

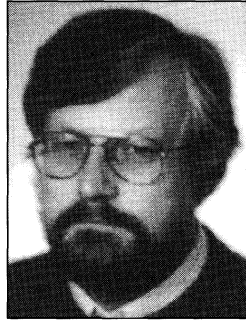
Jerzy NABIELEC, Jacek NALEPA

ZAKŁAD METROLOGII AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ W KRAKOWIE

Korekcja błędu dynamicznego pomiaru metodą „w ciemno” – badania symulacyjne obiektu pierwszego rzędu

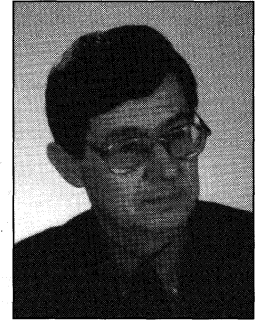
Dr inż. Jerzy NABIELEC

Adiunkt w Zakładzie Metrologii na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie gdzie pracuje od 1986 roku. Główne zainteresowania dotyczą modelowania i badań symulacyjnych systemów i procesów pomiarowych oraz eksperymentalnej weryfikacji wyników symulacji. Zajmuje się ponadto zagadnieniami integracji systemów pomiarowych. Autor ponad 50 publikacji naukowych.



Dr inż. Jacek NALEPA

Adiunkt w Zakładzie Metrologii na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie gdzie pracuje od 1971 roku. Główne zainteresowania dotyczą modelowania i badań symulacyjnych systemów i procesów pomiarowych. Autor ponad 40 publikacji naukowych i 1 skryptu.



Streszczenie

W artykule zaprezentowano wstępne wyniki badań symulacyjnych, których celem było wyznaczenie obszaru stosowalności nowej metody korekcji błędu dynamicznego bez posiadania apriorycznej wiedzy o właściwościach dynamicznych analogowej części toru pomiarowego. Zadanie to może być zrealizowane przy wykorzystaniu systemu pomiarowego zawierającego dwa bliźniacze toru pomiarowe mierzące tę samą wielkość wejściową. Do badań przyjęto model dynamiki torów w postaci obiektu inercyjnego pierwszego rzędu. Badaniom zostały poddane trzy algorytmy numerycznego odtwarzania chwilowej wartości mierzonego sygnału polegające na: minimalizacji wskaźnika jakości, tworzeniu układu równań algebraicznych o najmniejszym wskaźniku uwarunkowania oraz analizie wzajemnych relacji pomiędzy harmonicznymi rejestrowanego sygnału. Wprowadzono wskaźnik określający skuteczność korekcji w odniesieniu do błędu wnoszonego przez tor pomiarowy bez korekcji. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazują, że każdy ze sprawdzanych algorytmów korekcji znacznie zmniejsza błąd dynamiczny pomiaru zmiennych w czasie sygnałów.

Abstract

Paper presents introductory results of simulations, which aimed at marking out an area of application of a selected method of dynamical error correction without prior knowledge of properties of measurement channel. This task can be accomplished using a measurement system having two twin channels which measure the same input value. The research used inertial first order as dynamics model of measurement channel. The research tested three algorithms of numerical reconstruction of instantaneous value of a measured signal, which consisted of: minimalization of quality factor, creation of system algebraic equations with lowest condition number factor, and analysis of relationship between harmonics of registered signal. A factor which determines effectiveness of error correction in relation to measurement channel without correction was introduced. Simulations that were conducted show that each of correction algorithms tested substantially lowers dynamic measurement error of signals varying in time.

1. Wstęp

Prezentowana metoda korekcji dynamicznej pomiaru zakłada równoczesną identyfikację właściwości dynamicznych systemu pomiarowego i korekcję chwilowej wartości błędu dynamicznego powodowanego przez analogową część systemu.

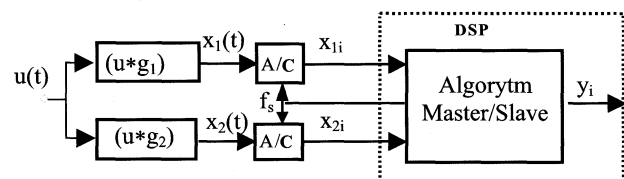
Podstawową zaletą badanej metody jest to, że wzorcowanie toru pomiarowego przeprowadzane jest tylko przy pomocy stałych wymuszeń. Dla sygnałów zmiennych w czasie system pomiarowy sam dokonuje autoidentyfikacji swoich właściwości dynamicznych przy wykorzystaniu tylko mierzonego sygnału.

W odróżnieniu od innych metod korekcji błędu dynamicznego (np. szeregowej lub równoległej) nie ma potrzeby przeprowadzania dokładnej identyfikacji wartości współczynników modelu toru pomiarowego związanych z jego właściwościami dynamicznymi. Wystarczające jest tylko oszacowanie zakresu możliwych zmian wartości tych współczynników.

Ze względu na to, że identyfikacja właściwości dynamicznych toru pomiarowego jest prowadzona na bieżąco, ich zmiany spowodowane wpływem warunków pracy systemu są natychmiast wykrywane i uwzględniane przez procedurę korekcji.

Do przewidywanych obszarów zastosowań można między innymi zaliczyć:

- pomiar zmiennych w czasie temperatur, gdy współczynnik wymiany ciepła pomiędzy badanym medium a czujnikiem temperatury zależy od właściwości fizycznych medium np. gęstości, pojemności cieplnej lub prędkości przepływu,
- pomiar zmiennego w czasie ciśnienia, gdy nie można a priori określić parametrów dynamicznych toru łączącego czujnik z badanym obiektem oraz dynamiki układu złożonego z membrany czujnika i objętości mierzonego płynu,
- pomiar zmiennego w czasie wysokiego napięcia, gdy właściwości dynamiczne dzielnika zależą od nieokreślonych pasożytniczych pojemności,
- pomiar małych szybkozmiennych sygnałów elektrycznych przy zastosowaniu wzmacniacza pomiarowego o dużym wzmocnieniu a przez to niskim paśmie (pomiar prądów niesinusoidalnych przy pomocy bocznika),
- zastąpienie prostym filtrem niskiego rzędu skomplikowanego i wysokiego rzędu filtra antyaliasingowego, wrażliwego na zmiany parametrów jego elementów.



Rys. 1. Podstawowa struktura systemu pomiarowego realizującego korekcję błędów dynamicznych metodą „w ciemno”

Celem prowadzonych badań symulacyjnych jest weryfikacja trzech algorytmów korekcji oraz wyznaczenie obszaru ich stosowalności z uwagi na parametry rzeczywistego systemu pomiarowego oraz kształt mierzonego sygnału.

2. Metoda korekcji

Zadanie postawione przed systemem wydaje się być niewykonalne. Jednak wykorzystanie systemu pomiarowego o strukturze przedstawionej na rysunku 1 umożliwia jego zrealizowanie.

W systemie zastosowano dwa toru pomiarowe mierzące tę samą

wielkość wejściową $u(t)$. Właściwości dynamiczne tych torów są określone przez ich odpowiedzi impulsowe $g_1(t)$ oraz $g_2(t)$ lub przez transmitancje $G_1(s)$ i $G_2(s)$ w dziedzinie zmiennej zespolonej, przy czym założono, że tory pomiarowe są liniowe. Obciążone błędami dynamicznymi sygnały wyjściowe $x_1(t)$ oraz $x_2(t)$ tych torów analogowych zostają przetworzone do postaci cyfrowej x_{1i} oraz x_{2i} w chwilach próbkowania t_i . Odtworzenie chwilowych wartości mierzonej wielkości y_i odpowiednio dla chwil t_i dokonywane jest w czasie rzeczywistym przez procesor sygnałowy realizujący jeden z badanych algorytmów korekcji.

Do uzyskania poprawnego wyniku korekcji niezbędne jest spełnienie dwóch warunków. Pierwszy zakłada, że obydwa tory mają jednakową wartość wzmocnienia k . Warunek ten może być złagodzony, przy zastosowaniu bardziej skomplikowanego algorytmu, do postulatu stanowiącego, że musi być znane wzmocnienie tylko jednego toru. Wzmocnienie drugiego toru system wyznaczy samodzielnie w trakcie realizacji procedury identyfikacji. Jednak ten rozszerzony wariant powoduje większą komplikację obliczeń i wzrost rozmiaru zagadnienia co powoduje zauważalny wzrost błędów numerycznych.

Drugi warunek narzuca, aby właściwości dynamiczne obydwu torów były różne. Oznacza to, że zaden biegun lub zero występujące w transmitancji jednego toru nie może pojawić się w drugim torze.

W ogólniejszym przypadku nie jest wymagane, aby oba tory pomiarowe były tego samego rzędu. Niedotrzymanie tego warunku powoduje, że zadanie korekcji nie posiada jednoznacznego rozwiązania.

Algorytm realizujący korekcję zawiera dwa zadania realizowane hierarchicznie.

Zadanie podrzędne przeprowadza identyfikację współczynników modelu dynamiki torów analogowych. Zadanie nadrzędne przeprowadza korekcję błędów dynamicznych korzystając z wyników pracy zadania podrzędnego. Korekcja nie jest przeprowadzana w czasie rzeczywistym do momentu uzyskania zadowalającego wyniku pracy zadania podrzędnego. Do chwili uzyskania wyniku identyfikacji zbierane próbki rejestrowanych sygnałów mogą być przechowywane w celu skorygowania błędów dynamicznych w trybie postprocesowym. Po uzyskaniu pierwszego zadowalającego wyniku pracy zadania podrzędnego uruchamiane jest zadanie nadrzędne. Jednocześnie w tle nadal pracuje zadanie podrzędne sprawdzające na bieżąco czy właściwości dynamiczne torów analogowych nie zmieniły się. W przypadku wykrycia takiej zmiany wyniki nowej identyfikacji są przekazywane do zadania nadrzędnego. W sytuacji gdy wykryto bardzo dużą i szybką zmianę tych parametrów zadanie nadrzędne jest informowane o rozstrojeniu się systemu i oczekuje na aktualny wynik identyfikacji i ponownie dokonuje tylko rejestracji zebranych sygnałów. System pomiarowy będzie poprawnie pracował w czasie rzeczywistym przy powolnych zmianach właściwości dynamicznych torów analogowych. Natomiast przy szybkich zmianach tych właściwości możliwa jest tylko rejestracja mierzonego sygnału i korekcja błędów dynamicznych po zakończeniu rejestracji.

Zadanie autoidentyfikacji może być realizowane przy wykorzystaniu różnych algorytmów, z których 3 były przedmiotem badań symulacyjnych:

- optymalizujący wskaźnik uwarunkowania,
- wykorzystujący zależności pomiędzy harmonicznymi rejestrowanych sygnałów,
- minimalizujący błąd różnicowy.

Algorytm nadrzędny umożliwia przeprowadzenie korekcji obydwu torów jednocześnie. Do chwilowej wartości zarejestrowanego sygnału dodawana jest poprawka wyznaczana jako iloczyn chwilowej wartości pochodnej rejestrowanego sygnału danego toru oraz parametru korektora określanego na podstawie wyniku identyfikacji.

Wyniki korekcji uzyskane w praktycznej realizacji tego algoryt-

mu zawsze są obciążone błędem. Z tego powodu odtworzona wartość chwilowa mierzonej wielkości dla pierwszego toru y_{1i} będzie się różnić nieznacznie od wyniku korekcji uzyskanego dla drugiego toru y_{2i} dla tej samej chwili czasu t_i . Każda z nich jest tak samo prawdopodobna. Przyjęto zatem, że wynik pomiaru z uwzględnieniem korekcji y_i uzyskany dla całego systemu jest określany jako wartość średnia z rezultatów korekcji obydwu torów dla zadanej chwili czasu.

3. Kryteria oceny korekcji

Błędy dynamiczne systemu pomiarowego z korekcją oraz bez niej oceniano wstępnie przy pomocy standardowych norm $\|e\|_1$, $\|e\|_2$ oraz $\|e\|_\infty$ określanych dla wektora e o współrzędnych równych chwilowym wartościom błędów dynamicznego w momentach próbkowania. Ze względu na to że norma $\|e\|_\infty$ wprowadza bardziej rygorystyczne kryteria oceny niż dwie poprzednie przyjęto ją jako jedynę kryterium oceny w dalszych badaniach symulacyjnych.

Wprowadzono wskaźnik oceniający skuteczność korekcji Q (1) zdefiniowany jako iloraz wartości normy wektora błędów dynamicznego e_m określonej dla szybszego toru pomiarowego bez korekcji do wartości normy wektora błędów dynamicznego (systemu z korekcją). Wskaźnik ten określa ile razy błędy dynamiczne zostaną zmniejszone przy zastosowaniu korekcji.

$$Q = \min_{m=1,2} \frac{\|e_m\|}{\|e\|} \quad : m - \text{indeks toru} \quad (1)$$

gdzie: $e_i = y_i - k_{ui}$ współrzędne wektora e
 $e_{mi} = x_{mi} - k_{ui}$ współrzędne wektora e

4. Wyniki badań symulacyjnych

Przedstawione przykłady ilustrują każdy z 3 wymienionych algorytmów autoidentyfikacji i korekcji dla takiego samego modelu dynamiki toru pomiarowego i dla różnych sygnałów pomiarowych.

4.1 Parametry symulacji

Do badań symulacyjnych przyjęto modele torów analogowych w postaci inercyjnych obiektów pierwszego rzędu (2) o jednostkowych wzmocnieniach $k=1$ i stałych czasowych T_1 oraz T_2 . 12-bitowy przetwornik A/C o zakresie napięć wejściowych ± 5 [V] zamodelowano jako operację kwantowania.

$$G_1(s) = \frac{1}{1+sT_1}, \quad G_2(s) = \frac{1}{1+sT_2} \quad (2)$$

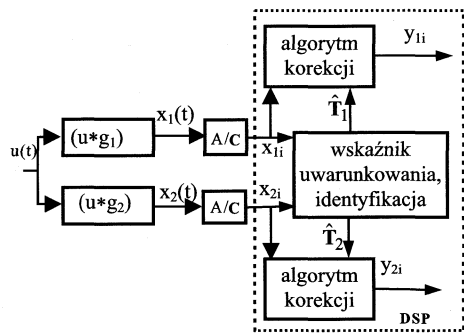
4.2 Algorytm optymalizujący wartość wskaźnika uwarunkowania

Metoda identyfikacji polega na algebraizacji w każdej chwili t_i równań różniczkowych opisujących właściwości dynamiczne torów analogowych [3]. Z nadmiarowego układu równań wybierany jest algebraiczny układ o kwadratowej macierzy A i o wartości wskaźnika uwarunkowania (3) najbardziej zbliżonym do jedności.

$$\text{cond}(A) = \|A\|_\infty \cdot \|A^{-1}\|_\infty \quad (3)$$

Schemat blokowy systemu pomiarowego pracującego według tego algorytmu przedstawiono na rysunku 2.

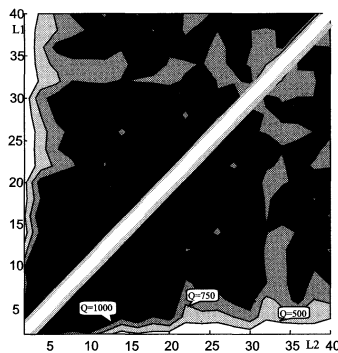
Skuteczność korekcji Q przy stosowaniu tej metody dla skokowego sygnału wejściowego o wartości 5 [V] przedstawiono na rysunku 3. Oznaczenia osi L1 oraz L2 określają stosunki stałych czasowych pierwszego T_1 i drugiego toru T_2 pomiarowego do okresu próbkowania T_s (4). Intensywność zaciemnienia określa wartość



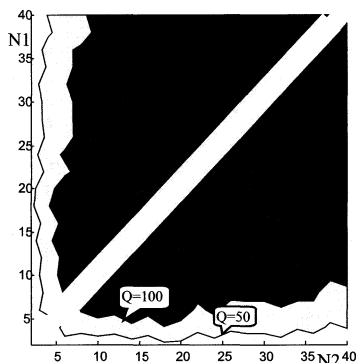
Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego i korektora dla algorytmu optymalizującego wskaźnik uwarunkowania

wskaźnika Q. Granice obszarów ustalono kolejno na 500, 750, 1000. Przy wykorzystaniu prezentowanych rysunków można określić dopuszczalny zakres zmian wartości stałych czasowych T₁ oraz T₂ obu torów dla założonej skuteczności korekcji. Przykładowo, jeżeli założona skuteczność korekcji powinna być nie gorsza niż 1000, to punkt wyznaczony przez te stałe czasowe powinien należeć do obszaru najintensywniejszego zaczerpnienia.

$$L1 = \frac{T_1}{T_s} \quad L2 = \frac{T_2}{T_s} \quad (4)$$



Rys.3. Skuteczność korekcji Q dla skokowego sygnału przy wykorzystaniu algorytmu optymalizującego wskaźnik uwarunkowania



Rys.4. Skuteczność korekcji Q dla sygnału liniowo narastającego przy wykorzystaniu algorytmu optymalizującego wskaźnik uwarunkowania

Rysunek 4 przedstawia wynik korekcji dla sygnału liniowo narastającego.

Przez oznaczenia N1 oraz N2 określono stosunki stałych czasowych torów analogowych do czasu T_{100%} osiągnięcia przez mierzony sygnał wartości U=5 [V] (5). W tym czasie pobieranych było zawsze 41 próbek. Poziomice rozgraniczające obszary wartości wskaźnika Q ustalono na wartościach 50 i 100.

$$N1 = \frac{T_1}{T_{100\%}} \quad N2 = \frac{T_2}{T_{100\%}} \quad u(t) = U \frac{t}{T_{100\%}} \quad (5)$$

Do wyznaczania wartości chwilowej pochodnej rejestrowanego sy-

gnału zastosowano algorytm prezentowany w [3].

Skuteczność korekcji jest mniejsza dla sygnału liniowo narastającego, ponieważ błędy dynamiczne wnoszone przez tory analogowe są znacznie mniejsze. Jednakże ten typ mierzonego sygnału lepiej oddaje rzeczywiste sygnały. Nachylenie sygnału liniowo narastającego może być miarą maksymalnej szybkości zmian sygnału mierzonego. Sygnał liniowo narastający można wykorzystać jako majorantę mierzonego sygnału i dla niej szacować błędy dynamiczne. Pobudzenie systemu sygnałem skokowym (reprezentowany często przez sygnał prostokątny) może być traktowane jako przypadek graniczny sygnału trapezowego.

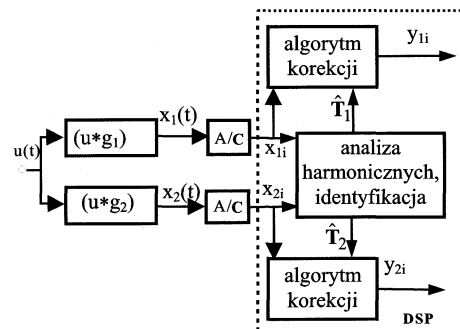
4.3 Algorytm bazujący na relacjach pomiędzy harmonicznymi

Drugi algorytm korekcji przeznaczony jest wyłącznie dla sygnałów okresowych. Polega on na określaniu wzajemnych relacji pomiędzy pierwszymi harmonicznymi sygnałów wyjściowych torów analogowych [2]. Schemat blokowy systemu pracującego według tego algorytmu przedstawiono na rysunku 5 a przykładowe wyniki badań skuteczności korekcji na rysunku 6.

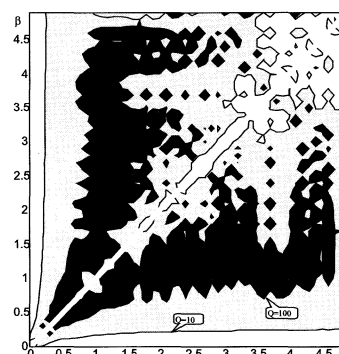
Oznaczenia osi α i β określają stosunki stałych czasowych torów analogowych do okresu mierzonego sygnału Θ . Wartości wskaźnika skuteczności korekcji rozdzielono poziomiami o wartościach 10 i 100. W eksperymencie zastosowano 100-krotnie większą częstotliwość próbkowania f_s od częstotliwości f mierzonego sygnału o amplitudzie $U = 5$ [V] (6).

$$u(t) = U \sin(2\pi ft), \quad f_s = 100 f, \quad \Theta = 1/f, \quad \alpha = T_1/\Theta, \quad \beta = T_2/\Theta \quad (6)$$

Wartość chwilową pierwszej pochodnej uzyskiwano analitycznie na podstawie znajomości spektrum rejestrowanego sygnału. W prowadzonych badaniach do analizy spektralnej sygnału wykorzystywano standardową procedurę FFT (dostępną w MATLABie jako DFT).

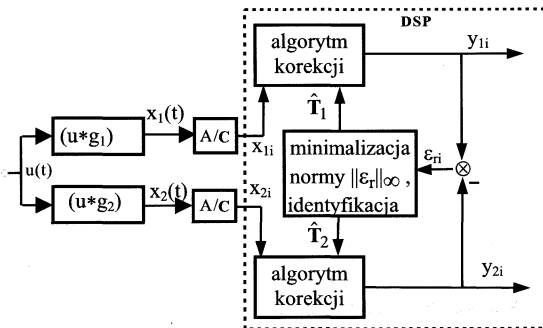


Rys. 5. Schemat blokowy systemu pomiarowego i korektora dla algorytmu analizującego zależności pomiędzy harmonicznymi



Rys. 6. Skuteczność korekcji Q dla sygnału sinusoidalnego przy wykorzystaniu algorytmu analizującego zależności pomiędzy harmonicznymi

Przebadano także przypadek, w którym oprócz podstawowej istnieją wyższe harmoniczne. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych [1] wynika, że skuteczność korekcji zależy przede wszystkim od rozdzielczości stosowanego przetwornika. Zastosowanie przetwornika 16-bitowego znacznie poszerza obszar, dla którego skuteczność korekcji przekracza 100 [1]. Podniesienie częstotliwości próbkowania powoduje mniej istotne powiększenie obszaru dobrej skuteczności korekcji.

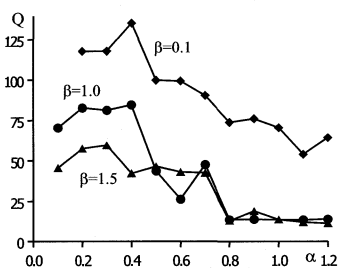


Rys. 7. Schemat blokowy systemu pomiarowego i korektora dla algorytmu minimalizującego błąd różnicowy

4.4 Algorytm bazujący na minimalizacji błędu różnicowego

Trzeci algorytm, którego schemat blokowy prezentuje rysunek 7 polega na minimalizacji wskaźnika jakości, który został określony na wektorze ϵ_r (7) zawierającym chwilowe wartości różnicy pomiędzy sygnałami wyjściowymi modeli obu kanałów [4].

Zadaniem procedury minimalizującej wartość wskaźnika jakości jest takie dostrojenie parametrów szeregowych korektorów aby przyjęty wskaźnik jakości uzyskał wartość minimalną. Z kilku stosowanych metod optymalizacji parametrycznej najbardziej skuteczna okazała się metoda Monte Carlo. Stosowano trzy kryteria jakości ($\|\epsilon_r\|_1$, $\|\epsilon_r\|_2$ i $\|\epsilon_r\|_\infty$), które wykazały podobną wrażliwość na odstrojenie parametrów korektorów. Modelowany sygnał pomiarowy miał postać sinusoidalną o częstotliwości 50 [Hz] i amplitudzie $U=5$ [V]. Na podstawie wstępnych badań stwierdzono, że numeryczna metoda różniczkowania dostępna w języku GODYS PC, w szerokim zakresie zmian długości słowa przetwornika A/C i częstotliwości próbkowania, nie powoduje błędów różniczkowania większych niż 1% [5]. Do dalszych badań wybrano częstotliwość próbkowania – 2 [kHz]. Przeprowadzono badania symulacyjne mające na celu określenie jakości identyfikacji i skuteczności korekcji w zależności od wartości stałych czasowych modelowanych obiektów.



Rys. 8. Skuteczność korekcji Q dla sygnału sinusoidalnego przy wykorzystaniu algorytmu analizującego zależności pomiędzy harmonicznymi

Na rys. 8 przedstawiono skuteczność korekcji, obliczoną według kryterium $\|\epsilon\|_\infty$, w funkcji α dla trzech różnych wartości.

$$\epsilon_r = y_{1i} - y_{2i} \quad (7)$$

$$u(t) = U \sin(2\pi f t), \quad f_s = 40 \text{ f}, \quad \Theta = 1/f, \quad \alpha = T_1/\Theta, \quad \beta = T_2/\Theta \quad (8)$$

5. Podsumowanie

Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły przydatność testowanych algorytmów do korekcji błędów dynamicznych.

Algorytmy bazujące na minimalizacji wskaźnika jakości oraz na optymalizacji wartości wskaźnika uwarunkowania przeznaczone są do korekcji błędów dynamicznych wnoszonych przez tory mierzące dowolne sygnały. Procedura identyfikacji działająca według tych algorytmów jest czasochłonna. Natomiast działanie układu korekcji według algorytmu operującego na zależnościach pomiędzy harmonicznymi jest bardzo szybkie.

Różna jest też wrażliwość badanych metod na wpływ zakłóceń. Zakłócenia dodane do mierzonego sygnału nie mają wpływu na dokładność identyfikacji stałych czasowych torów pomiarowych we wszystkich trzech metodach postępowania. Natomiast ingerencja zakłóceń w jeden lub obydwu z badanych bliźniaczych torów powoduje powstanie znacznych błędów identyfikacji a w konsekwencji pogorszenie jakości korekcji przy wykorzystaniu algorytmów bazujących na minimalizacji wskaźnika jakości lub optymalizacji wartości wskaźnika uwarunkowania. Trzecia metoda polegająca na analizie zależności pomiędzy harmonicznymi jest na tyle odporna na oddziaływanie zakłóceń na ile metoda analizy spektralnej rejestrowanego sygnału jest selektywna i potrafi oddzielić zakłócenia od mierzonego sygnału nawet jeżeli te zakłócenia ingerują w dowolne miejsce analogowej części systemu.

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazują, że każdy z sprawdzanych algorytmów korekcji znacznie zmniejsza błąd dynamiczny pomiaru zmiennych w czasie sygnałów. Algorytmy te wykazują bardzo małą wrażliwość na zmiany parametrów dynamicznych analogowej części torów pomiarowych. Ta cecha umożliwia dostrojenie się korektorów do nieznanych a priori właściwości dynamicznych tych torów oraz na nadążanie za ich fluktuacjami.

Dla sygnałów okresowych drugi algorytm wykazuje szerszy obszar skuteczniejszej korekcji niż trzeci ze względu na dopuszczalny zakres zmian stałych czasowych torów analogowych.

Algorytm trzeci umożliwia znaczące zmniejszenie błędu dynamicznego toru pomiarowego o korzystnych właściwościach dynamicznych ($\beta=0.1$) przy pomocy toru pomiarowego o niekorzystnych właściwościach dynamicznych ($\alpha>1$).

Bibliografia

- [1] Nabielec J.: *Blind Correction of Dynamic Error for Periodical Signal*, The 2001 IEEE International Symposium on Diagnostic for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, September 1-3, 2001 Grado Italy, str. 339-344
- [2] Nabielec J.: *Fast identification method of low order transducers for dynamic error 'blind' corrections for periodical signal*, 6th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, pp. 965-968, 2000, Międzyzdroje,
- [3] Nabielec J.: *Wyznaczanie współczynników algorytmu korekcji „w ciemno” błędu dynamicznego toru pomiarowego – badania symulacyjne*, Metrologia i systemy pomiarowe Tom VI, zeszyt 4/1999, str. 309-323.
- [4] Nalepa J.: *Ocena skuteczności korekcji błędu dynamicznego metodą „w ciemno” – badania symulacyjne toru inercyjnego pierwszego rzędu*, XI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, str. 167-173, Krynica 2001.
- [5] Nalepa J.: *The 'Blind' dynamic Error Correction Method for the First Order Measurement Channel-Simulation Study*, 3rd International Conference on Measurement, pp. 16-19 Smolenice Castle, May 14-17, 2001