

Karol RUMATOWSKI, Dariusz HORLA

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I INŻYNIERII INFORMATYCZNEJ

Analiza jakości śledzenia w układach z kompensatorami zjawiska windup dla obiektów oscylacyjnych

Dr hab. inż. Karol RUMATOWSKI

Urodzony w Poznaniu w 1937r. jest absolwentem Wydziału Elektrycznego PP (1961r.). Pracę doktorską obronił w roku 1968. Stopień dra hab. uzyskał w roku 1978. W latach 1989-2001 pracował w Zakładach SIEMENS Austria zajmując się komputerowym wspomaganie projektowania i konstrukcji elektronicznych układów impulsowych. Zainteresowania naukowe związane są z optymalizacją układów śledzących, przetwarzaniem sygnałów oraz analizą i syntezą układów sterowania impulsowego.

e-mail: Karol.Rumatowski@put.poznan.pl



Dr inż. Dariusz HORLA

Urodzony w Poznaniu w 1978r., ukończył studia Automatyka i robotyka, specj. Automatyka na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej w 2002r., uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w 2005r. w dziedzinie automatyka (PP). Zainteresowania naukowe dotyczą sterowania adaptacyjnego, kompensacji zjawiska windup w tym dla układów wielowymiarowych, liniowych nierówności macierzowych oraz optymalizacji układów sterowania.

e-mail: Dariusz.Horla@put.poznan.pl



Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy wpływu kompensacji zjawiska *windup* na jakość śledzenia w układach z regulatorem PID i ograniczeniem amplitudy sygnału sterującego dla obiektów oscylacyjnych. Jakość śledzenia oceniano na podstawie różnic między wartościami całkowitych wskaźników (modułu i kwadratu błędu śledzenia) dla układu bez i z kompensatorem. Nastawy parametrów regulatora dla rozpatrywanych modeli symulacyjnych dobrano wykorzystując blok NCD pakietu Matlab. Wyniki numeryczne analizy symulacyjnych uzyskano dla stabilnych obiektów oscylacyjnych i prostokątnego sygnału śledzonego.

Słowa kluczowe: kompensator zjawiska *windup*, błąd śledzenia, integrator.

Quality analysis of the tracking systems with anti-windup compensators for oscillatory plant models

Abstract

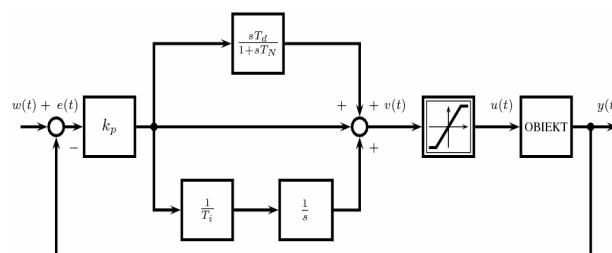
The paper discusses influence of anti-windup compensator on tracking operation of systems with PID controllers and control amplitude constraints for oscillatory plants. Tracking performance has been evaluated according to differences between integral indexes (of absolute and squared tracking error) for systems with and without compensation. Controller parameters for considered plants have been chosen according to NCD block from MATLAB. The results of numerical analysis have been obtained for stable oscillatory plants and square reference signal.

Keywords: block diagram, saturation, anti-windup compensator, tracking error, integrator.

1. Wprowadzenie

Sygnały sterujące w rzeczywistych układach śledzących podlegają ograniczeniom. Przykładami ograniczeń są: ograniczenie stopnia otwarcia nastawnika na obiekcie czy też ograniczenie prędkości otwierania zaworu regulacyjnego. Sygnał sterujący, wynikający z obliczeń nieuwzględniających ograniczeń sygnału różni się od rzeczywistego sygnału sterującego w układzie śledzącym z ograniczeniami (rys.1). Ten brak spójności pomiędzy wewnętrznymi stanami regulatora, a jego sygnałem wyjściowym, tj. między sygnałem sterującym obliczonym (bez ograniczeń) a sygnałem ograniczonym, określa się jako zjawisko *windup*. Zjawisko *windup* pogarsza jakość śledzenia sygnału wejściowego układu w porównaniu z układem liniowym bez ograniczeń.

Dla obliczonej wartości sygnału sterującego $|v(t)| > \alpha$ sygnał sterujący $u(t) = \text{asign}(v(t))$ i dalszy jego wzrost jest niemożliwy. Jeżeli regulator zawiera działanie całkujące, to jednocześnie trwa zbędne całkowanie sygnału błędu śledzenia $e(t)$, co oznacza, że na wyjściu integratora regulatora pojawiają się bardzo duże wartości, nie mające żadnego wpływu na proces śledzenia.



Rys. 1. Schemat blokowy układu śledzącego z ograniczeniem amplitudy sygnału sterującego $u(t)$

Fig. 1. Block diagram of tracking system with control amplitude constraint

Minimalizacja wpływu zjawiska *windup* na jakość procesu śledzenia wymaga zastosowania w układzie kompensatora tego zjawiska (AWC, ang. *anti-windup compensator*).

Artykuł zawiera wyniki jakościowej analizy porównawczej w układach z regulatorem PID o działaniu ciągłym i wybranymi obiektami regulacji, śledzącymi sygnał o przebiegu prostokątnym z zastosowaniem pięciu różnych kompensatorów AWC w odniesieniu do układu bez kompensatora zjawiska *windup*.

2. Wskaźniki jakości

Analizę jakości śledzenia w układzie z regulatorem PID i kompensatorami zjawiska *windup* w zależności od wartości parametrów obiektu przeprowadzono w oparciu o wskaźniki jakości

$$\Delta J_1 = J_1 - J_{1AWC}, \quad (1)$$

$$\Delta J_2 = J_2 - J_{2AWC},$$

gdzie

$$J_1 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

jest całką z modułu błędu śledzenia $e(t) = r(t) - y(t)$ (ang. Integral of the Absolute Error - IAE),

$$J_2 = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (3)$$

jest całką z kwadratu błędu $e(t)$ (ang. Integral of the Square Error - ISE) [1].

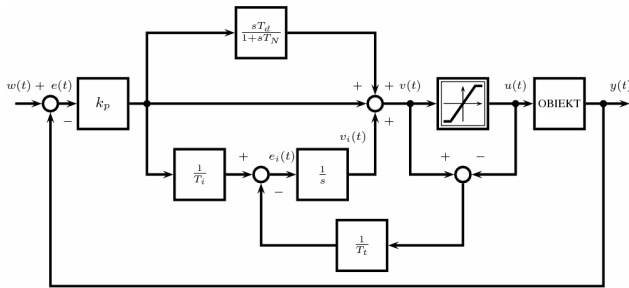
Wskaźniki J_{1AWC} , J_{2AWC} dotyczą układów z kompensatorami zjawiska *windup*, w odróżnieniu od wskaźników J_1 , J_2 odnoszących się do układów bez kompensatora zjawiska *windup*.

W obliczeniach numerycznych zastąpiono górną granicę całkowania ∞ wartością skończoną t_h , określającą horyzont symulacji.

3. Schematy blokowe układów śledzących z kompensatorami zjawiska windup

3.1. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC1

Schemat blokowy układu z kompensatorem AWC1 przedstawiono na rys. 2 [2].



Rys. 2. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC1
Fig. 2. Block diagram of tracking system with AWC1

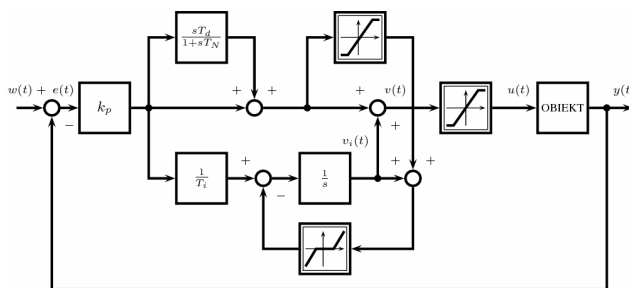
Gdy sygnał wyjściowy z regulatora $v(t)$, w układzie z rys. 2, przekracza zakres dopuszczalny czyli sygnał sterujący $u(t)$ wchodzi w nasycenie co oznacza, że $u(t) \neq v(t)$, to jest wytwarzany sygnał sprzężenia zwrotnego równy różnicy $\Delta u(t) = v(t) - u(t)$. Sygnał wejściowy integratora $e_i(t)$ jest określony wzorem

$$e_i(t) = \frac{k_p}{T_i} e(t) - \frac{1}{T_i} \Delta u(t), \quad (4)$$

gdzie stała czasowa T_i procesu śledzenia sygnałów $v(t)$ i $u(t)$, odpowiada za szybkość działania układu śledzącego. Przyjmuje się z reguły $T_i = (0,1 \dots 1) T_i$.

3.2. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC2

Kompensator AWC2 zastosowany w układzie śledzącym przedstawionym na rys. 3. stanowi modyfikację kompensatora AWC1.



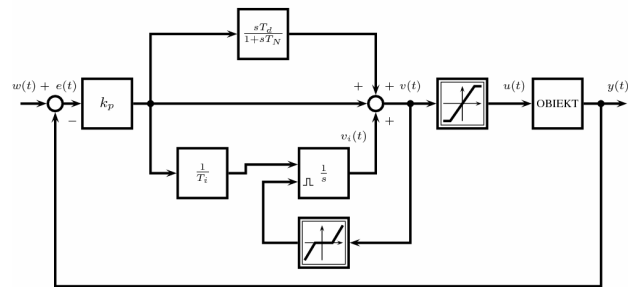
Rys. 3. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC2
Fig. 3. Block diagram of tracking system with AWC2

W układzie z kompensatorem AWC1, bardzo duży początkowy sygnał wyjściowy $v(t)$ (wynikający z działania członów P i D) powoduje duży sygnał sprzężenia zwrotnego oddziaływujący na integrator. Z upływem czasu wpływ członów P i D zmniejsza się, jednak człon I nie może skompensować tej zmiany wystarczająco szybko. Efektem takiej sytuacji jest wolniejszy przebieg sygnału sterującego regulatora. Kompensator AWC2 zjawiska windup

(rys.3) eliminuje tą wadę. Dodatkowo ograniczenie wprowadzono wyłącznie na człon PD - metoda ta może być interpretowana jako wstrzymywanie akcji całkującej dopóki wyjście członu PD nie przekroczy zakresu liniowego. Nastawy obydwu bloków ograniczających (ang. *saturation*) oraz bloku strefy martwej (ang. *deadzone*) są na jednakowym poziomie [3].

3.3. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC3 (z zerowaniem całkowania)

Schemat układu śledzącego z kompensatorem AWC3 przedstawiono na rys. 4 [3].

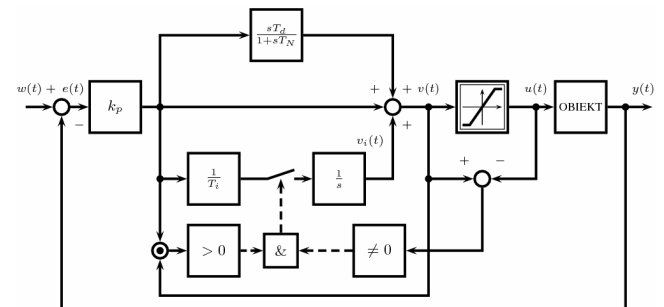


Rys. 4. Schemat blokowy układ śledzącego z kompensatorem AWC3
Fig. 4. Block diagram of tracking system with AWC3

Metoda kompensacji zjawiska windup w układzie śledzenia o schemacie przedstawionym na rys. 4 charakteryzuje się tym, że na dodatkowe wejście integratora regulatora (wejście zerujące integrator) jest podawany sygnał z wyjścia regulatora $v(t)$, przetworzony przez blok strefy martwej. Wielkość strefy martwej jest równa zakresowi dopuszczalnego sygnału wyjściowego regulatora $u(t)$. W ten sposób, w chwili gdy sygnał $v(t)$ przekroczy dopuszczalny zakres, zostanie podany sygnał na wejście zerujące (resetujące) sprowadzający sygnał wyjściowy integratora do wartości zerowej. Po wyjściu sygnału sterującego z ograniczenia (tj. $v(t) = u(t)$) całkowanie jest ponownie uruchamiane.

3.4. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC4 (z warunkowym całkowaniem)

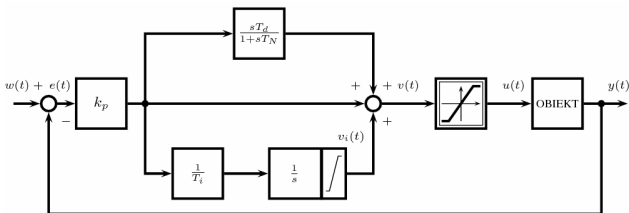
W układzie regulacji z kompensatorem AWC4 integrator jest włączany lub wyłączany zależnie od specjalnie dobranych warunków. Warunkami mogą być wartość sygnału wyjściowego regulatora lub sygnału uchybu. Najlepsze rezultaty są osiągane wtedy, gdy całkowanie jest wyłączane w chwili wejścia sygnału wyjściowego regulatora w ograniczenie ($v(t) \neq u(t)$), a jego znak jest zgodny ze znakiem sygnału uchybu. Schemat układu przedstawiono na rys. 5 [3].



Rys. 5. Schemat blokowy układ śledzącego z kompensatorem AWC4
Fig. 5. Block diagram of tracking system with AWC4

3.5. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC5 (z ograniczeniem integratora)

Metoda kompensacji zjawiska *windup* w układzie z kompensatorem AWC5 przedstawionym na rys. 6 polega na tym, że na tor całkujący jest nałożone ograniczenie równe ograniczeniu sygnału sterującego. Wadą tej metody jest to, że istnieje możliwość zatrzymania całkowania w przypadku, gdy sygnał wyjściowy z regulatora $v(t)$ nie podlega nasyceniu.



Rys. 6. Schemat blokowy układu śledzącego z kompensatorem AWC5
Fig. 6. Block diagram of tracking system with AWC5

4. Wyniki symulacji

Badania symulacyjne obejmowały układ śledzący z regulatorem PID o nastawach

$$k_p = 2.33, \quad T_d = 2.2, \quad T_i = 0.3,$$

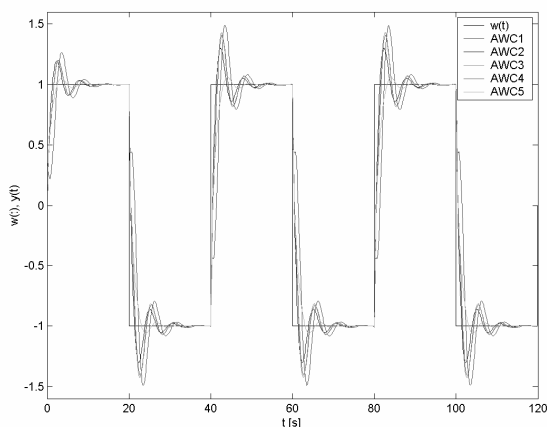
dobranych metodą wykorzystującą blok NCD (ang. *Nonlinear Control Design*) pakietu Matlab/Simulink [4] i obiektem oscylacyjnym o transmitancji operatorowej

$$G_{ob}(s) = \frac{s+1}{s^2+0.3s+1} \quad (\omega_n = 1 \text{ rd/s} \quad \xi = 0,15) \quad (5)$$

Sygnał śledzony (wejściowy) był przebiegiem prostokątnym.

Ograniczenie sygnału sterującego $\alpha = \pm 1,1$.

Przebiegi sygnałów wyjściowych analizowanych układów na tle prostokątnego sygnału śledzonego przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Przebiegi sygnałów wyjściowych $y(t)$ układów ze stabilnym obiektem oscylacyjnym

Fig. 7. Tracking performance for stable oscillatory plant

Z uzyskanych przebiegów (rys. 7) dla minimalnofazowego stabilnego obiektu oscylacyjnego widać, że po pierwszym półokresie znacznie wzrosła wartość maksymalnego odchylenia dynamicznego sygnałów wyjściowych $y(t)$ układów z kompensatorami

AWC1, AWC2, AWC3 oraz AWC4 od sygnału referencyjnego (śledzonego) $r(t)$. Najlepiej zadanie śledzenia realizuje układ z kompensatorem AWC5, gdyż zapewnia śledzenie sygnału wejściowego pozbawione oscylacji w przebiegu sygnału wyjściowego $y(t)$.

5. Analiza jakościowa

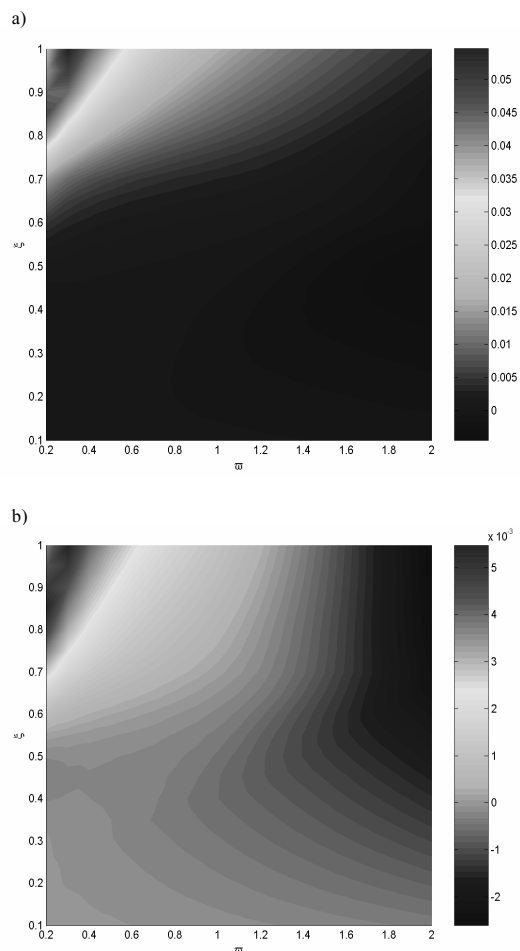
Do oceny wpływu kompensatorów AWC na jakość śledzenia w układzie z regulatorem PID i obiektem oscylacyjnym o transmitancji

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

(ξ - współczynnik tłumienia, ω_n - pulsacja drgań nietylonych), zastosowano wskaźniki jakości $\Delta J_1, \Delta J_2$ (zob. (1)).

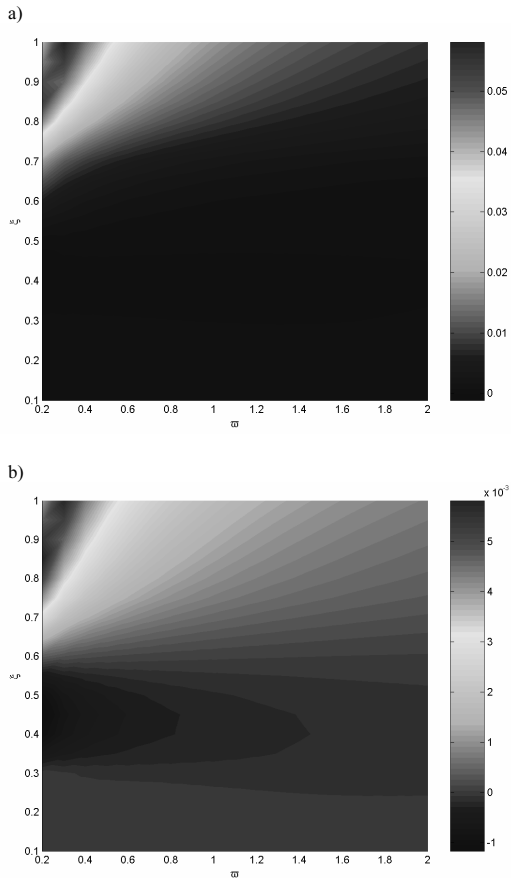
Wyniki analizy zaprezentowano na rys. 8 - 12 w postaci wykresów zależności (powierzchni) $\Delta J_1 = f(\xi, \omega)$ i $\Delta J_2 = f(\xi, \omega)$.

Wyniki zilustrowane na rys. 8 pokazują, że poprawa jakości śledzenia z wykorzystaniem kompensatora AWC1 dla rozpatrywanego obiektu występuje w obszarze $0 < \omega_n < 1$ oraz $0.5 < \xi < 1$. Poza tym obszarem zastosowanie kompensatora AWC1 pogarsza jakość śledzenia.

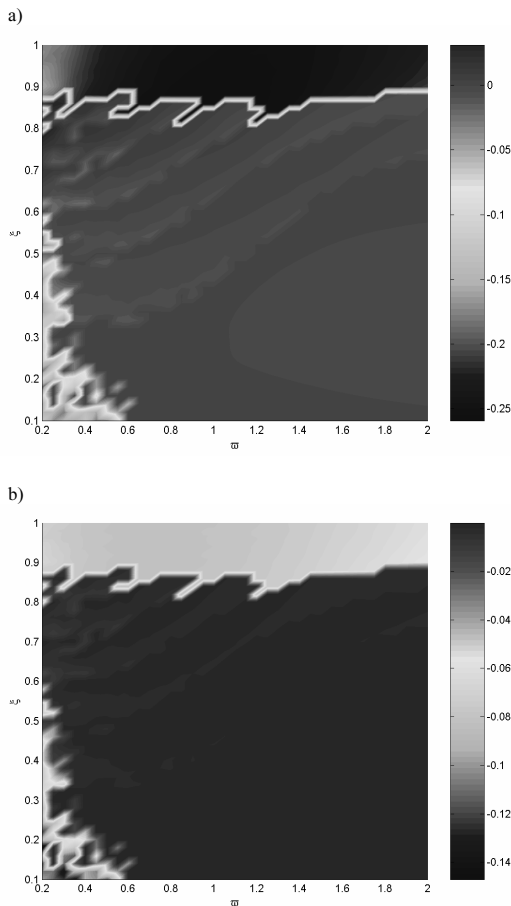


Rys. 8. Wykresy powierzchni $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ dla układu z kompensatorem AWC1
Fig. 8. Performance surfaces $\Delta J_1(a)$ i ΔJ_2 for AWC1

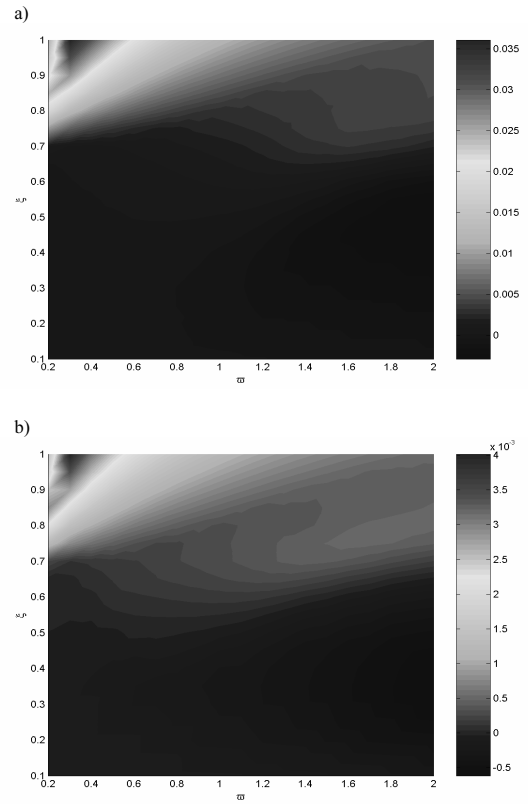
W przypadku zastosowania kompensatora AWC2 (rys. 9) obszar poprawy jakości regulacji przemieszcza się w stosunku do kompensatora AWC1 i jest widoczny dla parametrów obiektu $0.5 < \omega_n < 1.5$ i $0.6 < \xi < 1$. Natomiast w obszarze $1.5 < \omega_n < 2$ i $0.3 < \xi < 0.6$ występuje pogorszenie jakości śledzenia w stosunku do układu bez kompensatora.



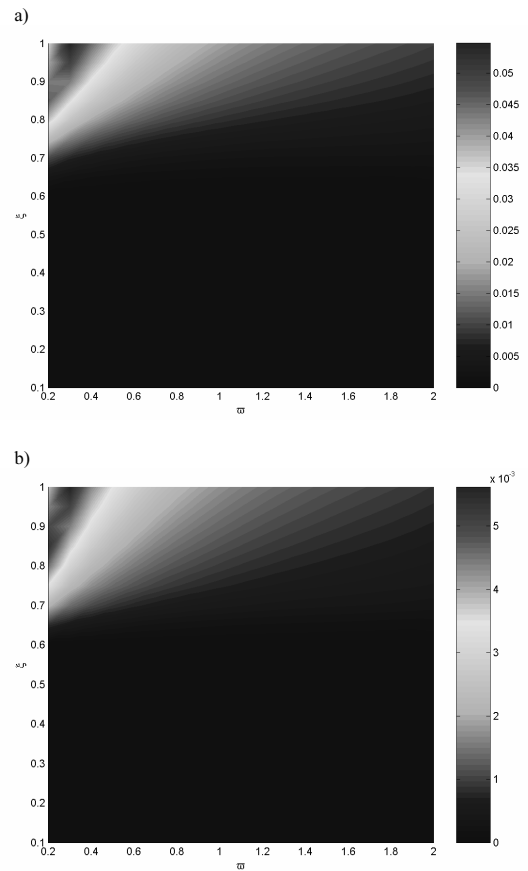
Rys. 9. Wykresy powierzchni $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ dla układu z kompensatorem AWC2
 Fig. 9. Performance surfaces $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ for AWC2



Rys. 10. Wykresy powierzchni $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ dla układu z kompensatorem AWC3
 Fig. 10. Performance surfaces $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ for AWC3



Rys. 11. Wykresy powierzchni $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ dla układu z kompensatorem AWC4
 Fig. 11. Performance surfaces $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ for AWC4



Rys. 12. Wykresy powierzchni $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ dla układu z kompensatorem AWC5
 Fig. 12. Performance surfaces $\Delta J_1(a)$ i $\Delta J_2(b)$ for AWC5

Zastosowanie dla obiektu o charakterze oscylacyjnym kompensatora AWC3 jest bezcelowe, gdyż nie ma obszarów, w których występowałyby poprawa jakości regulacji (zob. rys. 10) w odnie-

sieniu do układu bez kompensatora. Natomiast występują obszary, w których jakość regulacji ulega pogorszeniu ($1 < \omega_n < 2$ i $0 < \xi < 0.4$ – rys. 10b). Wskaźniki ΔJ_1 oraz ΔJ_2 przyjmują wartości ujemne.

W przypadku zastosowania kompensatora AWC4 obszary parametrów, w których występuje poprawa jakości śledzenia dla obiektu oscylacyjnego są znacznie większe w porównaniu z pozostałymi kompensatorami. Jak pokazano na rys. 11 obszary te występują dla następujących parametrów obiektu: $0.5 < \omega_n < 1.5$ i $0.5 < \xi < 1$ oraz $1.5 < \omega_n < 2$ i $0 < \xi < 0.7$.

Obszar poprawy jakości śledzenia w przypadku zastosowania kompensatora AWC5 w stosunku do układu bez AWC występuje dla następującej konfiguracji parametrów obiektu: $0.8 < \omega_n < 1.5$ i $0.7 < \xi < 1$ (rys. 12). Dla pozostałej konfiguracji parametrów rozpatrywanego obiektu jakość śledzenia nie ulega zmianie ($\Delta J_1 = 0$ i $\Delta J_2 = 0$) w stosunku do układu bez kompensatora.

6. Wnioski końcowe

Kompensacja zjawiska *windup* odgrywa bardzo ważną rolę w zadaniach śledzenia z ograniczeniami nałożonymi na sygnał sterujący regulatora PID. Istotny jest prawidłowy dobór kompensatora AWC do rodzaju obiektu.

Z zamieszczonych wyników analiz symulacyjnych dla obiektu oscylacyjnego widać, że nie wszystkie z rozpatrywanych kompensatorów zapewniają wymaganą jakość śledzenia, powodując niekiedy pogorszenie jakości w stosunku do układu bez kompensatora AWC. Uzyskane wyniki dowodzą również, że dla poprawy jakości śledzenia w przypadku obiektów oscylacyjnych jest wy-

magane stosowanie kompensatorów o bardziej zaawansowanej budowie.

W praktyce podczas projektowania układów śledzenia należy dokonać kompromisu pomiędzy oczekiwaną jakością śledzenia, zastosowanym regulatorem PID (jego liczbą stopni swobody), a kompensatorem zjawiska *windup* dla konkretnego rodzaju obiektu.

7. Literatura

- [1] Peng Y., Vrančić D., Hanus R., A Review of Anti-windup, Bumpless and Conditioned Trans-fer, Proceedings of 5th European Control Conference, Karlsruhe, Niemcy 1999, s. 79-84.
- [2] Visoli A., Modified Anti-windup Scheme for PID Controllers, IEE Proceedings-D, Vol. 150(1), 2003, s. 49-54.
- [3] Bohn C., Atherton D. P., An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies, IEEE Control Systems Magazine, 15 Issue 2, April 1995, s. 34 – 40.
- [4] Rumatowski K., Horla D., Analiza jakości regulacji z kompensatorami zjawiska windup dla obiektów inercyjnych z opóźnieniem, Studia z Automatyki i Informatyki, Tom 31, Wydawnictwo Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, 2006, s. 79-96.

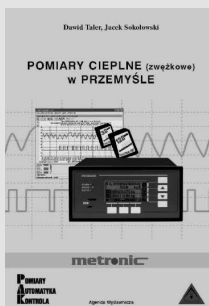
Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Książki Wydawnictwa PAK



Książka „Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów w LabVIEW”, autorstwa Dariusza Świsulskiego, stanowi kontynuację wydanej w 2002 roku książki „Komputerowa technika pomiarowa w przykładach”. Zasadniczą część książki zajmuje bardzo szczegółowy opis środowiska LabVIEW. Książka przeznaczona jest dla osób rozpoczynających pracę z oprogramowaniem LabVIEW, ale będzie również interesująca dla osób, które już wcześniej używały tego środowiska.



Książka „Pomiary cieplne (zwężkowe) w przemyśle” stanowi nową pozycję literaturową poświęconą pomiarom strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu zwęzek pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami ciepłno-przepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów zwężkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.



Książka „Regulacja mikroklimatu pomieszczenia” stanowi nowe opracowanie w stosunku do wydanej w 2002 r. książki „Klimat Pomiaru Regulacja”. Prezentuje ona aktualny stan wiedzy na temat mikroklimatu pomieszczeń i nowoczesne rozwiązania systemów pomiarowo - regulacyjno - sterujących oferowanych przez firmę LAB-EL. Rozwiązania te są osiągnięciem polskiej myśli technicznej o standardzie europejskim.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl