



Politechnika Lubelska

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki

Teoria maszyn i mechanizmów (TMM)

Wykład 1

Podstawowe pojęcia i analiza strukturalna
Mechanizmy dźwigniowe

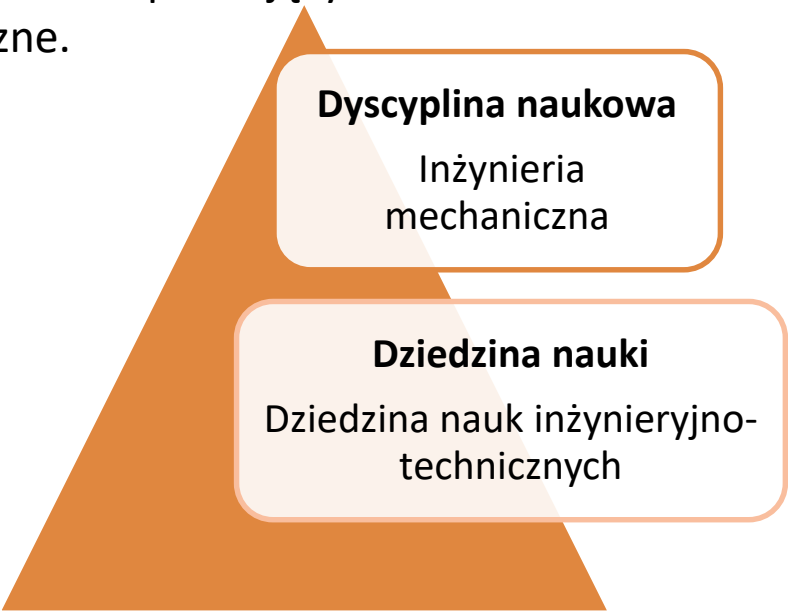
Podstawowe terminy i definicje

Teoria maszyn i mechanizmów stanowi wybrany obszar wiedzy z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych (patrz poniższy rys.). Wyróżnia się dwa podstawowe zadania stawiane TMM - analizę i syntezę. W **analizie** głównymi problemami, jakie należy rozwiązać są:

- badanie struktury,
- analiza kinematyczna,
- analiza dynamiczna.

Natomiast wśród celów **syntezy** wyróżnia się:

- poszukiwanie struktury mechanizmów dla zadanych wymagań,
- poszukiwanie właściwości mechanizmów spełniających stawiane im wymagania kinematyczne lub dynamiczne.



Dyscyplina naukowa

Inżynieria
mechaniczna

Dziedzina nauki

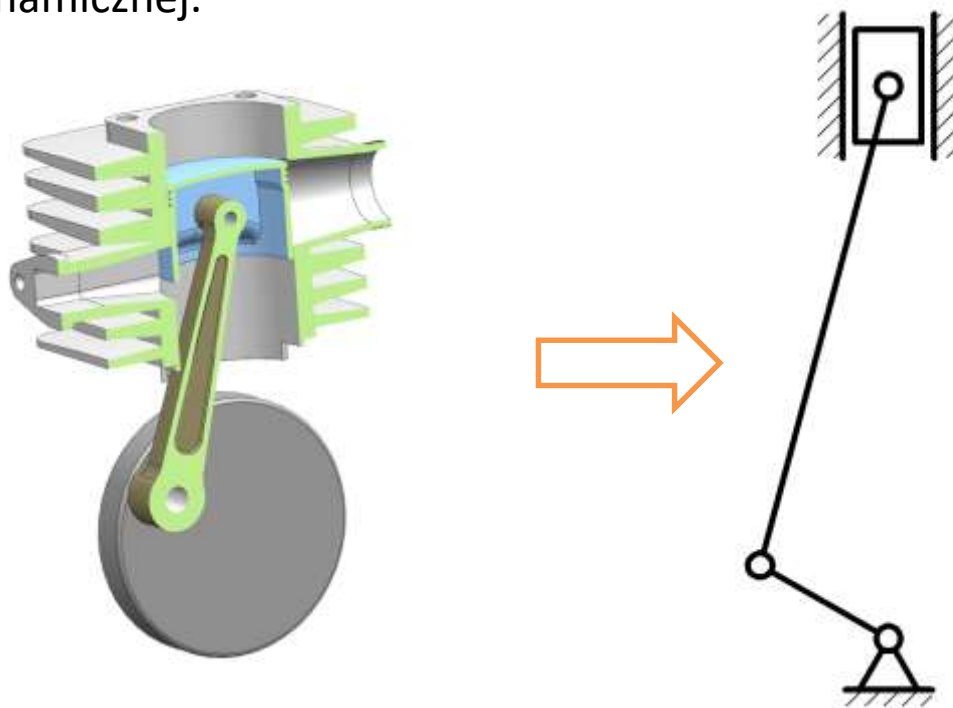
Dziedzina nauk inżynieryjno-
technicznych

Podstawowe terminy i definicje

W **analizie** głównymi problemami, jakie należy rozwiązać są:

- badanie struktury,
- analiza kinematyczna,
- analiza dynamiczna.

Badanie struktury maszyn i mechanizmów ma na celu ich klasyfikację i określenie ruchliwości. Wykonany schemat kinematyczny jest wykorzystywany w analizie kinematycznej i dynamicznej.

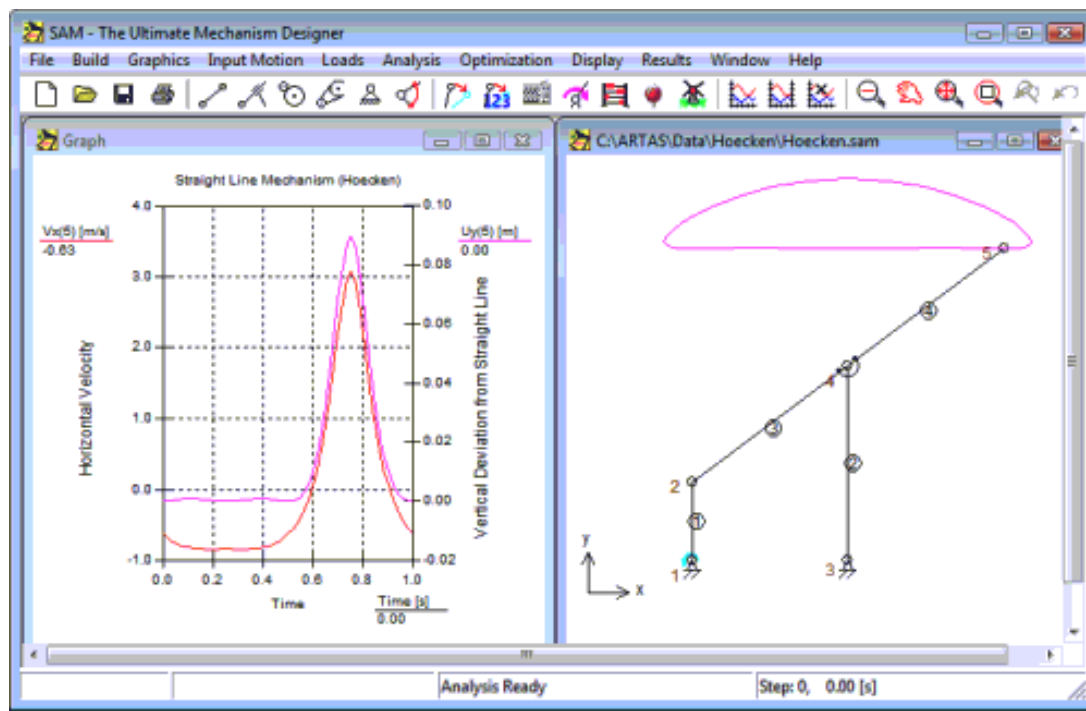


Podstawowe terminy i definicje

W **analizie** głównymi problemami, jakie należy rozwiązać są:

- badanie struktury,
- analiza kinematyczna,
- analiza dynamiczna.

Analiza kinematyczna ma na celu analizę ruchu poprzez wyznaczenie przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia elementów mechanizmu, z pominięciem wpływu masy członów i działających sił.



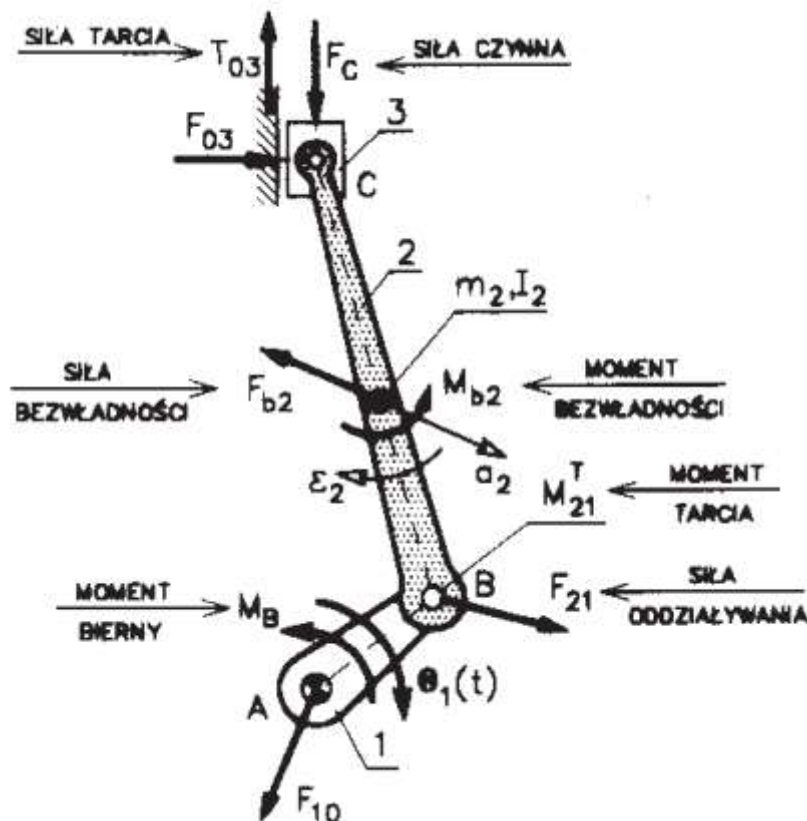
Rys. Program SAM (Synthesis and Analysis of Mechanisms)
[<https://www.artas.nl/en/>]

Podstawowe terminy i definicje

W **analizie** głównymi problemami, jakie należy rozwiązać są:

- badanie struktury,
- analiza kinematyczna,
- analiza dynamiczna.

Analiza dynamiczna zajmuje się badaniem mechanizmów z uwzględnieniem sił działających na nie. Wykorzystywane są wyniki z analizy kinematycznej.



Podstawowe terminy i definicje

Natomiast wśród celów **syntezy** wyróżnia się:

- poszukiwanie struktury mechanizmów dla zadanych wymagań,
- poszukiwanie właściwości mechanizmów spełniających stawiane im wymagania kinematyczne lub dynamiczne.

Tab. Możliwe warianty łańcucha kinematycznego [Szrek 2008]

Liczba elementów k	liczba par I klasy p_1	liczba par II klasy p_2	symbol $U_i (k \ p_1 \ p_2)$
0	0	1	0 0 1
1	2	0	1 2 0
2	3	1	2 3 1
3	5	0	3 5 0

Tab. Podstawowe schematy strukturalne [Szrek 2008]

Łańcuch podstawowy U	Schematy strukturalne	
001		
120		
231A	1	2
231B	1	2
231C	1	2
231D	1	2
231E		

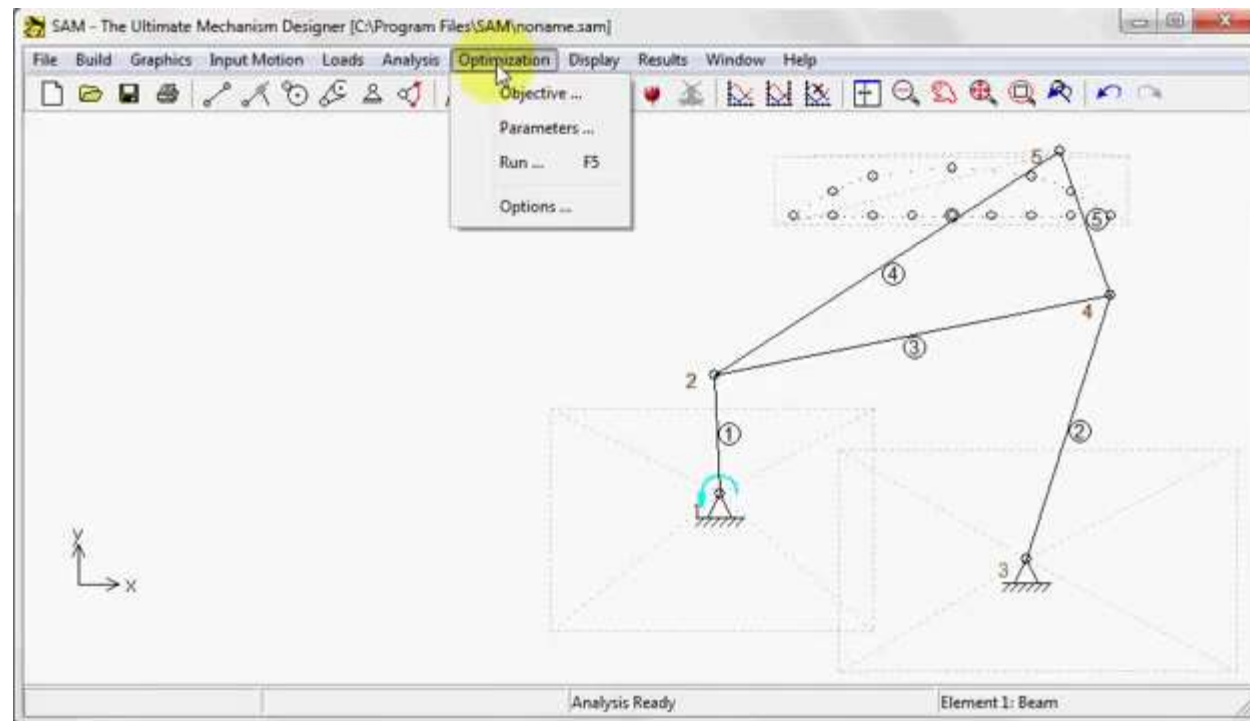
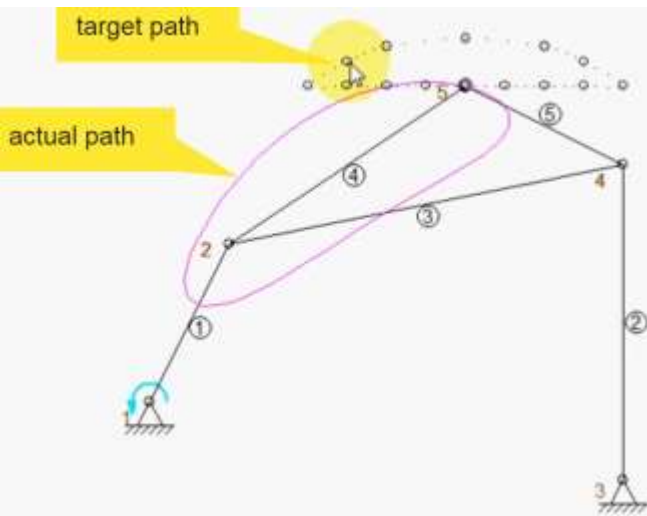
Tab. Wybrane schematy kinematyczne [Szrek 2008]

A	J					
001						
AB	RR	RT	TR	TT		
120						
ABCD	JRRR	JRRT	JRTR	JTRR		
231A2						
ABCD	RRRJ	RRTJ	RTRJ	TRRJ		
231C1						

Podstawowe terminy i definicje

Natomiast wśród celów **syntezy** wyróżnia się:

- poszukiwanie struktury mechanizmów,
- poszukiwanie właściwości mechanizmów spełniających stawiane im wymagania kinematyczne lub dynamiczne.



Rys. Program SAM [Artas]

Podstawowe terminy i definicje

Mechanizm

1. Wybrane definicje odrzucające manipulatory jako mechanizmy:

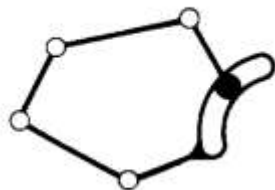
- Franz Reuleaux (1829-1905) – „assemblage of resistant bodies, connected by movable joints, to form a closed kinematic chain with one link fixed and having the purpose of transforming motion” [Uicker 2011].
- Miller S. – *„zamknięty łańcuch kinematyczny z jednym członem spełniającym funkcję podstawy, charakteryzujący się liczbą członów czynnych równą jego ruchliwości”*.

Łańcuch kinematyczny zamknięty to szereg członów połączonych ze sobą ruchowo tak, że każdy z nich tworzy parę przynajmniej z dwoma członami.

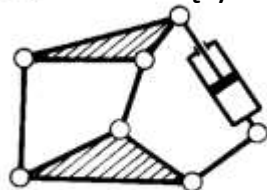
a) Otwarty



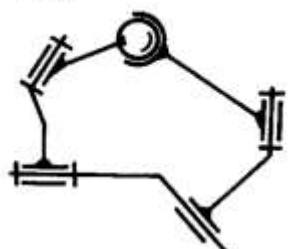
b) Zamknięty



c) Zamknięty



d) Zamknięty



Rys. Łańcuchy kinematyczne
[Miller 1989]

Podstawowe terminy i definicje

Mechanizm

2. Wybrane definicje traktujące manipulatory jako mechanizmy:

- Felis, Jaworowski, Cieřlik – „to łańcuch kinematyczny wykonujący ściřle określony ruch”.

„**łańcuch kinematyczny** jest to układ członów połączonych w pary kinematyczne” z jednym członem nieruchomym.

- Wawrzecki J. – „jest to układ połączonych ze sobą ciał (ogniw) o ściřle określonym ruchu względnym, którego zadaniem jest przeniesienie ruchu”.

Występują jeszcze definicje odrzucające twory naturalne jako mechanizmy.

Mechanizm przestrzenny

Každy rzeczywisty mechanizm jest mechanizmem przestrzennym. Wyodrębnia się z tej grupy mechanizmy płaskie w celu łatwiejszej analizy kinematycznej i częściowo strukturalnej i dynamicznej.

Mechanizm płaski to taki, w którym punkty wszystkich członów poruszają się w płaszczyznach wzajemnie równoległych do pewnej nieruchomej płaszczyzny.

Podstawowe terminy i definicje

Maszyna

- Franz Reuleaux (1829-1905) – „combination of resistant bodies so arranged that by their means the mechanical forces of nature can be compelled to do work accompanied by certain determinate motions” [Uicker 2011].
- Felis, Jaworowski, Cieślik – „to zespół mechanizmów wykonujących żadaną pracę związaną z procesami technologicznymi lub przemianą energii”.
- Miller S. – to *„urządzenie, w którym z udziałem ruchu mechanicznego zachodzi proces energetyczny polegający na wykonywaniu pracy użytecznej lub przekształcaniu energii”*.
- „zespół wyposażony lub który można wyposażyć w mechanizm napędowy inny niż bezpośrednio wykorzystujący siłę mięśni ludzkich lub zwierzęcych, składający się ze sprzężonych części lub elementów, z których przynajmniej jedna jest ruchoma, połączonych w całość mającą konkretne zastosowanie” [1228, ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn].

Jak jest różnica między maszyną a mechanizmem?

Podstawowe terminy i definicje

Układ sztywny – są to połączone ciała sztywne, które nie posiadają możliwości ruchu względnego i przeznaczone są do przenoszenia obciążeń.



Czy jest to obszar zainteresowań TMM?

Rys. Rama samochodu

[<https://mechanics.stackexchange.com/tags/frame/info>]



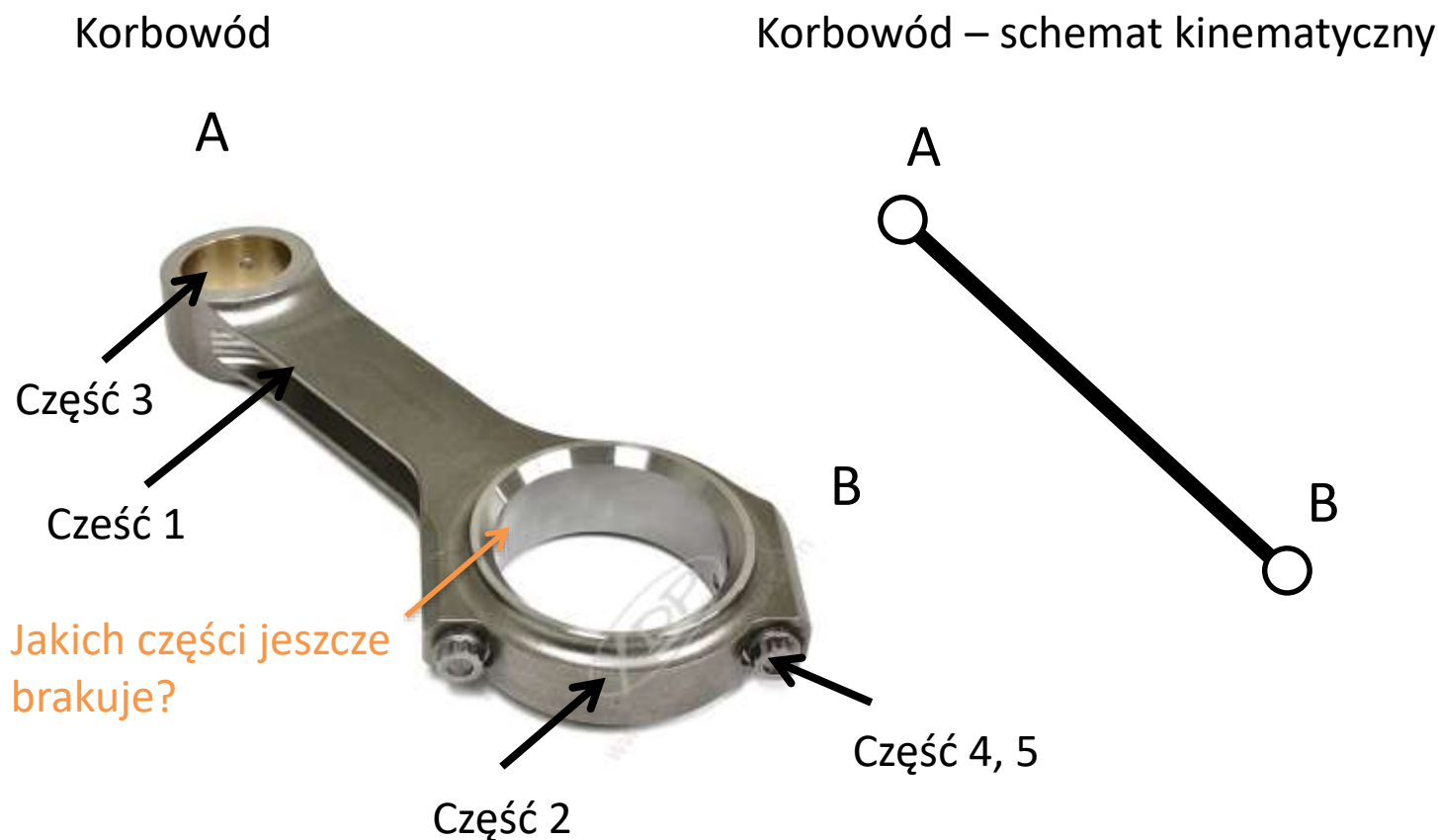
Rys. Most

[qctimes.com/traffic/photos-new-i--bridge/collection_6fedb8c6-c1ae-11e3-a1b9-0019bb2963f4.html]

Podstawowe terminy i definicje

Człon (ogniwo):

jest to element lub sztywno połączone elementy, z których wykonany jest mechanizm lub maszyna, pośredniczący w przekazywaniu ruchu.



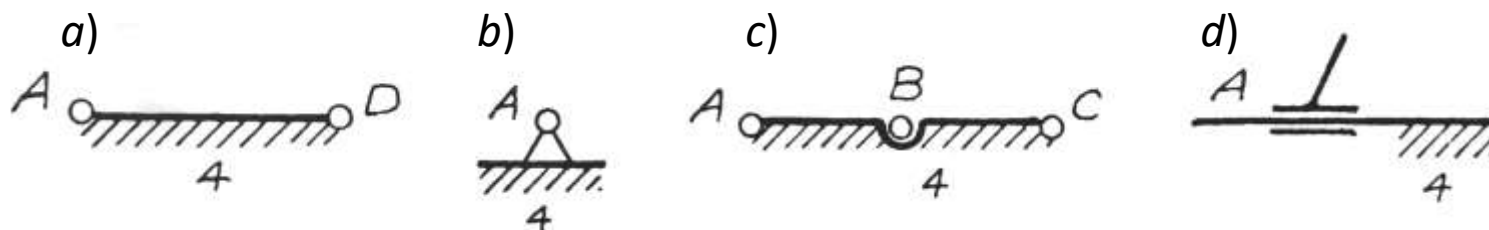
Rys. [<http://www.xtremediesel.com/Carrillo-Cummins-Pro-H-Connecting-Rod-with-H-11-Bolts.aspx>]

Podstawowe terminy i definicje

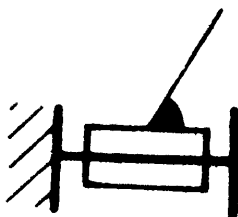
Rodzaje członów (ogniw)

1. Podział ze względu na ruch wykonywany względem przyjętego układu odniesienia:

- ruchome (np. wał, tłok, łącznik) – wykonujące ruch względem przyjętego układu odniesienia,
- nieruchome (np. podstawa, rama, korpus) – nie wykonujące ruchu względem przyjętego układu odniesienia.



Rys. Człon nieruchomy 4 wchodzący w skład pary obrotowej (a, b, c) i przesuwnej (d) [Młynarski 1997]



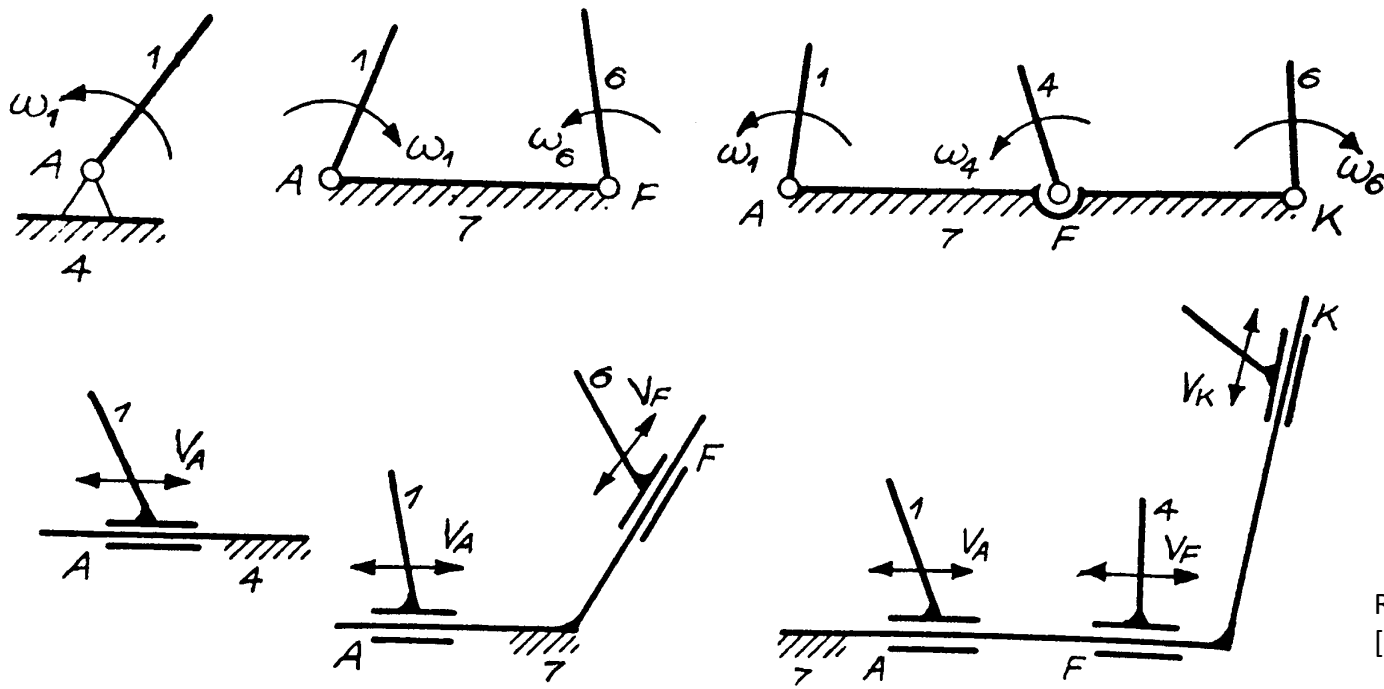
Rys. Człon nieruchomy wchodzący w skład pary obrotowej przestrzennej [Dobrzański 2002]

Podstawowe terminy i definicje

Rodzaje członów (ogniw)

2. Podział ze względu na spełnianą rolę:

- czynne (napędzające) – których ruch jest znany,
- bierne (napędzane),
- pośredniczące.



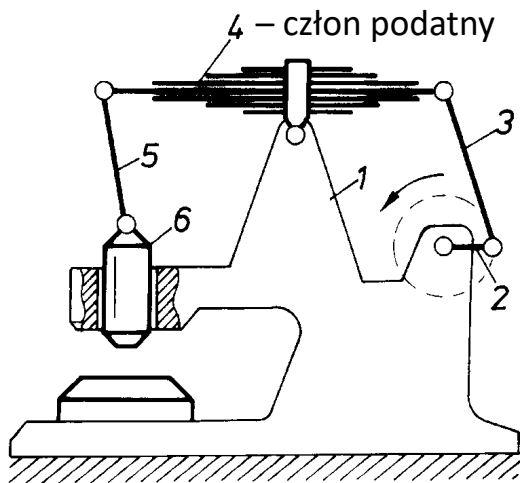
Rys. Człon czynny
[Młynarski 1997]

Podstawowe terminy i definicje

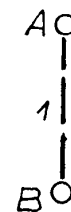
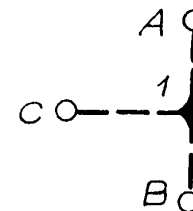
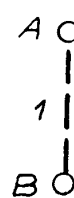
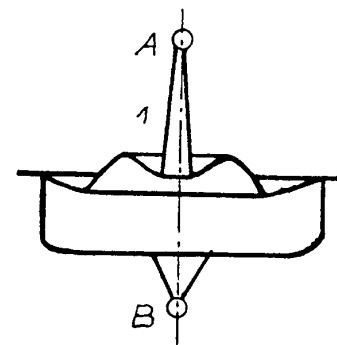
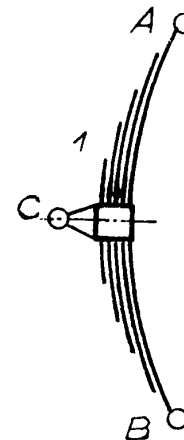
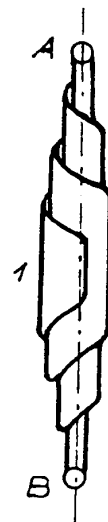
Rodzaje członów (ogniw)

3. Podział ze względu na podatność:

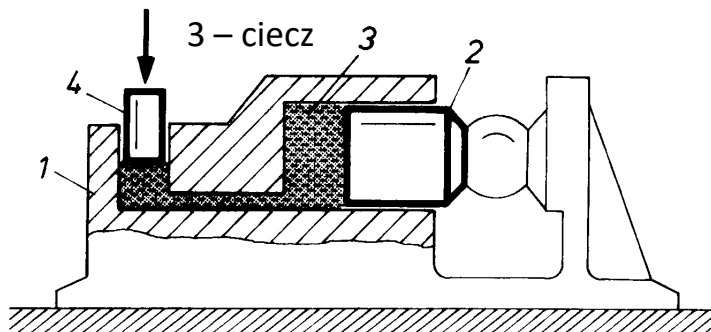
- sztywne – zakłada się, że są nieodkształcalne,
- podatne np. sprężyna,
- ciecze i gazy.



Rys. [Miller 1989]



Rys. Człon podatny
[Młynarski 1997]

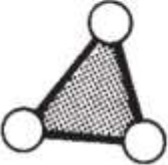
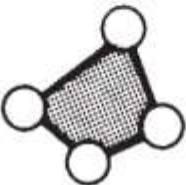
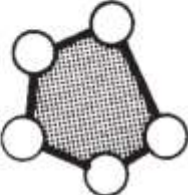
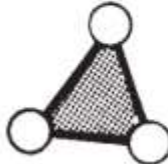
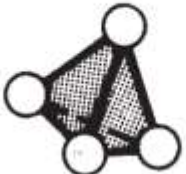
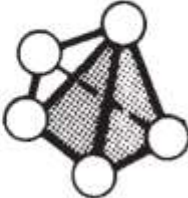


Rys. [Miller 1989]

Podstawowe terminy i definicje

Rodzaje członów (ogniw)

Człony łączą się w miejscu zwanym półparą lub półwęzłem, i w zależności od ilości miejsc połączeń wyróżnia się ogniwa 2, 3 i n węzłowe.

Typy członów		N_2	N_3	N_4	N_5
Graficzna postać członów wielowęzłowych	w układzie płaskim				
	w układzie przestrzennym				

Rys. [Miller 1989]

Podstawowe terminy i definicje

Para kinematyczna (węzeł kinematyczny) to miejsce ruchowego połączenia członów.

Klasyfikacja par kinematycznych może być przeprowadzona ze względu na:

1. Rodzaj ruchu między członami.
2. Typ kontaktu między członami.
3. Sposób zapewnienia stałego kontaktu między członami.
4. Liczbę połączonych członów.
5. Liczbę stopni swobody w ruchu względnym.

Podstawowe terminy i definicje

Klasyfikacja par kinematycznych ze względu na:

1. Rodzaj ruchu między członami:

- a) **Para obrotowa**. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie tylko ruch obrotowy. 1 stopień swobody.
- b) **Para przesuwna (postępowa)**. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie tylko ruch postępowy. 1 stopień swobody.
- c) **Para cylindryczna**. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie ruch obrotowy i niezależnie ruch postępowy. 2 stopnie swobody.
- d) **Para śrubowa**. Człony są połączone za pośrednictwem gwintu (np. śruba i nakrętka). Mogą wykonywać względem siebie ruch obrotowy i jednocześnie znany ruch prostoliniowy. 1 stopień swobody.
- e) **Para sferyczna (kulista)**. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie tylko trzy ruchy obrotowe. 3 stopnie swobody.
- f) **Para płaska (płaszczyznowa)**. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie, na płaszczyźnie, ruchy postępowe w dwóch kierunkach oraz obrót wokół osi prostopadłej do tej płaszczyzny. Jest to rzadko spotykana para w mechanizmach i służy jako punkt podparcia. 3 stopnie swobody.

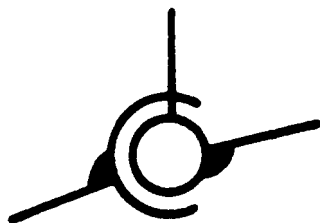
Podstawowe terminy i definicje

Klasyfikacja par kinematycznych ze względu na:

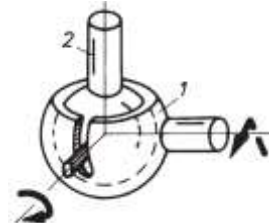
1. Rodzaj ruchu między członami:

Teoretycznie możliwe:

g) Para kulista z czopem. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie ruchy obrotowe względem dwóch osi. 2 stopnie swobody.

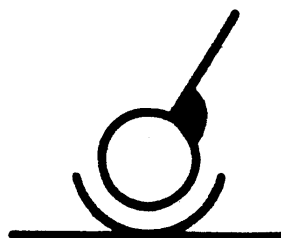


Rys. [Dobrzański 2002]



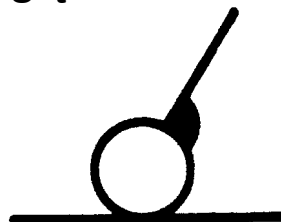
Rys. [Miller 1989]

h) Para kula-cylinder. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie ruch obrotowy względem trzech osi i ruch prostoliniowy względem jednej osi. 4 stopnie swobody.



Rys. [Dobrzański 2002]

i) Para kula płaszczyzna. Człony są połączone w taki sposób, że mogą wykonywać względem siebie ruch obrotowy względem trzech osi i ruch prostoliniowy względem dwóch osi. 5 stopni swobody.



Rys. [Dobrzański 2002]

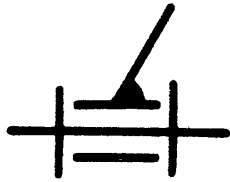
Podstawowe terminy i definicje

Oznaczenie schematyczne

a) Para obrotowa – I

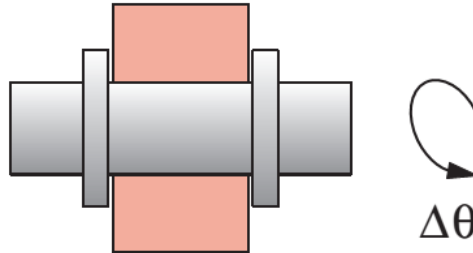


Rys. Płaska
[Dobrzański 2002]



Rys. Przestrzenna
[Dobrzański 2002]

Konstrukcja



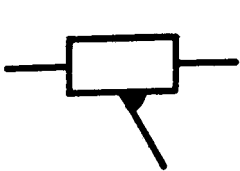
Rys. [Norton 1999]

Realizacja techniczna



Rys. [<http://airsklep.pl/pl/p/PRZEGUB-OBROTOWY-BEZ-DZWIGNI-30x30-B/181>]

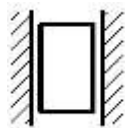
b) Para przesuwna (postępowa)- I



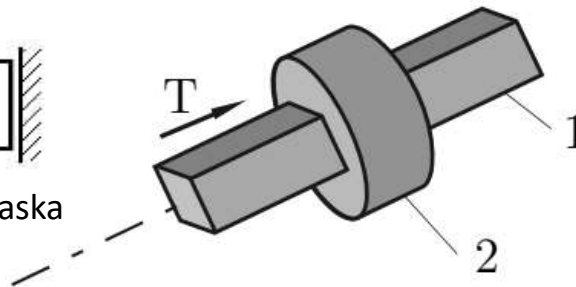
Rys. Płaska
[Dobrzański 2002]



Rys. Przestrzenna
[Dobrzański 2002]



Rys. Płaska



Rys. [Marghitu 2009]

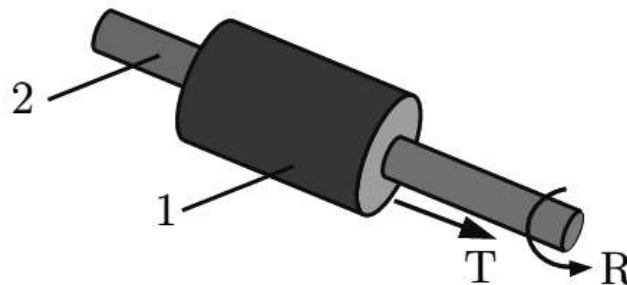


Rys. [<http://www.gg-powertransmission.com/splined-shafts-sleeves/standard/>]

c) Para cylindryczna - II



Rys. [Dobrzański 2002]



Rys. [Marghitu 2009]



Rys. [<http://www.practicalmachinist.com/vb/archive/index.php/t-274723.html>]

Podstawowe terminy i definicje

Oznaczenie schematyczne

d) Para śrubowa – I

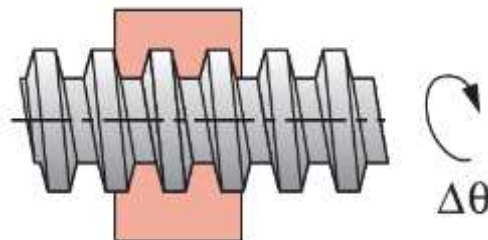


Rys. Wersja 1
[Dobrzański 2002]



Rys. Wersja 2
[Dobrzański 2002]

Konstrukcja



Rys. [Norton 1999]

Realizacja techniczna

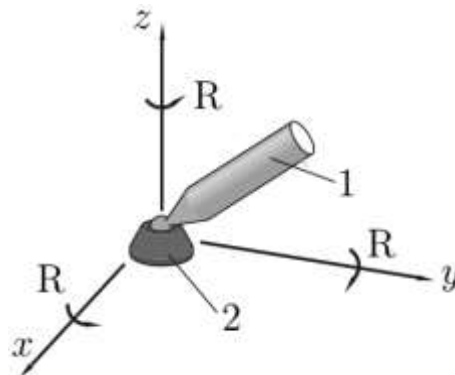


Rys. [<http://www.linearways.in/lead-screws-nuts.html>]

e) Para sferyczna (kulista) – III



Rys. [Dobrzański 2002]

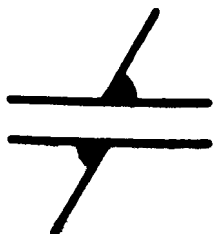


Rys. [Marghitu 2009]

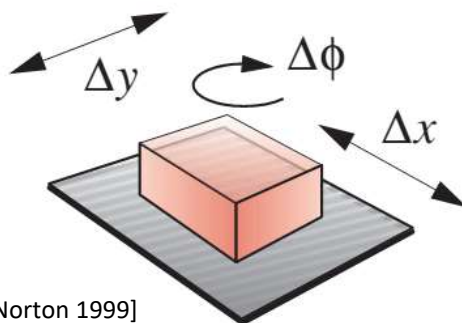


Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Ball_joint]

f) Para płaska (płaszczyznowa) – III



Rys. [Dobrzański 2002]



Rys. [Norton 1999]



Rys. [<http://sofy24.pl/sofy/162-kanapa-3-osobowa-rozkladana-dawid.html>]

Podstawowe terminy i definicje

2. Ze względu na rodzaj kontaktu między członami (*Reuleaux*):

a) *Pary niższe*. Człony mają kontakt powierzchniowy i w trakcie ruchu jedna powierzchnia ślizga się po drugiej. Przykłady par niższych (w realizacjach technicznych): obrotowa, przesuwna, śrubowa, cylindryczna, sferyczna, płaska.

b) *Pary wyższe*. Człony mają (teoretycznie) kontakt liniowy lub punktowy i w trakcie ruchu powierzchnie się ślizgają po sobie oraz dochodzi do ich toczenia. Przykłady par wyższych posiadających 2 stopnie swobody: zazębienie oraz krzywka i popychacz.



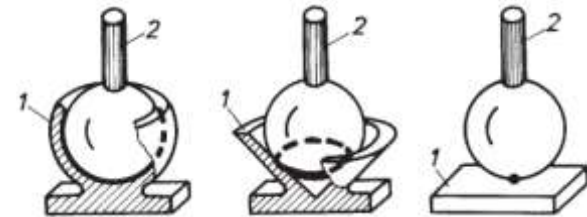
Rys. Koła zębate [<http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/gear2.htm>]



Rys. Liczba stopni swobody, schemat ideowy i symboliczne zazębienie [Gronowicz 2003]



Rys. Krzywka i popychacz
[<https://www.cgtrader.com/free-3d-models/industrial/part/cam-follower-mechanism-with-spring>]



Rys. Para sferyczna konstrukcja teoretyczna [Miller 1989]



Rys. Liczba stopni swobody i schemat ideowy krzywki i popychacza [Gronowicz 2003]

Podstawowe terminy i definicje

3. Sposób zapewnienia stałego kontaktu między członami :

- a) *Para zamknięta (samozwarta)* określana jest jako połączenie mechaniczne dwóch członów w taki sposób, aby występował tylko wymagany ruch względny. Wszystkie pary niższe należą do tej grupy.
- b) *Para otwarta (niesamozwarta)* wymaga działania dodatkowych sił zewnętrznych do zapewnienia ciągłego kontaktu członów. Stosowane są sprężyny, siła ciężkości itd. Przykładem jest przedstawiona na rysunku para krzywka – popychacz.



Rys. Para otwarta krzywka i popychacz

[<https://www.cgtrader.com/free-3d-models/industrial/part/cam-follower-mechanism-with-spring>]



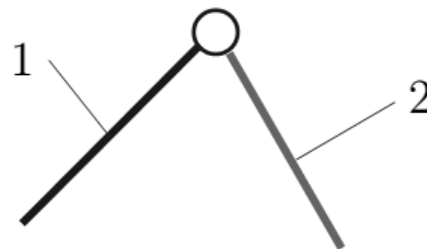
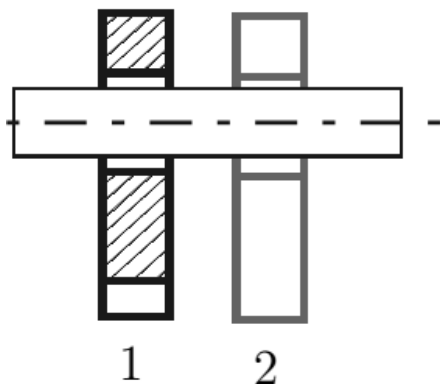
Rys. Para zamknięta sferyczna

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ball_joint]

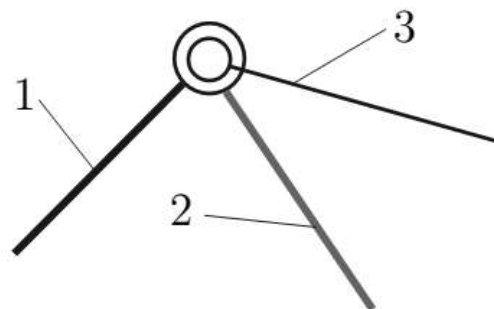
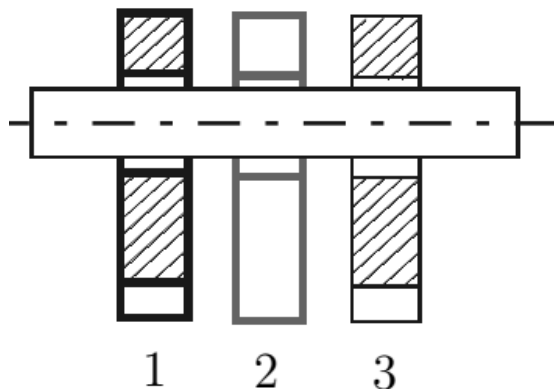
Podstawowe terminy i definicje

4. Liczbę członów w parze kinematycznej

Krotność pary jest określona jako liczba członów minus jeden. Połączenie ruchowe dwóch członów to para jednokrotna, trzech – dwukrotna itd.



Rys. Para jednokrotna
[Marghitu 2009]



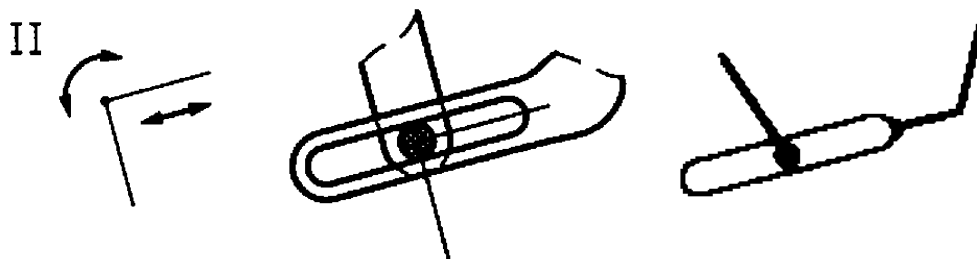
Rys. Para dwukrotna
[Marghitu 2009]

Podstawowe terminy i definicje

5. Liczbę stopni swobody w ruchu względnym

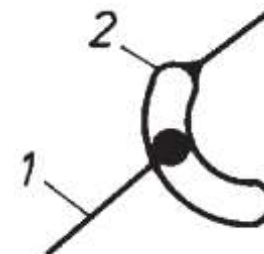
Jest to najbardziej rozpowszechniony podział par kinematycznych. **Klasę pary** określa się jako liczba pozostawionych* stopni swobody. Para obrotowa i przesuwna jest więc klasy *I*, cylindryczna klasy *II*, sferyczna klasy *III* itd.

W mechanizmach występują także pary jarzmowe posiadające dwa stopnie swobody nieprzedstawiane wcześniej.



Rys. Liczba stopni swobody, schemat ideowy i symboliczny pary jarzmowej
[Gronowicz 2003]

Odmianą tej pary jest para kulisowa z jarzmem krzywoliniowym.



Rys. [Miller 1989]

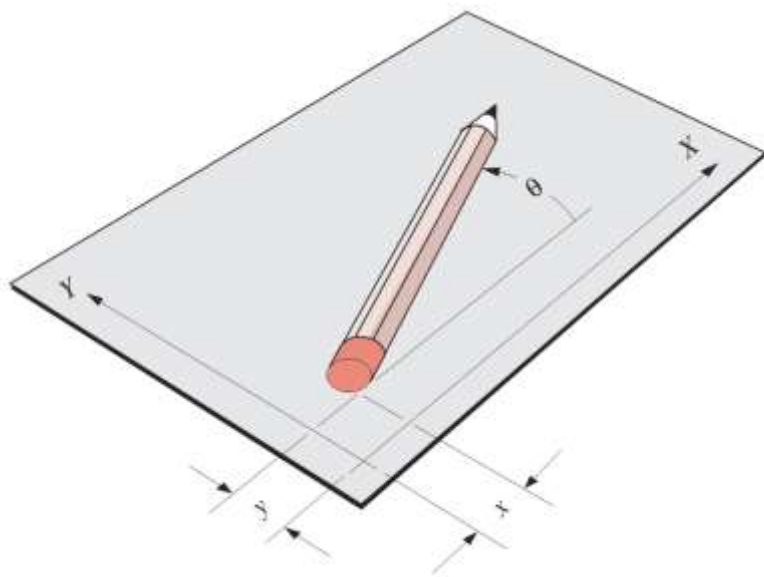
* Stosowane jest również inne podejście do określania klasy par kinematycznych. Liczba odebranych stopni swobody określa klasę pary, a więc para obrotowa jest klasy *V*.

Podstawowe terminy i definicje

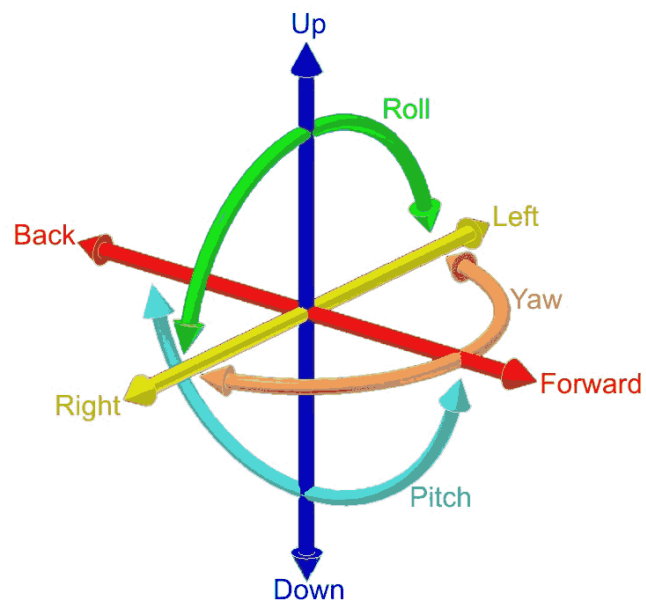
Liczba stopni swobody

Felis, Jaworowski, Cieřlik – „*Liczbę stopni swobody członu sztywnego (bryły sztywnej) nazywamy liczbę niezależnych współrzędnych uogólnionych określających jego położenie w przestrzeni względem wybranego układu współrzędnych*”.

Ruch członu swobodnego w przestrzeni można przedstawić jako trzy niezależne ruchy postępowe (względem X, Y, Z) i trzy ruchy obrotowe (względem X, Y, Z)



Rys. Człon sztywny w przestrzeni 2D (płaszczyzna) – 3 stopnie swobody [Norton 1999]



Rys. Człon sztywny w przestrzeni 3D – 6 stopni swobody [https://en.wikipedia.org/wiki/Six_degrees_of_freedom]

Podstawowe terminy i definicje

Ruchliwość mechanizmu

Jest to liczba stopni swobody jaką posiadają człony względem podstawy.

Inaczej ruchliwość mechanizmu może być określona jako liczba napędów, które należy zastosować, aby jego ruch był jednoznaczny.

Wzór na obliczanie ruchliwości mechanizmów płaskich, zwany kryterium Kutzbacha, jest następujący:

$$W = 3(n - 1) - 2 p_1 - p_2$$

W = ruchliwość,

n = liczba członów łącznie z podstawą,

p_1 = liczba par kinematycznych klasy *I*,

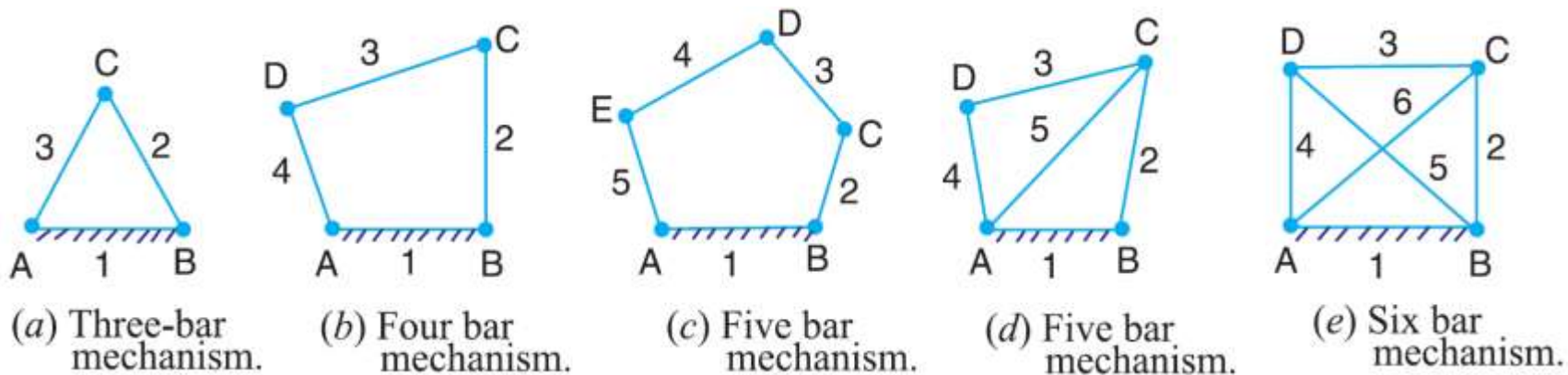
p_2 = liczba par kinematycznych klasy *II*.

a dla mechanizmów przestrzennych:

$$W = 6(n - 1) - 5 p_1 - 4 p_2 - 3 p_3 - 2 p_4 - p_5$$

Podstawowe terminy i definicje

Ruchliwość mechanizmów płaskich - przykłady



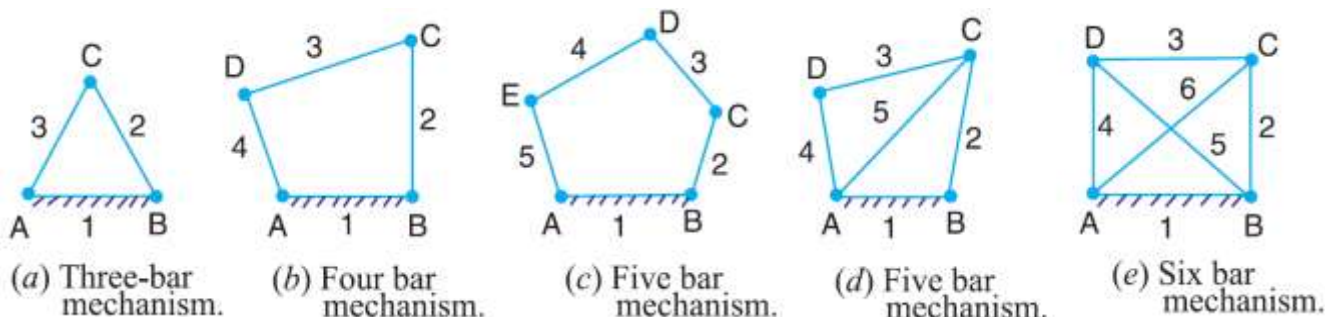
Rys. [Khurmi 2005]

Ruchliwość mechanizmów zbudowanych w oparciu o pary obrotowe:

- a) Mechanizm ma trzy człony i trzy pary kinematyczne klasy I tj. $n = 3$ and $p_1 = 3$
$$W = 3(3 - 1) - 2 \times 3 = 0$$
- b) Mechanizm ma cztery człony i cztery pary kinematyczne klasy I tj. $n = 4$ and $p_1 = 4$
$$W = 3(4 - 1) - 2 \times 4 = 1$$
- c) Mechanizm ma pięć członów i pięć par kinematycznych klasy I tj. $n = 5$ and $p_1 = 5$
$$W = 3(5 - 1) - 2 \times 5 = 2$$
- d) Mechanizm ma pięć członów i sześć par kinematycznych klasy I tj. (para kinematyczna A i C jest parą dwukrotną) $n = 5$ and $p_1 = 6$
$$W = 3(5 - 1) - 2 \times 6 = 0$$
- d) Mechanizm ma sześć członów i osiem par kinematycznych klasy I tj. $n = 6$ and $p_1 = 8$
$$W = 3(6 - 1) - 2 \times 8 = -1$$

Podstawowe terminy i definicje

Ruchliwość mechanizmów płaskich - przykłady



Rys. [Khurmi 2005]

Należy zauważyć, że:

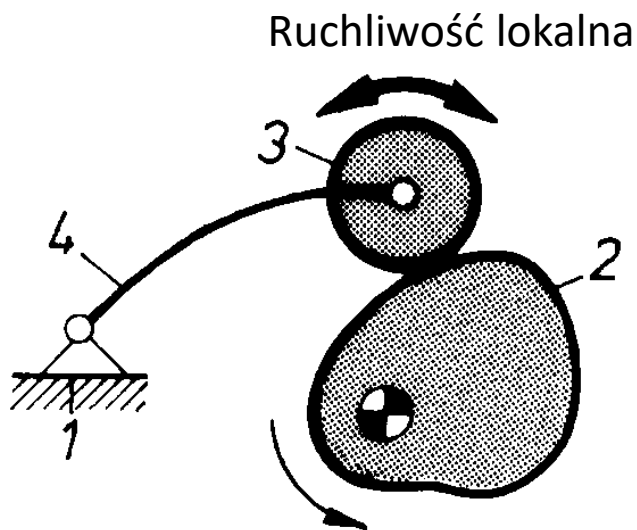
- Kiedy $W = 0$, to mechanizm tworzy układ sztywny i żaden ruch względny między członami nie jest możliwy, rys. *a* i *d*;
- Kiedy $W = 1$, to mechanizm może być napędzany jednym silnikiem, rys. *b*;
- Kiedy $W = 2$, to dwa niezależne źródła napędu są wymagane, aby zapewnić jednoznaczny ruch, rys. *c*;
- Kiedy $W = -1$ lub mniej, to występują niepotrzebne więzy i jest to układ sztywny statycznie niewyznaczalny, rys. *e*.

Podstawowe terminy i definicje

- $W \leq 0$ Mechanizm z zerową lub mniejszą ruchliwością określany jest jako mechanizm zablokowany i tworzy układ sztywny.
- $W > 1$ Mechanizm z ruchliwością większą niż jeden wymaga więcej niż jednego niezależnego źródła napędu. Generalnie taki mechanizm zapewnia dokładniejsze pozycjonowanie członów. Nie ma wymagania, aby projektowany mechanizm miał ruchliwość równą jeden, aczkolwiek upraszcza to sterowanie i jest stosowane w większości mechanizmów.

Podstawowe terminy i definicje

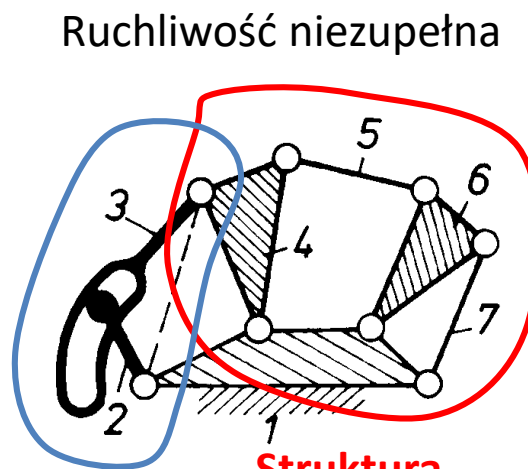
Równanie ruchliwości nie uwzględnia geometrii członów (wymiarów oraz kształtu) i kolejności połączeń, tylko ich liczbę i typy par kinematycznych jakie tworzą. Dlatego to równanie nie zawsze się sprawdza.



Rys. [Miller 1989]

$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

$$W_{\text{równanie}} = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 = 2$$



Mechanizm

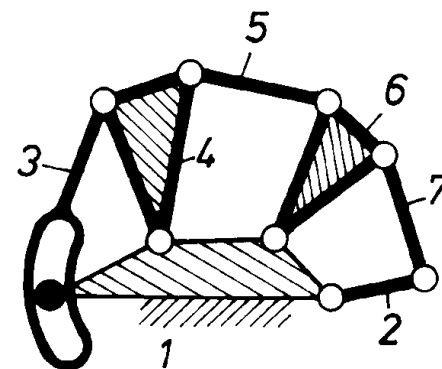
$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

Struktura

$$W_{\text{rzeczywiste}} = 0$$

$$W_{\text{równanie}} = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

Ruchliwość zupełna



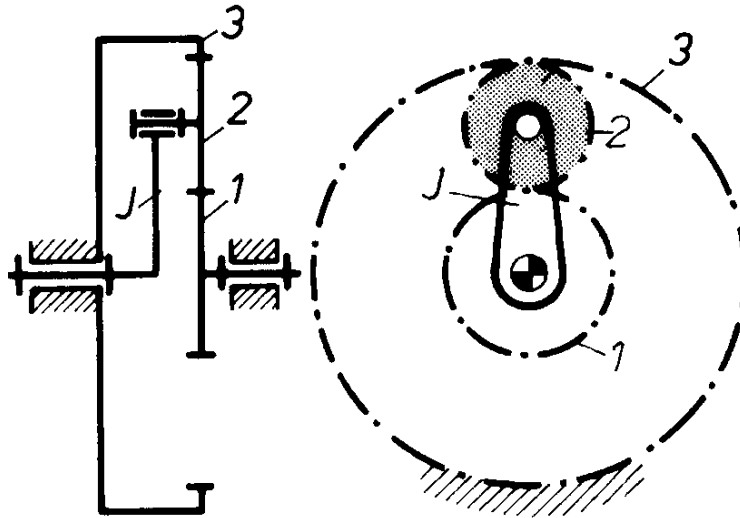
$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

$$W_{\text{równanie}} =$$

$$3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

Podstawowe terminy i definicje

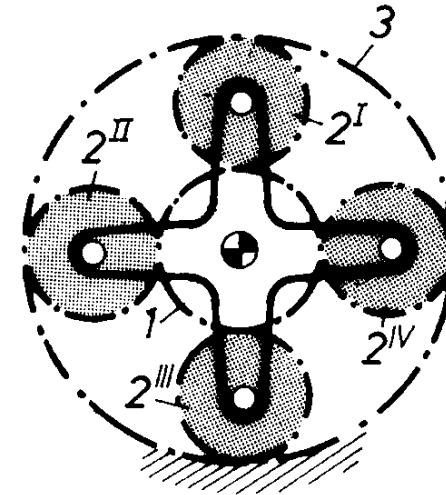
Więzy bierne (przesztywnienia)



Rys. [Miller 1989]

$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

$$W_{\text{równanie}} = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$$

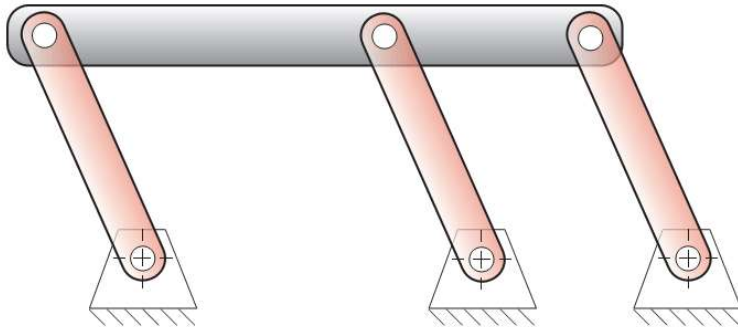


$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

$$W_{\text{równanie}} = 3 \times 6 - 2 \times 6 - 8 = -2$$

Podstawowe terminy i definicje

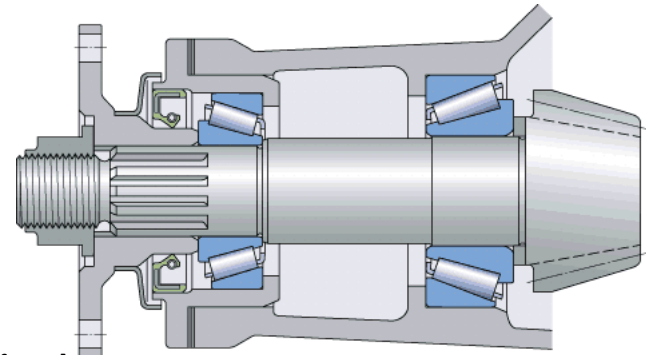
Więzy bierne (przesztywnienia)



Rys. [Norton 1999]

$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

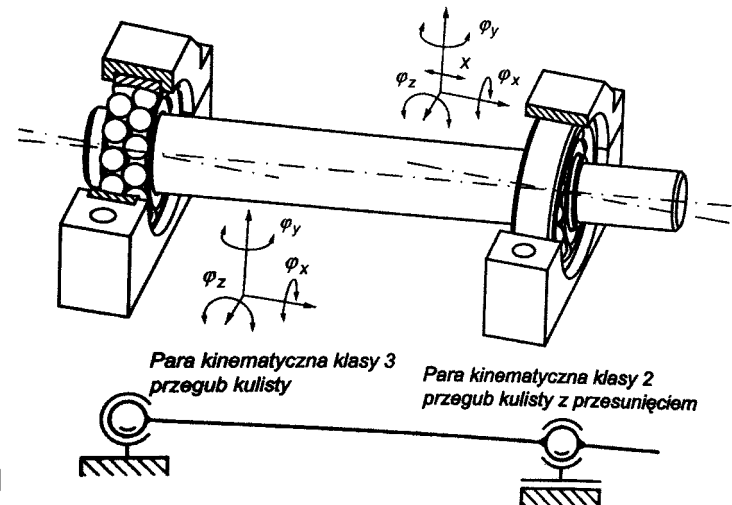
$$W_{\text{równanie}} = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$



Rys. [www.skf.com]

$$W_{\text{rzeczywiste}} = 1$$

$$W_{\text{równanie}} = 3 \times 1 - 2 \times 2 = -1$$



Rys. [Felis 2007]

Przedstawione konstrukcje na tym i poprzednim slajdzie określane są mianem nieracjonalnych. Czy tak jest naprawdę?

Klasyfikacja mechanizmów

Występują trzy typy klasyfikacji mechanizmów:

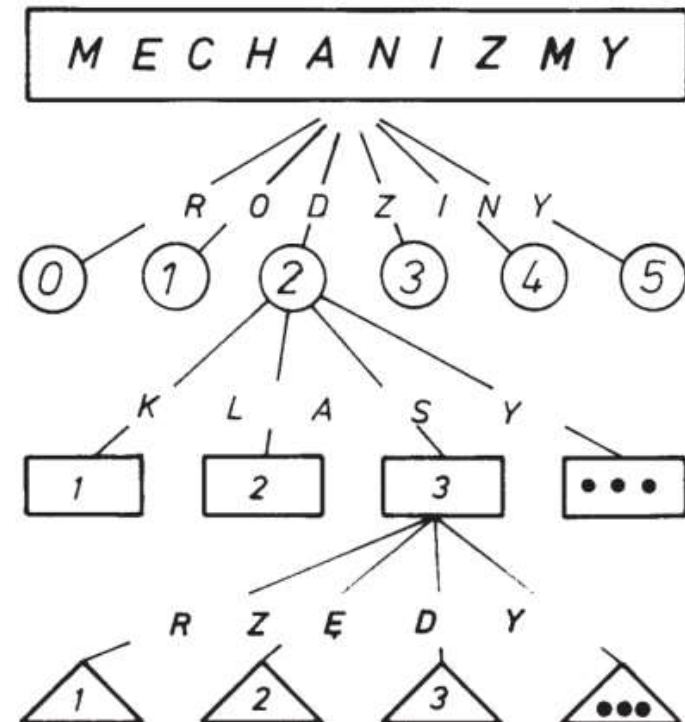
- strukturalna,
- konstrukcyjna,
- funkcjonalna.

Klasyfikację strukturalną, czyli podział zgodnie z cechami strukturalnymi, zapoczątkował rosyjski uczony Leonid Vladimirovich Assur (1878–1920), rozwijaną później przez innych naukowców. Ivan Ivanovich Artobolevski (1905–1977) sprecyzował pojęcie grupy strukturalnej oraz jej klasę i rząd [Ceccarelli 2014].

Przyjęta w tym opracowaniu klasyfikacja strukturalna dzieli mechanizmy na rodziny, klasy i rzędy (rys.). Nie jest to podział pozwalający na jednoznaczne przyporządkowanie wszystkich mechanizmów do odpowiednich kategorii. Powstały dokładniejsze metody klasyfikacji, o większym stopniu skomplikowania, których omawianie nie jest zasadne w tym opracowaniu.

Zaletą klasyfikacji strukturalnej jest możliwość stworzenia uniwersalnych metod analizy strukturalnej, kinematycznej i dynamicznej.

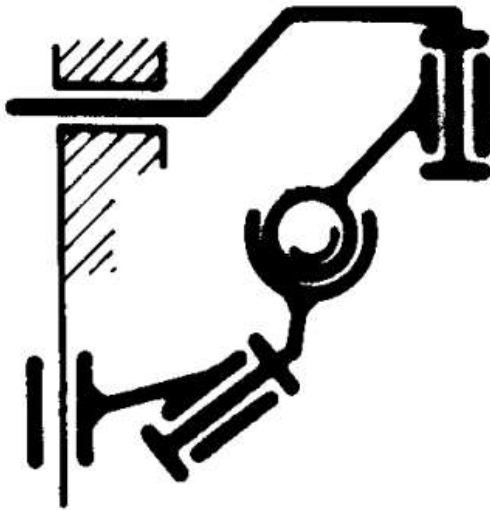
Rys. [Miller 1989]



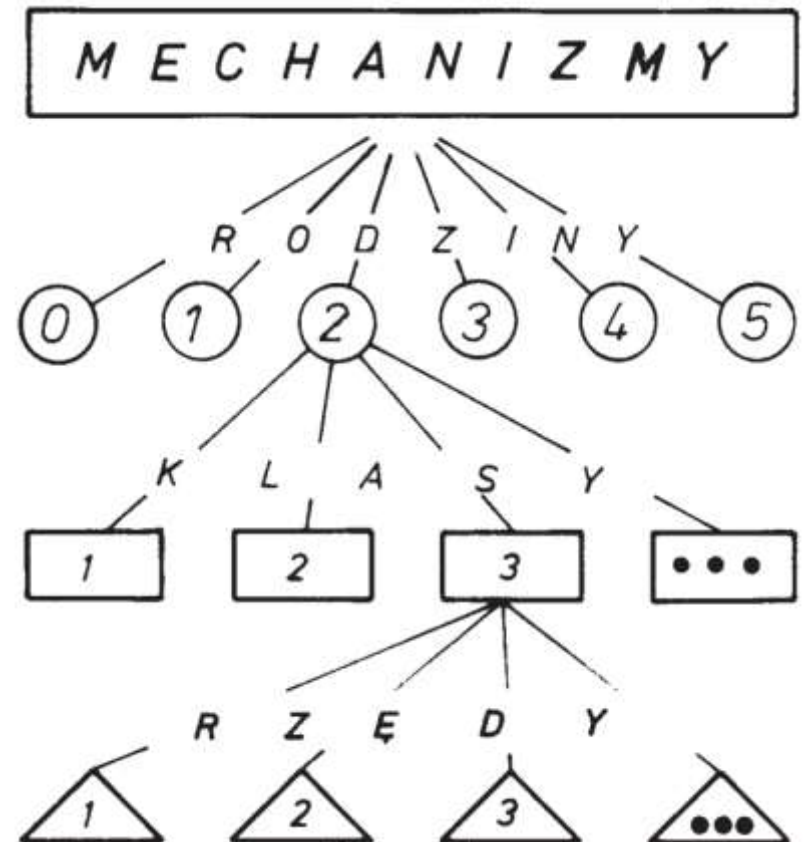
Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

Rodzina

Jest sześć rodzin od 0 do 5. Przynależność do rodziny wynika z narzuconych więzów. Są one określane względem przyjętego układu współrzędnych wspólnie dla wszystkich członów. W **rodzinie 0** członki mają sumarycznie sześć stopni swobody (rys. 1)



Rys. 1. Rodzina 0 – sześć stopni swobody [Miller 1989]



Rys. [Miller 1989]

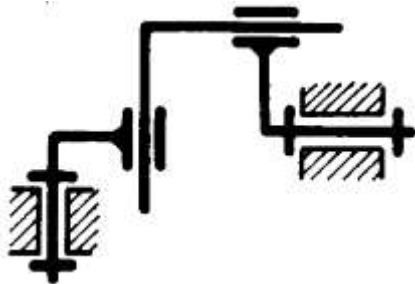
Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

Rodzina

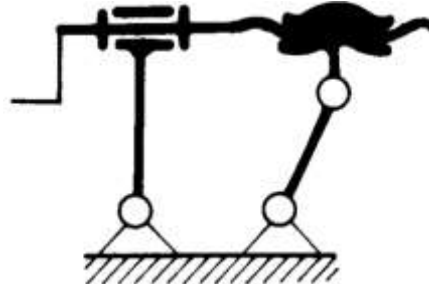
Rodzina 1 – wszystkie człony mają odebrany jeden wspólny stopień swobody. Dla mechanizmu na rys. 1, jest to obrót względem osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku.

Rodzina 2 – wszystkie człony mają odebrane dwa wspólne stopnie swobody. Dla mechanizmu na rys. 2 jest to obrót względem osi pionowej i przesunięcie względem osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku.

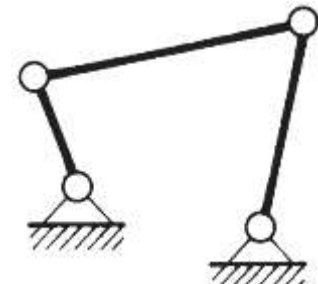
Rodzina 3 – wszystkie człony mają odebrane trzy wspólne stopnie swobody. Dla mechanizmu na rys. 3, jest to obrót względem osi pionowej oraz poziomej i przesunięcie względem osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku. Do tej grupy należą głównie mechanizmy płaskie (również mechanizmy przestrzenne kuliste).



Rys. 1. Rodzina 1 –
pięć stopni swobody [Miller 1989]



Rys. 2. Rodzina 2 –
cztery stopnie swobody [Miller 1989]



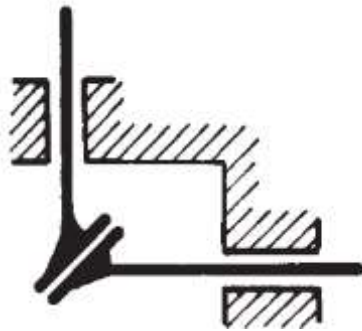
Rys. 3. Rodzina 3 –
trzy stopnie swobody [Miller 1989]

Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

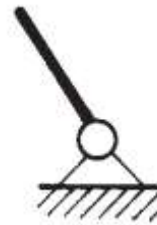
Rodzina

Rodzina 4 – wszystkie człony mają pozostawione w sumie dwa stopnie swobody. Dla mechanizmu klinowego na rys. 1 jest to przesunięcie względem osi poziomej i pionowej. Należą do tej rodziny mechanizmy z parami przesuwными (klinowe) i mechanizmy śrubowe.

Rodzina 5 – człon ma pozostawiony jeden stopień swobody (rys. 2). Do tej rodziny należą człony czynne (napędzające).



Rys. 1. Rodzina 4 –
dwa stopnie swobody [Miller 1989]



Rys. 2. Rodzina 5 –
jeden stopień swobody [Miller 1989]

Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

Klasa mechanizmu (prezentowany tu opis dotyczy mechanizmów płaskich)

Klasa mechanizmu określana jest na podstawie klasy grup strukturalnych (Assura) wchodzących w skład mechanizmu. Należy przeprowadzić następujące kroki w celu ustalenia klasy mechanizmu:

1. Wykonać schemat kinematyczny mechanizmu, którego ruchliwość odpowiada ruchliwości rzeczywistej (usunąć więzy bierne i ruchliwości lokalne).
2. Jeżeli występują pary klasy II, to należy utworzyć schemat kinematyczny zastępczy, w którym zastąpione są one parami klasy I.
3. Określić klasę grupy Assura. Klasa mechanizmu jest równa najwyższej klasie grupy występującej w mechanizmie. W przypadku niektórych mechanizmów, np. z przekładnią zębatą lub skomplikowanych, wygodnie jest wcześniej utworzyć schemat strukturalny.

Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

Klasa mechanizmu

Należy wyjaśnić pojęcie grupy Assura i jej klasy.

Grupa strukturalna (Assura) jest to łańcuch kinematyczny łącznie spełniający warunki:

1. Po połączeniu z podstawą wolnych członów tworzy układ sztywny.
2. Nie ma możliwości podziału na prostsze łańcuchy spełniające warunek pierwszy.
3. Wydzielając grupę strukturalną z istniejącego mechanizmu nie można zmienić jego ruchliwości.

Z punktu 1 wynika, że grupa Assura ma ruchliwość równą 0 i obowiązuje ją równanie strukturalne postaci:

$$\begin{aligned}3n - 2p_1 &= 0 \\ 3n &= 2p_1\end{aligned}$$

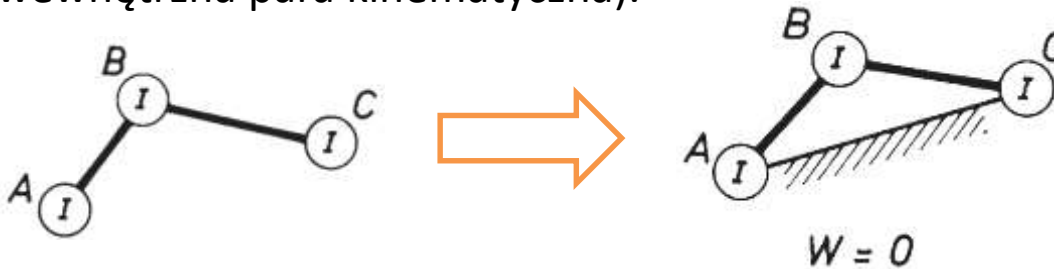
Z równania uzyskuje się informację ile członów i par kinematycznych klasy I może mieć grupa Assura (tab.).

Liczba członów n	2	4	6	...
Liczba par kinematycznych p_1	3	6	9	...

Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

Klasa mechanizmu

Klasa grupy Assura dla 2 członów i 3 par kinematycznych określana jest jako druga (jedna wewnętrzna para kinematyczna).

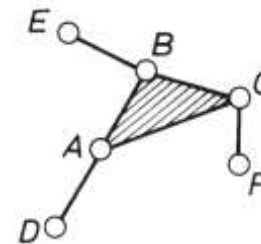


Rys. Przykładowa grupa Assura przyłączona do podstawy [Miller 1989]

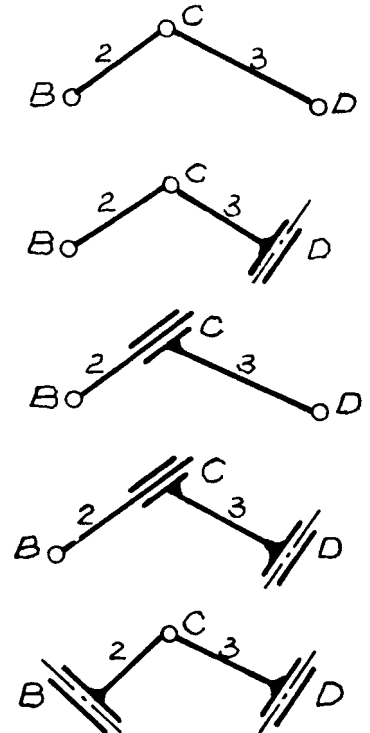
Dla pozostałych grup, składających się z większej ilości członów, o klasie grupy decyduje liczba boków największego wieloboku zamkniętego tej grupy*.

*Według niektórych źródeł [np. Siemieniako 1999, Miller 1989] o klasie grupy decyduje liczba członów i par kinematycznych. Poniżej przedstawiono tabelę z przynależnością grup do klas według tej reguły.

Klasa grupy	II	III	IV	
Liczba członów n	2	4	6	...
Liczba par kinematycznych p_1	3	6	9	...



Rys. Przykładowa grupa klasy III [Miller 1989]

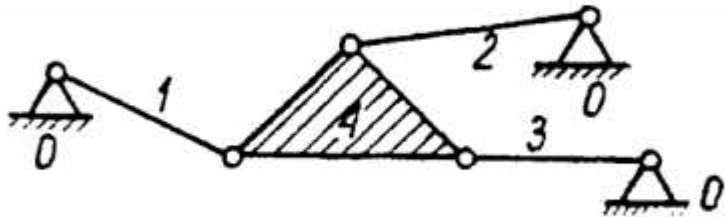
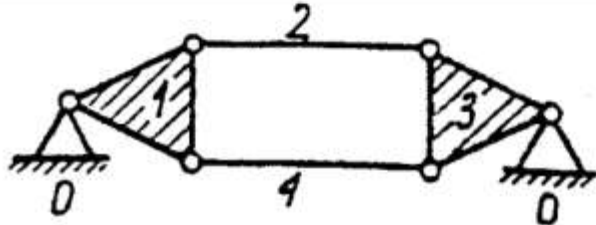
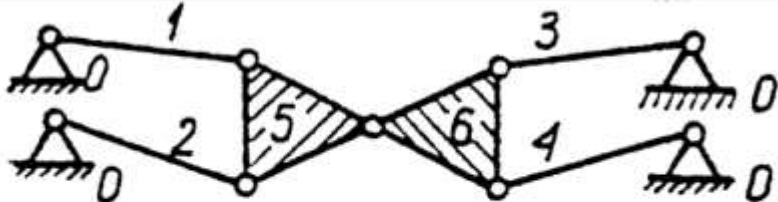
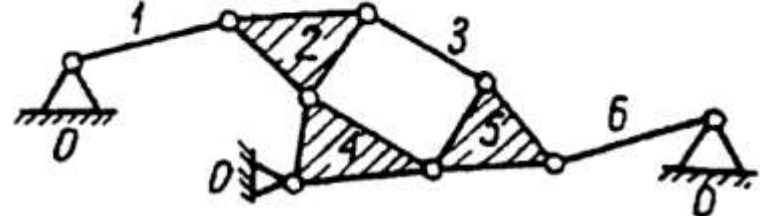


Rys. Wszystkie warianty grupy klasy 2 z parami klasy I [Młynarski 1997]

Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

Klasa mechanizmu

Przedstawione dwie reguły określania klasy grupy, wieloboku zamkniętego i oparta na liczbie członów i par, nie są równoważne (rysunki grup w tabeli są z [Siemieniako 1999]).

Klasa grupy według		Liczba członów	Liczba par kinematycznych	Schemat kinematyczny grupy
Wieloboku zamkniętego	Liczby członów i par			
<i>III</i>	<i>III</i>	4	6	
<i>IV</i>	<i>III</i>	4	6	
<i>III</i>	<i>IV</i>	6	9	
<i>IV</i>	<i>IV</i>	6	9	

Klasyfikacja mechanizmów - strukturalna

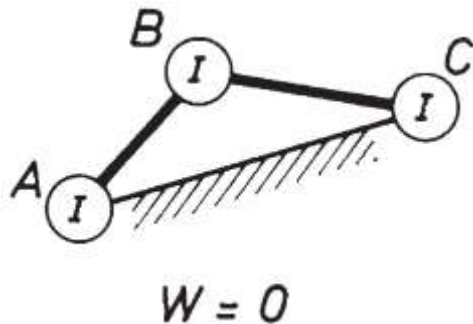
Klasa mechanizmu

Na zajęciach stosować będziemy regułę wieloboku zamkniętego wprowadzoną przez I. I. Artobolevskiego [Ceccarelli 2014].

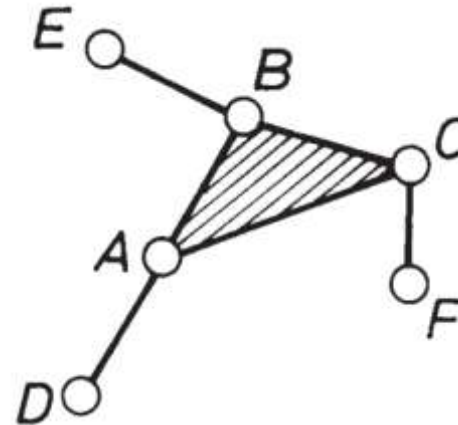
Niektórzy autorzy określają człon napędowy jako grupę klasy *I*.

Rząd mechanizmu

Rząd mechanizmu definiowany jest jako liczba pól zewnętrznych grupy, które po połączeniu z podstawą tworzą strukturę.



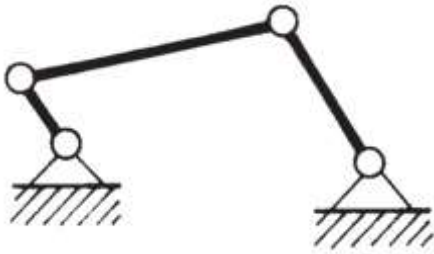
Rys. Grupa rzędu 2
[Miller 1989]



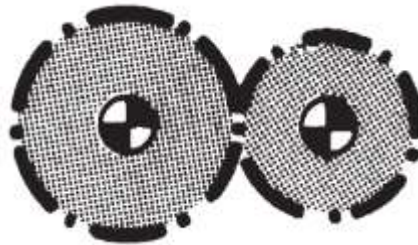
Rys. Grupa rzędu 3
[Miller 1989]

Klasyfikacja mechanizmów - konstrukcyjna

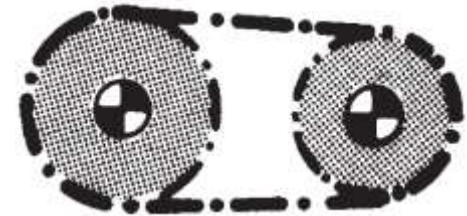
Klasyfikacja konstrukcyjna dzieli mechanizmy ze względu na właściwości konstrukcyjne.



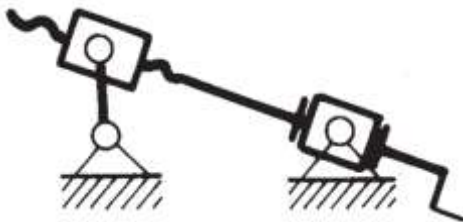
Dźwigniowe



Zębate



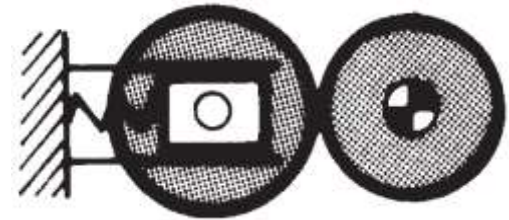
Cięgnowe



Śrubowe

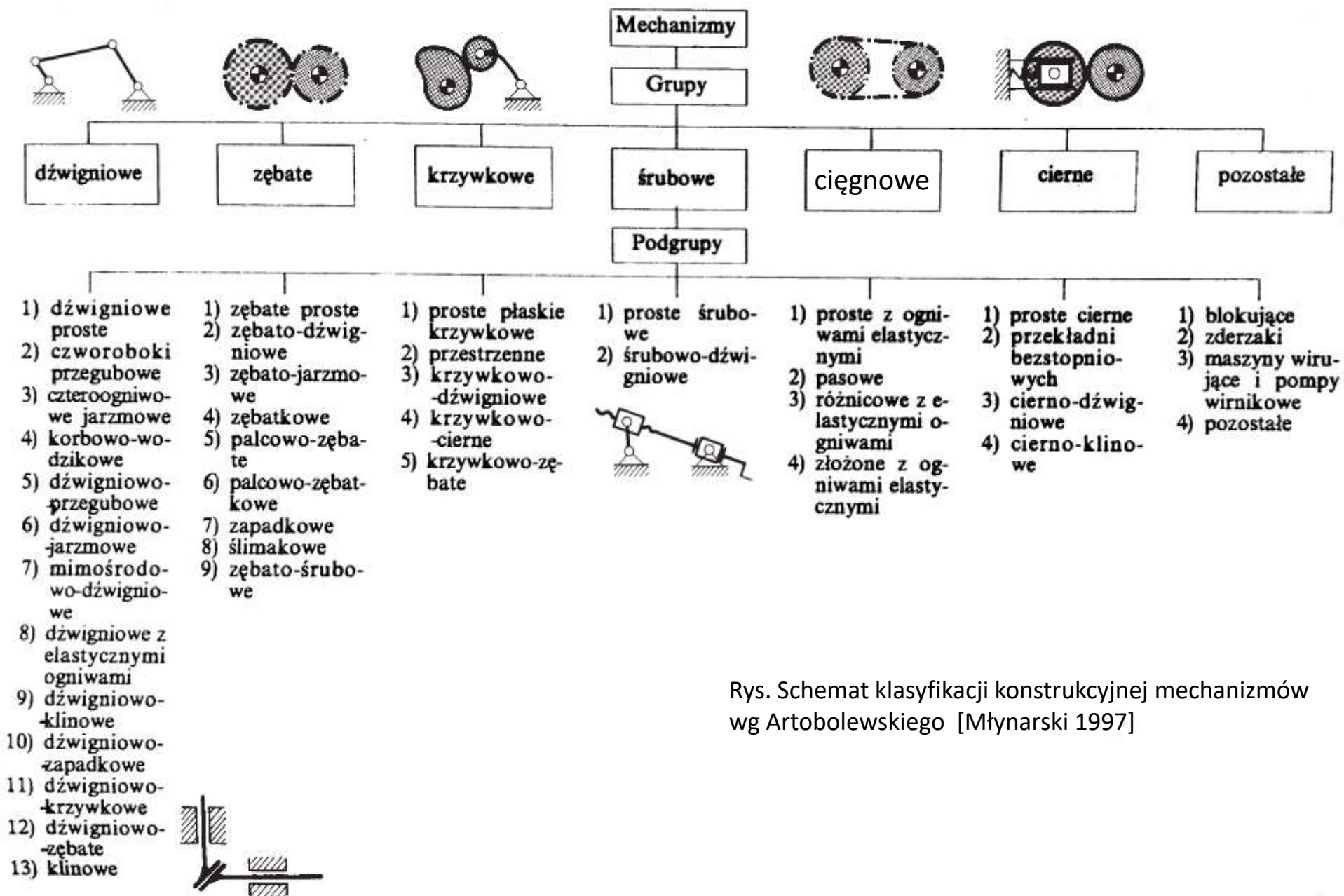


Krzywkowe



Cierne

Klasyfikacja mechanizmów - konstrukcyjna



Rys. Schemat klasyfikacji konstrukcyjnej mechanizmów wg Artobolewskiego [Młynarski 1997]

Klasyfikacja mechanizmów - funkcjonalna

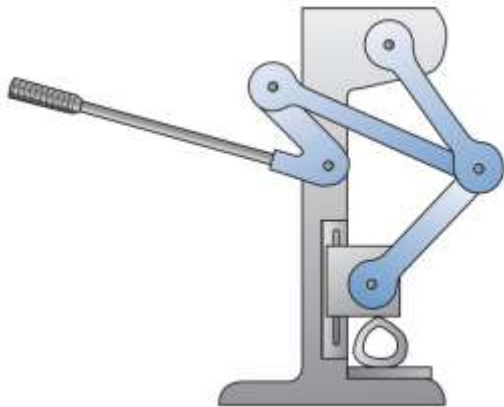
Klasyfikacja funkcjonalna dzieli mechanizmy ze względu na pełnione zadania w maszynach. Mechanizmy wg. Artobolewskiego dzielone są na [Młynarski 1997]: włączania i wyłączania, chwytaków, wag, hamulców, przystankowe, dla wykonywania operacji matematycznych, kierujące, dźwigniowe, zaworów, równoległoboków, nierównoległoboków, tłoków, pomp wirnikowych i mimośrodowych, maszyn kołowrotów, regulatorów, z wahającymi się tarczami, pras, zasilania, dorywczego zasilania, ciężarowe podnoszenia, młotów, urządzeń blokujących, rozrzędu, zapadowe oraz pozostałych urządzeń.

Analiza strukturalna mechanizmów

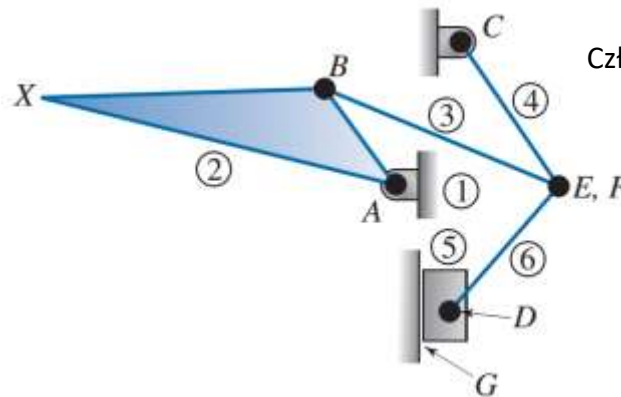
Analiza strukturalna mechanizmu ma na celu określenie jego ruchliwości, klasyfikację strukturalną i stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz kinematycznych i dynamicznych.

W trakcie analizy mogą być sporządzane schematy:

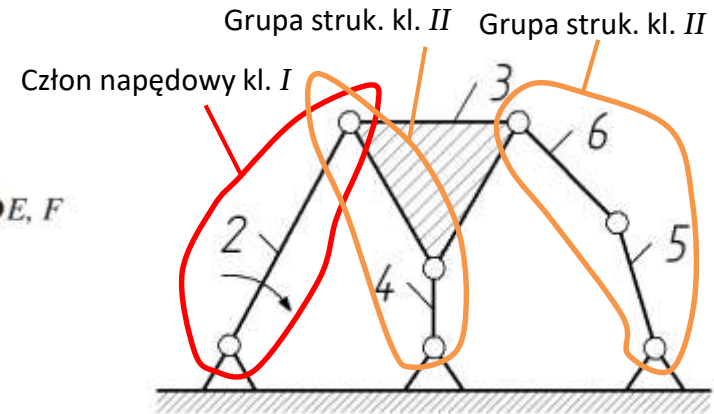
- *kinematyczny* – przedstawia mechanizm w sposób uproszczony z zachowaniem struktury i wielkości geometrycznych członów koniecznych do przeprowadzania analizy kinematycznej,
- *strukturalny* – przedstawia w sposób symboliczny połączenia członów parami kinematycznymi.



Rys. Schemat konstrukcyjny prasy [Myszka 2012]



Rys. Schemat kinematyczny prasy [Myszka 2012]



Rys. Schemat strukturalny prasy

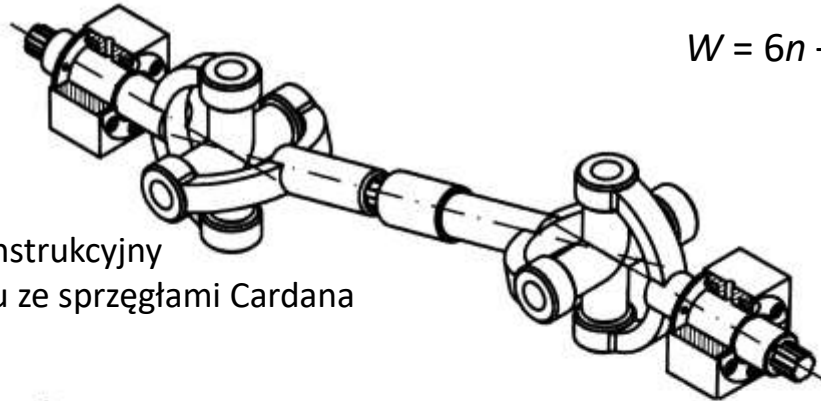
$$W = 3n - 2P_1 - P_2 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 = 15 - 14 = 1$$

Mechanizm prasy ma ruchliwość 1 i zaliczany jest do rodziny 3, klasy *II*, rzędu 2.

Co należy zmienić, aby był to mechanizm kl. III?

Analiza strukturalna

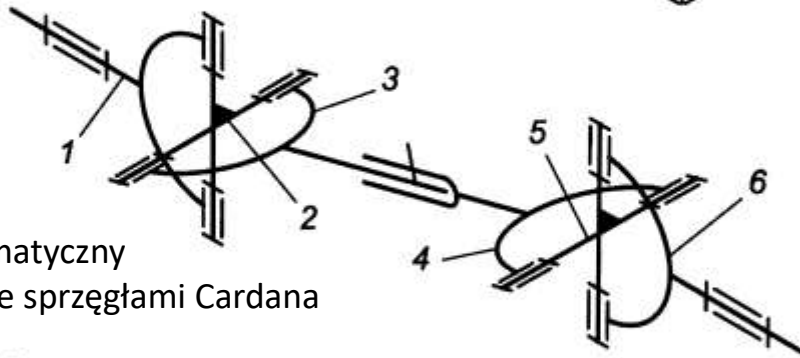
Analiza strukturalna



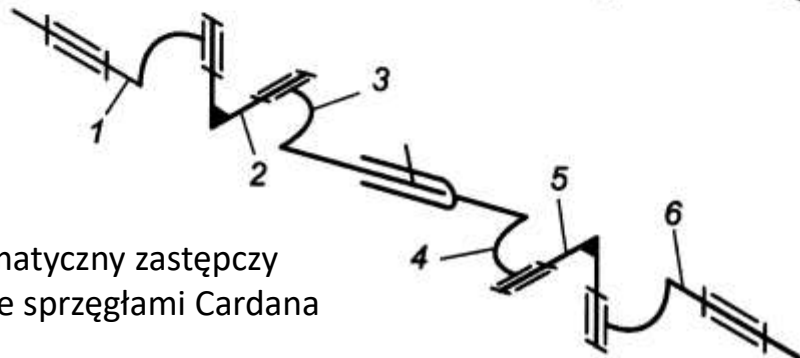
$$W = 6n - 5P_1 - 4P_2 - 3P_3 - 2P_4 - P_5 = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 7 = 36 - 35 = 1$$

Jaka jest klasa mechanizmu?

Schemat konstrukcyjny mechanizmu ze sprzęgłami Cardana



Schemat kinematyczny mechanizmu ze sprzęgłami Cardana



Schemat kinematyczny zastępczy mechanizmu ze sprzęgłami Cardana

Mechanizmy dźwigniowe

W skład tej grupy, za Parszewskim, zaliczane są mechanizmy zbudowane tylko z niższych par kinematycznych z wyjątkiem śrubowej.

Najprostszym mechanizmem z tej grupy jest wałek wirnika np. wentylatora, silnika elektrycznego podparty w łożyskach.



Podstawowym mechanizmem jest natomiast czworobok przegubowy. Znaczna część mechanizmów dźwigniowych może być otrzymana na jego podstawie w drodze odpowiednich przekształceń.

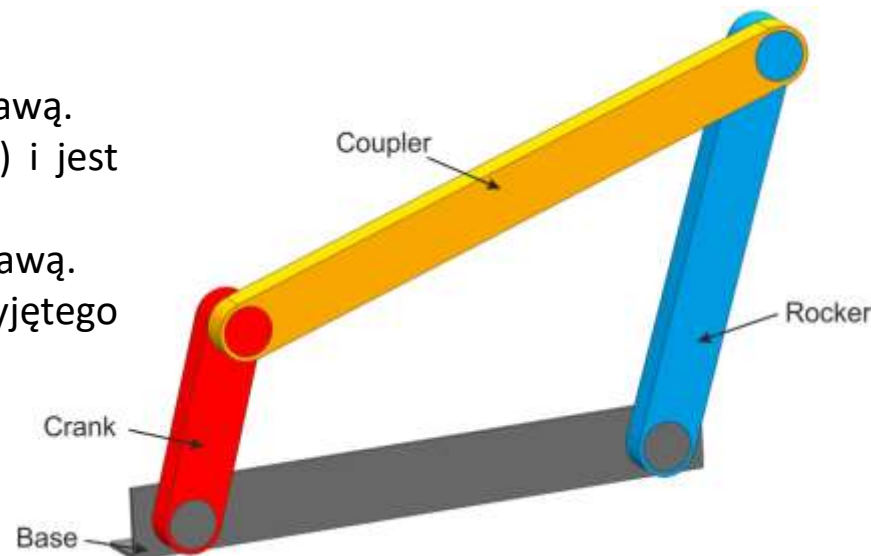
Typy członów występujące w czworoboku przegubowym:

Korba – może wykonać pełny obrót i jest połączona z podstawą.

Wahacz – wykonuje ruch obrotowo-zwrotny (wahadłowy) i jest połączony z podstawą.

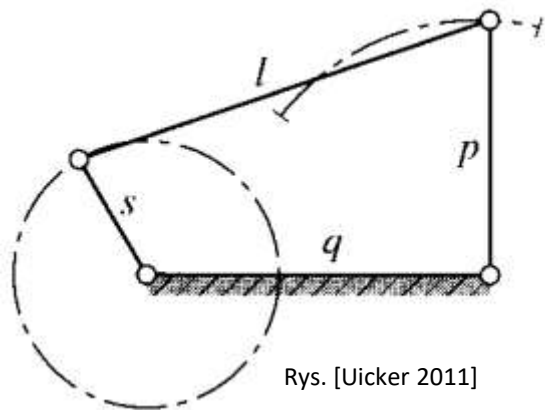
Łącznik – wykonuje ruch złożony i nie jest połączony z podstawą.

Podstawa (rama) – nie wykonuje ruchu względem przyjętego układu odniesienia.



Mechanizmy dźwigniowe

Z praktycznego punktu widzenia ważne jest, jakie warunki muszą spełniać człony czworoboku przegubowego, aby jeden z nich mógł wykonać pełny obrót. Z tym członem można połączyć silnik. Rozwiązaniem jest warunek Grashof'a, według którego suma długości członu najkrótszego i najdłuższego nie może być większa od sumy długości pozostałych członów:



$$s + l \leq p + q$$

s = długość najkrótszego członu

l = długość najdłuższego członu

p = długość pozostałego członu

q = długość pozostałego członu

Reuleaux również rozwiązał ten problem tylko uzyskał cztery równania:

$$s + l + p \geq q$$

$$s + l - p \leq q$$

$$s + q + p \geq l$$

$$s + q - p \leq l$$

s - korba

l - łącznik

p - wahacz

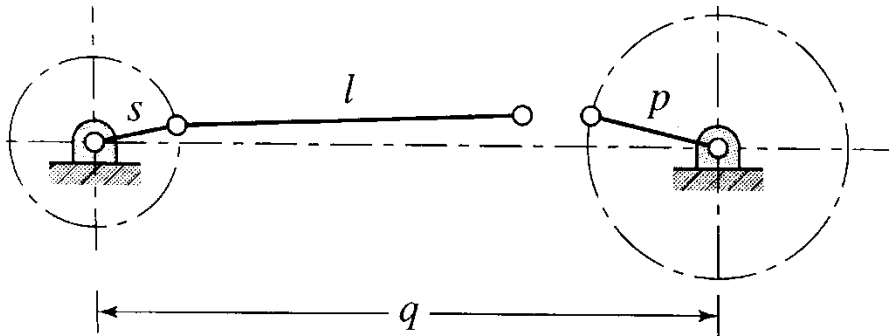
q - podstawa

Wynik jest oczywiście taki sam.

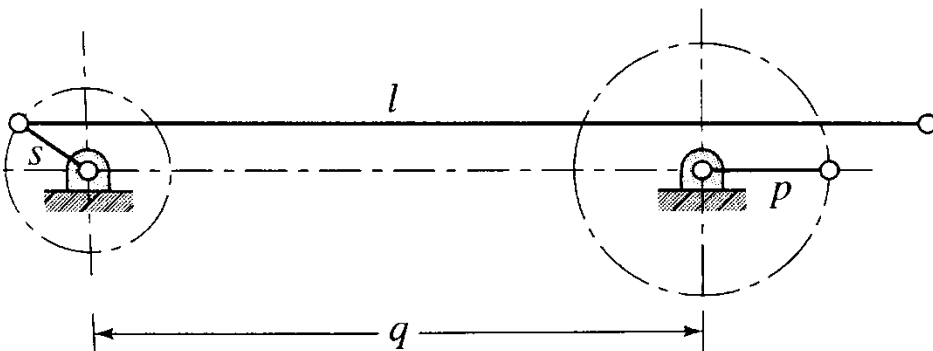
Mechanizmy dźwigniowe

Na poniższych rysunkach zobrazowane jest niespełnienie tych czterech warunków.

Brak możliwości realizacji

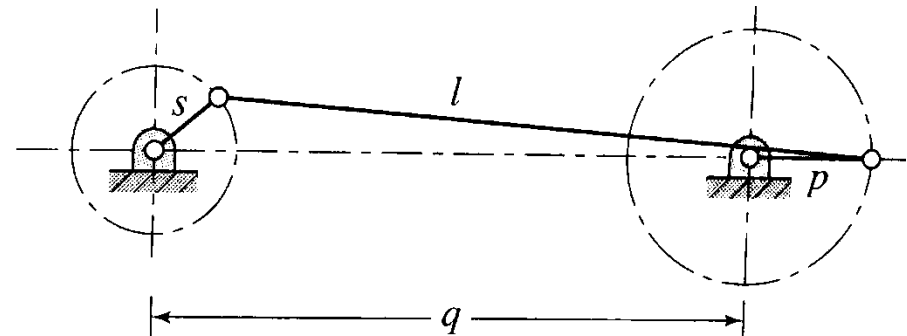


$$s + l + p < q$$

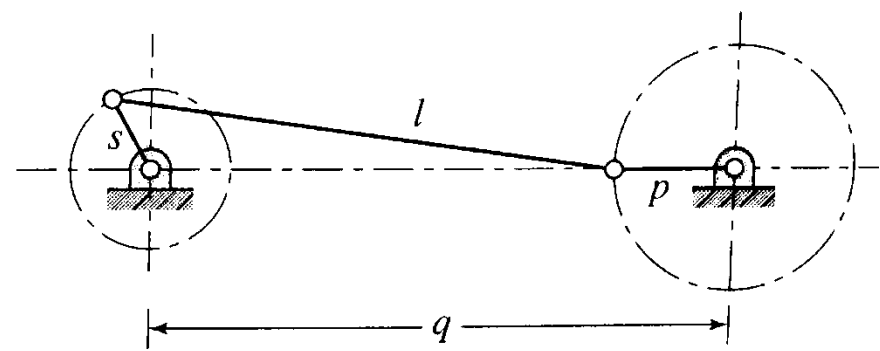


$$s + q + p < l$$

Człon s nie jest korbą



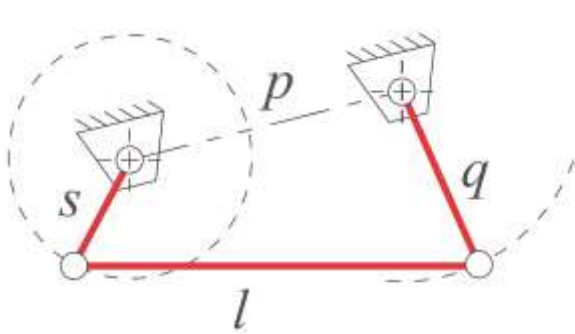
$$s + l - p > q$$



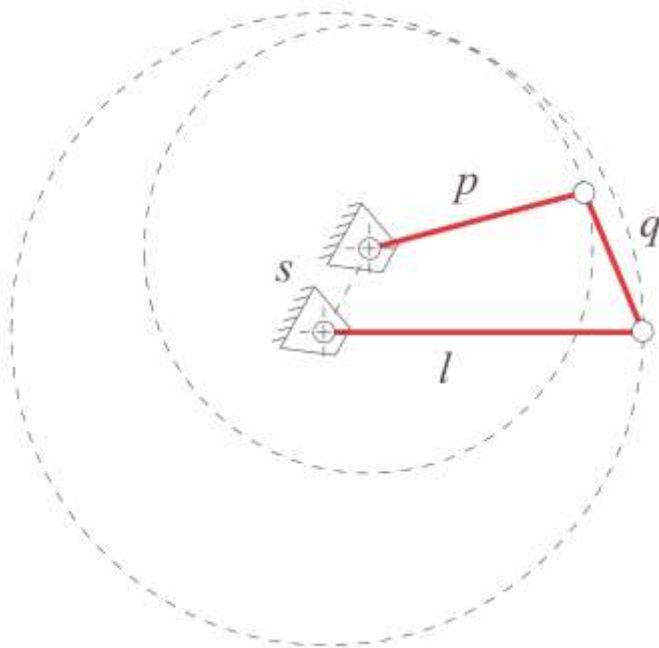
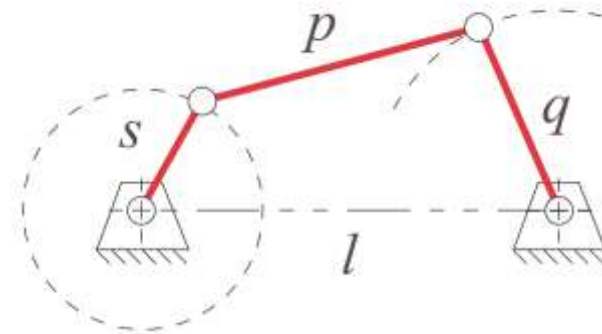
$$s + q - p < l$$

Mechanizmy dźwigniowe

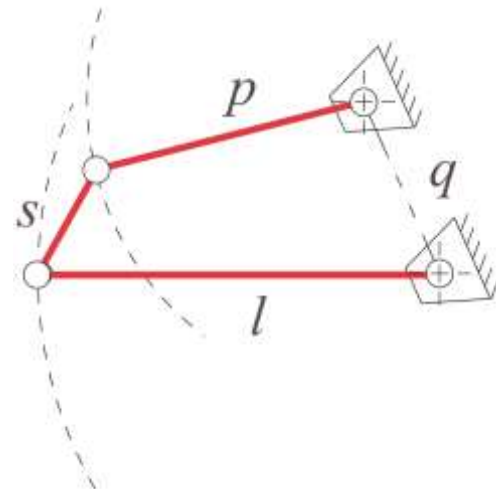
W zależności od przyjęcia różnych funkcji przez człony otrzymuje się trzy typy mechanizmów.



Mechanizm korbowo-wahaczowy



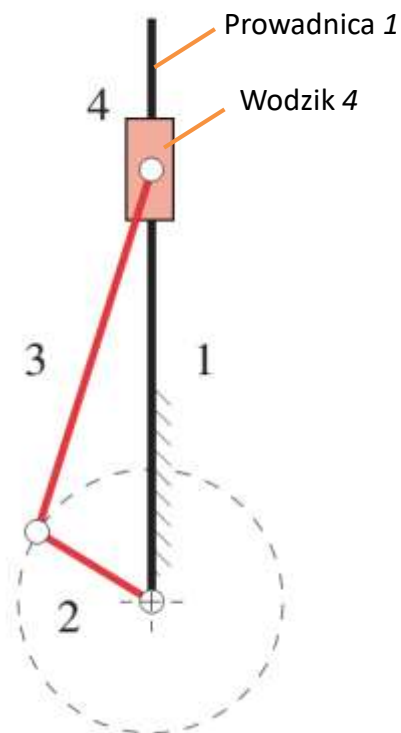
Mechanizm dwukorbowy



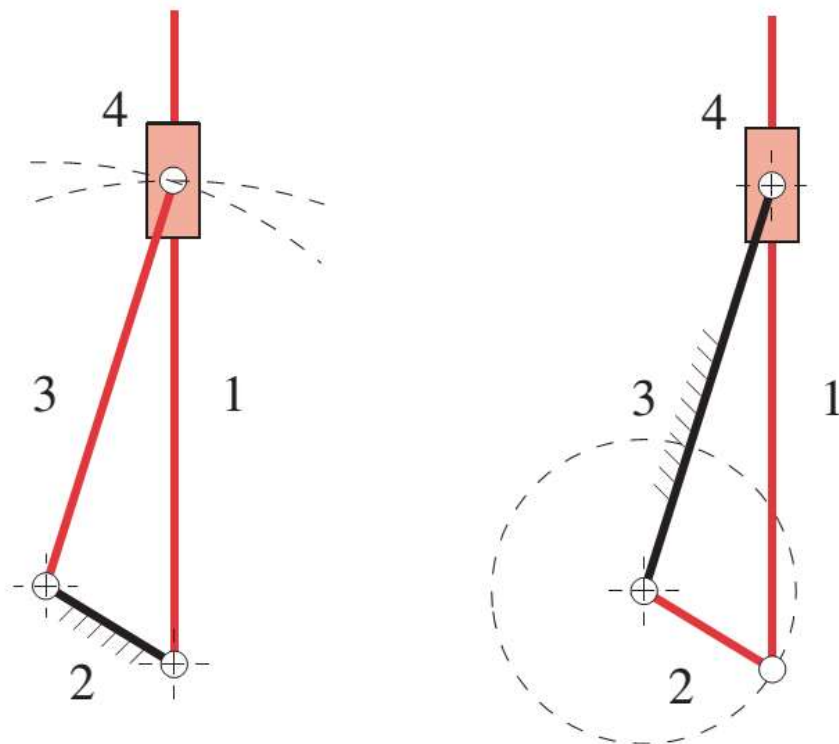
Mechanizm dwuwahaczowy

Mechanizmy dźwigniowe

Dokonując transformacji pary obrotowej na przesuwną czworoboku przegubowego otrzymuje się mechanizm *korbowo-wodzikowy* zwany również *korbowo-suwakowy* lub krótko *korbowy* (rys. 1). Stosowany jest on powszechnie w silnikach spalinowych i sprężarkach. Jeżeli prowadnica 1 suwaka 4 jest ruchoma, to taki mechanizm nazywamy *jarzmowym* (rys. 2).



Rys. 1. Mechanizm korbowo-wodzikowy
[Norton 1999]



Rys. 2. Mechanizm jarzmowy w dwóch wariantach
[Norton 1999]

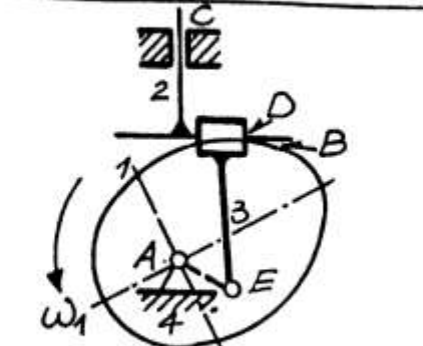
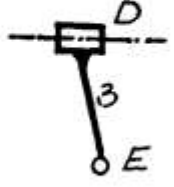
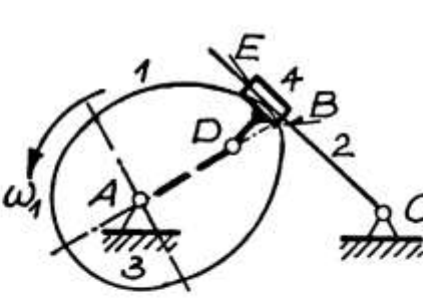
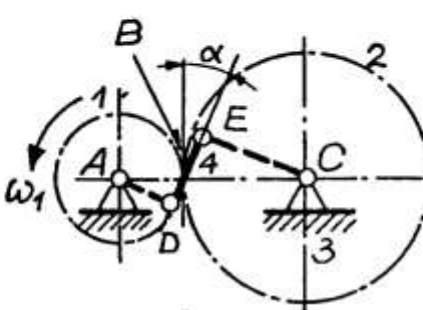
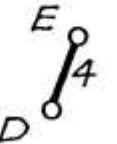
Mechanizmy dźwigniowe

Zamiana par kinematycznych klasy 2 na pary klasy 1 umożliwia przeprowadzenie analizy kinematycznej metodami stosowanymi dla mechanizmów dźwigniowych. Utworzony mechanizm zastępczy musi być równoważny pod względem kinematycznym rzeczywistemu w danym położeniu.

Wprowadza się dodatkowy człon, co sprawia, że ruchliwość mechanizmu nie ulega zmianie. W przypadku mechanizmów krzywkowych końce ogniwa znajdują się w środku stykających się krzywizn.

Lp.	Nazwa mechanizmu	Schemat	Schemat ogniwa zamieniającego
1	Dwu-krzywkowy		
2	Krzywkowy z popychaczem ostrzowym (na krzywiznie)		
3	Krzywkowy z popychaczem ostrzowym (na części prostej linijowej)		
4	Krzywkowy z wahaczem ostrzowym (na krzywiznie)		
5	Krzywkowy z popychaczem kształtowym		

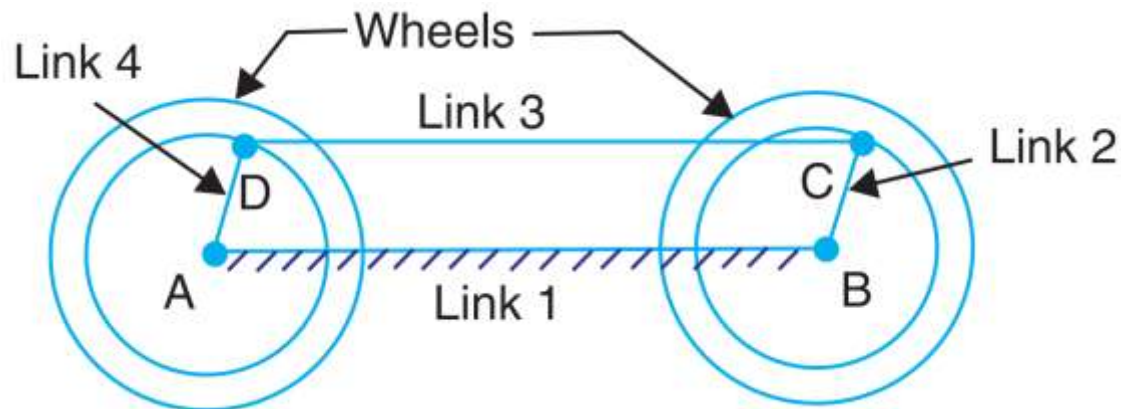
Mechanizmy dźwigniowe

Lp	Nazwa mechanizmu	Schemat	Schemat ogniwa zamieniającego
6	Krzywkowy z popychaczem talerzykowym		
7	Krzywkowy z wahaczem liniowym		
8	Przekładnia kół zębata wałkowe-czołowe ewolwentowe		

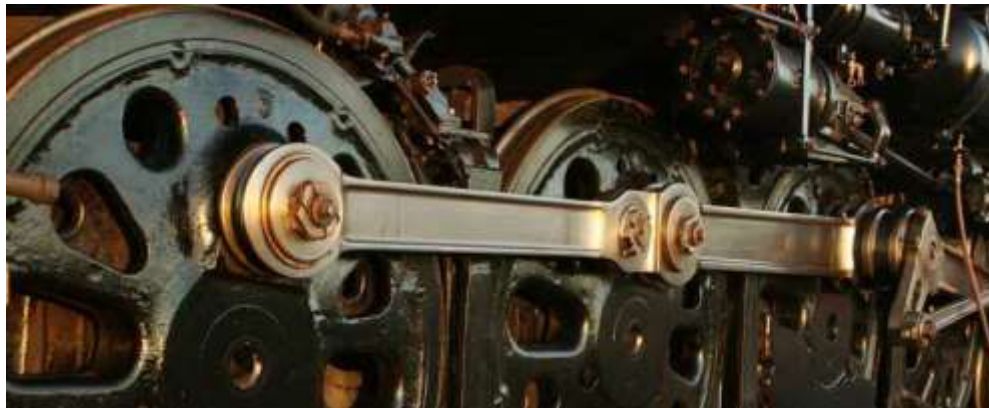
Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Czworobok przegubowy (równoległobok) stosowany w przeniesieniu napędu kół



Rys. [Khurmi 2005]

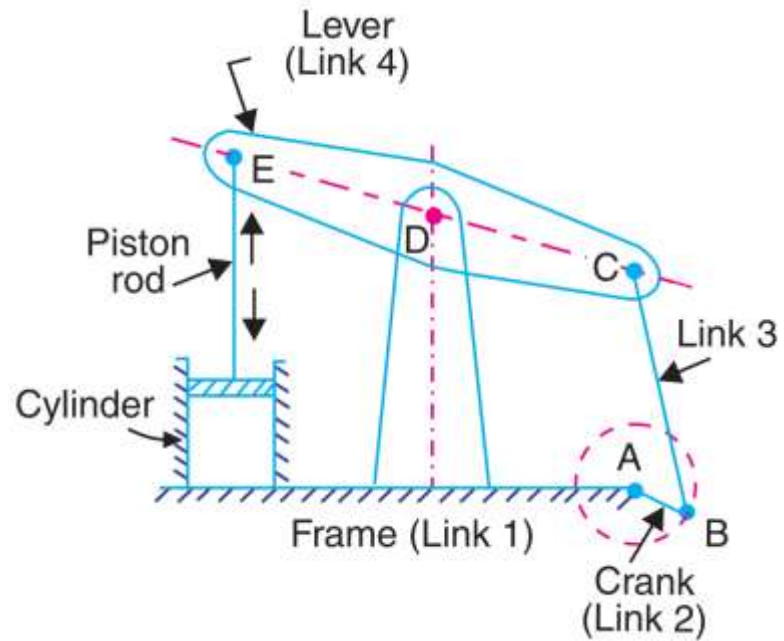


Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Coupling_rod]

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

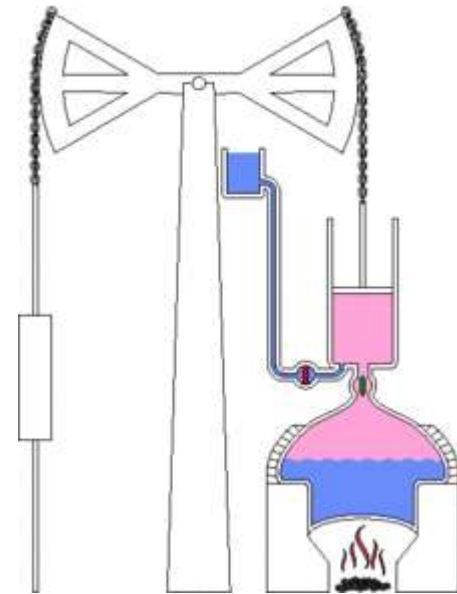
Silnik parowy belkowy



Rys. [Khurmi 2005]



Rys. [<https://hanselygretel.eu/tienda/maquina-vapor-watt/>]



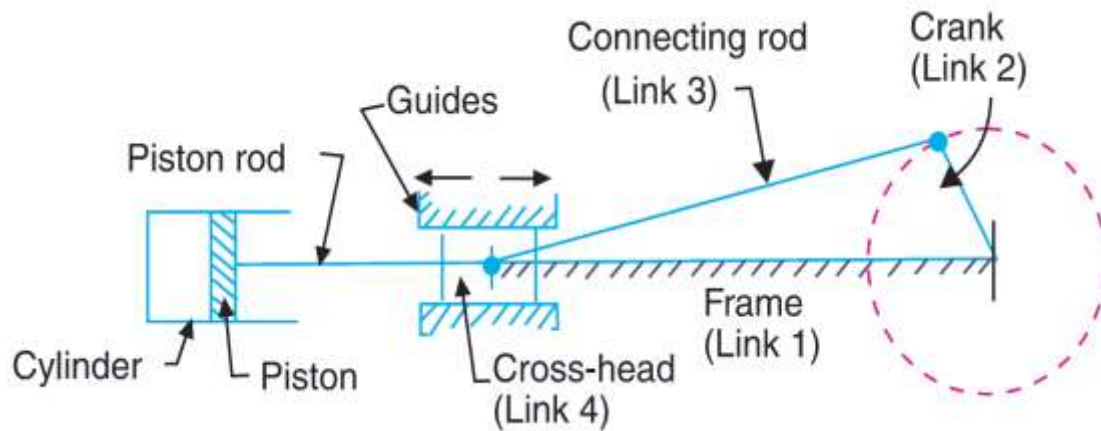
Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen]

Beam engine

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Układ korbowo-tłokowy



Rys. [Khurmi 2005]

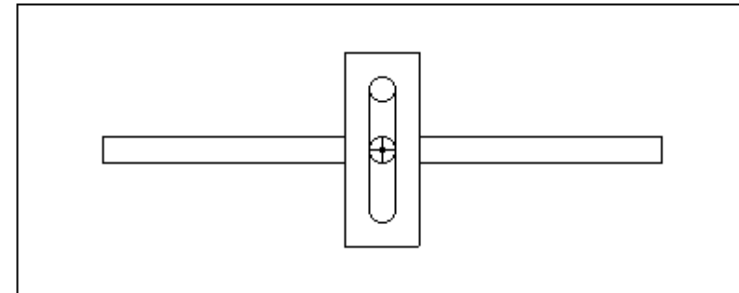
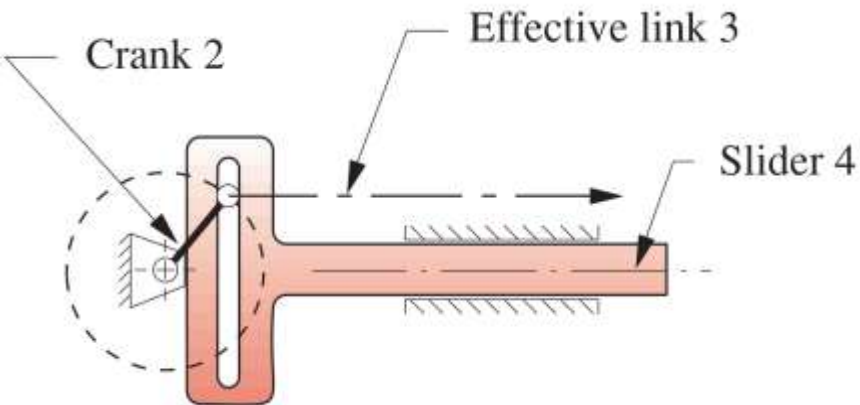


Rys. [<http://www.magoda.com/industrial/oem-manufacturing-in-the-united-states/>]

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Mechanizm jarzmowy



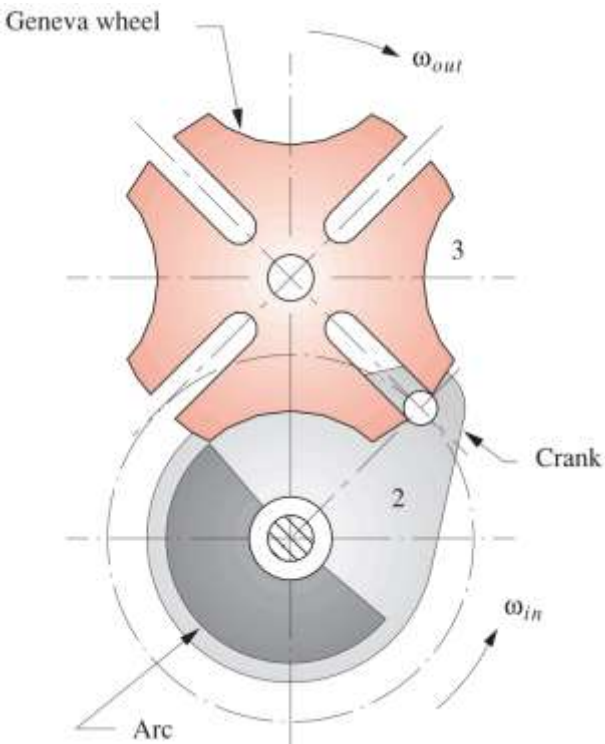
Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Scotch_yoke#/media/File:Scotch_yoke_animation.gif]

Rys. [Norton 1999]

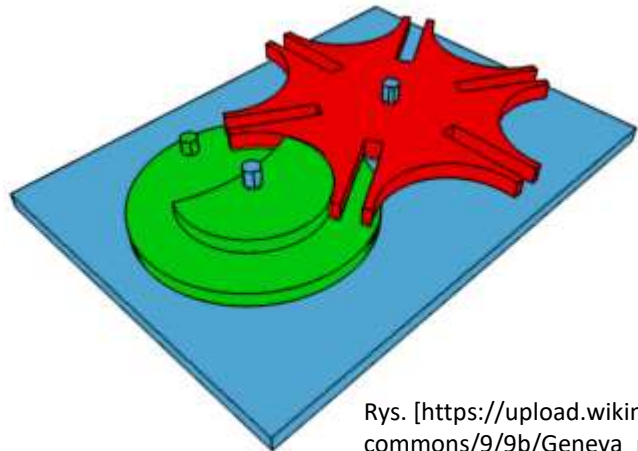


Rys. Scotch yoke mechanism [<http://www.etotheipiplusone.net/?m=201209>]

Mechanizmy dźwigniowe

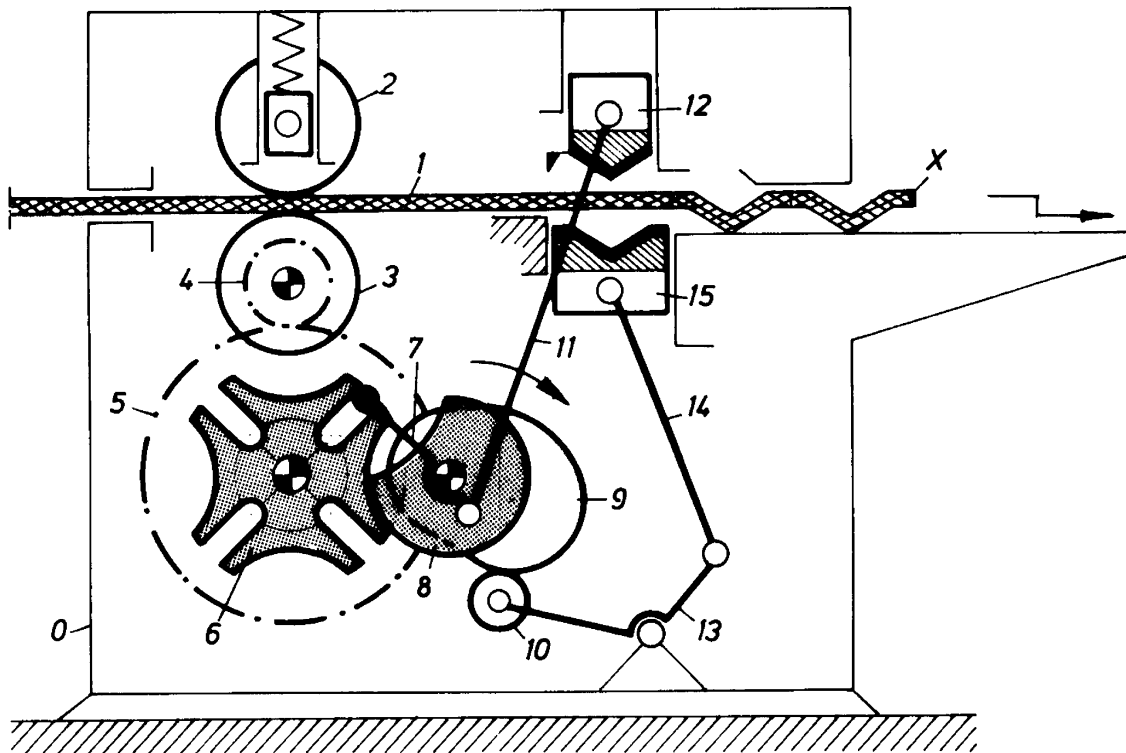


Rys. Geneva mechanism [Norton 1999]



Przykłady

Mechanizm Maltański



Rys. Maszyna do obróbki blachy
[Miller 1989]

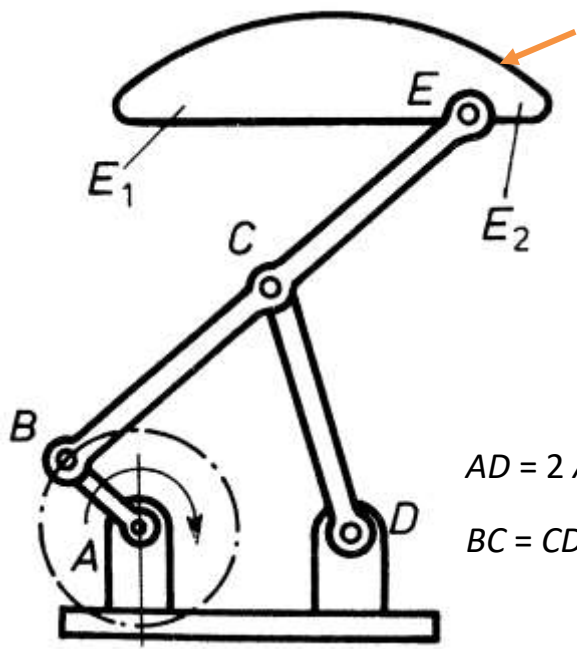
Rys. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Geneva_mechanism_6spoke_animation.gif]

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Prostowody

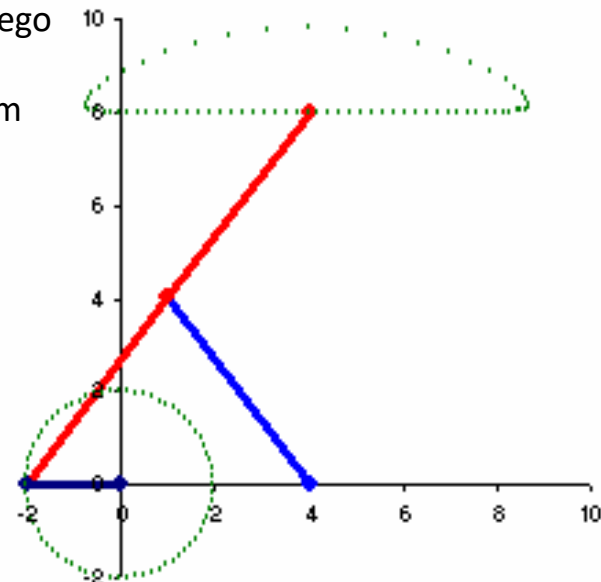
W XVII wieku przed opracowaniem frezarek trudno było uzyskać precyzyjne pary postępowe. Ruch wzdłuż linii prostej osiągnano poprzez stosowanie mechanizmów z parami obrotowymi. Prostowody wchodziły w skład mechanizmów kierujących, których zadaniem jest realizacja ruchu po wymaganej trajektorii.



Krzywa łącznikowa jest to tor (trajektoria) dowolnego punktu sztywno połączanego z łącznikiem

$$AD = 2 AB$$

$$BC = CD = CE = 2,5 AB$$

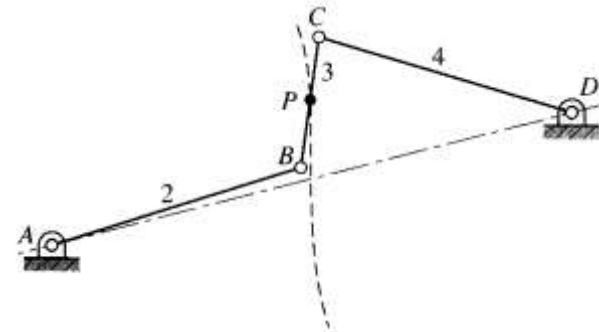


Rys. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Hoekens_linkage_animated.gif]

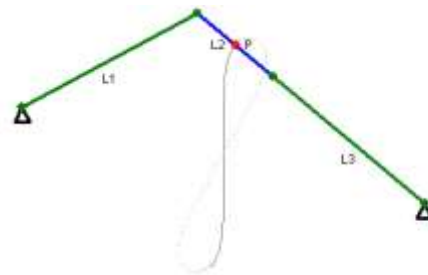
Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

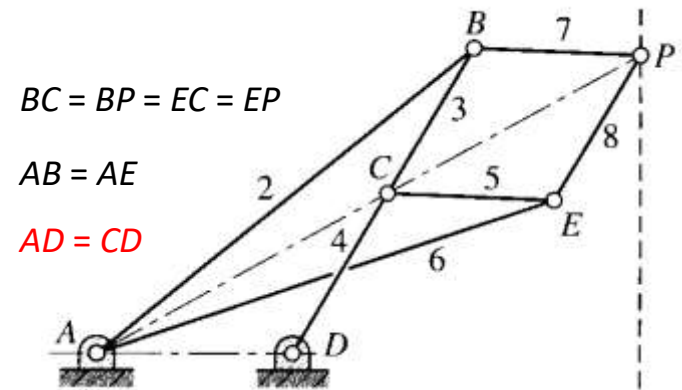
Prostowody



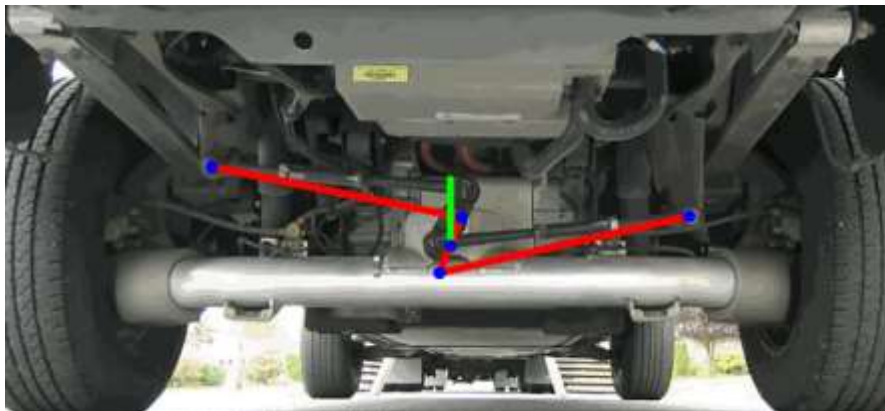
Rys. Prostowód przybliżony Wattsa,
[Uicker 2011]



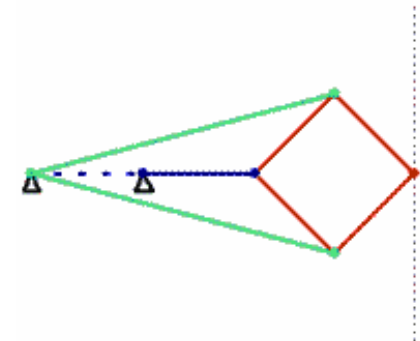
Rys. [https://upload.wikimedia.org/
wikipedia/commons/9/93/Watts_linkage.gif]



Rys. Prostowód dokładny Peaucellier-
Lipkin [Uicker 2011]



Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Watt%27s_linkage#
/media/File:Watt%27s_Linkage_Rear_Suspension.gif]

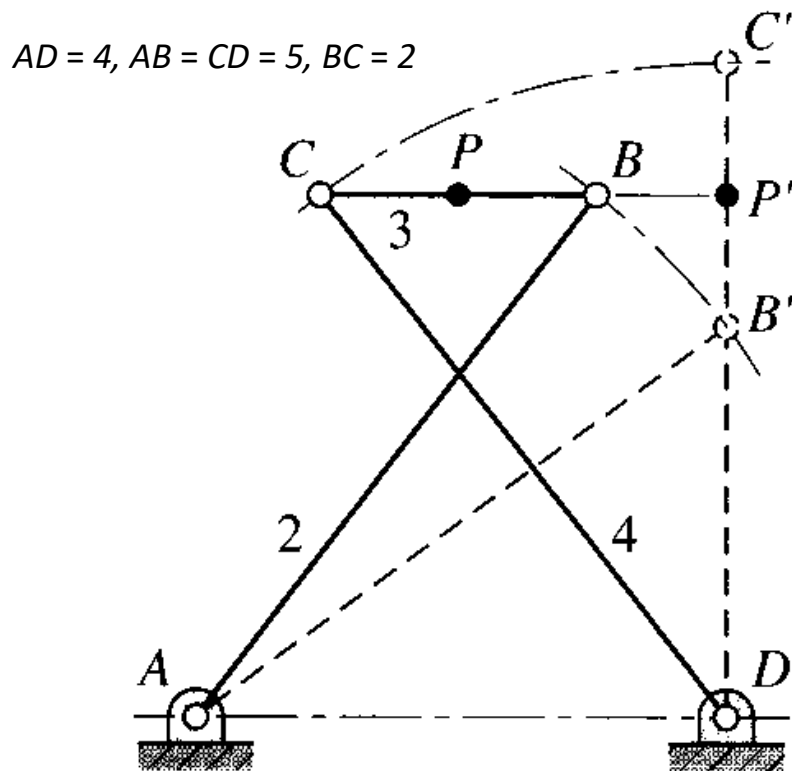


Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Straight_line_
mechanism#/media/File:Peaucellier_linkage_animation.gif]

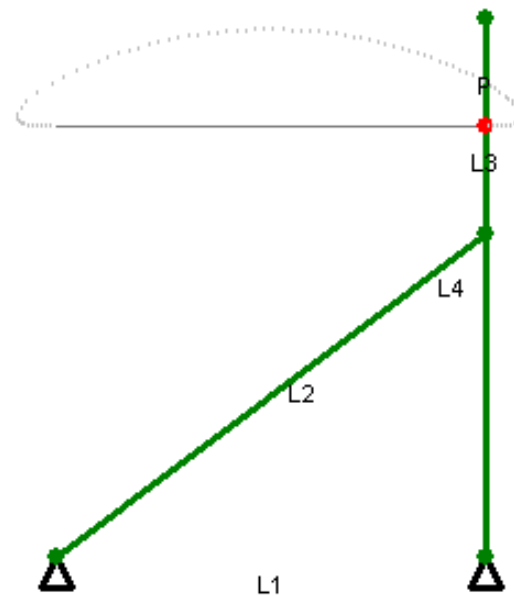
Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Prostowody



Rys. Prostowód przybliżony Czybyszewa
[Uicker 2011]

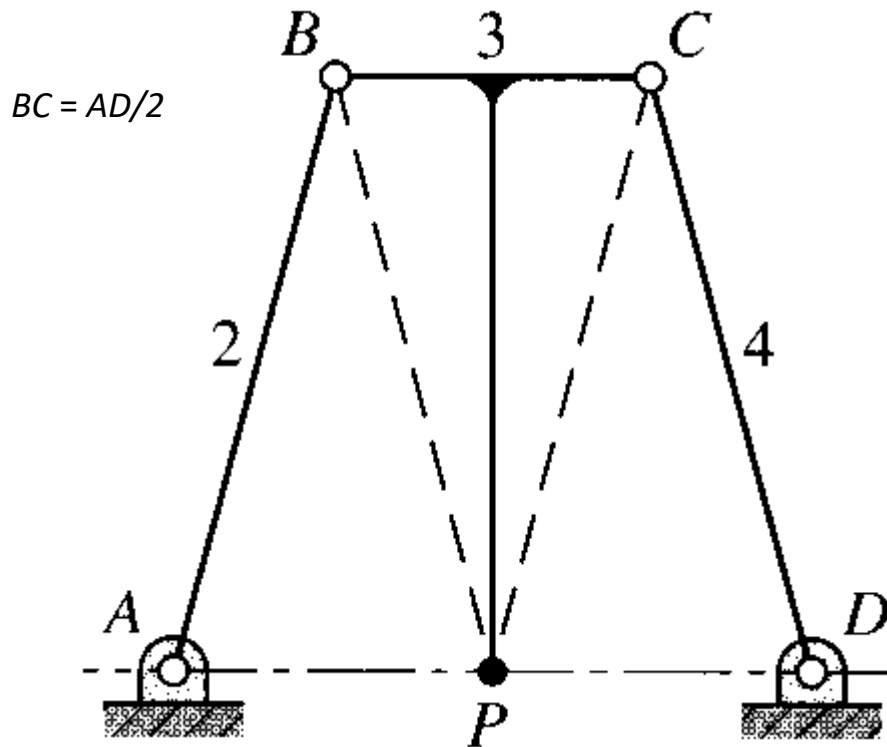


Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev_linkage#/media/File:Chebyshev_linkage.gif]

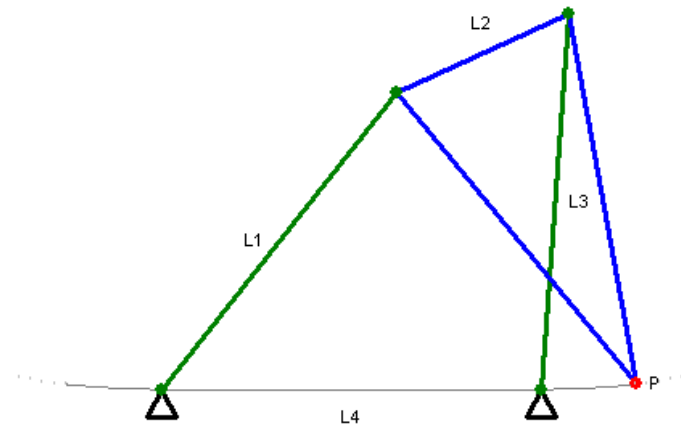
Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Prostowody



Rys. Prostowód przybliżony Roberts'a
[Uicker 2011]



Rys. [https://en.wikipedia.org/wiki/Roberts_Mechanism#/media/File:Roberts_linkage.gif]

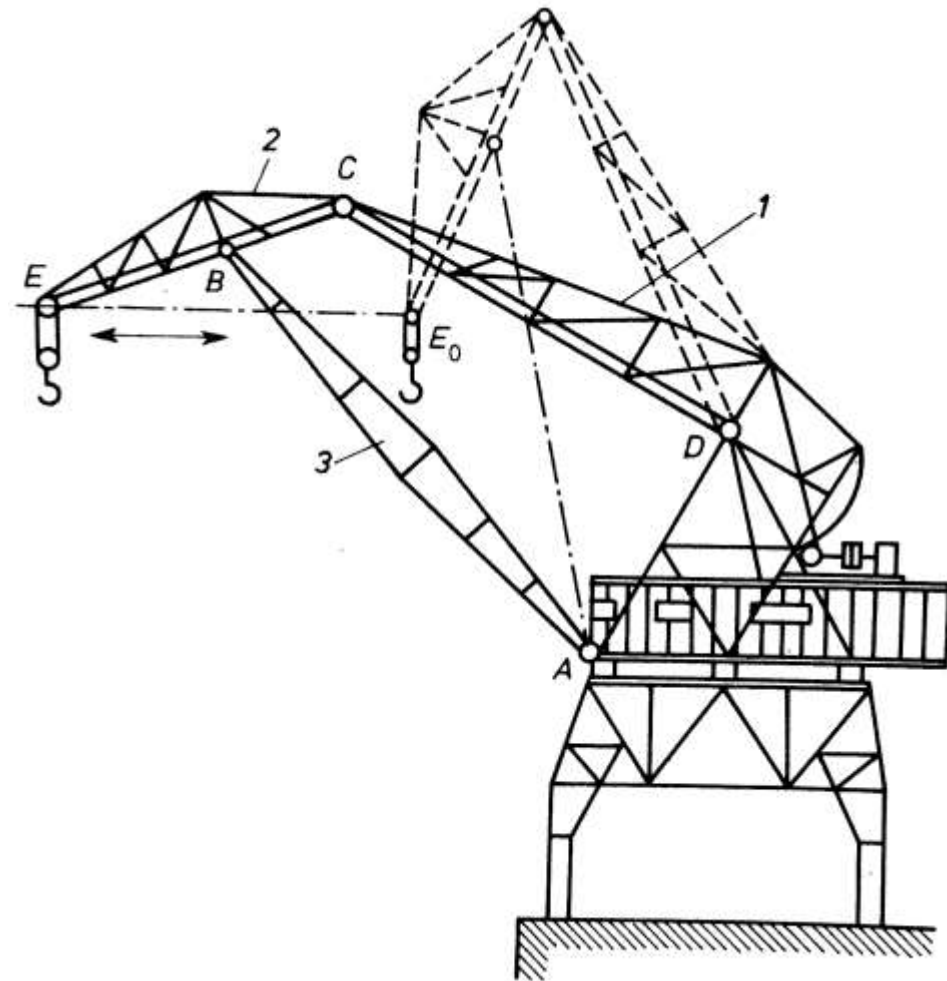
Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Prostowody



Rys. [<https://pt.depositphotos.com/2975201/stock-photo-the-port-crane.html>]

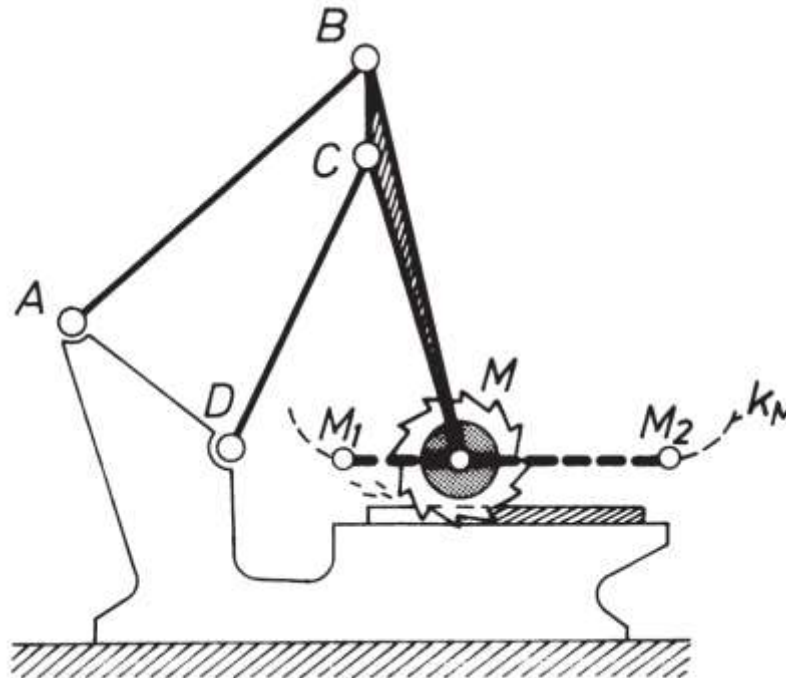


Rys. Żuraw portowy, krzywa łącznikowa EE_0 jest aproksymacją linii prostej [Morecki 1987]

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Prostowody



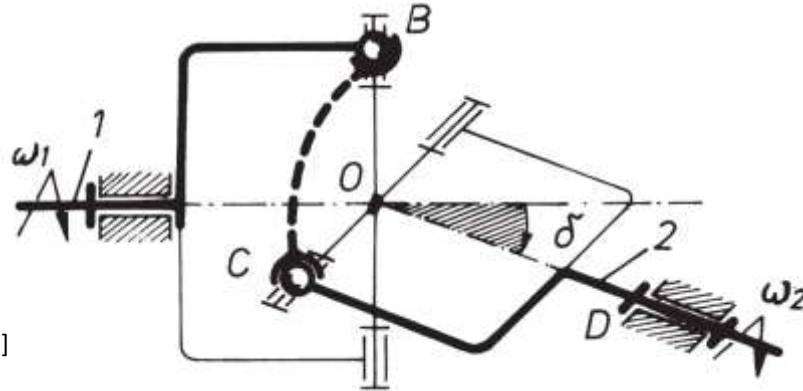
Rys. Krzywa łącznikowa M_1M_2 czworoboku przegubowego, aproksymacja prostej [Miller 1989]

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

Sprzęgło Cardana (niesynchroniczne)

Mechanizm dźwigniowy
przestrzenny, mechanizm kulisty.



Rys. [Miller 1989]



Rys. [agromer.pl/ogolna-wal-kardana-john-deere-al117415,c2,p5717,pl.html]

Mechanizmy dźwigniowe

Przykłady

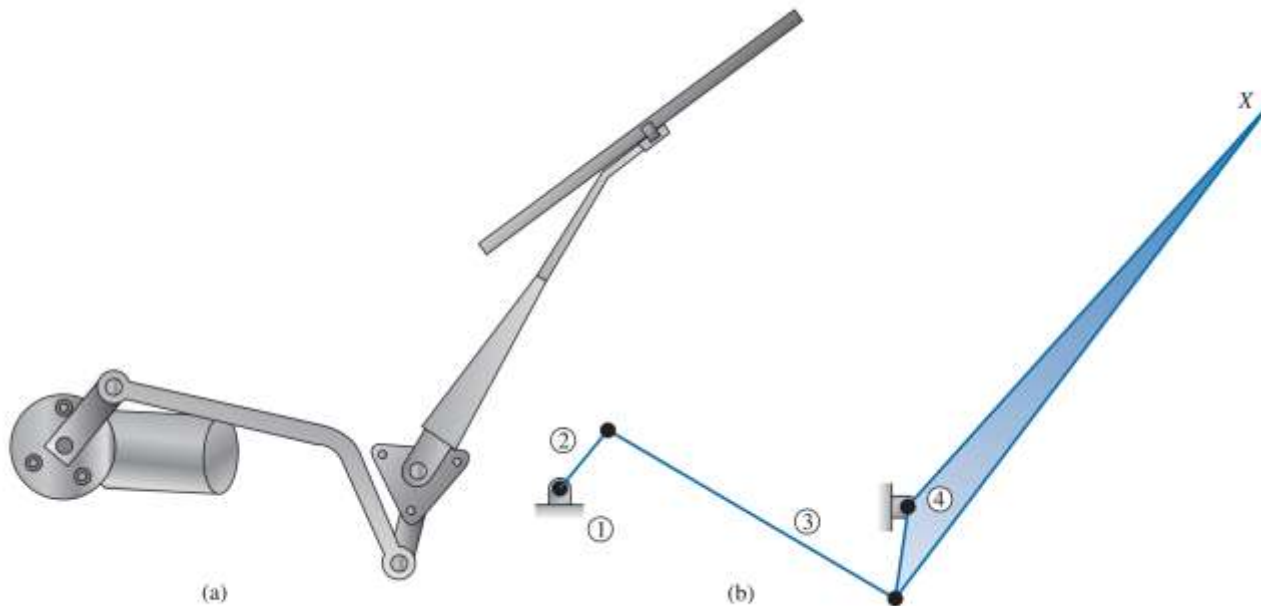
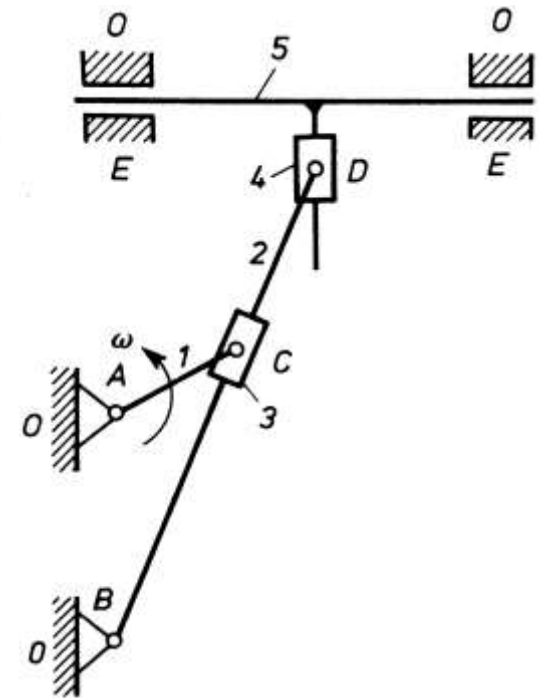


FIGURE 1.33 Rear-window wiper mechanism.

Rys. Mechanizm tylnej wycieraczki
[Myszka 2012]



Rys. Mechanizm napędu stołu
strugarki poprzecznej [Morecki 1987]

Literatura

1. Gronowicz A.: Podstawy analizy układów kinematycznych. OWPW, Wrocław 2003.
2. Szrek J.: Synteza układu kinematycznego i sterowania czworonożnego robota kołowo-kroczącego. Rozprawa doktorska, Wrocław 2008.
3. Miller S.: Teoria maszyn i mechanizmów. Analiza układów kinematycznych. WPW, Wrocław 1989.
4. Felis J., Jaworowski H., Cieślik J.: Teoria maszyn i mechanizmów. Część I. Analiza mechanizmów. UWND AGH, Kraków 2008.
5. Felis J., Jaworowski H.: Teoria maszyn i mechanizmów. Część II. Przykłady i zadania. UWND AGH, Kraków 2007.
6. Wawrzecki J.: Teoria maszyn i mechanizmów. WPŁ, Łódź 1994.
7. Uicker J., Pennock G., Shigley J.: Theory of machines and mechanism. OUP, New York 2011.
8. Młynarski T., Listwan A., Pazderski E.: Teoria maszyn i mechanizmów. Cz. I. Synteza i analiza strukturalna mechanizmów. ZGPK, Kraków 1997
9. Norton R. L.: Design of machinery. An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines. Mc Graw-Hill, 1999.
10. Marghitu D. B.: Mechanisms and robots analysis with Matlab. Springer, 2009.
11. Dobrzański T.: Rysunek techniczny maszynowy. WNT, Warszawa 2002.
12. Khurmi R. S., Gupta J.K.: Theory of machines. S Chand & Co Ltd, 2005.
13. Ceccarelli M. (Editor): Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science. Their Contributions and Legacies, Part 3. Evgrafov A., Kozlikin D.: Leonid Assur. Springer, Dordrecht 2014.
14. Siemieniako F.: Teoria maszyn i mechanizmów z zadaniami. DzWiPPB, Białystok 1999.
15. Myszka D. H.: Machines & mechanism. Applied kinematic analysis. Prentice Hall, Boston 2012.
16. Parszewski Z.: Teoria maszyn i mechanizmów. WNT, Warszawa 1978.
17. Morecki A., Oderfeld J.: Teoria maszyn i mechanizmów. PWN, Warszawa 1987.