

METODA SYMULACYJNA DOBORU PARAMETRÓW NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO DLA DEDYKOWANEJ TRAJEKTORII RUCHU

W artykule zaproponowano metodę doboru parametrów napędów elektrycznych na przykładzie robota typu Scara dla konkretnej trajektorii ruchu. W tym celu została przeprowadzona symulacja w środowisku Simulink modelu powstałego przy pomocy biblioteki SimMechanics. Symulację przeprowadzono dla trzech różnych zestawów regulatorów. Porównano wielkości sygnałów sterujących, wskaźniki jakości oraz błędy statyczne. Autor pracy proponuje opisaną metodę symulacyjną jako narzędzie inżynierskie do doboru parametrów napędów konstrukcji mechanicznych.

WSTĘP

Jednym z problemów projektowych jest dobór napędu do zaprojektowanego lub już istniejącego urządzenia. Konstruktorzy często dokonują tego na podstawie uproszczonych obliczeń, lub symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Obie metody posiadają jednak wady i zalety. Pierwsza z nich pozwala na zgrubną ocenę (estymację) warunków pracy urządzenia. Na dokładność obliczeń ma tu wpływ stopień skomplikowania problemu oraz doświadczenie zawodowe konstruktora. W takim przypadku zazwyczaj przyjmuje się wysoki współczynnik bezpieczeństwa, co często prowadzi do przewymiarowania napędu. Druga metoda pozwala uzyskać bardziej precyzyjną ocenę warunków pracy urządzenia, lecz wiąże się z czasochłonnym procesem budowania modelu symulacyjnego. Zaletą tej metody jest jednak możliwość otrzymania analiz wytrzymałościowych urządzenia, co może posłużyć do optymalizacji konstrukcji.

Istnieje również możliwość opisanego urządzenia równaniami ruchu. Są to równania różniczkowe opisujące dynamikę układu. Wyprowadzenie równań ruchu dla złożonych konstrukcji może być trudne ale istnieją aplikacje dzięki którym można problem szybko rozwiązać. Do rozwiązania równań różniczkowych można wykorzystać na przykład program Simulink.

Simulink wśród modułów dodatkowych posiada również jeden o nazwie SimMechanics. Przyborek ten służy do modelowania układów mechanicznych, przy pomocy bloków [1]. Modelowanie polega na określeniu elementów fizycznych, z których składa się model (bryły sztywne), transformaty układów odniesienia, oraz więzów kinematycznych. Dzięki tej metodzie możliwe jest szybkie przeprowadzenie symulacji pracy urządzenia nawet bez znajomości równań opisujących dynamikę układu.

Zaletą aplikacji Simulink, która dedykowana jest dla układów sterowania, jest możliwość przeprowadzenia symulacji elementów dynamicznych pod kątem sterowania. Oznacza to, że model utworzony przy pomocy SimMechanics może być użyty do przeprowadzenia symulacji sterowania. Przez sterowanie rozumie się w tym kontekście przyłożenie siły lub momentu siły do członu napędowego. W wyniku działania przyłożonego wymuszenia (siły lub momentu), układ wykonuje ruch który może być zarejestrowany i oceniony pod kątem spełnienia założeń projektowych. W przypadku manipulatorów, gdzie zazwyczaj należy stabilizować pozycję poszczególnych członów, można również rejestrować i ocenić błąd regulacji.

Ponizej podany został przykład obliczeń, jaki można wykonać w programie dla robota wykonującego ruch po zadanej trajektorii.

1. ZASADA TWORZENIA MODELU

Aplikacja Simulink jest prostym narzędziem, gdyż nie wymaga znajomości języków programowania, a programy (środowiska symulacyjne) tworzy się w sposób blokowy, poprzez obiekty-bloki oraz wiązania pomiędzy nimi. Do utworzenia modelu dynamicznego w aplikacji Simulink nie jest potrzebna znajomość równań opisujących dynamikę układu mechanicznego, wystarczy jedynie znajomość parametrów opisujących własności brył sztywnych (masa, środek ciężkości, momenty bezwładności, itp.) z których składa się mechanizm (układ) oraz relacji pomiędzy nimi (typu wiązania)[2-4].

Budowę modelu przy pomocy modułu SimMechanics można przeprowadzić według następującego schematu:

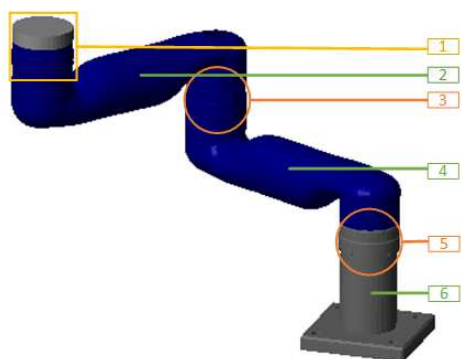
- zdefiniowanie środowiska pracy, poprzez określenie narzędzia do rozwiązywania problemu, określenie globalnej współrzędnej odniesienia, oraz sił działających na układ (w rozważanym przypadku siły grawitacji).
- zdefiniowanie parametrów bryły sztywnej: bezwładności, stopni swobody, transformaty układów odniesienia umożliwiającej opisanie układu względem wymaganego układu współrzędnych,
- zdefiniowanie sił/momentów działających na układ oraz określenie stanu początkowego modelu, określenie wartości mierzonych w celu inicjalizacji i zapisywania trajektorii ruchu,
- uruchomienie symulacji, określenie metody rozwiązywania układu
- wizualizacja modelu w formie animacji podczas symulacji.

Wymiana danych pomiędzy modelem i blokami Simulinka odbywa się poprzez specjalne konwertery, w których można zdefiniować jednostki fizyczne. Na układ można oddziaływać siłą lub momentem siły.

W celu uzyskania sterowania pozycją członu napędowego należy utworzyć układ regulacji, dla którego sygnałem wartości zadanej jest wartość położenia liniowego/kątowego, sygnał pomiarowym wartość pozycji liniowej/kątowej uzyskana z bloku wiązania kinematycznego oraz sygnał sterujący, którym jest siła/moment siły. Możliwe jest również dodanie członów opisujących dodatkowe elementy takie jak: przekładnie, silnik elektryczny, oraz ich modelowanie dzięki dodatkowym modułom SimScape.

2. MODEL SYMULACYJNY

Manipulatory typu Scara stosowane w przemyśle najczęściej posiadają trzy stopnie swobody: -dwa obrotowo-zwrotne oraz jeden posuwisto-zwrotny. W opisanym przykładzie układ kinematyczny został uproszczony poprzez założenie, iż końcówka manipulatora (rys. 1) będzie poruszała się tylko po płaszczyźnie XY. Pozwoliło to na usunięcie członu posuwisto-zwrotnego.



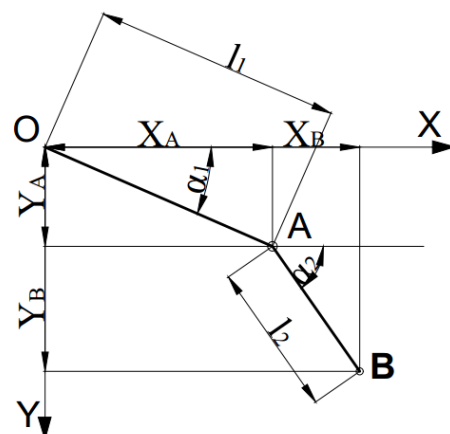
Rys. 1. Schemat manipulatora typu Scara

Przedmiotem badań jest robot szeregowy typu Scara (Rys. 1). Manipulator ten zbudowany jest z nieruchomej podstawy (6) przymocowanej do podłoża oraz kolejnych segmentów (2,4) połączonych ze sobą napędami elektrycznymi (3,5). Elementy ruchome (2,4) wykonane są z wytrzymałego tworzywa kompozytowego. Kończówka efektorowa (1) porusza się dzięki napędom elektrycznym, możliwe jest jej pozycjonowanie w kartezjańskim układzie współrzędnych przestrzeni roboczej. Parametry elementów ruchomych potrzebnych do symulacji zestawiono w tabeli 1. Ten konkretny model manipulatora został w przeszłości wykorzystany jako sprzężenie zwrotne dla osoby sterującej ruchem manipulatora poprzez sygnał EEG [5], [6].

Tab. 1 Parametry modelu

Bryła	Parametr	Wartość
(4)	Masa [kg]	1.9896
	Środek ciężkości (x,y,z) [m]	(0.24359,0,0.059265)
	I_{xx} [kg*m ²]	0.0041085
	I_{xy} [kg*m ²]	-8.195E-06
	I_{xz} [kg*m ²]	0.0032956
	I_{yy} [kg*m ²]	0.025936
	I_{yz} [kg*m ²]	5.9873E-06
	I_{zz} [kg*m ²]	0.023561
(2)	Masa [kg]	0.79012
	Środek ciężkości (x,y,z) [m]	(0.15703,8.4232E-06, 0.039874)
	I_{xx} [kg*m ²]	0.0011636
	I_{xy} [kg*m ²]	-2.9234E-07
	I_{xz} [kg*m ²]	0.0011521
	I_{yy} [kg*m ²]	0.013165
	I_{yz} [kg*m ²]	3.4767E-09
	I_{zz} [kg*m ²]	0.013092
(1)	Masa [kg]	0.11084
	Środek ciężkości (x,y,z) [m]	(0 0 0.01)
	I_{xx} [kg*m ²]	5.2573E-05
	I_{xy} [kg*m ²]	-1.1294E-21
	I_{xz} [kg*m ²]	9.1496E-22
	I_{yy} [kg*m ²]	5.2573E-05
	I_{yz} [kg*m ²]	6.7234E-22
	I_{zz} [kg*m ²]	9.7757E-05

Dokładny opis kinematyczny przedstawia rys. 2. Ruch obrotowy członów napędowych (rys.1 punkty (3,5)) wyrażonych kątami (α_1, α_2) powoduje przemieszczenie końcówki efektora w kartezjańskim układzie współrzędnych (x,y).



Rys. 2. Schemat kinematyczny manipulatora Scara o dwóch stopniach swobody

Wartości przemieszczeń końcówki spowodowane obrotem członów napędowych ściśle zależą od wymiarów geometrycznych konstrukcji wyrażonych parametrami l_1, l_2 , gdzie:

- l_1 - odległość pomiędzy osiami obrotu pomiędzy podstawą a końcem pierwszego ramienia,
- l_2 - odległość pomiędzy osiami obrotu pomiędzy początkiem drugiego ramienia a jego końcem.

Wyznaczenie pozycji końcówki robota na podstawie znanych pozycji członów napędowych polega na rozwiązaniu równań zwanym zadaniem kinematyki prostej $(x,y)=f(\alpha_1,\alpha_2)$. Dla badanego przypadku, równania kinematyki prostej przedstawiają zależności (1-2).

$$x = l_1 * \cos(\alpha_1) + l_2 * \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (1)$$

$$y = l_1 * \sin(\alpha_1) + l_2 * \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (2)$$

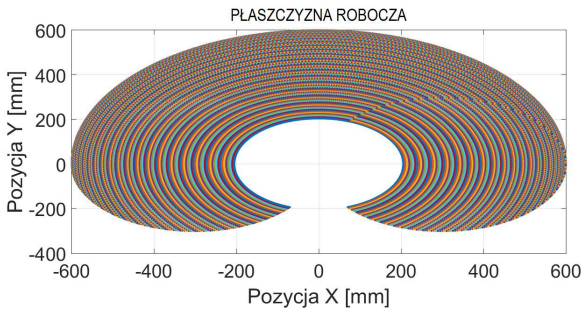
Natomiast operacja odwrotna, polegająca na określeniu położenia członu napędowego na podstawie żądanej pozycji końcówki (np. chwytaka) w układzie odniesienia przestrzeni roboczej nosi nazwę zadania kinematyką odwrotną $(\alpha_1, \alpha_2)=f(x,y)$.

Równania przypadku odwrotnego przedstawiają zależności (3-5).

$$d = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1}\left(\frac{x}{d}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{(d^2 + l_1^2 - l_2^2)}{(2 * l_2 * d)}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_2 = 90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{x}{d}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{(l_1^2 + d^2 - l_2^2)}{(2 * l_2 * d)}\right) \quad (5)$$



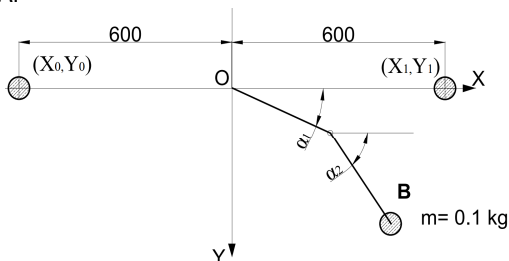
Rys. 3. Płaszczyzna robocza manipulatora typu Scara o dwóch stopniach swobody

Jak wynika z rys. 2, istnieją dwa rozwiązania odwrotnej kinematyki usytuowania członów napędowych. Własność ta umożliwia optymalizację wykonywanego ruchu. Określenie płaszczyzny roboczej projektowanego układu kinematycznego polega na obliczeniu pozycji końcówki robota dla wszystkich kombinacji pozycji (kątown) członów napędowych. Wszystkie kombinacje pozycji członów napędowych wynikające z ich rozdzielczości przedstawiają pełny zbiór rozwiązań, czyli przestrzeń roboczą. W rozważanym przypadku układu o dwóch stopniach swobody wszystkie punkty należące do przestrzeni roboczej będą leżały na płaszczyźnie XY. Zbiór punktów przestrzeni roboczej określa wszystkie możliwe miejsca zatrzymania robota ze względu na rozdzielczość pomiaru pozycji przegubów. W trakcie ruchu końcówki manipulatora możliwy jest przejazd przez dowolny punkt znajdujący się w przestrzeni roboczej. Dokładność pozycjonowania zależy więc głównie od rozdzielczości napędów, parametrów geometrycznych konstrukcji oraz algorytmowi sterowania [2]. Przykładową przestrzeń roboczą dla parametrów: $l_1=l_2=300[\text{mm}]$, $\alpha_1=[0\div 180^\circ]$, $\alpha_2=[-140\div 140^\circ]$, $\Delta\alpha=1^\circ$, przedstawia rys. 3.

3. TRAJEKTORIA RUCHU

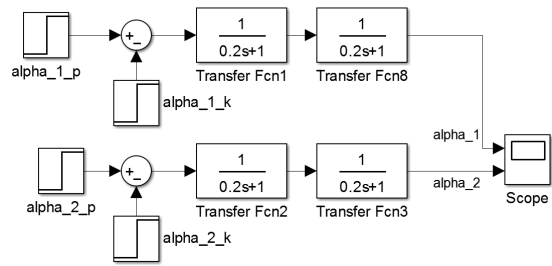
Roboty typu Scara, ze względu na konstrukcję kinematyczną, steruje się w układzie biegunowym. Biorąc pod uwagę specyfikę ich pracy, najczęściej są to aplikacje typu pick and place (przenoszenie elementów, przykładowo do składania, pakowania). Powoduje to, że w jednym kierunku urządzenie przemieszcza się bez dodatkowego obciążenia, a w drugim przenosząc wymagany przedmiot. Fakt ten powoduje, iż należy uwzględnić masę oraz parametry bezwładnościowe takiego elementu w symulacji.

Przypadek takiego ruchu przedstawia (rys. 4). Przenoszony element jest pobierany z punktu A i przenoszony do punktu B. W trakcie ruchu jałowego manipulator przemieszcza się z punktu B do punktu A.



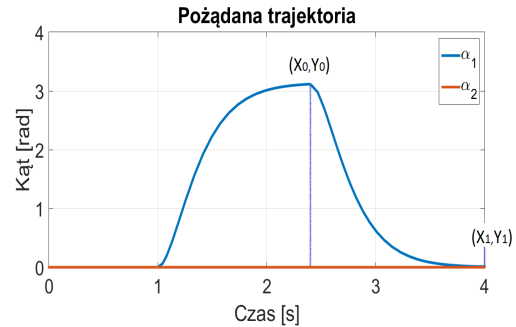
Rys. 4. Koncepcja ruchu

Aby wykonać taki ruch, więzy kinematyczne manipulatora (przegubowy) muszą przemieścić się w taki sposób, aby końcówka chwytaka znalazła się wymaganej pozycji [4], [7]. W tym celu poddano filtrem drugiego rzędu (co przedstawia rys. 5) sygnał skokowy określający pożądane wartości kątowne członów napędowych w czasie.



Rys. 5. Schemat bloków służących do generowania wartości zadanej członów napędowych.

Uzyskane przebiegi wartości zadanej członów napędowych zostały przedstawione na rys. 6, przedstawiają trajektorię ruchu.



Rys. 6. Przebiegi wartości zadanych członów napędowych

4. WYMAGANIA ODNOŚNIE JAKOŚCI STEROWANIA

Głównymi parametrami opisującymi i wpływającymi na budowę manipulatorów i robotów jest dokładność i powtarzalność. Dokładność manipulatora określa, jak blisko manipulator może dojść do zadanego punktu w przestrzeni roboczej. Powtarzalność jest wielkością określającą, jak blisko manipulator może dojść do pozycji uprzednio osiągniętej. Dlatego głównym wymaganiem jest zminimalizowanie sygnału błęd regulacji. W tym celu użyto wskaźnika jakości dynamicznej układu sterowania IAE (Integral of Absolute value of Error). Jest to całka sygnału uchybu.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6)$$

Uchybem regulacji (błąd sterowania) w układzie regulacji jest różnica między wartością zadaną sygnału a wartością sygnału wyjściowego.

Zwiększając nastawy regulatora, minimalizujemy wskaźnik jakości, aczkolwiek wiąże się to z powstaniem sygnału sterującego o większej wartości. W zasadzie zwiększając nastawy regulatora można by było (teoretycznie) doprowadzić wskaźnik jakości do wartości zero. W rzeczywistości ograniczeniem jest fizykałność urządzenia wykonawczego. Dobierając nastawy regulatora w przypadku robota Scara powinniśmy założyć wstępnie maksymalną wartość momentu siły jaki mógłby wygenerować napęd. Takie podejście umożliwi zminimalizowanie wskaźnika jakości dynamicznej sterowania w odniesieniu do nasycenia sygnału sterującego.

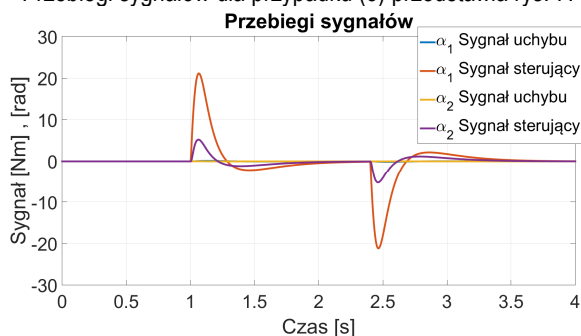
5. WYNIKI SYMULACJI

W wyniku przeprowadzonej symulacji uzyskano właściwości układu regulacji przedstawione w tab 2. Określone właściwości układu regulacji takie jak: wskaźnik jakości IAE, wartość maksymalną sygnału sterującego U_{MAX} wyrażoną w [Nm], uchyb regulacji dla pozycji trajektorii ruchu z rys. 4.

Tab. 2 Wyniki symulacji

Napęd	Wskaźnik	1	2	3
α_1	IAE	2.1546	0.3615	0.0945
	U_{MAX} [Nm]	5.6072	15.1603	21.1312
	$E(x_0, y_0)$ [rad]	0.1413	0.0597	0.0056
	$E(x_1, y_1)$ [rad]	0	-0.0377	-0.0029
α_2	IAE	0.0158	0.0421	0.0065
	U_{MAX} [Nm]	1.1689	3.7233	5.2359
	$E(x_0, y_0)$ [rad]	-0.0020	-0.0020	0
	$E(x_1, y_1)$ [rad]	0.0015	0	0

Przebiegi sygnałów dla przypadku (3) przedstawia rys. 7.



Rys. 7: Przebiegi sygnałów

Sygnały błędów regulacji oraz wskaźnik jakości określają precyzję odzwierciedlenia zadanej trajektorii ruchu. Wyznaczone właściwości można wykorzystać do doboru napędu, poprzez wskazanie ich jako wytyczne układu regulacji. W taki sposób jasno można określić wartość momentu obrotowego napędu elektrycznego dla zadanej trajektorii ruchu. Możliwe jest również określenie nasycenia sygnału sterującego, czyli maksymalnego momentu obrotowego, jaki może wygenerować napęd. Podejście takie umożliwia określenie wskaźnika IAE, błędów regulacji dając odpowiedź czy napęd spełnia wymagania.

PODSUMOWANIE

Modelowanie układów dynamicznych przy pomocy modułu SimMechanics może być wykonane bez znajomości opisujących je równań ruchu co umożliwia ich symulację w prosty sposób. Wymagana jest jedynie znajomość parametrów układu mechanicznego takich jak: środki ciężkości brył, momenty bezwładności itp.

Uzyskanie modelu dynamicznego umożliwia przeprowadzenie symulacji dowolnej trajektorii ruchu, przez co możliwe jest dobranie do niej napędu oraz układu sterowania. Symulacja pozwala na uzyskanie informacji, przydatnych w procesie projektowania. Z uzyskanych wyników wynika, iż zmiana parametrów układu regulacji wpływa na zachowanie układu. Wraz ze wzrostem sygnału sterującego maleją uchyby i rośnie precyzja pozycjonowania końcówki manipulatora. Zadaniem projektanta jest określenie maksymalnych

dopuszczalnych wartości uchybów statycznych E_{ST} , oraz wskaźnika IAE dla których nie będą przekroczone dopuszczalne (lub maksymalne) wartości momentów obrotowych i obciążeń zastosowanych/testowanych napędów. Opisana metoda umożliwia dobór optymalnych parametrów napędu pod dedykowaną trajektorię ruchu.

BIBLIOGRAFIA

1. Steve Miller, „SimMechanics-Model and Simulate Multibody Mechanical Systems.”, 2014.
2. M. S. Alshamasin, F. Ionescu, i R. T. Al-Kasasbeh, „Kinematic modeling and simulation of a SCARA robot by using solid dynamics and Verification by Matlab/Simulink”, *Eur. J. Sci. Res.*, t. 37, nr 3, ss. 388–405, 2009.
3. K. Łygas, P. Wolszczak, T. Klepka, i D. Ghiculescu, „Kinematic Design of Parallel Delta System in Matlab”, *Appl. Mech. Mater.*, t. 844, ss. 7–12, lip. 2016.
4. G. Chen, Y. Yang, L. Zhai, K. Zou, i Y. Yang, „SCARA Robot Control System Design and Trajectory Planning: A Case Study”, w *Advances in Electrical Engineering and Automation*, A. Xie i X. Huang, Red. Springer Berlin Heidelberg, 2012, ss. 171–176.
5. M. Plechawska-Wojcik i P. Wolszczak, „Appling of Neural Networks to Classification of Brain-Computer Interface Data”, w *Beyond Databases, Architectures and Structures, Bdas 2016*, t. 613, S. Kozielski, D. Mrozek, P. Kasprowski, B. Malysiak-Mrozek, i D. Kostrzewa, Red. Cham: Springer Int Publishing Ag, 2016, ss. 485–496.
6. M. Plechawska-Wojcik, P. Wolszczak, R. Cechowicz, i K. Lygas, „Construction of neural nets in brain-computer interface for robot arm steering”, 2016, ss. 348–354.
7. V. Fedak, F. Ďurovsky, i R. Üveges, „Analysis of Robotic System Motion in SimMechanics and MATLAB GUI Environment”, w *MATLAB Applications for the Practical Engineer*, K. Bennett, Red. InTech, 2014.

Simulation method of selection electric drive for dedicated trajectory

The paper presents a method of developing a dynamic model of a mechanism (SCARA robot arm) that can be used to simulate forces and moments during operation. The results obtained from simulation can be used to determine the required parameters of electric motors. Simulink tools are used to model and simulate the behavior of the mechanism in pre-defined test conditions

Autor:

mgr inż. Krystian Łygas – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji, k.lygas@pollub.pl