Adam ŻUCHOWSKI
ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA STEROWANIA I POMIARÓW
ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin

Układ regulacji ekstremalnej z „grzebieniową” składową sygnału sterującego obiektem

Prof. dr hab. inż. Adam ŻUCHOWSKI

Profesor zwyczajny zatrudniony w Katedrze Sterowania i Pomiarów w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym. Ze szkolnictwem wyższym związany zawodowo od 1955 roku (Politechnika Wrocławska, Politechnika Szczecińska). Jest współtwórcą polskiej szkoły miernictwa dynamicznego, posiada w dorobku około 350 publikacji. W kwietniu 2010 roku upłynęło 55 lat jego działalności naukowej.

e-mail: adam.zuchowski@zut.edu.pl

Streszczenie

W powszechnie znanych układach regulacji ekstremalnej dynamika obiektu regulowanego stanowi przeszkodę w prowadzeniu procesu zmierzającego do osiągnięcia ekstremum charakterystyki statycznej obiektu i wymaga działań kompensujących jej wpływ. Zaproponowano układ nie stwarzający takich trudności.

Słowa kluczowe: Regulacja ekstremalna, dynamika obiektu, proces sterowania.

The Extreme Control System with „Comb – Form” Component of Plant Input Signal

Abstract

The commonly known extreme control systems have to be equipped with elements compensating plant dynamics, because the lack of this solution seriousely complicats the process of generation of those plant input signals which assure the plant operation in neighbourhood of extremum of its static characteristic. The proposed idea overcomes the mentioned difficulties.

Keywords: extreme control systems, plant dynamics, control process.

1. Wstęp

Znanych jest od wielu lat i prezentowanych w literaturze [1, 2, 3, 4] kilka typów układów regulacji ekstremalnej, w tym układy z detekcją znaku pochodnych, z detekcją synchroniczną sygnału wyjściowego obiektu, z piłową modulacją sygnału sterującego, w różnych odmianach i wariantach. W każdym z tych typów układów dynamika obiektu regulowanego o charakterystyce statycznej posiadającej ekstremum utrudniania prowadzenie procesu sterowania i wymaga stosowania specjalnych układów kompensacyjnych – w przypadku dynamiki nieliniowej – nie do końca skutecznych. Istnieje jak się wydaje możliwość ominięcia takich trudności, co pociąga za sobą konieczność pewnego rozbudowania układu sterującego. Wyizolujmy ze schematu układu regulacji pokazanego na rys. 1 sam obiekt o sygnale wejściowym $x(t)$ i wyjściowym $y(t)$. Załóżmy, że w pewnym – w praktyce zwykle dopuszczalnym uproszczeniu – charakterystykę statyczną (element środkowy na schemacie) opisuje równanie:

$$y_1 = A - B\cdot\left(x_1 - x_{1e}\right)^2 \tag{1}$$

a więc, że posiada ona ekstremum (maksimum) w punkcie $x_1 = x_{1e}$.

Przy odchyleniu x_1 o pewien przyrost Δx_1 otrzymuje się:

$$y_1 = A - B\cdot\left(x_1 + \Delta x_1 - x_{1e}\right)^2 = A - B\cdot\left(x_1 - x_{1e}\right)^2 - 2\cdot B\cdot\left(x_1 - x_{1e}\right)\cdot\Delta x_1 - \\ - B\cdot\Delta x_1^2 = y_{1o} - 2\cdot B\cdot\left(x_1 - x_{1e}\right)\cdot\Delta x_1 - B\cdot\Delta x_1 \tag{2}$$

a więc przyrost wartości $y_1 - y_{1o}$ proporcjonalny do wielkości odchylenia punktu pracy od punktu docelowego (w którym występuje ekstremum) i nieliniowo zależny od Δx_1^2. Można to wykorzystać do sterowania obiektem wprowadzając operacje:

- okresowego wprowadzania krótkotrwałego odchylenia Δx_1 na wejściu obiektu, po uprzednim zapamiętaniu wartości y_{1o},
- powiększenia wartości sygnału x_i o całkę z różnicy $y_1 - y_{1o}$,
- zapamiętywania kolejnej wartości sygnału y_1 jako ustalonego wyniku reakcji na powiększony sygnał x_1,
- kolejnego wprowadzenia krótkotrwałego odchylenia Δx_1 i powtarzania tych operacji do skutku.

Uwzględniając dynamikę obiektu (transmitancje członów $K_1(s)$ i $K_2(s)$ spełniające warunek $K_1(0)=K_2(0)=0$) i schemat układu pokazany w górnej części rys. 1 doprecyzujemy kolejne fazy jego działania.

W chwili startu mamy na wejściu obiektu o nieliniowej charakterystycznej $y_1=F(x_1)$ sygnał $x(0)$, a na jego wyjściu ustaloną wartość sygnału $y(0)$ zapamiętaną przez integrator I_1 w pomocniczym układzie śledzącym. Specjalny generator prostokątnych impulsów poprzez węzeł sumacyjny podaje na wejście obiektu impuls $r(t) = \frac{d}{2}\cdot\left(1(t) - 1(t - t_x)\right)$ o amplitudzie d i czasie trwania t_x.

Przełącznik P w głównej pętli sprzężenia zwrotnego znajduje się w pozycji (2), a integrator I_2 wyznacza całkę z sygnału $e(t)$. Przy pominięciu składnika pochodzącego od nieliniowego członu Δx_1^2 całka ta określa przyrost

$$\Delta x = \lim_{s\to 0} s\cdot\frac{F'(x_0)}{s\cdot T_c}\cdot\frac{d}{s}\cdot\left(1 - \exp(-s t_x)\right)\cdot K_1(s)\cdot K_2(s) = d\cdot\frac{t_x}{T_c}F'(x_0) \tag{3}$$

niezależnie od dynamiki obiektu. Jego obliczenie trwa przez czas T_0 zależny od wielkości t_x i dynamiki obiektu. W tym czasie sygnał sterujący nie może jeszcze ulegać zmianie, więc w pętlę zostaje wprowadzony człon opóźniający o transmitancji $\exp(-sT)$, przy $T>T_0$.

Po upływie tego czasu na wejście obiektu trafia już suma $x(0)+\Delta x$, przełącznik P przyjmuje pozycję (1), obiekt osiąga nowy stan równowagi zapamiętany przez integrator I_1. Ta faza pracy trwa przez czas T_1. Po upływie czasu $T+T_1$ generator wytwarza kolejny impuls $r(t)$, przełącznik zostaje przełączony w pozycję (2) i następuje powtórzenie całej procedury. Układ zmierza do stanu w którym sygnał wyjściowy obiektu przyjmuje wartość ekstremalną ($F'(x)=0$) z błędem spowodowanym nieliniowym członem Δx_1^2, który powinien być mały.

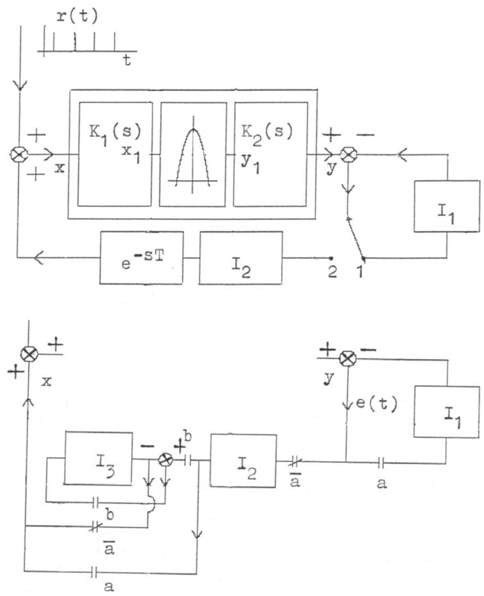
Zamiast członu opóźniającego o transmitancji $\exp(-sT)$, można zastosować układ pokazany w dolnej części rys. 1 z wykorzystaniem elementu przełączającego o stykach a, oraz b i dodatkowo członu śledzącego (integrator I_3 oraz węzeł sumacyjny). Pracą elementów przełączających należy sterować uwzględniając czasy kolejnych faz T, oraz $T+T_1$ w następujący sposób:

Faza 0 – start układu, $a=1,\ \bar{a}=0,\ b=1,\ r=0$

Integrator I_1 zapamiętuje wartość $y(0)$
Integrator I_2 steruje obiekt sygnałem $x(0)$
Integrator I_3 zapamiętuje wartość $x(0)$

Faza 1. $a=0,\ \bar{a}=1,\ b=0,\ r=d$

Integrator I_1 pamięta $y(0)$
Integrator I_2 wypracowuje sygnał $x(0)+\Delta x_1$
Integrator I_3 steruje obiekt sygnałem $x(0)$



Rys. 1. Schemat blokowy proponowanego układu regulacji ekstremalnej
Fig. 1. The block diagram of extreme control system

Faza 2. $a=1,\ \bar{a}=0,\ b=1,\ r=0$

Integrator I_1 zapamiętuje nową wartość $y(1)$
Integrator I_2 steruje obiekt sygnałem $x(0)+\Delta x_1$
Integrator I_3 zapamiętuje wartość $y(0)+\Delta x_1$

Faza 3. $a=0,\ \bar{a}=1,\ b=0,\ r=d$

Integrator I_1 pamięta $y(1)$
Integrator I_2 wypracowuje wartość $x(0)+\Delta x_1+\Delta x_2$
Integrator I_3 steruje obiekt sygnałem $x(0)+\Delta x_1$
Faza 4 = Faza 2, Faza 5 = Faza 3, itd.

2. Stabilność układu

Dla uproszczenia pominiemy dynamikę obiektu zakładając jednocześnie, że posiada on charakterystykę statyczną o postaci ogólnej $y=F(x)$ np. z ekstremum typu maksimum. Startując z punktu początkowego $x=x_1$ przy niewielkim $r(t)=d$ otrzymuje się:

$$F(x_1+d)\cong F(x_1)+d\cdot F'(x_1)+\frac{1}{2}\cdot d^2\cdot F''(x_1) \qquad (4)$$

Wartość $F(x_1)$ została zapamiętana przez integrator I_1, jest to też kolejna wartość sygnału sterującego obiektem:

$$x_2 = x_1+\frac{1}{T_c}\cdot\int_0^t\left(F(x_1+d)-F(x_1)\right)\cdot dt = x_1+d\cdot\frac{t_x}{T_c}\cdot\left(F'(x_1)+\frac{d}{2}\cdot F''(x_1)\right) \qquad (5)$$

gdzie t_x jest czasem trwania impulsu $r(t)$. W kolejnym kroku układ startując od wartości $x=x_2$ osiągnie nowy stan ustalony:

$$x_3 = x_2+\frac{1}{T_c}\cdot\int_0^t\left(F(x_2+d)-F(x_2)\right)\cdot dt = x_2+d\cdot\frac{t_x}{T_c}\cdot\left(F'(x_2)+\frac{d}{2}\cdot F''(x_2)\right) \qquad (6)$$

Różnica:

$$D = x_3-x_1 = x_3-x_2+x_2-x_1 = d\cdot\frac{t_x}{T_c}\cdot\left(F'(x_1)+F'(x_2)+\frac{d}{2}\cdot\left(F''(x_1)+F''(x_2)\right)\right) \qquad (7)$$

Jeśli $x_1<0$, oraz $D<0$, lub $x_1>0$, oraz $D>0$ – układ będzie niestabilny. Dla ekstremum typu maksimum jest więc stabilny, jeżeli

$$x_1\cdot D<0 \qquad (8)$$

Przypuśćmy dla przykładu, że $F(x)=A-Bx^2$, $F'(x)=-2Bx$ oraz $F''(x)=-2B$. W tych warunkach, po przekształceniach otrzymuje się:

$$x_1\cdot D = -2\cdot B\cdot d\cdot\frac{t_x}{T_c}\cdot x_1\cdot(2\cdot x_1+d)\cdot\left(1-B\cdot d\cdot\frac{t_x}{T_c}\right) \qquad (9)$$

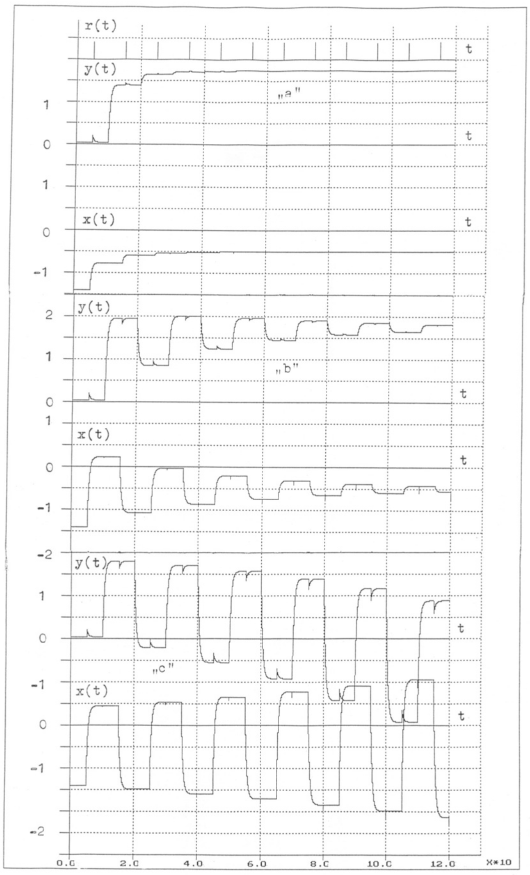
i układ jest stabilny, jeśli $2x_1+d<0$ oraz $B\cdot d\cdot\frac{t_x}{T_0}<1$.

Ponieważ $2x_1+d$ staje się dodatnie dla małych $|x_1|$, zatem układ w pobliżu ekstremum posiada cykl graniczny (przeszukiwanie okolicy ekstremum). Uwzględnienie dynamiki obiektu zmienia nieco warunki pracy. Jeśli impulsowi $r(t)$ odpowiada $r(s)$ w postaci operatorowej, to na wejście gałęzi statycznej obiektu zostanie podany impuls $r_1(t)$ odpowiadający $r(s)\cdot K_1(s)$, a na wyjściu obiektu pojawi się impuls o składowej $r_1(s)\cdot K_2(s)$, i składowej zależnej od kwadratu $r_1^2(t)$ z uwzględnieniem przejścia tej składowej przez blok o transmitancji $K_2(s)$. Przy stabilnej pracy układu stan ustalony nastąpi w takim punkcie x_u, przy którym kolejny przyrost sygnału x na wejściu integratora I_2 stanie się równy zeru. Istotne jest więc przyjęcie odpowiednio małego i krótkotrwałego impulsu $r(t)$, co wydłuża proces odnajdywania punktu ekstremum.

3. Wyniki symulacji układu

Wykorzystując odpowiedni program komputerowy dokonano symulacji układu jak na rys. 1 przyjmując nieliniową charakterystykę obiektu o postaci $y=2(1-0{,}5x^2)$ i jego dynamikę w postaci członu o transmitancji $K_2(s)=1/(1+s)$, przy $K_1(s)=1$. Układ każdorazowo startował z warunku początkowego $x(0)=-1{,}4$, $y(0)=0{,}04$, przy tym zmieniono czas całkowania integratora T_2. W pierwszym przypadku (rys. 2a) czas całkowania był stosunkowo długi i układ dochodzi do punktu bliskiego ekstremum przy $x=0$ aperiodycznie i z pewnym błędem powodowanym nieliniową składową wynikającą z członu Δx^2. W drugim przypadku – przy krótszym czasie całkowania proces ma charakter oscylacyjny tłumiony (rys. 2b), a w trzecim rozbiega się (rys. 2c), zgodnie z przewidywaniami, przy krótkim czasie całkowania.

Błąd statyczny stabilnego układu maleje w miarę zmniejszenia się amplitudy impulsów d, ale jednocześnie wydłuża się czas odnajdywania ekstremum, co stanowi wadę układu. Można – jak się wydaje uzyskać pewną poprawę stosując dodatkowy, sterowany człon nieliniowy w gałęzi sygnału $e(t)$. W pierwszej fazie pracy, dalekiej od punktu $x(t)$ bliskiego optymalnej wartości należało by sterować integrator I_2 sygnałem sgn $[e(t)]$, a począwszy od chwili w której po kolejnym przyroście sygnału sterującego $x(t)$ przyrost $y(t)$ staje się ujemny – wykorzystywać już sygnał $e(t)$. Komplikuje to strukturę układu i tak już dosyć złożoną.



Rys. 2. Wyniki komputerowej symulacji działania układu
Fig. 2. Results of computer simulations of system operation

Jeżeli obiekt posiada ekstremum charakterystyki typu minimum – należy oczywiście zmienić znak przyrostu sygnału $x(t)$ na przeciwny. Dodatkową wadą układu jest konieczność uzależnienia długości czasów T oraz T_1 od dynamiki obiektu.

4. Podsumowanie

Prezentowany układ należy traktować jako jedną z odmian układów regulacji ekstremalnej z sygnałem przeszukującym. Odpowiedni dobór czasów T i T_1 uniezależnia działanie układu od rodzaju dynamiki obiektu i zmian jego parametrów w szerokim zakresie, ale najprawdopodobniej nie nadaje się do stosowania w przypadku transmitancji obiektu posiadającej dodatnie zera. Proste eksperymenty symulowane potwierdzają poprawność jego działania i zgodność zachowania się z przewidywaniami.

5. Literatura

[1] Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN Warszawa 1963.
[2] Krasowski A.A, Pospiełow G.S.: Podstawy automatyki i cybernetyki technicznej. WNT Warszawa 1965.
[3] Gibson John E.: Nieliniowe układy sterowania automatycznego. WNT Warszawa, 1968.
[4] Żuchowski A.: O pewnym układzie regulacji ekstremalnej. PAK, 10/1970.

otrzymano / received: 01.02.2012
przyjęto do druku / accepted: 02.07.2012 *artykuł recenzowany / revised paper*

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo–technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK