej krzywej dostarcza informacji o dynamice układu, natomiast odchylenie kształtu i położenie krzywej 2 względem krzywej 1 informuje o odporności układu.

4.1. Analiza stabilności układu

W pracy [11] udowodniono, że dla większych wartości indeksów stabilności wypukłość krzywej 1 na CD, utworzonej z wielomianu charakterystycznego (w oparciu o te wartości indeksów stabilności) wzrasta, a układ ma większy zapas stabilności. Analizując sytuację na płaszczyźnie zespolonej, koresponduje to z rozmieszczeniem biegunów w lewej półpłaszczyźnie w większym oddaleniu od osi urojonej, wyznaczającej granicę stabilności.

Na podstawie analizy diagramu można ocenić graficznie zapas stabilności. Odpowiednio, dla i -tej potęgi wielomianu charakterystycznego, dla której wyznaczono wartości γ oraz γ^* , odległość pionowa między krzywymi 3 i 4 stanowi miarę oceny stabilności układu (im odległość dla każdego i jest większa, tym układ ma większy zapas stabilności). Należy zauważyć również, że układ jest stabilny tylko wówczas, gdy krzywe te nie przecinają się oraz gdy krzywa 3 znajduje się powyżej krzywej 4. W analizowanym przykładzie układ z modelem SMF jest stabilny i ma duży zapas stabilności.

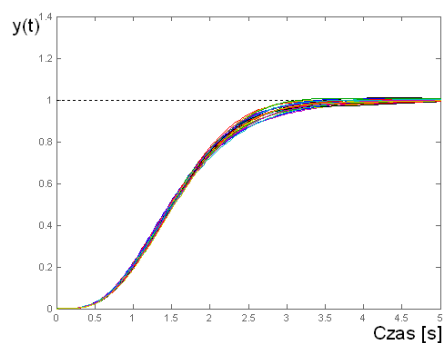
Podstawę teoretyczną analizy stabilności układu stanowi kryterium Routha-Hurwitza dla wielomianów charakterystycznych stopnia trzeciego i czwartego. Kryterium to nie daje bezpośredniego przełożenia na diagram w przypadku obiektów i regulatorów wyższych rzędów. Manabe udowodnił [11], że warunek konieczny i wystarczający dla stabilności układów wyższych stopni może być przeprowadzony z wykorzystaniem praw opracowanych przez Lipatova i Sokolova – opisanych szczegółowo w [10], a ze względu na ich matematyczną prostotę – adaptowanych przy syntezie układu regulacji metodą diagramu współczynnika.

4.2. Analiza dynamiki układu

Dynamikę pracy układu charakteryzuje ekwiwalent stałej czasowej τ . Układ odznacza się większą dynamiką dla mniejszych wartości τ , co na CD (rys. 5) odpowiada większemu kątowni nachylenia krzywej, utworzonej w oparciu o wielomian charakterystyczny względem osi poziomej. Analiza ekwiwalentu stałej czasowej jest istotna również w przypadku ograniczenia sygnału sterującego. Jeżeli sygnał sterujący nasyca się, to wówczas kluczowym zagadnieniem w syntezie układu regulacji jest powrót do etapu wyboru oczekiwanej wartości ekwiwalentu stałej czasowej, zwiększenie jej wartości (spowolnienie oczekiwanej odpowiedzi skokowej) oraz ponowienie algorytmu CDM. Analogicznie, w przypadku gdy sygnał sterujący przyjmuje niewielkie wartości, dynamika odpowiedzi skokowej układu może zostać zwiększona przez zmniejszenie wartości τ .

4.3. Analiza odporności układu

Oceny odporności układu w oparciu o CD dokonuje się na podstawie wzajemnego rozmieszczenia krzywych 1 i 2 (rys. 5). Jeżeli krzywa 2 znajduje się poniżej krzywej 1, to układ odznacza się odpornością na niepewność parametryczną tym większą, im krzywe są bliżej siebie. W analizowanym przykładzie układ z modelem SMF charakteryzuje się zadowalającą odpornością na niepewność parametryczną (rys. 6).



Rys. 6. Odpowiedź skokowa układu z modelem SMF przy zmianie wartości (d) parametrów mianownika transmitancji modelu o $\pm 0,1$

Fig. 6. Step response of control system with SMF model by the change of transfer function denominator parameters values (d) for $\pm 0,1$

Graficzne przedstawienie odporności układu na CD opiera się na zapisie wielomianu charakterystycznego

w postaci wielomianu złożonego z części tzw. wielomianu regulatorowego $P_{ki}(s)$ oraz części tzw. wielomianu modelu obiektu $P_{li}(s)$ (szerzej omówionych w [12]):

$$P(s) = P_{li}(s) + P_{ki}(s) \quad (22)$$

Dla wielomianu opisanego równaniem (22) wprowadza się pojęcie pomocniczej funkcji wrażliwości charakteryzującej odporność definiowanej wzorem (23):

$$T(s) = \frac{P_{ki}(s)}{P(s)} \quad (23)$$

W zależności od typu obiektu oraz zastosowanego regulatora, wykazano [12], że w ogólności można zaprojektować układ regulacji algorytmem CDM, który zachowuje stabilność dla zmian i -tej wartości współczynnika wielomianu charakterystycznego w zakresie od 0,5 do 3 razy względem wartości nominalnej tego współczynnika.

5. Uwagi końcowe

Przedstawiony algorytm CDM zapewnia kontrolę odporności, stabilności i dynamiki na etapie projektowania i analizy zaprojektowanego układu dla zaprezentowanego modelu SMF, jak i innych powszechnie stosowanych modeli liniowych (również nieminimalnofazowych), w różnych konfiguracjach struktur regulatorów. Poprzez wykorzystanie CD może on być z powodzeniem stosowany w klasycznym sterowaniu odpornym, jak i odpornym sterowaniu adaptacyjnym opartym na tym algorytmie, co zostało szerzej udowodnione w [3], której fragment stanowi niniejsza praca.

Bibliografia

- Bigdeli N., Haeri M.: *CDM-based design and performance evaluation of a robust AQM method for dynamic TCP/AQM networks*, "Computer Communications", 2009, 32, 213–229.
- Budiyono A., Sudiyanto T.: *An Algebraic Approach for the MIMO Control of Small Scale Helicopter*, Proceedings of the International Conference on Intelligent Unmanned Systems, Bali, Indonezja 2007, 64–72.
- Giernacki W.: *Odporne sterowanie adaptacyjne z ograniczeniem sygnału sterującego oparte na algorytmie CDM*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2010.
- Hamamci S.E., Koksai M.: *A Program for the Design of Linear Time Invariant Control Systems: CDMCAD*, "Computer Applications In Engineering Education", 2004, 12(3), 165–174.
- Hamamci S.E., Koksai M., Manabe S.: *Robust Position Control of Radar Antenna with the Coefficient Diagram Method*, Proceedings of the 4th Asian Control Conference, Singapur, Chiny 2002, 1785–1790.
- Hamamci S.E., Ucar A.: *A controller based on coefficient diagram method for the robotic manipulators*, Proceedings of The 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits & Systems, Kaslik, Liban 2000, 777–780.
- Hamamci S.E., Ucar A.: *A robust model-based control for uncertain systems*, "Transaction of the Institute of Measurement and Control", 2002, 24(4), 331–345.
- Hamamci S.E., Ucar A.: *Robust Control of a DC Motor by Coefficient Diagram Method*, Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Control and Automation, Dubrownik, Chorwacja 2001, CD-ROM.
- Kongratana V., Numsomran A., Roengruen P., Santi T., Suksri T.: *Smith Predictor Design by CDM for Temperature Control System*, Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, Seul, Korea 2007, CD-ROM.
- Lipatov A.V., Sokolov N.I., *Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems*, tłumaczenie z *Automatika i Telemekhanika* w "Automatic Remote Control", 1979, 39, 1285–1291.
- Manabe S.: *Coefficient Diagram Method*, 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seul, Korea 1998, 199–210.
- Manabe S., Kim Y.Ch.: *Coefficient Diagram Method for Control system design*, monografia w opracowaniu (udostępniony przez autorów fragment maszynopisu).
- Manabe S., Kim Y.Ch.: *Recent Development of Coefficient Diagram Method*, Proceedings of the 3rd Asian Control Conference, Szanghaj, Chiny 2000, CD-ROM.
- Rymarski Z.: *Zagadnienia projektowe jednofazowych inwerterów napięcia w układach UPS*, „Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania”, 2007, 11, 40–43.
- Saff E.B.: *Introduction to Padé approximants*, Stany Zjednoczone, Report of Center for Constructive Approximation, CD-ROM, 2004. ■

The designing of a robust control system supported by CDM algorithm

Abstract: In a paper a new method of synthesis of robust control system is presented. Basis of Coefficient Diagram Method in the system designing context and its properties analysis, were characterized. Methods of control quality improvement on the basis of the coefficient diagram – a tool which the complex control of robustness, stability and system's dynamics enables, were discussed. The example of robust control system synthesis for oscillatory minimum-phase plant by CDM algorithm and system properties analysis by coefficient diagram, were placed. The results of simulations confirmed the effectiveness of the proposed solution.

Keywords: robust control, polynomial control, coefficient diagram method, system's stability, system's dynamics

dr inż. Wojciech Giernacki

Adiunkt w Zakładzie Automatyki i Robotyki Instytutu Automatyki i Inżynierii Informatycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe skupiają się wokół problemów sterowania odpornego i adaptacyjnego, algorytmów optymalizacji, identyfikacji obiektów sterowania, metod opisu dyskretnych i impulsowych układów regulacji oraz urządzeń i systemów pomiarowych w automatyce.
e-mail: wojciech.giernacki@put.poznan.pl

