

# Wykorzystanie syntezy strukturalnej mechanizmów do symulacji dynamicznej w programie Autodesk Inventor

## Use of structural synthesis of mechanisms for dynamic simulation in Autodesk Inventor

MAREK BORYGA  
PAWEŁ KOŁODZIEJ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.2.24>

Prezentujemy sposób wykorzystania syntezy strukturalnej mechanizmów do symulacji dynamicznej w programie Autodesk Inventor. Zaprezentowano etapy przygotowania symulacji dynamicznej (w tym definiowanie typów wiązań pomiędzy poszczególnymi ogniwami) oraz wykorzystano metodę łańcucha pośredniczącego, umożliwiającą tworzenie kompletnych zestawów rozwiązań strukturalnych. Sposób postępowania zilustrowano dwoma przykładami.

**SŁOWA KLUCZOWE:** synteza strukturalna, symulacja dynamiczna, ruchliwość mechanizmu, metoda łańcucha pośredniczącego

*The use of structural synthesis of mechanisms for dynamic simulation in Autodesk Inventor is presented. The stages of preparation for dynamic simulation (in particular the creation of connections between links) and the method of an intermediate chain enabling the creation of complete sets of structural solutions are presented. The procedure is illustrated by two examples.*

**KEYWORDS:** structural synthesis, dynamic simulation, mobility of the mechanism, intermediate chain method

Początkowym etapem projektowania mechanizmów stanowiących zespoły i podzespoły maszyn jest właściwe dobranie ich schematów strukturalnych. W wielu przypadkach modyfikacja konstrukcyjna istniejących układów kinematycznych lub rozwiązanie oparte na przypadkowym pomysśle mogą prowadzić do zastosowania nieracjonalnych rozwiązań. Projektant powinien dysponować pełnym zestawem teoretycznie możliwych schematów strukturalnych, ponieważ to warunkuje wybór najkorzystniejszego układu kinematycznego [3].

W publikacji [1] przedstawiono syntezy strukturalną i klasyfikację manipulatorów równoległych. Zaprezentowano metody tworzenia rozwiązań strukturalnych z jedną lub wieloma platformami oraz dokonano ich klasyfikacji według typu platform i połączeń. W pracy [2] przedstawiono metodę strukturalnej syntezy płaskich lub przestrzennych mechanizmów równoległych. Umożliwia ona tworzenie schematów strukturalnych, a efektem końcowym jest kompletny zestaw możliwych rozwiązań przestrzennego mechanizmu równoległego dla wymaganej ruchliwości. Praca [3] stanowi przegląd zagadnień z zakresu struktury układów mechanicznych. Autorzy omówili metody tworzenia zbiorów możliwych rozwiązań układów kinematycznych oraz zaprezentowali katalog wybranych typów mechanizmów, uszeregowanych według rodzaju

ogniwa czynnego i biernego. W pracy [4] przedstawiono metodykę projektowania manipulatorów równoległych. Przeprowadzono syntezy strukturalną łańcuchów kinematycznych o sześciu stopniach swobody, tworząc łańcuch ogólny, który można rekonfigurować w celu uzyskania dodatkowych rozwiązań.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie sposobu wykorzystania metody łańcucha pośredniczącego w module *Symulacja dynamiczna* programu Autodesk Inventor.

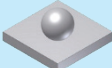
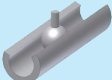
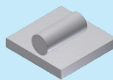
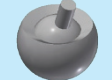
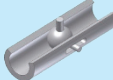
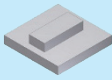

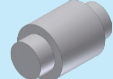
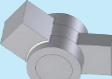
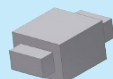
### Moduł symulacji dynamicznej programu Autodesk Inventor

Pierwszym etapem symulacji dynamicznej w programie Autodesk Inventor jest przygotowanie modelu 3D do analizy. Polega to na rozdzieleniu elementów mechanizmu na ogniwa stałe i ruchome oraz utworzeniu grup spojonych, czyli połączeń elementów, które poruszają się razem. Kolejnym krokiem jest zdefiniowanie typów wiązań pomiędzy ogniwami analizowanego mechanizmu.

W module symulacji dynamicznej programu Autodesk Inventor wiązania są podzielone na: standardowe, toczne, przesuwne, kontaktowe 2D oraz siłowe. Większość połączeń standardowych ma odpowiedniki w klasyfikacji par kinematycznych i można je tworzyć z wykorzystaniem automatycznej konwersji wiązań zespołów. Pozostałe rodzaje połączeń tworzy się tylko ręcznie.

Klasyfikację par kinematycznych przedstawiono w tabl. I [6], a w tabl. II [7] – połączenia standardowe, występujące w module *Symulacja dynamiczna*.

**TABLICA I. Klasyfikacja par kinematycznych [6]**

Klasa	Postać 1	Postać 2	Postać 3
I			
II			
III			
IV			
V			

\* Dr hab. inż. Marek Boryga (marek.boryga@up.lublin.pl), dr inż. Paweł Kołodziej (pawel.kolodziej@up.lublin.pl) – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

TABLICA II. Połączenia standardowe modułu *Symulacja dynamiczna* [7]

Nazwa połączenia	Symbol połączenia	Odpowiednik w tabl. I	Opis
przestrzenne		nie jest parą kinematyczną	obrót wokół osi x, y i z przesunięcie wzdłuż osi x, y i z
punkt–płaszczyzna		klasa I postać 1	obrót wokół osi x, y i z przesunięcie wzdłuż osi x i z
punkt–linia		klasa II postać 1	obrót wokół osi x, y i z przesunięcie wzdłuż osi z
linia–płaszczyzna		klasa II postać 2	obrót wokół osi y i z przesunięcie wzdłuż osi x i z
kuliste		klasa III postać 1	obrót wokół osi x, y i z
plaskie		klasa III postać 3	obrót wokół osi y przesunięcie wzdłuż osi x i z
walcowe		klasa IV postać 2	obrót wokół osi z przesunięcie wzdłuż osi z
obrotowe		klasa V postać 1	obrót wokół osi z
pryzmatyczne		klasa V postać 2	przesunięcie wzdłuż osi z
spoina		nie jest parą kinematyczną	brak przesunięcia i obrotu

### Synteza mechanizmu – metoda łańcucha pośredniczącego

W każdym mechanizmie (rys. 1) można wyróżnić podstawę  $O$ , człon czynny  $C$ , człon bierny  $B$  i łańcuch ogniw pośredniczących  $U$  [3]. Ruchliwość  $W$  mechanizmu można obliczyć z zależności:

$$W = W_C + W_U + W_B \quad (1)$$

gdzie:  $W_C$  – ruchliwość ogniwa czynnego,  $W_U$  – ruchliwość łańcucha pośredniczącego,  $W_B$  – ruchliwość członu biernego.

Gdy znana jest liczba stopni swobody  $W$ ,  $W_C$  i  $W_B$ , można obliczyć ruchliwość łańcucha pośredniczącego:

$$W_U = W - W_C - W_B \quad (2)$$

Ruchliwość  $W$  płaskiego łańcucha kinematycznego wynosi:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 \quad (3)$$

gdzie:  $n$  – liczba ogniw ruchomych,  $p_5$  – liczba par kinematycznych klasy V,  $p_4$  – liczba par kinematycznych klasy IV.

Z kolei ruchliwość mechanizmu przestrzennego określa się ze wzoru:

$$W = 6 \cdot n - \sum_{i=1}^5 i \cdot p_i \quad (4)$$

gdzie:  $i$  – klasa pary kinematycznej,  $p_i$  – liczba par kinematycznych klasy  $i$ .

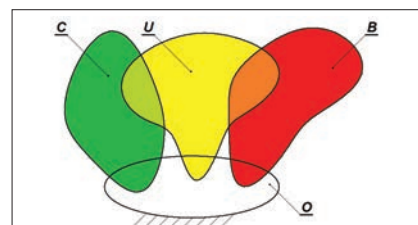
Wykorzystując zależności (3) lub (4) na ruchliwość mechanizmu, dla ruchliwości łańcucha pośredniczącego, wyznaczonej z równania (2), otrzymuje się formułę, która dla mechanizmów płaskich przyjmuje postać (5), a dla mechanizmów przestrzennych – postać (6):

$$3 \cdot n - W_U = 2 \cdot p_5 + p_4 \quad (5)$$

$$6 \cdot n - W_U = \sum_{i=1}^5 i \cdot p_i \quad (6)$$

Liczby  $n$  oraz  $p_i$  są liczbami naturalnymi, zatem równania (5) i (6) umożliwiają wyznaczenie określonej ilości wariantów rozwiązań strukturalnych łańcucha pośredniczącego  $U$  [3].

Rys. 1. Idea budowy mechanizmu z łańcuchem pośredniczącym ( $O$  – podstawa,  $C$  – człon czynny,  $B$  – człon bierny,  $U$  – łańcuch ogniw pośredniczących) [3]



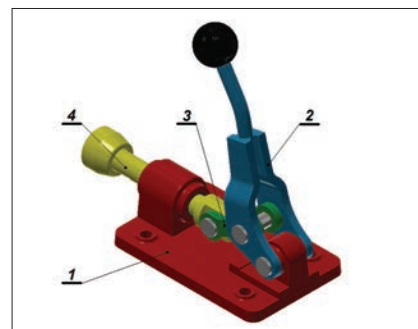
### Mechanizm płaski – dociskacz suwakowy

Na rys. 2 przedstawiono model 3D dociskacza suwakowego.

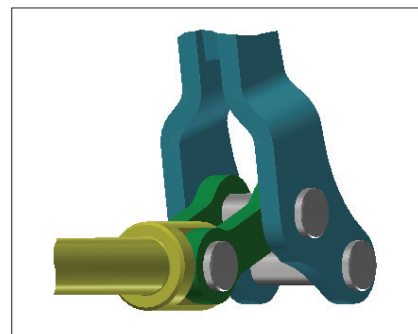
W module symulacji dynamicznej utworzono jedno połączenie pryzmatyczne (podstawa–suwak) oraz trzy połączenia obrotowe (podstawa–dźwignia, dźwignia–łącznik, łącznik–suwak). Ruchliwość obliczona z zależności (3) wynosi  $W = 1$ .

Na rys. 3. przedstawiono model 3D łańcucha pośredniczącego zastosowanego w rozwiązaniu pierwotnym.

Rys. 2. Model 3D dociskacza suwakowego (1 – podstawa, 2 – dźwignia, 3 – łącznik, 4 – suwak)



Rys. 3. Model 3D łańcucha pośredniczącego dociskacza suwakowego dla rozwiązania pierwotnego



Po wstawieniu ostatniego połączenia pojawia się komunikat o nadmiernym związaniu mechanizmu (o trzy stopnie swobody). Wynika to z faktu, że w module symulacji dynamicznej wszystkie mechanizmy traktowane są jako przestrzenne. Gdy znana jest rzeczywista ruchliwość mechanizmu  $W'$ , można obliczyć liczbę więzów biernych  $r$ :

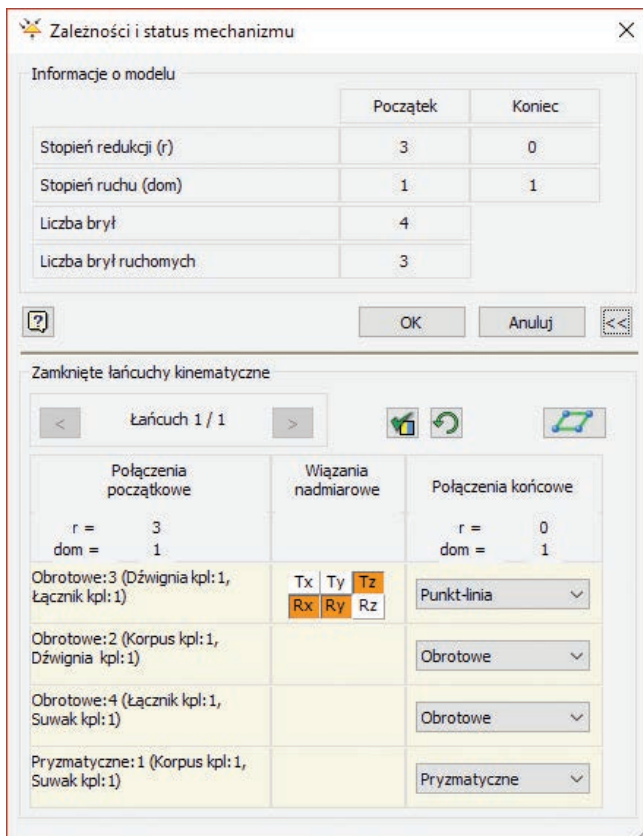
$$r = W' - W \quad (7)$$

W analizowanym mechanizmie ruchliwość obliczona z zależności (4) wynosi  $W = -2$ , rzeczywista ruchliwość  $W' = 1$ , a liczba więzów biernych wynosi  $r = 3$ .

W module symulacji dynamicznej liczba więzów biernych została nazwana stopniem redukcji, natomiast rzeczywista ruchliwość – stopniem ruchu.

Program na bieżąco sprawdza status połączeń i informuje użytkownika o połączeniach nadmiarowych. Po kliknięciu ikony *Status mechanizmu* i rozwinięciu okna widoczna jest propozycja zamiany pary obrotowej dźwignia–łącznik na parę punkt–linia (rys. 4). Taka zamiana eliminuje więzy bierne. Ruchliwość obliczona ze wzoru (4) wynosi wtedy  $W = 1$  ( $n = 3, p_5 = 3, p_2 = 1, p_4 = p_3 = p_1 = 0$ ), a liczba więzów biernych  $r = 0$ .

Wykorzystując metodę łańcucha pośredniczącego, w równaniu (2) należy podstawić  $W = 1, W_C = 1$  oraz  $W_B = 1$ . Obliczona wymagana ruchliwość łańcucha pośredniczącego wynosi  $W_U = -1$ . Po wprowadzeniu ograniczenia  $n = 1$  i  $p_1 = 0$  oraz wstawieniu do równania (6)  $W_U = -1$  uzyskuje się rozwiązania podane w tabl. III.

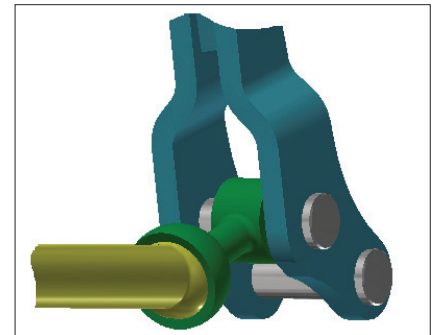


Rys. 4. Okno *Zależności i status mechanizmu* dla rozwiązania pierwotnego

TABLICA III. Warianty rozwiązania łańcucha pośredniczącego dociskacza suwakowego

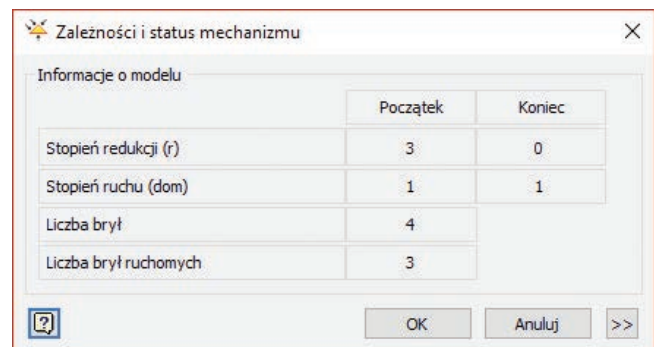
Lp.	$n$	$p_5$	$p_4$	$p_3$	$p_2$
1	1	1	0	0	1
2		0	1	1	0
3		0	0	1	2

Zasugerowana przez program zamiana pary obrotowej dźwignia–łącznik na parę punkt–linia jest w tabl. III oznaczona numerem 1. Jako racjonalne wybrano rozwiązanie oznaczone numerem 2 – jego model 3D przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Model 3D łańcucha pośredniczącego dociskacza suwakowego dla wybranego rozwiązania

Po wstawieniu w module symulacji dynamicznej połączenia obrotowego (podstawa–dźwignia), walcowego (dźwignia–łącznik), kulistego (łącznik–suwak) i pryzmatycznego (podstawa–suwak) oraz po kliknięciu ikony *Status mechanizmu* pojawia się okno przedstawione na rys. 6.



Rys. 6. Okno *Zależności i status mechanizmu* dla dociskacza z łańcuchem pośredniczącym przedstawionym na rys. 5

Zaproponowane rozwiązanie jest mechanizmem pozbawionym więzów biernych. Takie mechanizmy cechuje [6]:

- niewrażliwość na błędy wykonania,
- łatwość montażu i naprawy,
- częściowa lub całkowita eliminacja docierania.

### Mechanizm przestrzenny – manipulator równoległy

Metodę łańcucha pośredniczącego można też wykorzystać do projektowania manipulatora równoległego. Wtedy w równaniu (2) należy podstawić  $W = 3, W_C = 0$  i  $W_B = 6$ . Przy założeniu, że łańcuch pośredniczący będzie się składał z trzech jednakowych łańcuchów ( $W_U = 3W_L$ ), można obliczyć ruchliwość pojedynczego łańcucha:

$$W_L = \frac{W - W_C - W_B}{3} = -1 \quad (8)$$

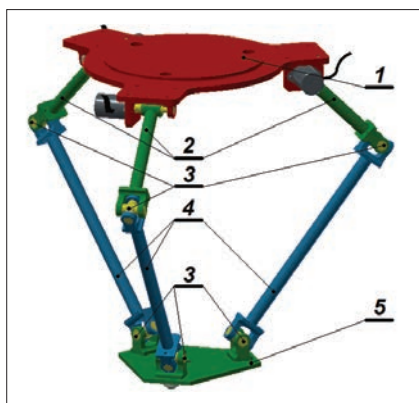
Po skorzystaniu z zależności (6) i wprowadzeniu ograniczeń  $n \leq 3, p_1 = 0, p_2 = 0$  otrzymuje się osiem możliwych rozwiązań łańcucha pośredniczącego przedstawionych w tabl. IV.

Na rys. 7 przedstawiono wybrany model 3D manipulatora równoległego. Jego podstawę stanowi nieruchoma płyta 1 z elementami łożyskowania oraz silnikami napędzającymi ogniwa czynne 2. Przeguby Cardana 3 łączą człony 2 z ogniwami biernymi 4 oraz człony 4 z platformą roboczą 5.

Rozwiązanie przedstawione na rys. 7 (gdy przegub Cardana potraktuje się jako łańcuchową parę kinematyczną klasy IV [5]) w tabl. IV oznaczono numerem 6.

**TABLICA IV. Warianty rozwiązania łańcucha pośredniczącego manipulatora równoległego**

Lp.	$n$	$\rho_5$	$\rho_4$	$\rho_3$
1	3	3	1	0
2		2	0	3
3		1	2	2
4		0	4	1
5	2	2	0	1
6		1	2	0
7		0	1	3
8	1	0	1	1



Rys. 7. Model 3D manipulatora równoległego (1 – nieruchoma płyta stanowiąca podstawę manipulatora, 2 – ogniwa czynne, 3 – przeguby Cardana, 4 – ogniwa bierne, 5 – platforma robocza)

## Podsumowanie

Zastosowanie metody łańcucha pośredniczącego pozwala na dobór racjonalnych rozwiązań strukturalnych łańcuchów kinematycznych spośród wszystkich możliwych konfiguracji par kinematycznych, tworzących mechanizmy robocze maszyn i urządzeń. Połączenie klasyfikacji par kinematycznych i wyznaczania ruchliwości mechanizmu z elementami modułu *Symulacja dynamiczna* programu Autodesk Inventor wyjaśnia i precyzuje zastosowanie proponowanych wariantów rozwiązań strukturalnych. Ponadto zwiększa możliwości tworzenia i ułatwia prawidłowy dobór konfiguracji par kinematycznych o określonych klasach – zarówno dla mechanizmów płaskich, jak i przestrzennych. W procesie projektowania elementów oraz zespołów maszyn i mechanizmów stanowi skuteczne narzędzie wspomagające pracę konstruktora.

## LITERATURA

1. Alizade R., Bayram C. "Structural synthesis of parallel manipulators". *Mechanism and Machine Theory*. 39, 8 (2004): s. 857–870.
2. Bałchanowski J. "General method of structural synthesis of parallel mechanisms". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 16, 3 (2016): s. 256–268.
3. Gronowicz A., Miller S. „*Mechanizmy. Metody tworzenia zbiorów rozwiązań alternatywnych. Katalog schematów strukturalnych i kinematycznych*”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
4. Ibarreche J.I., Hernández A., Petuya V., Urizar M., Macho E. "Multioperation capacity of parallel manipulators basing on generic kinematic chain approach". *Mechanism and Machine Theory*. 116, 8 (2017): s. 234–870.
5. Miller S. „*Układy kinematyczne. Podstawy projektowania*”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1988.
6. Olędzki A. „*Podstawy teorii maszyn i mechanizmów*”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1987.
7. Stasiak F. „*Zbiór ćwiczeń Autodesk Inventor 2018. Kurs Professional*”. ExpertBooks, 2018. ■