

# **XV Krajowa Konferencja Automatyki**

## **Tom I**



**Redaktorzy:  
Zdzisław Bubnicki  
Roman Kulikowski  
Janusz Kacprzyk**

# XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:  
Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK

**ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

**WSPÓŁORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **KOMITET PROGRAMOWY**

Przewodniczący  
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI

## **CZŁONKOWIE**

Stanisław BAŃKA  
Mikołaj BUSŁOWICZ  
Ryszard GESSING  
Jakub GUTENBAUM  
Stanisław KACZANOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Józef KORBICZ  
Krzysztof KOZŁOWSKI  
Krzysztof KUŹMIŃSKI  
Krzysztof MALINOWSKI  
Antoni NIEDERLIŃSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Stanisław SKOCZOWSKI  
Jerzy ŚWIĄTEK  
Ryszard TADEUSIEWICZ  
Krzysztof TCHOŃ  
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO  
Władysław FINDEISEN  
Henryk GÓRECKI  
Jerzy JÓZEFczyk  
Tadeusz KACZOREK  
Jerzy KLAMKA  
Zbigniew KOWALSKI  
Juliusz L. KULIKOWSKI  
Kazimierz MALANOWSKI  
Wojciech MITKOWSKI  
Władysław PEŁCZEWSKI  
Leszek RUTKOWSKI  
Roman SŁOWIŃSKI  
Andrzej ŚWIERNIAK  
Piotr TATJIEWSKI  
Leszek TRYBUS  
Andrzej P. WIERZBICKI

## **KOMITET ORGANIZACYJNY**

Przewodniczący  
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Stanisław KACZANOWSKI  
Tadeusz KACZOREK  
Krzysztof MALINOWSKI  
Roman OSTROWSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Dariusz WAGNER  
Jan STUDZIŃSKI  
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowci

**ISBN 83-89475-00-6**

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk  
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

TEORIA STEROWANIA  
– TEORIA SYSTEMÓW

## UKŁADY STEROWANIA Z NIERÓWNOMIERNYM PRÓBKOWANIEM SYGNAŁÓW

**Krzysztof CZYŻ**

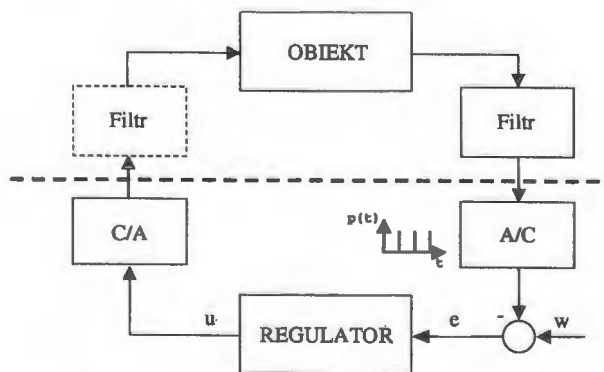
Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: kczyz@ia.polsl.gliwice.pl

**Streszczenie:** W pracy zaproponowano nową klasę algorytmów sterowania wykorzystujących ideę nierównomiernego próbkowania sygnałów. Algorytmy te cechuje znaczne zmniejszenie opóźnienia w torze sterowania, dzięki eliminacji z układu sterowania dodatkowej dynamiki wprowadzanej poprzez analogowe filtry antystroboskopowe i formujące, które to są niezbędne do prawidłowej pracy klasycznego cyfrowego układu sterowania.

**Słowa kluczowe:** Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, projektowanie układów sterowania, nierównomierne próbkowanie sygnałów.

### 1. WPROWADZENIE

Obecnie stosowane układy sterowania są w większości przypadków realizowane jako układy cyfrowe pracujące ze stałym okresem próbkowania [1], [8] (rys. 1). Przetwarzanie sygnałów ze stałym okresem próbkowania niesie za sobą konieczność dołączenia do obiektu dodatkowej dynamiki w postaci analogowych filtrów antystroboskopowych oraz formujących gwarantujących poprawne próbkowanie oraz rekonstrukcję sygnałów [1]. Dodatkowa dynamika w torze sterowania negatywnie wpływa na działanie całego układu sterowania, prowadząc między innymi do zmniejszenia szybkości działania regulatora, a czasem nawet do destabilizacji całego układu sterowania.

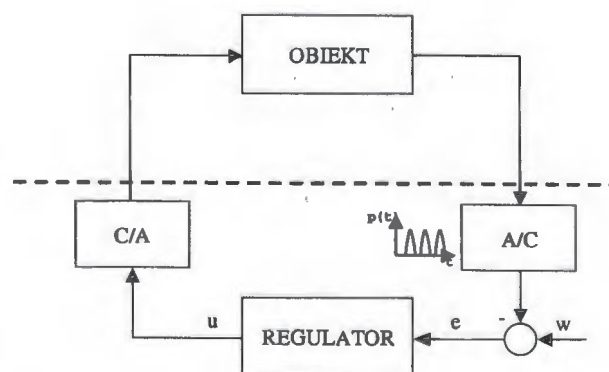


Rys. 1. Schemat blokowy klasycznego układu sterowania.

Z klasycznego układu sterowania wspomniane filtry mogą zostać wyeliminowane (rys. 2) poprzez wprowadzenie nieregularności w procesie próbkowania sygnałów [2]. Jeśli nieregularności zostaną wprowadzone w odpowiedni sposób - każda ze zmierzonych próbek opatrzona zostanie poza wartością również dokładnym pomiarem chwili, w której została pobrana możliwe jest całkowite usunięcie zjawiska stroboskopowego w jego klasycznym rozumieniu. Ten sposób próbkowania sygnałów w dalszej części będzie rozpatrywany jako próbkowanie nierównomierne.

W pracy zaproponowano nową klasę algorytmów sterowania wykorzystujących ideę nierównomiernego próbkowania sygnałów. Algorytmy te cechuje znaczne zmniejszenie opóźnienia czasowego w torze sterowania, dzięki eliminacji z układu sterowania dodatkowej dynamiki wprowadzanej poprzez analogowe filtry antystroboskopowe, które to są niezbędne do prawidłowej pracy klasycznego cyfrowego układu sterowania.

Niniejszy artykuł jest zorganizowany następująco. W punkcie (2) omówiono nierównomierne próbkowanie sygnałów. Punkt (3) prezentuje układy sterowania, w których zastosowano klasyczne oraz nierównomierne próbkowanie.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania z nierównomiernym próbkowaniem.

## 2. NIERÓWNOMIERNE PRÓBKOWANIE SYGNAŁÓW

Przetwarzanie sygnałów ze stałym okresem próbkowania niesie za sobą konieczność dołączenia do obiektu dodatkowych analogowych filtrów. Zapewniają one poprawne próbkowanie sygnałów oraz rekonstrukcję sygnału sterującego.

Zastosowanie, w odpowiedni sposób, nierównomierności w procesie próbkowania sygnałów pozwala na pozyskanie znacznie większej ilości informacji o mierzonym sygnale, między innymi pomiar składowych sinusoidalnych występujących w rzeczywistym sygnale, których częstotliwości są o wiele wyższe niż połowa średniej częstotliwości próbkowania [2]. Przetwarzanie zbioru próbek i przyporządkowanym im chwil, w których zostały one zmierzone na model lub sygnał sterujący nie jest zadaniem prostym.

Problem ten może zostać rozwiązany poprzez przekształcenie sygnałów dyskretnych w czasie otrzymanych w wyniku nierównomiernego próbkowania do odpowiadających im sygnałów, które otrzymanoby w wyniku ich próbkowania ze stałym okresem. Rozwiązanie takie pozwala dalej stosować klasyczne metody w dalszych etapach przetwarzania sygnału oraz daje możliwość całkowitej eliminacji konieczności dołączenia do obiektu dodatkowych analogowych filtrów antystroboskopowych.

Należy zwrócić szczególną uwagę na to, by przekształcenie sygnału do sygnału próbkowanego ze stałym okresem gwarantowało w dalszym ciągu eliminację zjawiska stroboskopowego. Pociąga to za sobą konieczność ograniczenia pasma nierównomiernie próbkowanego sygnału do częstotliwości Nyquista dla odpowiadającego mu sygnału próbkowanego ze stałym okresem, czyli de facto konieczna jest filtracja dolnoprzepustowa sygnału. W literaturze można znaleźć prace na ten temat [3], [7]. Realizacja filtracji dolnoprzepustowej działającej bezpośrednio na ciągu nierównomiernych próbek jest trudna do zrealizowania, dlatego zwykle filtracje dolnoprzepustową zastępuje się operacją o zbliżonych właściwościach.

Jedną z operacji o bardzo zbliżonych własnościach do filtracji dolnoprzepustowej jest aproksymacja nierównomiernie próbkowanego sygnału wielomianem możliwie niskiego rzędu. Wyznaczone równanie wielomianu aproksymującego pozwala na wyznaczenie wartości kolejnych próbek odpowiadających próbkom otrzymanym w wyniku równomiernego próbkowania sygnałów [7].

Niech  $x(t_i)$  będzie sygnałem powstałym w wyniku nierównomiernego próbkowania sygnału ciągłego,  $t_i$  oznacza nierównomiernie rozłożone chwile, w których sygnał był próbowany.

$$x(t_i) = f(t_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Dowolnie długa sekwencja sygnału  $x(t_i)$  może zostać zamodelowana w oparciu o wielomian aproksymujący  $p(t_i)$  rzędu L:

$$p(t_i) = \sum_{k=0}^L c_k t_i^k \quad (2)$$

przy czym wówczas sygnał jest modelowany z pewnym błędem aproksymacji  $e(t_i)$ :

$$x(t_i) = p(t_i) + e(t_i) \quad (3)$$

Właściwy dobór długości sekwencji oraz rzędu wielomianu  $p(t_i)$  pozwala na modelowanie poprzez wielomian aproksymacyjny  $p(t_i)$  tylko niskoczęstotliwościowych składowych sygnału  $x(t_i)$ .

W praktyce współczynniki wielomianu aproksymującego mogą być wyznaczone na bieżąco wewnątrz przesuwającego okna czasowego  $t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+N}$  o długości  $N+1$  w oparciu o rekurencyjną metodę najmniejszych kwadratów minimalizującą następujący wskaźnik jakości:

$$J = \sum_{i=0}^N [x(t_i) - p(t_i)]^2 \quad (4)$$

Zaproponowany algorytm eliminuje konieczność stosowania analogowych filtrów analogowych – są one zastąpione przez cyfrowy algorytm o właściwościach zbliżonych do filtracji dolnoprzepustowej. Należy jednak podkreślić, że zaproponowany algorytm nie zapewnia idealnego odtworzenia pierwotnego ciągłego sygnału, jednak przy odpowiedniej parametryzacji błędy odwzorowania utrzymywane są na odpowiednio niskim poziomie.

## 3. ALGORYTMY STEROWANIA Z NIERÓWNOMIERNYM PRÓBKOWANIEM SYGNAŁÓW

W proponowanej klasie algorytmów sterowania cyfrowa część układu sterowania pracuje nadal ze stałym okresem próbkowania, sygnały dyskretne w czasie otrzymane w wyniku nierównomiernego próbkowania są przekształcane do odpowiadających im sygnałów, które otrzymanoby w wyniku ich próbkowania ze stałym okresem.

Właściwości zaproponowanej klasy algorytmów sterowania zostały zweryfikowane dla dwóch najpopularniejszych struktur sterowania: ze sprzężeniem w przód oraz ze sprzężeniem zwrotnym.

Układ sterowania ze sprzężeniem zwrotnym wykorzystano do sterowania nieliniowym obiektem o odpowiedni skokowej jak na rys. 3. Obiekt zamknięto kolejno dwoma regulatorami GPC [8] z klasycznym próbkowaniem sygnałów oraz z nierównomiernym próbkowaniem

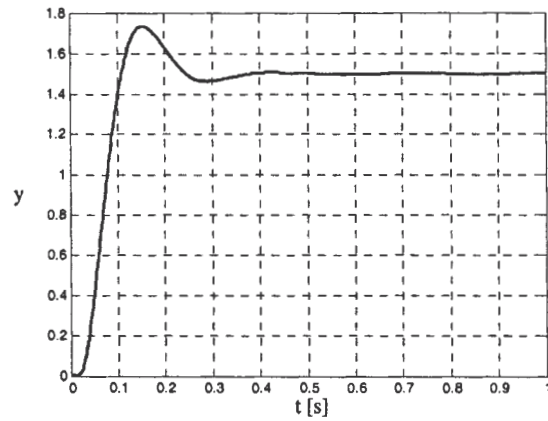
sygnałów. Parametry regulatorów zostały dobrane doświadczalnie, a następnie poddane procesowi optymalizacji w oparciu o Nonlinear Control Design (NCD) Blockset pakietu Matlab [9].

Własności układu zamkniętego były optymalizowane pod kątem spełnienia ograniczeń na czas narastania odpowiedzi skokowej jak i na wielkość oscylacji (ograniczenia te zaznaczono na rys. 4 jako pogrubione linie). Optymalizacja parametrów klasycznego regulatora pracującego z filtrem antystroboskopowym czwartego rzędu (zrezygnowano z zastosowania filtra rekonstruującego ze względu na dolnoprzepustowy charakter dynamiki obiektu) zakończyła się niepowodzeniem. Na rys. 4 linią ciągłą zaznaczono odpowiedź układu zamkniętego klasycznym regulatorem, pomimo tego że proces projektowania regulatora zakończył się nie udało się spełnić części ograniczeń na odpowiedź skokową. Linią przerywaną zaznaczono odpowiedź regulatora opartego na algorytmie z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów, regulator ten spełnił wszystkie ze stawianych mu ograniczeń projektowych, dzięki eliminacji z układu dynamiki analogowych filtrów antystroboskopowych.

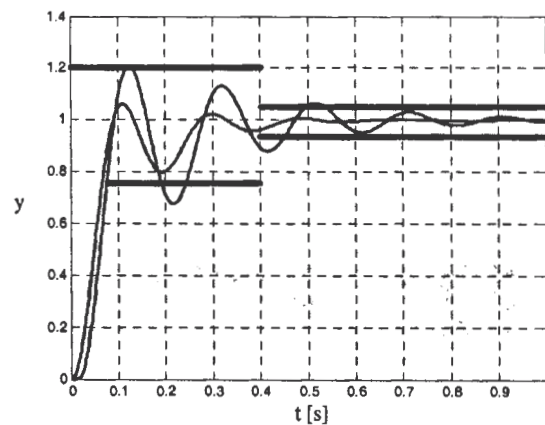
Struktura układu sterowania ze sprzężeniem w przód najczęściej stosowana jest w zagadnieniach związanych z filtracją adaptacyjną. Filtry te znajdują zastosowanie między innymi w układach sterowania związanych z transmisją danych, eliminacją echa oraz aktywnym tłumieniem hałasu (ATH) [4], [5], [6].

Celem działania układów ATH jest eliminacja sygnału błędu wokół wybranych mikrofonów na podstawie sygnału odniesienia, niosącego informację o hałasie (zakłóceniu). Powstałe wokół mikrofonów strefy, w których nastąpiło tłumienie hałasu noszą nazwę stref ciszy. Analogowe filtry antystroboskopowe, których stosowanie jest obecnie konieczne w układach ATH negatywnie wpływają na działanie układu, prowadząc między innymi do zmniejszenia szybkości zbieżności algorytmu sterowania oraz ograniczenia wartości osiąganego tłumienia hałasu. Dodatkowo zwiększają one również stopień komplikacji oraz koszt układów ATH.

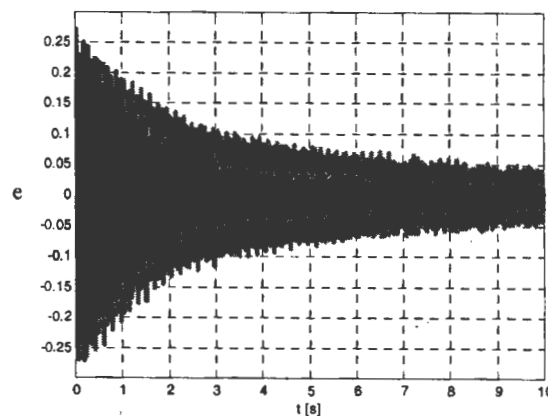
Przebiegi sygnału błędu podczas tłumienia poprzez układ ATH zakłócenia składającego się z sumy czterech sygnałów sinusoidalnych prezentuje rys. 5. Kolorem szarym wykreślono przebieg sygnału błędu zarejestrowanego dla klasycznego układu ATH, kolorem czarnym wykreślono odpowiedni przebieg dla układu z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów. Warto podkreślić, że klasyczny układ sterowania pracował z filtrami antystroboskopowymi ósmego rzędu, które wpłynęły znacząco na zmniejszenie zbieżności algorytmu. Usunięcie filtrów analogowych z klasycznego układu sterowania spowodowało jego destabilizację, natomiast układ z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów pracował poprawnie bez filtrów analogowych. Na rys. 6 przedstawiono osiągnięte tłumienie zakłócenia wokół mikrofonu błędu podczas pracy układu ATH.



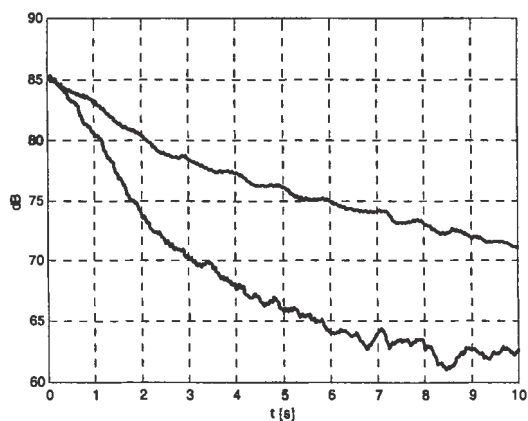
Rys. 3. Odpowiedź obiektu na skok jednostkowy.



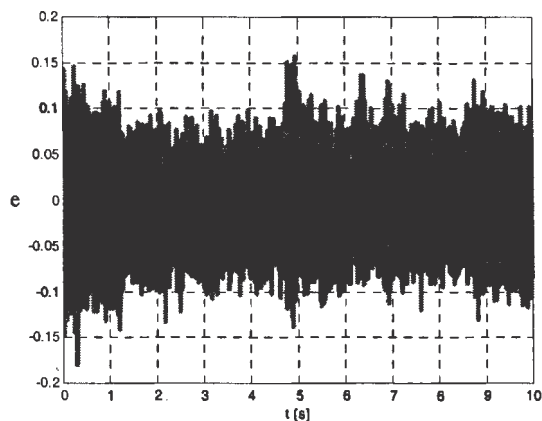
Rys. 4. Odpowiedź skokowa układu zamkniętego regulatorem GPC a) układ klasyczny (linia ciągła); b) układ z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów (linia przerywana).



Rys. 5. Przebieg sygnału błędu podczas pracy układu aktywnego tłumienia hałasu dla zakłócenia periodycznego: a) układ klasyczny (kolor szary); b) układ z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów (kolor czarny).



Rys. 6. Tłumienie zakłócenia wokół mikrofonu błędu - układ aktywnego tłumienia: hałasu; a) układ klasyczny (linia ciągła); b) układ z nierównomiernym próbkowaniem (linia przerywana).



Rys. 7. Przebieg sygnału błędu podczas pracy układu aktywnego tłumienia hałasu dla zakłócenia losowego: a) układ klasyczny (kolor szary); b) układ z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów (kolor czarny).

Zadawalające przebiegi uzyskano również dla zakłóceń losowych (rys. 7). Dla tego typu zakłóceń układ sterowania z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów nie tylko zapewnia szybszą zbieżność ale również lepsze tłumienie hałasu dzięki zmniejszeniu opóźnienia występującego w torze sterowania.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano nową klasę algorytmów sterowania z nierównomiernym próbkowaniem sygnałów. Zaproponowane podejście do próbkowania sygnałów pozwala na znaczne uproszczenie układu sterowania poprzez usunięcie z niego analogowych filtrów antystroboskopowych wysokiego rzędu

Prezentowane idee zweryfikowano zarówno dla algorytmów ze sprzężeniem w przód jak i sprzężeniem zwrotnym w doświadczeniach symulacyjnych oraz laboratoryjnych. Przeprowadzone doświadczenia poka-

zały, że zastosowanie nierównomiernego próbkowania sygnałów pozwala na realizację bardziej odpornych i zarazem szybszych układów sterowania niż w klasycznym podejściu bazującym na próbkowaniu sygnałów ze stałym okresem.

#### NONUNIFORMLY SAMPLED CONTROL SYSTEMS

**Abstract:** The paper presents a new class of control algorithms based on processing nonuniformly sampled signals. The proposed class of algorithms transforms nonuniformly sampled signals to the corresponding uniformly sampled signals which are used to drive classical control algorithms. The proposed approach significantly reduces time-delay in the signal processing loop by analog antialiasing filters elimination. Properties of the proposed algorithm are illustrated by the results of simulation and laboratory experiments.

#### Literatura

- [1] Astrom K. J., Wittenmark B. (1990) *Computer Controlled Systems*. Prentice Hall.
- [2] Bilinskis I., Mednieks I. (2001) *Introduction to Digital Alias-free Signal Processing*. Institute of Electronics and Computer Science, Riga.
- [3] Czyż K. (2004) *Nonuniformly sampled Active Noise Control system*, Preprints of IFAC Workshop on Programmable Devices and Systems PDS'04, Kraków, 351-355.
- [4] Elliott S.J (1999) *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, London.
- [5] Hansen C.H., Snyder S.D. (1997) *Active Control of Noise and Vibration*. Cambridge University Press.
- [6] Jonhson Jr C. R. (1998). *Lectures on Adaptive Parameter Estimation*. Prentice Hall.
- [7] Laakso T.I., Tarczyński A., Murphy N.P., Välimäki V. (2000) *Polynomial Filtering Approach to Reconstruction and Noise Reduction of Nonuniformly Sampled Signals*. Signal Processing, 80 567-575.
- [8] Niederliński A., Mościński A., Ogonowski Z. (1995) *Regulacja adaptacyjna*. PWN. Warszawa.
- [9] *Nonlinear Control Design Blockset User's Guide*. The MathWorks, Inc.





**Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk**

**ISBN 83-89475-02-2**