

Robert DĄBROWSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Informatyki i Elektroniki

## Właściwości dynamiczne komputerowego systemu odtwarzania napięć i prądów

Mgr inż. Robert DĄBROWSKI

Urodzony w 1972r. Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w 1997r. Od 1997 asystent w Instytucie Informatyki i Elektroniki Uniwersytetu Zielonogórskiego. Jego zainteresowania związane są z automatyzacją systemów pomiarowych oraz obiektowymi technikami programowania.



e-mail: R.Dabrowski@iie.uz.zgora.pl

### Streszczenie

Artykuł przedstawia zagadnienia budowy komputerowego systemu odtwarzania wzorcowych wartości napięć i prądów opartego o ekonomiczny kalibrator średnich klas dokładności i miernik kontrolny wysokich klas dokładności. Głównym tematem jest analiza parametrów dynamicznych systemu. Autor podejmuje próbę określenia optymalnych wartości parametrów pracy programu sterującego działaniem systemu. Przedstawia metodologię badań symulacyjnych czasu odpowiedzi i przeregulowania na wyjściu systemu w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego. Na podstawie wyników tych badań przedstawia receptę w postaci wzoru na uzyskanie przez system optymalnych dynamicznie warunków pracy.

**Słowa kluczowe:** właściwości dynamiczne, kalibrator, czas odpowiedzi, przeregulowanie.

### Dynamic properties of computer controlled system for generating voltage and current

#### Abstract

Article presents some problems of computer controlled calibration system for generating voltage and current. The low cost close loop system includes medium accuracy calibrator and high accuracy control meter. Main topic of this article is consideration of dynamics optimization possibilities, especially how dynamic performance of mentioned system can be improved by applying optimal parameters of control algorithm. Article describes simulation experiments which provides to formalized conclusion how to match parameters to get optimal system performance.

**Keywords:** dynamic performance, calibrator, response time, overshoot.

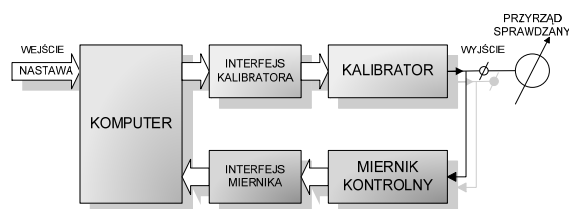
### 1. Wstęp

Znane rozwiązania systemów odtwarzania napięć i prądów, stosowanych w procesach wzorcowania, sprawdzania lub adjustacji przyrządów pomiarowych, oparte są głównie na metodzie kalibratora kontrolnego [1], która jest wydajna i łatwa do automatyzacji, jednak kosztowna z uwagi na wysokie ceny kalibratorów wysokich klas dokładności. Alternatywne tańsze rozwiązanie stanowią systemy oparte na metodzie miernika kontrolnego [2], są one jednak dużo mniej wydajne z uwagi na ręczną obsługę i dłuższe czasy ustalania w stosunku do systemów z kalibratorem kontrolnym.

Założeniem pracy było opracowanie systemu odtwarzania napięć i prądów eliminującego wady systemów przedstawionych powyżej. Autor proponuje budowę komputerowego systemu (rys. 1) opartego na metodzie miernika kontrolnego [3].

System ten składa się z ekonomicznego kalibratora średnich klas dokładności, interfejsu komunikacyjnego kalibratora, miernika kontrolnego wysokich klas dokładności, interfejsu miernika oraz komputera. Kalibrator pełni funkcję programowalnego precyzyjnego źródła napięć i prądów, miernik kontrolny przejmuje funkcje wzorca a komputer pełni rolę sterownika systemu. Na

wejście systemu podawana jest nastawa kalibratora  $N_K$ , na wyjściu otrzymywana jest wielkość fizyczna odpowiadająca nastawie oznaczona jako wskazanie kalibratora  $W_K$ . Do wyjścia systemu podłączany jest przyrząd sprawdzany.



Rys. 1. System pomiarowy z miernikiem kontrolnym

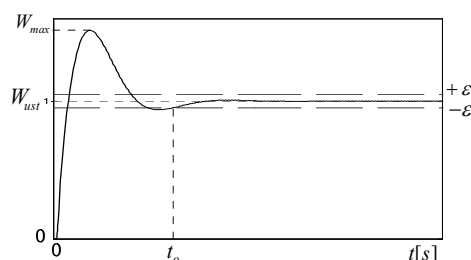
Fig. 1. Measurement system with control meter

System przedstawiony na rys. 1 należy do grupy systemów z addytywną korekcją błędów i astatyczną charakterystyką regulacji, o czym stanowi algorytm pracy programu komputerowego.

Analiza właściwości statycznych [3] wykazała, że przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów pracy, można uzyskać parametry dokładnościowe systemu zbliżone do parametrów zastosowanego w nim multimetru kontrolnego. Problemem pozostaje natomiast uzyskanie zadawalających parametrów dynamicznych.

### 2. Metoda badań właściwości dynamicznych

Podstawowymi parametrami dynamicznymi badanego systemu są czas odpowiedzi  $t_o$  i przeregulowanie  $p$ . Parametry te ilustruje rys. 2, przedstawiający przykładowy proces przejściowy na wyjściu systemu w odpowiedzi na skokową zmianę nastawy w chwili  $t=0$ .



Rys. 2. Parametry procesu przejściowego

Fig. 2. Transient process parameters

Czas odpowiedzi definiowany jest jako czas od momentu wystąpienia sygnału wymuszającego na wejściu systemu do osiągnięcia przez wskazanie systemu wartości odbiegającej od wartości ustalonej o nie więcej niż zadany uchyb regulacji  $\varepsilon$ .

$$t_o = \max\{t : t \in (0, +\infty) \wedge |W - W_{ust}| \geq \varepsilon\} \quad (1)$$

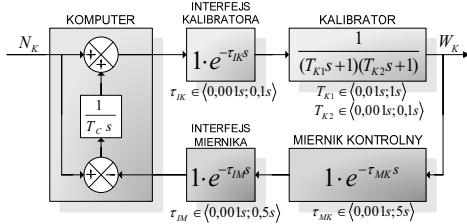
Przeregulowanie określono w postaci procentowej miary różnicy między największą (lub najmniejszą) wartością wielkości wyjściowej w czasie procesu przejściowego a ustaloną wartością wielkości wyjściowej.

$$p = \left( \frac{W_{max}}{W_{ust}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

Dla potrzeb analizy parametrów dynamicznych sporządzony został model systemu odtwarzania napięć i prądów przedstawiony na rys. 3. Zawiera on bloki opisujące przetwarzanie sygnału

w dziedzinie czasu [4]. Poniżej bloków podano zakresy parametrów czasowych fizycznych urządzeń.

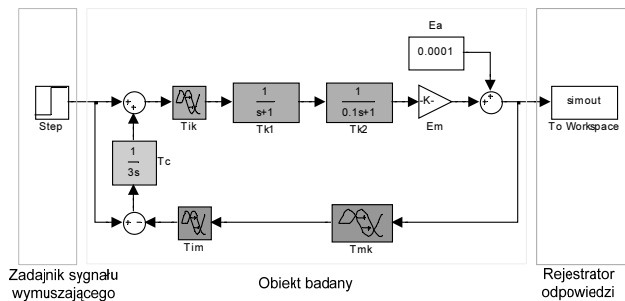
Badania miały na celu określenie zależności parametrów dynamicznych systemu od parametrów poszczególnych jego elementów i opracowanie kryteriów doboru optymalnych parametrów dla algorytmu pracy sterownika komputerowego.



Rys. 3. Model systemu dla analizy właściwości dynamicznych  
Fig. 3. System model for dynamic parameters analysis

Badania symulacyjne systemu przeprowadzono przy użyciu programu *MATLAB* [5] firmy *MathWorks, Inc.* z nakładką *Simulink* oraz z zastosowaniem programów napisanych przez autora w środowisku *MATLAB*.

Model symulacyjny przedstawiony na rys. 4, składa się z zadajnika sygnału wymuszającego, obiektu badanego i rejestratora odpowiedzi.



Rys. 4. Model symulacyjny systemu  
Fig. 4. System simulation model

Przy czym badany obiekt odzwierciedla strukturę opisywanego systemu a w jego skład wchodzi:

- dwa sumatory i blok całkujący  $T_c$ , reprezentujące algorytm pracy aplikacji komputerowej,
- blok opóźniający  $T_{ik}$  reprezentujący opóźnienie wnoszone przez transmisję kodu nastawy do kalibratora ( $\tau_{ik}$ ),
- bloki  $T_{k1}$  i  $T_{k2}$  reprezentujące właściwości dynamiczne kalibratora ( $T_{k1}$  i  $T_{k2}$ ),
- blok opóźniający  $T_{mk}$  reprezentujący czas pomiaru miernika kontrolnego ( $\tau_{mk}$ ),
- blok opóźniający  $T_{im}$  reprezentujący opóźnienie wnoszone przez transmisję wyniku pomiaru do komputera ( $\tau_{im}$ ),
- blok wzmacnienia  $E_m$  reprezentujący składową multiplikatywną błęd kalibratora ( $\delta_K$ ),
- blok stałej  $E_a$  i sumator reprezentujące składową addytywną błęd kalibratora ( $\Delta_K$ ).

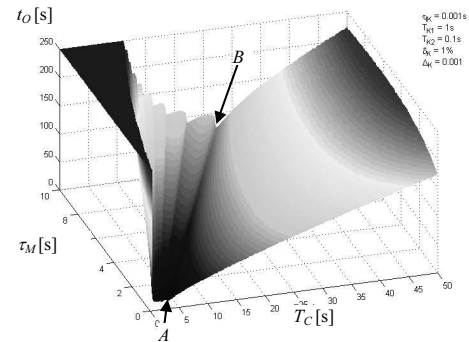
W celu zmniejszenia liczby kombinacji parametrów mających wpływ na właściwości systemu, określono nowy parametr  $\tau_M$  (czas pomiaru) jako sumę opóźnienia miernika i opóźnienia interfejsu miernika ( $\tau_M = \tau_{MK} + \tau_{IM}$ ). Wykorzystano również zależność  $T_{K2} = 0,1 \cdot T_{K1}$  [6] wynikającą z fizycznej budowy kalibratora mówiącą, że druga stała czasowa bloku inercyjnego kalibratora jest o rząd mniejsza od pierwszej.

Badania symulacyjne przeprowadzono obrazując zależności czasu odpowiedzi i przeregulowania od czasu pomiaru  $\tau_M$  i stałej czasowej regulatora całkującego  $T_C$ , przy ustalonych pozostałych parametrach systemu. Badania powtarzano dla kombinacji szeregu

reprezentatywnych wartości tych parametrów w rzeczywistych zakresach fizycznie występujących urządzeń składowych systemu.

### 3. Wyniki badań

Rys. 5 przedstawia wyniki badań czasu odpowiedzi systemu na skok jednostkowy dla jednego przykładowego zestawu parametrów. Na osiach poziomych opisano wartości czasu pomiaru miernika kontrolnego  $\tau_M$  oraz stałej czasowej regulatora całkującego  $T_C$ . Na osi pionowej opisano wartości czasu odpowiedzi  $t_o$ .



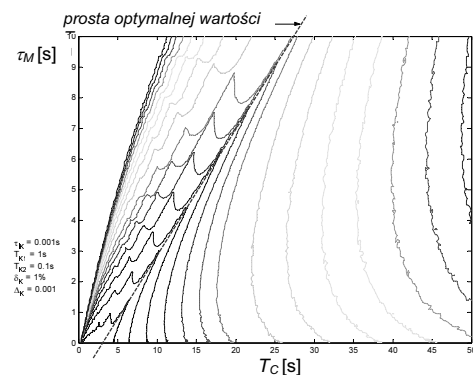
Rys. 5. Wyniki badań symulacyjnych  $t_o = f(\tau_M, T_C)$   
Fig. 5. Results of simulations  $t_o = f(\tau_M, T_C)$

Minimalne czasy odpowiedzi układają się wzdłuż odcinka łączącego punkty oznaczone na wykresie jako A i B. Wartości tych czasów określono względem czasu pomiaru  $\tau_M$  równaniem *prostej minimalnego czasu odpowiedzi* w postaci:

$$t_{O(MIN)} = 6,17 \cdot \tau_M + 12,17 \quad (3)$$

dla:  $\tau_{ik} = 0,001$  s,  $T_{K1} = 1$  s,  $T_{K2} = 0,1$  s,  $\delta_K = 1\%$ ,  $\Delta_K = 0,001$

Rys. 6 Przedstawia rzut poziom wartości czasu odpowiedzi na płaszczyznę ( $\tau_M, T_C$ ).



Rys. 6. Prosta optymalnej wartości  $T_C$   
Fig. 6. Line of optimal  $T_C$  values

Minimalne czasy odpowiedzi występują dla optymalnych wartości stałych czasowych  $T_C$ , w związku z tym określono zależność doboru optymalnych wartości  $T_C$  od czasu pomiaru miernika w postaci równania *prostej optymalnej wartości  $T_C$* :

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 3,05 \quad (4)$$

dla:  $\tau_{ik} = 0,001$  s,  $T_{K1} = 1$  s,  $T_{K2} = 0,1$  s,  $\delta_K = 1\%$ ,  $\Delta_K = 0,001$

Operacje wyznaczania równań *prostej minimalnego czasu odpowiedzi* oraz *prostej optymalnej wartości  $T_C$*  powtórzono dla kolejnych zestawów parametrów systemu. Tabela 1 przedstawia zestaw współczynników równań *prostej optymalnej wartości  $T_C$*  dla uszeregowanych wartości parametrów:  $\tau_{ik}$  (opóźnienie inter-

fejsu kalibratora) oraz  $T_{KI}$  (pierwsza stała czasowa członu inercyjnego kalibratora). Tabela 1 nie uwzględnia zmian parametrów  $\delta_K$  i  $\Delta_K$  ponieważ w toku badań nie stwierdzono wpływu składowych błędów kalibratora na dobór optymalnych wartości stałej czasowej  $T_C$ .

Tab. 1. Współczynniki równań optymalnej wartości  $T_C$   
Tab. 1. Coefficients of  $T_C$  optimal value equations

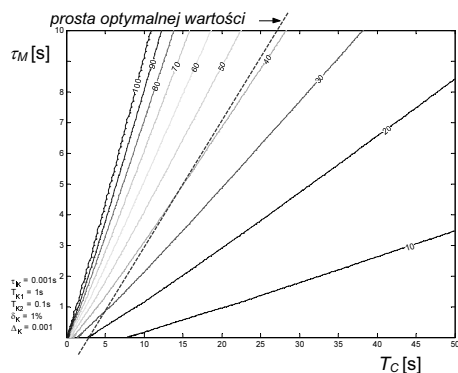
| $T_{KI} [s]$ | $\tau_K [s]$         |                      |                      |                      |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|              | 0,001                | 0,01                 | 0,1                  | 1                    |
| 0,01         | $2,42 \tau_M + 0,03$ | $2,42 \tau_M + 0,05$ | $2,42 \tau_M + 0,27$ | $2,42 \tau_M + 2,40$ |
| 0,05         | $2,42 \tau_M + 0,15$ | $2,42 \tau_M + 0,18$ | $2,42 \tau_M + 0,39$ | $2,42 \tau_M + 2,52$ |
| 0,1          | $2,42 \tau_M + 0,31$ | $2,42 \tau_M + 0,33$ | $2,42 \tau_M + 0,54$ | $2,42 \tau_M + 2,68$ |
| 0,5          | $2,42 \tau_M + 1,53$ | $2,42 \tau_M + 1,55$ | $2,42 \tau_M + 1,76$ | $2,42 \tau_M + 3,90$ |
| 1            | $2,42 \tau_M + 3,05$ | $2,42 \tau_M + 3,07$ | $2,42 \tau_M + 3,29$ | $2,42 \tau_M + 5,42$ |

Na podstawie powyższych wyników wyprowadzono ogólny wzór empiryczny (5) uzależniający wartość optymalnej stałej czasowej regulatora całkującego od fizycznych właściwości dynamicznych elementów systemu:

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 3,05 \cdot T_{KI} + 2,37 \cdot \tau_{IK} \quad (5)$$

Zastosowanie wartości stałej czasowej  $T_C$  obliczonej ze wzoru (5) pozwala na osiągnięcie przez system minimalnego czasu odpowiedzi.

Rys. 7 przedstawia rzut poziomicy wartości przeregulowania  $p$  na płaszczyznę  $(\tau_M, T_C)$  dla przykładu podanego na rys 5 i 6. Wartości przeregulowania zwiększa się wraz ze wzrostem czasu pomiaru miernika kontrolnego  $\tau_M$ , natomiast zmniejsza się wraz ze wzrostem stałej czasowej regulatora całkującego  $T_C$ . Obszar w lewej części rysunku obejmujący wartości przeregulowania większe od 100% odpowiada obszarom pracy systemu w warunkach wzbudzenia lub na granicy stabilności.



Rys. 7. Przeregulowanie  $p = f(\tau_M, T_C)$

Fig. 7. Overshot  $p = f(\tau_M, T_C)$

Na powyższym rysunku przerywaną linią oznaczono przedstawioną wcześniej prostą optymalnej wartości  $T_C$ . Dla wartości  $T_C$  należących do tej prostej wartość przeregulowania jest nie większa od 42% zmniejsza się dla krótszych czasów pomiaru miernika.

## 4. Podsumowanie

Dla dowolnego zestawu parametrów czasowych kalibratora, miernika kontrolnego, oraz ich interfejsów można dobrać stałą czasową regulatora całkującego tak, aby osiągnąć minimalny (dla tych parametrów) czas odpowiedzi systemu.

Dla dowolnego zestawu parametrów systemu zachodzi liniowa zależność doboru optymalnej wartości stałej czasowej  $T_C$  regulatora całkującego od czasu pomiaru  $\tau_M$  miernika kontrolnego. Porównując zmiany tej zależności w odniesieniu do zmian wartości kolejnych parametrów systemu wyznaczono szereg równań określających zależności doboru optymalnej dla tych parametrów

wartości stałej czasowej regulatora całkującego  $T_C$ , której odpowiada minimalny czas  $t_o$  odpowiedzi systemu. Na podstawie tych równań zaproponowano równanie (5) uzależniające dobór optymalnej wartości stałej czasowej  $T_C$  od wartości wszystkich uwzględnionych w badaniach parametrów zamodelowanego systemu odtwarzania napięć i prądów.

Analiza wyników badań wykazała, że zmiany wartości składowych błędów kalibratora nie mają wpływu na dobór optymalnych wartości  $T_C$ , ale mają wpływ na czas odpowiedzi systemu.

Na uwagę zasługuje również fakt, iż minimalny czas odpowiedzi systemu jest czuły na niedokładność doboru optymalnej stałej czasowej  $T_C$  z uwagi na stromość wykresów czasu odpowiedzi w pobliżu *prostej optymalnych wartości  $T_C$* .

Wyniki badań właściwości dynamicznych przedstawionego wyższego systemu automatycznej regulacji porównano z wynikami badań systemu otwartego składającego się z interfejsu kalibratora i kalibratora kontrolnego. W wyniku porównania stwierdzono, że dzięki zastosowaniu równania (5) do wyznaczenia optymalnej wartości stałej czasowej regulatora całkującego  $T_C$ , możliwe jest w systemie z miernikiem kontrolnym osiągnięcie czasu odpowiedzi o wartości nieprzekraczającej dwukrotnego czasu odpowiedzi systemu z kalibratorem kontrolnym (przy złożeniu identycznych właściwości dynamicznych kalibratorów w obu systemach). Dla przykładu: dla  $T_{KI}=1$  s i  $\tau_{IK}=0,01$  s w systemie otwartym z kalibratorem kontrolnym czas odpowiedzi systemu  $t_o=7,13$  s, w systemie zamkniętym minimalny czas odpowiedzi systemu  $t_{o(MIN)}=12,9$  s - przy zastosowaniu szybkiego miernika kontrolnego ( $\tau_{MK}=0,1$  s) i szybkiego interfejsu miernika ( $\tau_{IM}=0,02$  s).

Wartości przeregulowania  $p$  uzależnione są od szybkości miernika kontrolnego i jego interfejsu oraz od stałych czasowych kalibratora. Dla optymalnie dobranych wartości stałej czasowej regulatora całkującego,  $p$  przyjmuje wartości nie większe od 43%, i maleje wraz ze wzrostem współczynnika  $T_{KI}/\tau_M$ . Zależność ta jest bardziej widoczna przy dużych wartościach tego ilorazu. Zmniejszenie wartości przeregulowania można uzyskać stosując szybszy miernik kontrolny. Innym sposobem na osiągnięcie mniejszych wartości przeregulowania jest dobór większej od optymalnej wartości stałej czasowej regulatora całkującego, co jednak skutkuje niepożądanym wydłużeniem czasu odpowiedzi systemu.

W ramach rozprawy doktorskiej autor rozważa również możliwości poprawy właściwości dynamicznych omawianego systemu poprzez zastosowanie innych niż skok jednostkowy sygnałów wymuszających.

## 5. Literatura

- [1] Lubimow Ł.I., Forsirowa I.D., Szapiro J.Z.: Powierka sriedstw elektricheskikh izmierenij. Sprawocznaja kniga. Energoatmizdat. Leningrad, 1987.
- [2] Olencki A., Szymtkiewicz J.: Komputerowy system pomiarowy do testowania mierników napięcia i prądu. II Konferencja „Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle”. Materiały konferencyjne. Zielona Góra, 1998, s.107-114.
- [3] Dąbrowski R., Olencki A.: Analiza modelu systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów do sprawdzania mierników. X Sympozium „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”. Krynica Górska, 2000.
- [4] Dąbrowski R.: Analiza właściwości dynamicznych modelu komputerowego systemu odtwarzania napięć i prądów, Materiały konferencyjne, Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, Istabna, 2003.
- [5] Osowski S.: Modelowanie układów dynamicznych z zastosowaniem języka simulink, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
- [6] Szymtkiewicz J.: Analiza możliwości poprawy parametrów metrologicznych uniwersalnego kalibratora napięć i prądów stałych i przemennych. Rozprawa doktorska, Zielona Góra, 2000.