

SŁOTA Adam¹
CHAŁABIS Piotr²

Implementacja sterowania admitancyjnego w sterowniku ruchu NextMove

Układ sterowania pozycyjnego,
Sterowanie pozycyjno-siłowe

Streszczenie

W pracy przedstawiono realizację sterowania admitancyjnego w oparciu o sterownik ruchu realizujący sterowanie pozycyjne. Zbudowano stanowisko składające się z: wieloosiowego sterownika ruchu NextMove ESB2, serwowzmacniacza ADS 50/5, silnika DC 403A403 z enkoderem oraz zasilacza DR 120/24. Korzystając z dostarczonych przez producenta sterownika bibliotek funkcji ruchu oraz kompilatora języka C opracowano program zastępujący wybrane funkcje firmowego oprogramowania sterownika NextMove. Program ten realizuje algorytm regulatora admitancyjnego. Algorytm wyznacza wartości zadane pozycji do sterowanego pozycyjnie napędu na podstawie zadanej i rzeczywistej wartości momentu siły oddziaływania z otoczeniem. Do wyznaczenia wielkości oddziaływania z otoczeniem wykorzystano pomiar prądu silnika realizowany przez serwowzmacniacz. Działanie oprogramowania przetestowano na zbudowanym stanowisku, przedstawiono uzyskane wyniki.

IMPLEMENTATION OF ADMITTANCE CONTROL IN NEXTMOVE MOTION CONTROLLER

Abstract

Implementation of admittance control in motion controller designed for position control is presented in the paper. The test stand which consists of: a multi-axis motion controller NextMove ESB2, a servoamplifier ADS 50/5, a DC motor 403A403 with encoder and a power source DR 120/24 is built. With the use of provided by controller manufacturer library of motion functions and a C language compiler control software is worked out. It replaces some functions of original firmware of NextMove controller. The software implements an algorithm of admittance controller. The algorithm calculates set position values for position controlled drive on the basis of set and actual values of torque of interaction with environment. To calculate actual value of torque of interaction with environment, functionality of motor current measurement provided by servoamplifier is used. The control software operation is tested on the test stand and results are presented.

1. WSTĘP

Rozwój w zakresie szeroko pojętej robotyce dotyczy w głównej mierze układów sterowania oraz ich oprogramowania. Rozszerzenia układów sterowania pozycyjnego, dominujących w robotach przemysłowych, o wykorzystanie w sterowaniu informacji związanych z oddziaływaniem robota z otoczeniem prowadzi do układów sterowania pozycyjno-siłowego takich jak: sterowanie sztywnością, impedancyjne czy admitancyjne. Układy sterowania pozycyjno-siłowego przekształcają robota z układu realizującego bezwzględnie zaprogramowaną trajektorię ruchu w urządzenia aktywne reagujące na zmiany otoczenia [1]. Dlatego duża część prac dotyczących zastosowania sterowania pozycyjno-siłowego dotyczy robotów, które w przeciwieństwie do robotów przemysłowych, nie pracują w dobrze zdefiniowanym środowisku. Przykładami są roboty usługowe pracujące wśród ludzi [4], manipulatory chirurgiczne [4,9], urządzenia wirtualnej rzeczywistości [10] czy przyrządy rehabilitacyjne [2]. Ponieważ prace takie mają charakter badawczy lub są we wstępnej fazie implementacji to układy sterowania pozycyjno-siłowego często są budowane w oparciu o komputery PC [1,7]. Podejście takie wymaga budowy układu sterowania od podstaw. Korzystnym, ze względu na wymagany nakład pracy oraz stosowanie sprawdzonych rozwiązań, byłoby wykorzystanie dostępnych na rynku sterowników ruchu.

Dostępne na rynku układy sterowania ruchem w większości oferują sterowanie pozycyjne. Dlatego wykorzystanie ich do budowy układu sterowania pozycyjno-siłowego wymaga zwykle modyfikacji oprogramowania układu sterowania. Dlatego o możliwości wykorzystania sterownika ruchu do budowy układu sterowania pozycyjno-siłowego decyduje jego otwartość. Podstawowe cechy sterownika decydujące o jego otwartości to m. in. [1]:

- modułowa budowa, pozwalająca na łatwą modyfikację/dodawanie modułów,
- możliwość dodawania nowych funkcjonalności, w tym z wykorzystaniem narzędzi innych firm,
- konfigurowalność, dająca możliwość dostosowania rozwiązania do wymagań.

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37.
Tel: +48 12 374 32 41, Fax: +48 12 374 32 02, E-mail: slota@mech.pk.edu.pl

² Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37.
Tel: +48 12 374 32 41, Fax: +48 12 374 32 02, E-mail: piotr1ch@gmail.com

W pracy [8] przedstawiono przegląd dostępnych na rynku układów sterowania ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich programowania. Ze względu na cechy otwartości, do realizacji układu sterowania admitancyjnego zaproponowano sterownik *NextMove ESB2* firmy Baldor [6].

Programowanie układu realizowane jest w języku Mint, z wykorzystaniem aplikacji MintWorkbench. Język Mint umożliwia programowanie zadań ruchu, obsługę sygnałów wejścia/wyjścia oraz udostępnia programowanie wielowątkowe. Dostępna biblioteka profili ruchu zawiera: ruchy interpolowane z możliwością łączenia segmentów liniowych i kołowych, interpolację śrubową i typu spline, funkcję ruchu stycznego do krzywej 2D, funkcję elektronicznej przekładni, elektronicznej krzywki. Dostępny interfejs w postaci kontrolki ActiveX pozwala na zarządzanie sterownikiem z programu użytkownika na PC za pośrednictwem aplikacji MILServer. Dodatkowo producent udostępnia biblioteki funkcji w języku C, umożliwiające budowę wbudowanych aplikacji czasu rzeczywistego, zastępujących interpreter języka Mint. Funkcjonalność ta pozwala użytkownikowi na samodzielne modyfikowanie algorytmów działania sterownika, w tym budowy układu sterowania pozycyjno-siłowego. Modułowa architektura oprogramowania pozwala na modyfikację wybranych części oprogramowania poprzez zdefiniowanie i zainstalowanie własnych funkcji [5]:

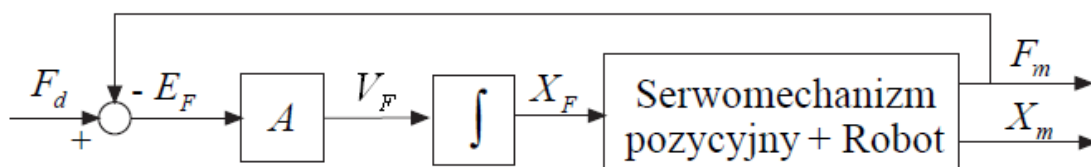
- Pre Servo Loop – wywoływanej po odczytaniu rzeczywistej wartości pozycji, a przed obliczeniem wartości uchybu (*TPreServoLoop*),
- Main Servo Loop – wywoływanej w miejscu układu *PIDVFA*, w celu wyznaczenia, według algorytmu użytkownika, wartości wyjściowej do napędu (*TMainServoLoop*),
- Post Servo Loop – wywoływanej bezpośrednio przed wysłaniem wyznaczonej wartości wyjściowej do napędu (*TPostServoLoop*),
- Motion Profiler – wyznaczającej wartość zadaną pozycji do zrealizowania przez napęd (*TProfileLoop*),
- Obsługi zdarzeń – np. zmiany wartości w tablicy komunikacji *Comms* (*CommsEventHandler*).

Do budowy aplikacji wbudowanej dla sterownika *NextMove ESB2* konieczny jest kompilator umożliwiający wygenerowanie kodu wykonywalnego dla procesora firmy Texas Instruments *TMS320VC33PGE*. W pracy wykorzystano kompilator języka C v.5.11 ze środowiska Code Composer Studio 4.10.

2. STEROWANIE ADMITANCYJNE – IMPLEMENTACJA W STEROWNIKU NEXTMOVE ESB2

2.1 Zasada sterowania admitancyjnego

W układach sterowania pozycyjno-siłowego wykorzystuje się wewnętrzną pętlę sterowania pozycją oraz zewnętrzną pętlę sterowania siłą. Wartość zadaną pozycji dla pętli wewnętrznej jest efektem działania zewnętrznej pętli sterowania siłą [11]. Obiektem typu admitancyjnego nazywamy obiekt, w którym działająca na wejściu siła powoduje prędkość przemieszczenia na wyjściu [3]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu regulacji admitancyjnej.



Rys.1. Schemat blokowy układu sterowania admitancyjnego [11]

Element przekształcający wartość uchybu siły E_F na wartość prędkości zadanej V_F jest elementem admitancyjnym opisanym transmitancją operatorową postaci (1):

$$A(s) = \frac{V(s)}{F(s)} = \frac{s}{Ms^2 + Bs + K} \quad (1)$$

gdzie: M – współczynnik inercji
 B – współczynnik tłumienia
 K – współczynnik sztywności

2.2 Budowa stanowiska

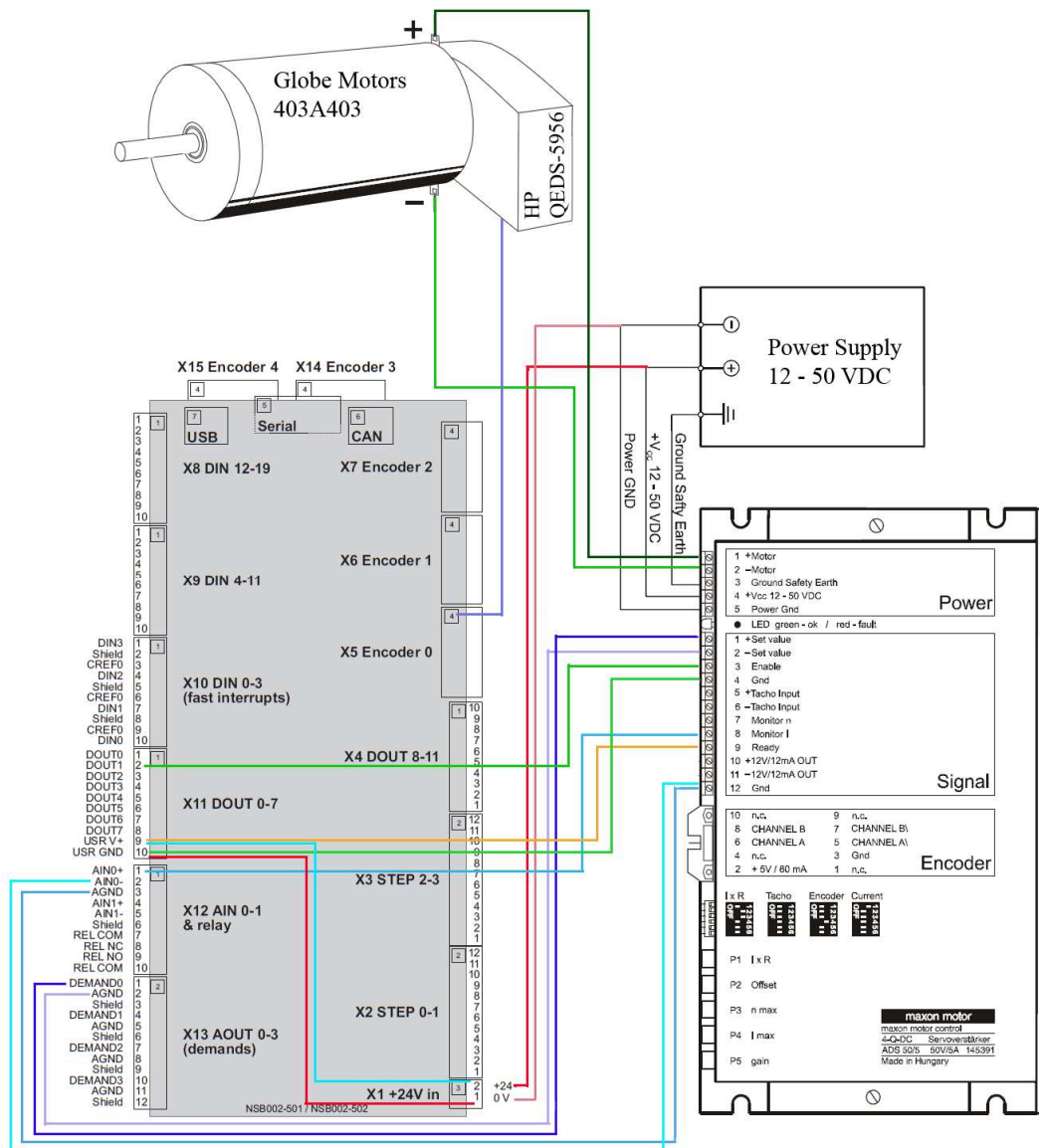
W celu implementacji i testowania sterowania admitancyjnego zestawiono stanowisko badawcze. W skład stanowiska wchodzi:

- Sterownik ruchu *NextMove ESB2 NSB202-502*,
- Silnik *Globe Motors 403A403* z enkoderem *Hewlett Packard QEDS-5956 A11* o rozdzielczości 500 impulsów na obrót (sterownik odczytuje wszystkie zbrocza sygnałów prostokątnych, dlatego też całkowita ilość impulsów na obrót wynosi 2000),
- Serwowzmacniacz *ADS 50/5* działający w trybie prądowym,
- Zasilacz *DR 120/24*.

Widok stanowiska pokazano na rysunku 2. Rysunek 3 przedstawia połączenia elementów stanowiska.

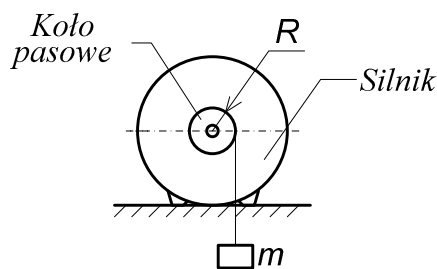


Rys.2. Widok stanowiska



Rys.3. Schemat połączeń elementów stanowiska

Przyjęto, że wartością zadaną będzie moment siły działania wałka silnika. Wałek silnika obciążony jest masą m zawieszoną na nawiniętej na koło pasowe, cienkiej linie (rys. 4).



Rys.4. Schemat obciążenia wałka silnika

Zastosowany na stanowisku serwowzmacniacz udostępni sygnał napięciowy (*Monitor I*), proporcjonalny do wartości prądu silnika, o gradencie $0,8 [V/A]$. Sygnał ten będzie wykorzystany do wyznaczenia wielkości momentu siły z jakim wałek silnika działa na otoczenie. Wartość momentu siły F_m , przy założeniu idealnej sztywności układu, wyznaczany będzie z zależności (2):

$$F_m(n) = hi(n) - J \frac{\alpha(n) - 2\alpha(n-1) + \alpha(n-2)}{T^2} \quad (2)$$

gdzie: h – stała momentowa silnika
 i – prąd twornika
 J – zredukowany do osi wałka silnika moment bezwładności wałka silnika i dołączonej masy
 α – pozycja kątowa wałka silnika
 T – okres próbkowania

2.3 Modyfikacja oprogramowania sterownika NextMove

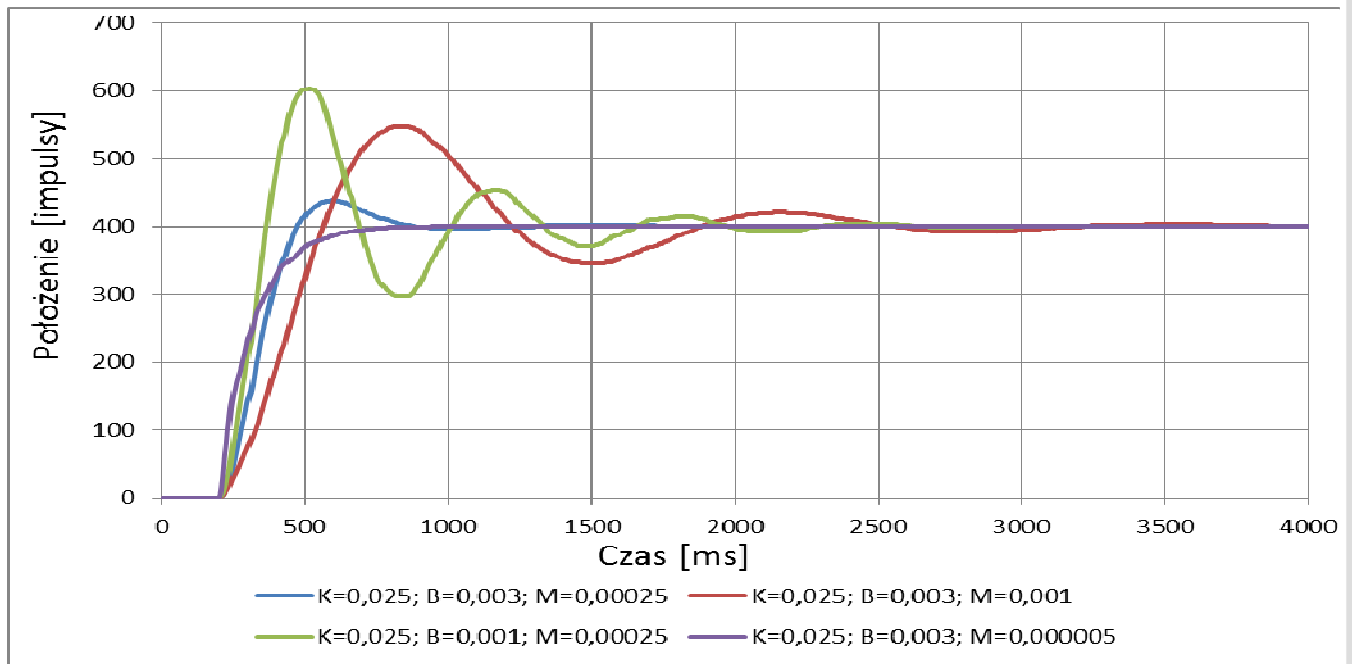
W oryginalnym oprogramowaniu sterownika *NextMove ESB2* wartości pozycji zadanej wyznaczane są przez generator profilu ruchu (funkcja *TProfileLoop*). Pętla sterowania (funkcje *TPreServoLoop*, *TMainServoLoop*, *TPostServoLoop*) realizuje sterowanie pozycyjne. W celu wyznaczenia wartości zadanej pozycji na podstawie uchybu momentu siły E_F , zdefiniowano własną funkcję *myGenerator*, zastępującą funkcję *TProfileLoop*. Wykonując odwrotną transformację Laplace'a i zapisując wyrażenie w postaci dyskretnej otrzymujemy zależność na wartości prędkości zadanej V_F , dla kolejnych przebiegów pętli sterowania (3):

$$V_F(n) = \frac{E_F(n) - KT \sum_{i=0}^{n-1} V_F(i) + M \frac{V_F(n-1)}{T}}{\frac{M}{T} + KT + B} \quad (3)$$

Do przesyłania danych do sterownika wykorzystano tablicę *Comms*. W tym celu zdefiniowano funkcję *myCommsEventHandler*, zastępującą funkcję *CommsEventHandler*. Funkcja ta jest wywoływana każdorazowo przy zmianie wartości w tablicy *Comms*. Wykorzystano następujące elementy tablicy *Comms*: 10 – wartość zadanej momentu siły F_d , 15 – wartość współczynnika sztywności K , 20 – wartość współczynnika tłumienia B , 25 – wartość współczynnika inercji M , 30 – masa ciężarka zawieszonoego na wałku silnika m , 1 – zapisanie powyższych wartości oraz uruchomienie ruchu.

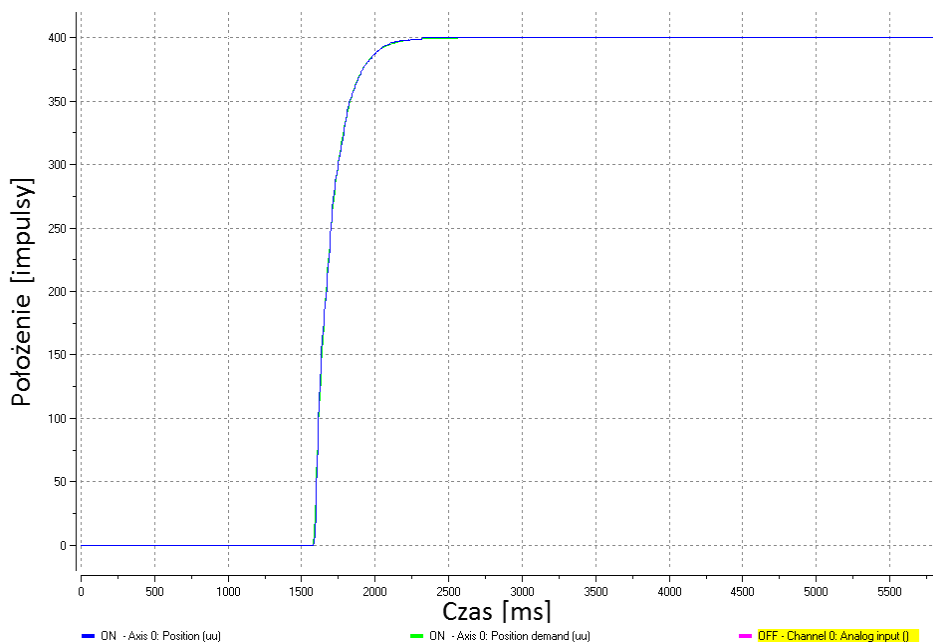
2.4 Wyniki testów

W pierwszym kroku sprawdzono poprawność działania regulatora admitancyjnego zaimplementowanego w funkcji *myGenerator*. W tym celu zarejestrowano przebiegi sygnału pozycji zadanej do pętli sterowania pozycyjnego X_F dla $F_m=0$. Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane przebiegi dla czterech zestawów wartości parametrów K , B oraz M regulatora admitancyjnego oraz skokowej zmiany wartości zadanej momentu siły $F_d=10 [mNm]$.



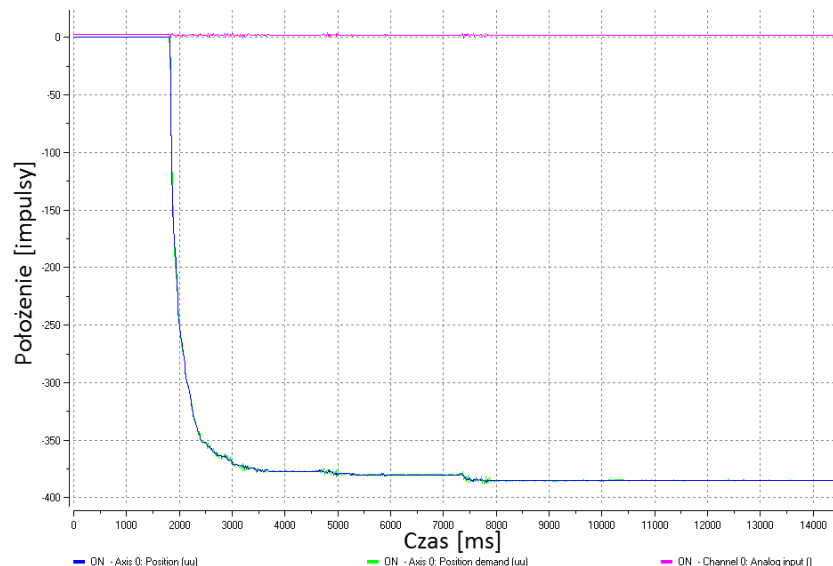
Rys.5. Przebiegi sygnałów X_F dla $F_m=0$

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi sygnałów pozycji zadanej do pętli sterowania pozycyjnego X_F (wykres zielony) oraz pozycji rzeczywistej X_m (wykres niebieski) dla wartości parametrów regulatora admitancyjnego $K=0,025 [mNm/imp]$, $B=0,003 [mNm/imp/s]$, $M=0,000005 [mNm/imp/s^2]$ oraz skokowej zmiany wartości zadanej momentu siły $F_d=10 [mNm]$ i zerowej wartości momentu siły oddziaływania wałka silnika z otoczeniem.



Rys.6. Przebiegi sygnałów X_F oraz X_m dla $F_d=10 [mNm]$ i $F_m=0$

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi sygnałów pozycji zadanej do pętli sterowania pozycyjnego X_F (wykres zielony) oraz pozycji rzeczywistej X_m (wykres niebieski) dla wartości parametrów regulatora admitancyjnego jak na rysunku 6 oraz skokowej zmiany wartości momentu siły oddziaływania wałka silnika z otoczeniem (wywołanego obciążeniem wałka silnika masą $m=0,2 [kg]$ – w stanie ustalonym $F_m=10 [mNm]$) i zerowej wartości zadanej momentu siły.



Rys.7. Przebiegi sygnałów X_F oraz X_m dla $F_d=0$ i $F_m=10[mNm]$ (w stanie ustalonym)

3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono realizację sterowania admitancyjnego w oparciu o sterownik ruchu przeznaczony do sterowania pozycyjnego. Zbudowano stanowisko, którego głównymi elementami są: wieloosiowy sterownik ruchu *NextMove ESB2* firmy Baldor, serwowzmacniacz *ADS 50/5* firmy Maxon, silnik *DC 403A403* z enkoderem firmy Globe Motors oraz zasilacz *DR 120/24* firmy Mean Well. Realizacja zadania była możliwa dzięki otwartej strukturze sterownika *NextMove* (modułowość oprogramowania, dostarczane biblioteki funkcji ruchu oraz dokumentacja) oraz pozyskanemu z firmy Texas Instruments kompilatorowi języka C (wersja v.5.11) dla procesora *TMS320VC33PGE*.

Dla sterownika *NextMove* opracowano oprogramowanie, zastępujące dostarczane razem ze sterownikiem oprogramowanie firmowe. Realizuje ono algorytm regulatora admitancyjnego. Algorytm ten wyznacza wartości zadane pozycji do sterowanego pozycyjnie napędu na podstawie zadanej i rzeczywistej wartości momentu siły oddziaływania z otoczeniem. Do wyznaczenia wielkości oddziaływania z otoczeniem wykorzystano pomiar prądu realizowany przez serwowzmacniacz. Przeprowadzone testy potwierdzają możliwość realizacji sterowania pozycyjno-siłowego w oparciu o komercyjny sterownik ruchu realizujący sterowanie pozycyjne. Rozwiązanie takie jest prostsze od prezentowanych w literaturze rozwiązań budowanych na bazie komputerów PC [1,7]. Wyznaczanie wielkości oddziaływania z otoczeniem na podstawie pomiaru prądu jest rozwiązaniem pośrednim a uzyskiwane w ten sposób wyniki są silnie uzależnione od dokładności zastosowanego modelu układu mechanicznego.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Colombo D., Dallefrate D., Tosatti L.: *Pc based control systems for compliance control and intuitive programming of industrial robots*, In VDI-Wissensforum et al.: *ISR 2006 – ROBOTIK 2006 – Proceedings of the Joint Conference on Robotics*, 2006.
- [2] Culmer P., Jackson A., Levesley M., et al.: *An admittance control scheme for a robotic upper limb stroke rehabilitation system*, *Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, pp. 5081–5084, 2005.
- [3] Jezierski E.: *Dynamika robotów*, WNT, Warszawa 2006.
- [4] Kumar R., Berkelman P., Gupta P., et al.: *Preliminary experiments in cooperative human/robot force control for robot assisted microsurgical manipulation*, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.1, pp. 610–617, 2000.
- [5] *MintMT Embedded Programming Guide*.
- [6] *NextMove, Multi-axis Motion Controllers*, http://www.baldor.com/pdf/literature/BR1202-C_NextMove.pdf
- [7] Naksuk N.: *The implementation of a natural admittance controller on an industrial robot*, Case Western Reserve University, 2001.
- [8] Słota A., Więk T.: *Koncepcja układu sterowania pozycyjno-siłowego z wykorzystaniem sterownika NextMove*, *Logistyka* 6/2011, str. 2689-2696.
- [9] Taylor R, Jensen P, Whitcomb L, et al.: *A steadyhand robotic system for microsurgical augmentation*, *International Journal of Robotic Research*, pp. 18-12, 1999.
- [10] Van der Linde R., Lammertse P., Frederiksen E., Ruiters B.: *The hapticmaster, a new high-performance haptic interface*, *Proceedings of Eurohaptics 2002*, Edinburgh, UK, pp. 1–5, 2002.
- [11] Volpe R.: *Real and Artificial Forces in the Control of Manipulators: Theory and Experiments*, PhD thesis, 1990, <http://robotics.jpl.nasa.gov/people/volpe/papers>.
- [12] Winiarski T., Zieliński C.: *Podstawy sterowania siłowego w robotach*, *PAR* 6/2008, str. 5-10