

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

**Wydział Transportu**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Grzegorz Dobrzyński

**Synteza własności mechatronicznego wózka inwalidzkiego jako  
elementu systemu transportu osób niepełnosprawnych**

Promotor:  
prof. nzw. dr hab. inż. Włodzimierz Choromański

Warszawa, 2012r.



*Bardzo dziękuję Panu Profesorowi Włodzimierzowi  
Choromańskiemu za umożliwienie podjęcia tematu,  
poświęcony czas i wyrozumiałość.*

*Dziękuję również wszystkim osobom, które wsparły mnie  
w realizacji tej pracy.*

*Grzegorz Dobrzyński*





**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



PROJEKT WSPÓLFINANSOWANY ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO W RAMACH PROGRAMU OPERACYJNEGO INNOWACYJNA GOSPODARKA

# POLITECHNIKA WARSZAWSKA

## Wydział Transportu

# ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Grzegorz Dobrzyński

**Synteza własności mechatronicznego wózka inwalidzkiego jako  
elementu systemu transportu osób niepełnosprawnych**

Promotor:  
prof. nzw. dr hab. inż. Włodzimierz Choromański

**PRACĘ ZREALIZOWANO PRZY WSPARCIU PROJEKTU ECO – MOBILNOŚĆ**

współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

w ramach programu operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



**Biuro Projektu ECO-MOBILNOŚĆ**  
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu,  
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

web: [www.eco-mobilnosc.pw.edu.pl](http://www.eco-mobilnosc.pw.edu.pl)  
email: [biuro@eco-mobilnosc.pw.edu.pl](mailto:biuro@eco-mobilnosc.pw.edu.pl)  
tel.: 22 234 61 43, tel./fax.: 22 234 60 07



**Streszczenie:**

W pracy przedstawiono zagadnienia syntezy własności mechatronicznego wózka inwalidzkiego jako elementu systemu transportu osób niepełnosprawnych. Na bazie badań eksperymentalnych i doświadczeń eksploatacyjnych innych wózków inwalidzkich sformułowano wstępne założenia dla modelu nowego rozwiązania konstrukcyjnego wózka o specjalnych możliwościach. Przedstawiono proces budowy modeli nominalnych, modeli matematycznych i symulacyjnych z uwzględnieniem specyficznych cech tarcia oraz kontaktu tocznego kół z nawierzchnią. Model symulacyjny układu człowiek - pojazd - przeszkoda opracowano przy wykorzystaniu CAx/MBS. Przeprowadzono analizy wrażliwości parametrycznej. Wykorzystane zostały procedury optymalizacji parametrów wózka w celu zapewnienia warunków bezpieczeństwa. Uzyskane wyniki były podstawą opracowania konstrukcji prototypu wózka „Wektor”. Przeprowadzono również weryfikacyjne badania doświadczalne. Opracowana przez autora koncepcja budowy i działania stała się częścią zgłoszenia patentowego nr P.393063 z dnia 26.11.2010r. Wózek ten posiada autonomiczny napęd elektryczny spełniający następujące wymagania: możliwość poruszania się po różnorodnej nawierzchni, charakteryzującej się różnym współczynnikiem tarcia; możliwość samodzielnego pokonania typowej przeszkody typu stopień, krawężnik, schody itp.; możliwość samodzielnego wjazdu do autobusu lub tramwaju niskopodłogowego, relatywnie prosta i lekka konstrukcja.

W zakończeniu pracy sformułowano wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz określono przewidywane możliwości dalszych badań w tym zakresie.

## **DOCTORAL DISSERTATION**

**Subject: Synthesis of the mechatronic wheelchair properties as a part of the transport systems for people with disabilities**

### **Summary:**

The work concerns simulation tests of a mechatronic wheelchair design of the author's own concept. On the basis of experimental test and operational experience with other wheelchairs, input assumptions were made for the model of the here proposed wheelchair with special abilities. The dissertation presents a process of building nominal, mathematical and simulation models, taking into account specific characteristics of friction and tires-road contact. A simulation model of man - vehicle – obstacle configuration was developed with use of CAx / MBS. Furthermore, parametric sensitivity analysis was performed. Procedures of optimizing wheelchair's parameters was used in order to ensure proper safety conditions. Acquired results were used as a base for development of a prototype construction truck. Moreover, experimental validation studies were also carried out. The concept of the design and functionality of the presented wheelchair has been proposed by the author of this work and design approach has become a part of the patent application P.393063 of 26.11.2010. Presented Wheelchair has a stand-alone electric drive which meets the following requirements: the ability to move on various surfaces characterized by different coefficients of friction, the possibility of self-overcoming typical obstacles such as steps, curbs, stairs etc., the capability of independent entry into a low-floor bus or tram, a relatively simple and lightweight design.

The conclusion summarizes the results of the carried out research and describes projected possibilities for further works.



## Spis treści

|  |    |
|--|----|
| 1. Wstęp .....   | 11 |
| 1.1 Współczesne rozwiązania układów jezdnych zaawansowanych konstrukcji wózków inwalidzkich .....                | 12 |
| 1.1.1 Wózki elektryczne z układem gąsienicowym .....   | 13 |
| 1.1.2 Wózki z zespołem wielokołowym .....  | 14 |
| 1.1.3 Schodołazy .....   | 17 |
| 1.1.4 Wózki - roboty kroczące .....  | 17 |
| 1.1.5 Rozwiązania specjalne .....  | 19 |
| 1.2 Przegląd prac z zakresu wykorzystania symulacji komputerowej w analizie wózków inwalidzkich .....            | 20 |
| 2. Sformułowanie celu, tezy oraz zakresu pracy .....   | 22 |
| 2.1 Cel pracy .....  | 22 |
| 2.2 Teza pracy .....   | 22 |
| 2.3 Zakres pracy .....   | 22 |
| 2.3.1 Opis autorskiej koncepcji środka transportu dla osób niepełnosprawnych .....                               | 24 |
| 2.3.2 Algorytm pokonywania przeszkody .....  | 25 |
| 3. Budowa modelu symulacyjnego oraz zastosowane narzędzia .....  | 29 |
| 3.1 Model nominalny .....  | 30 |
| 3.2 Budowa modelu matematycznego .....   | 31 |
| 3.2.1 Warunek realizacji zadania pokonania przeszkody typu schody .....  | 35 |
| 3.3 Analiza wpływu doboru parametrów elementów modelu na realizację zadania pokonania przeszkody .....           | 37 |
| 3.3.1 Wpływ parametrów geometrycznych wiatraka kroczącego .....  | 37 |
| 3.3.2 Wpływ parametrów geometrycznych płozy poziomej .....   | 38 |
| 3.3.3 Wpływ masy modelu .....  | 40 |
| 3.3.4 Wpływ położenia środka ciężkości .....   | 40 |
| 3.3.5 Wpływ parametrów geometrycznych przeszkody (schodów) .....   | 41 |
| 3.4 Optymalizacja wybranych parametrów konstrukcji .....   | 44 |
| 4. Badania symulacyjne dynamiki modelu .....   | 46 |
| 4.1 Model nominalny .....  | 46 |
| 4.2 Model kontaktu kół, płozy i wiatraka z podłożem .....  | 47 |
| 4.3 Model symulacyjny ciała człowieka oraz model układu wózek – osoba na wózku .....                             | 51 |
| 4.4 Model napędu i sterowania .....  | 55 |
| 4.5 Równania ruchu .....   | 56 |
| 4.6 Badania symulacyjne .....  | 59 |
| 4.6.1 Analiza sił występujących w obszarach kontaktu z podłożem .....  | 60 |
| 4.6.2 Wyznaczenie zakresu wartości parametrów tarcia, przy których wózek poprawnie wjeżdża na różne schody ..... | 61 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.6.3 | Analiza momentów napędzających człony modelu .....  | 63  |
| 4.6.4 | Wyznaczenie przyspieszeń drgań elementów modelu .....                                       | 63  |
| 4.7   | Analiza drgań oddziałujących na człowieka w trakcie wjazdu na schody .....                  | 64  |
| 5.    | Badania symulacyjne modelu w zakresie podążania za zadanym torem jazdy .....                | 69  |
| 5.1   | Model nominalny .....   | 69  |
| 5.2   | Identyfikacja parametrów modelu .....   | 71  |
| 5.2.1 | Eksperymentalne wyznaczanie parametrów sztywności promieniowej modelu opon .....            | 71  |
| 5.2.2 | Eksperymentalne wyznaczanie stałej tłumienia opon .....                                     | 73  |
| 5.3   | Model symulacyjny .....   | 79  |
| 5.3.1 | Moduł ramy .....  | 80  |
| 5.3.2 | Moduły kół .....  | 81  |
| 5.3.3 | Moduł reprezentujący decyzje osoby kierującej wózkiem .....                                 | 82  |
| 5.3.4 | Moduł systemu sterowania .....  | 83  |
| 5.4   | Badania symulacyjne .....   | 84  |
| 5.5   | Analiza wrażliwości modelu .....  | 87  |
| 6.    | Budowa prototypu wózka .....  | 90  |
| 6.1   | Laboratoryjne badania doświadczalne własności jezdnych prototypowej konstrukcji wózka ..... | 90  |
| 6.2   | Analiza oddziaływań dynamicznych na osobę poruszającą się na wózku inwalidzkim .....        | 92  |
| 7.    | Podsumowanie i wnioski .....  | 95  |
| 8.    | Bibliografia .....  | 98  |
| 9.    | Spis rysunków .....   | 103 |
| 10.   | Spis tabel .....  | 107 |

## **1. Wstęp**

Współczesne systemy transportu powinny być tworzone z uwzględnieniem specyficznych potrzeb osób niepełnosprawnych. W założeniach do ich budowy bierze się pod uwagę specjalne ułatwienia, przede wszystkim dla osób z dysfunkcją narządów ruchu. Dla tych osób szczególnie istotnymi elementami systemu transportowego są: architektura, infrastruktura transportu, odpowiednio przystosowane środki komunikacji publicznej oraz środki transportu indywidualnego. Wózek inwalidzki o specjalnych możliwościach jest ważnym elementem systemów transportu. Rozwój motoryzacji oraz związany z tym dramatyczny wzrost liczby wypadków, a także choroby cywilizacyjne powodują zwiększoną liczbę osób dotkniętych trwałym kalectwem i niesprawnością narządów ruchu. Z informacji otrzymywanych od osób niepełnosprawnych wynika, że wciąż istnieje wiele barier utrudniających im samodzielne funkcjonowanie w społeczeństwie. Dla osób z niepełnosprawnością samodzielność jest równoznaczna z poczuciem godności. Niezależnie od obowiązującego prawa budowlanego liczba budynków, które są nieprzystosowane dla osób niepełnosprawnych ruchowo jest duża. Proces ich dostosowywania do wymagań normatywnych jest długotrwały i kosztowny. Istotnym elementem systemu transportu, który jest w stanie ułatwić pokonywanie przeszkód architektonicznych jest innowacyjny wózek inwalidzki o specjalnych możliwościach, takich jak pokonywanie schodów i unoszenie osoby niepełnosprawnej na wysokość osiągalną przez osoby w pełni sprawne.

Wysoki stopień zróżnicowania opracowanych rozwiązań wózków inwalidzkich jest odpowiedzią na zapotrzebowanie użytkowników odnośnie funkcjonalności środka transportu, ale przede wszystkim wynika on z wymagań dotyczących przystosowania do różnych typów schorzeń. Wózek inwalidzki dla konkretnej osoby dobiera się tak, aby podczas jego użytkowania, możliwie w jak najszerszym zakresie wykorzystywane były sprawne partie mięśni. Pozwala to poprawić komfort psychiczny osoby niepełnosprawnej poprzez umożliwienie jej względnie samodzielnej egzystencji, ale również na utrzymanie kondycji fizycznej. Dlatego wózków o napędzie ręcznym używają najczęściej osoby z porażeniem dwukończynowym nóg (paraplegia) lub innymi schorzeniami utrudniającymi chód, lecz z właściwą sprawnością górnych kończyn. Bardziej rozległe upośledzenia ruchowe wymagają wspomagania przemieszczania tego typu wózka przez osobę sprawną, co ogranicza samodzielność. W takich przypadkach niezbędne jest zastosowanie wózka z autonomicznym napędem np. elektrycznym.

Relatywnie mała ilość prac naukowych o tematyce transportu osób z niepełnosprawnością ruchowa oraz społeczna waga tego problemu stały się dla autora inspiracją do podjęcia tego tematu. Dodatkową motywacją i wsparciem w realizacji były prace zapoczątkowane przez Zakład Teorii Konstrukcji Urządzeń Transportowych a kierowane przez prof. nzw. dr hab. inż. Włodzimierza Choromańskiego.

## **1.1 Współczesne rozwiązania układów jezdnych zaawansowanych konstrukcji wózków inwalidzkich**

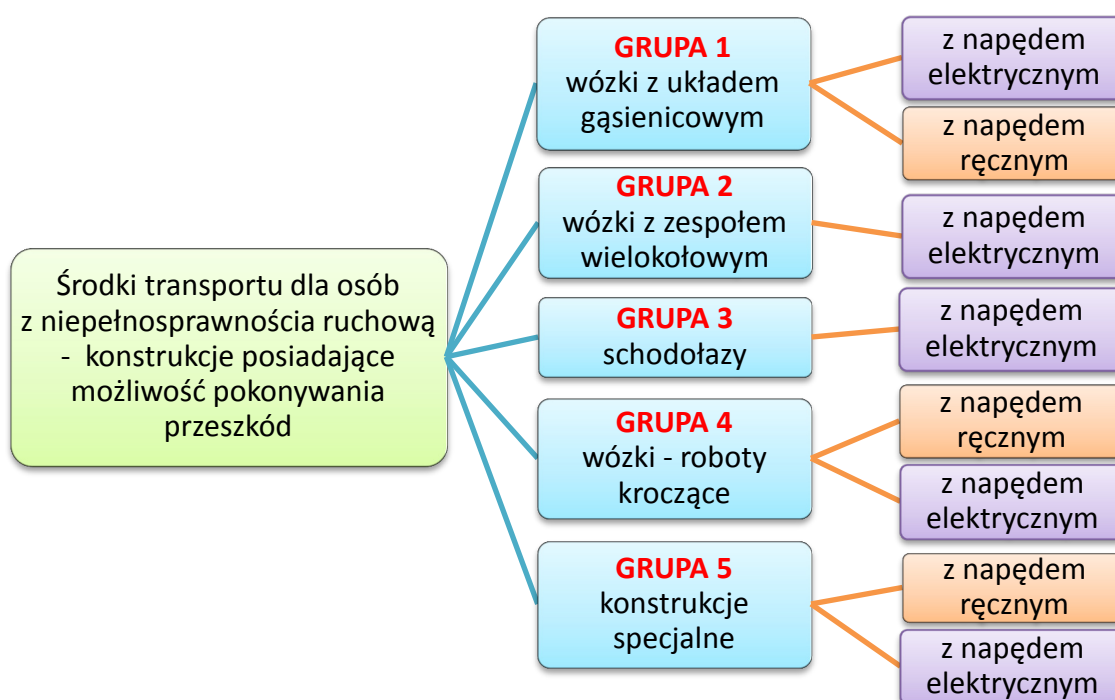
Współczesne elektryczne wózki inwalidzkie są skomplikowanymi konstrukcjami mechatronicznymi, a ich złożoność i różnorodność dostarcza wiele nowych funkcji. Podział takich wózków inwalidzkich może być dokonany według bardzo różnych kryteriów. Stosowane są różne klasyfikacje w różnych krajach i zostały one zaprezentowane w pracy [39]. Nie spotkano tam klasyfikacji ze względu na rodzaj niepełnosprawności. Przypadek, w którym uszkodzony jest tylko układ ruchowy kończyn dolnych jest diametralnie różny od przypadku z uszkodzeniem ruchowym kończyn górnych i dolnych. Nie bez znaczenia jest też stopień urazu, który warunkuje np. wybór systemów sterowania i konstrukcji mechanicznej wózka [10]. W niniejszej pracy rozważania dotyczą wózków dla osób z niepełnosprawnością dolnych kończyn, przy sprawnym układzie ruchowym kończyn górnych w stopniu pozwalającym samodzielnie sterować pojazdem poprzez panel typu joystick.

Napęd elektryczny ze względu na uniwersalność zastosowania, cichą pracę i brak emisji zanieczyszczeń jest najczęściej stosowanym w wózkach inwalidzkich rozwiązaniem. Wykorzystanie silnika elektrycznego wymaga, co prawda zawarcia w konstrukcji ciężkich i kosztownych magazynów energii elektrycznej, lecz tym samym daje również możliwość rozszerzenia podstawowej funkcji napędu o urządzenia pomocnicze [5][4][6]. Wózki elektryczne o rozszerzonej funkcjonalności będą głównie przedmiotem tego przeglądu.

Podstawowym obszarem zastosowania napędu elektrycznego w wózkach inwalidzkich jest napęd kół, przeznaczonych do jazdy po względnie płaskiej nawierzchni. Konstrukcje ograniczające się do tej funkcjonalności cechują się prostotą wykonania, a co za tym idzie niskimi kosztami zakupu. Z tego powodu obecnie jest to najpopularniejszy typ elektrycznych wózków. Konstrukcje, które można zaliczyć do tej grupy również cechują się różnicami w budowie. Producenci w celu umożliwienia pokonywania progów o nieznaczącej wysokości stosują większe koła napędowe oraz stosują napęd na cztery koła. Ma to na celu poprawienie

własności jezdnych w terenie. Rozwiązania te rozszerzają nieznacznie możliwości poruszania się wózków inwalidzkich, lecz nie rozwiązują podstawowego problemu, jaki staje przed osobą niepełnosprawną korzystającą z infrastruktury miejskiej, to jest schodów, stopni i krawężników. Dlatego te uproszczone konstrukcje nie będą opisywane w dalszej części pracy.

Dla potrzeb pracy dokonano podziału i zaprezentowano konstrukcje posiadające funkcje pokonywania przeszkód terenowych o gabarytach spotykanych na co dzień przez osoby poruszające się na nich. Strukturę podziału przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1 Struktura podziału konstrukcji posiadających możliwość pokonywania przeszkód

W kolejnych podrozdziałach, zaprezentowano konstrukcje reprezentujące każdą z grup. Autorską koncepcję zaklasyfikowano do grupy 5. Wszystkie, zgodnie z założeniami, mają możliwość pokonania przeszkód typu schody lub krawężnik.

### 1.1.1 Wózki elektryczne z układem gąsienicowym

Grupa 1 to wózki inwalidzkie z układem gąsienicowym. Problem pokonywania przeszkód typu schody został rozwiązany poprzez uzupełnienie podstawowego układu jezdnych wózka o układ gąsienicowy przeznaczony jedynie do tego celu. Przykładem takiego podejścia jest wózek EXPLORER firmy TGR [60] oraz wózek TopChair [61]. Podstawowy układ jezdny składa się z trzech kół – dwóch napędzanych i trzeciego służącego zadawaniu

kierunku jazdy (Rys. 2). W chwili przejścia w tryb jazdy po schodach koła są unoszone a wózek spoczywa na gąsienicach. Wjazd po schodach odbywa się tyłem, co może powodować dyskomfort. Duża masa układu gąsienicowego i jego znaczne rozmiary powodują ograniczenie wydajności jazdy po terenie płaskim. Ponadto, poruszając się po schodach, gąsienice zaczepiają się o ich krawędzie obciążając je znacząco, co może prowadzić do ich uszkodzenia.



Rys. 2 a) Wózek EXPLORER firmy TGR, b) wózek TopChair [61]

Wózki te przez swoją złożoność są bardzo ciężkie (ponad 100 kg). Wózek Explorer został zakupiony przez Zakład TKUT do badań eksperymentalnych w Międzyzakładowym Laboratorium Badań Doświadczalnych i Symulacyjnych Układu Człowiek-Środki Transportu-Otoczenie. Ich wyniki zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach. W chwili obecnej został wycofany ze sprzedaży. W literaturze można spotkać prace dotyczące prototypu wózków o napędzie ręcznym [24], posiadających układ gąsienicowy, jednak z uwagi na duże zapotrzebowanie energetyczne, a co za tym idzie duże obciążenie fizyczne podczas wjazdu na schody konstrukcje te nie są rozwijane.

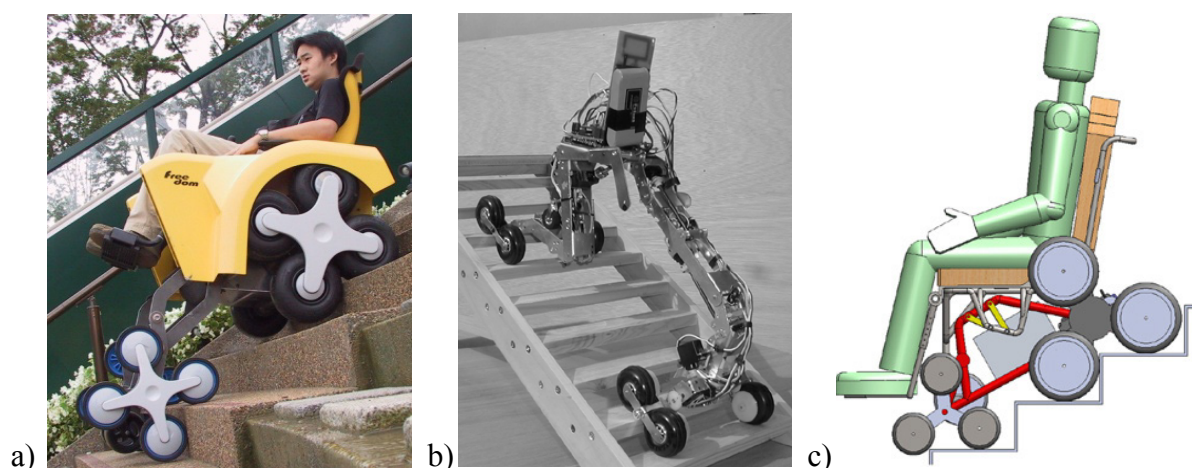
Jedynym wózkiem posiadającym opcję jazdy po schodach i pozostającym w ofercie handlowej jest elektryczny wózek TopChair [61].

### 1.1.2 Wózki z zespołem wielokołowym

Innym podejściem do problemu pokonywania przeszkód typu schody jest wykorzystanie wielokołowych zespołów napędowych. Konstrukcja posiadała zespoły kół, którym umożliwiono dodatkowy obrót wokół osi leżącej poza ich własną osią obrotu. W ten sposób zespoły kół, obracając się, wchodziły naprzemiennie w kontakt z kolejnymi stopniami,

a wózek pokonuje przeszkodę poprzez kroczenie zespołów. Istnieje wiele rozwinięć podstawowej koncepcji, różniących się przede wszystkim metodą stabilizacji konstrukcji podczas pokonywania przeszkody.

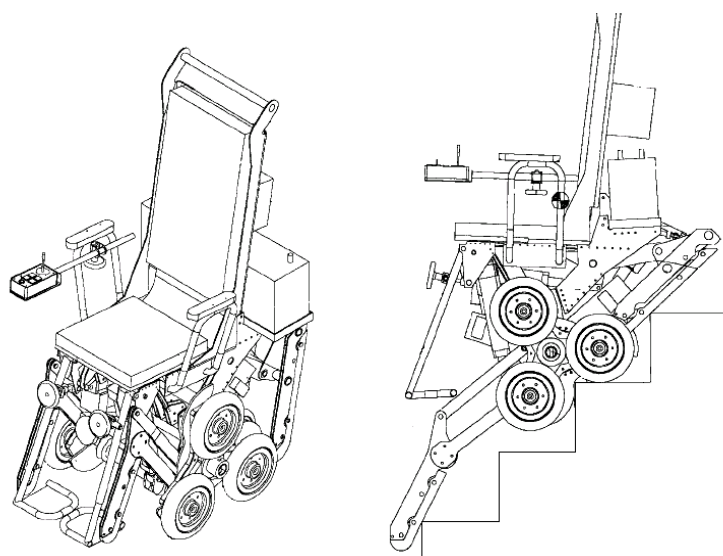
Na Rys. 3a) przedstawiono prototypowy wózek posiadający napędzany układ ośmiokołowy na tylnej osi i taki sam układ pełniący rolę stabilizatora w części przedniej [58][57]. Koła stabilizujące umieszczone są dodatkowo na wysuwanych ramionach w celu utrzymania dogodnego kąta nachylenia siedziska pasażera. Do jazdy po terenie płaskim wykorzystywane są dodatkowe koła samoskrętne. Konstrukcja ta charakteryzuje się znacznymi gabarytami, co zwiększa jej masę i utrudnia manewrowanie. Zbliżone rozwiązania zostały również przedstawione w pracach [24] Rys. 3b) oraz [41] Rys. 3c).



Rys. 3 Wózki posiadające zespoły wielokołowe na obu osiach: a) SunwaStair freedom [58], b) prototyp opracowany na Nagasaki University [24], c) model Politecnico di Torino [41];

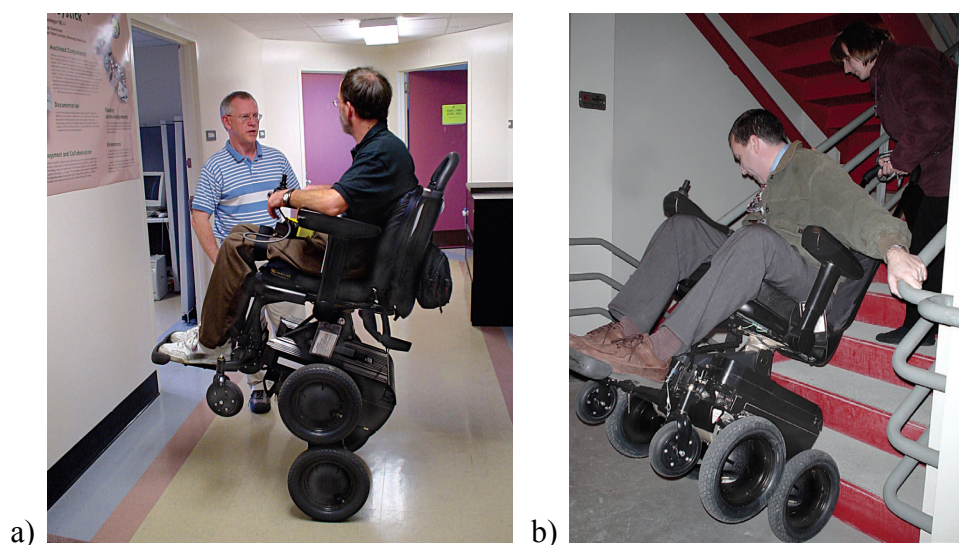
Innym rozwiązaniem jest opatentowana koncepcja wózka posiadająca dwa napędzane układy trzykołowe [36]. W tym przypadku do stabilizacji wykorzystywane są wysuwane ramiona o złożonej kinematyce. Ramiona te pełnią rolę podpór w przedniej i tylnej części wózka. Układ ten jest wrażliwy na położenie środka ciężkości. Do jazdy po terenie płaskim wykorzystywane są cztery nieskrętne koła, co utrudnia manewrowanie. Rozbudowana konstrukcja ramion dodatkowo zwiększa masę własną pojazdu, co pociąga za sobą duży pobór mocy.





Rys. 4 Wózek posiadający parę układów trzykołowych [36]

Jedną z najbardziej zaawansowanych konstrukcji wykorzystujących układy wielokołowe jest wózek o nazwie Independence 3000 IBOT. Konstrukcja posiada parę układów dwukołowych i cechuje się zdolnością jazdy po schodach, pokonywania krawężników, itp., lecz w ograniczonym zakresie. Podczas jazdy po terenie płaskim wykorzystywane są dwa z kół napędzanych i dodatkowe małe, samoskrętne koła przednie.



Rys. 5 Wózek IBOT 3000 [14]: a) podczas jazdy w pozycji uniesionej b) podczas wjeżdżania na schody z pomocą dodatkowej osoby

Układ wielokołowy wykorzystywany jest dodatkowo do unoszenia pasażera np. w celu sięgnięcia po przedmiot leżący na wysoko położonej półce sklepowej. Do stabilizacji konstrukcji podczas unoszenia i jazdy po przeszkodach wykorzystywany jest układ żyroskopowy oraz zespół czujników określających przesunięcie środka ciężkości względem punktu podparcia kół. Na tej podstawie, przy pomocy napędu kół, automatycznie



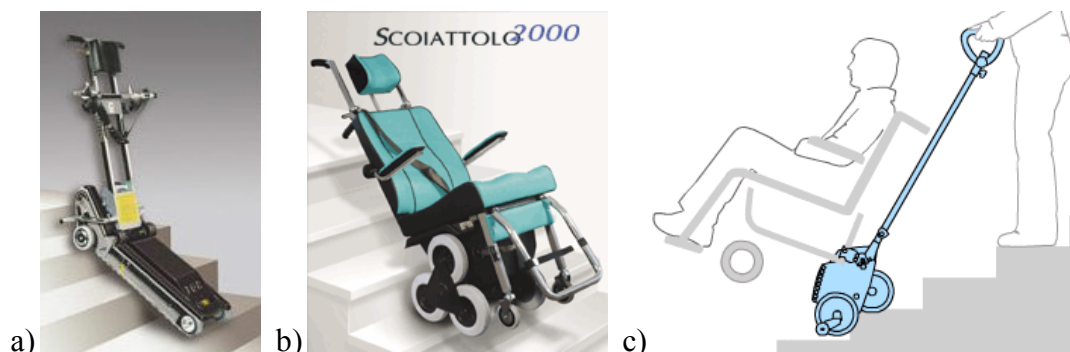
dokonywana jest korekcja położenia, co pozwala utrzymać równowagę. Układ ten nie jest jednak wystarczający podczas samodzielnego pokonywania schodów. W tym przypadku wymagany jest aktywny udział osoby poruszającej się na wózku lub pomoc osoby asystującej. IBOT 3000, jak dotąd, jako jedyny z omawianych wózków z układami wielokołowymi, trafił do sprzedaży na pewien czas, lecz z barku zainteresowania zaprzestano jego produkcję w 2008 roku.

### 1.1.3 Schodolazy

Mianem schodolazów określana jest grupa urządzeń, które służą tylko i wyłącznie pokonywaniu schodów. Są to urządzenia pomocnicze dla wózków inwalidzkich i samodzielnie nie mogą służyć przemieszczaniu się osoby niepełnosprawnej.

Dostępne w ofercie handlowej schodolazy oparte są głównie na omawianych już rozwiązaniach wykorzystujących układy wielokołowe lub gąsiennicowe. Są to najczęściej uniwersalne konstrukcje mogące współpracować z wieloma modelami wózków.

Podstawową wadą tych urządzeń jest fakt, że aby funkcjonować bezpiecznie wymagają asysty osoby sprawnej.



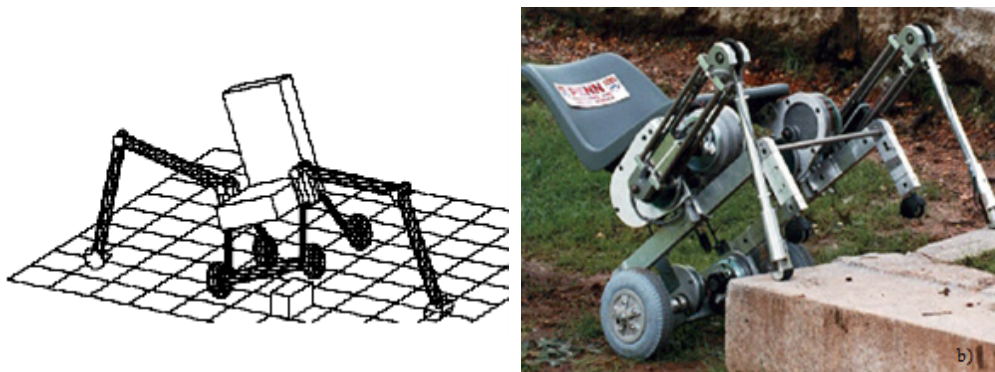
Rys. 6 Schodolazy: a) podnośnik gąsiennicowy TR-93 [26], b) fotel do transportu po schodach, c) urządzenie Scalamobil S30 [62] ;

Do tej grupy zaliczono również różnego rodzaju windy, platformy i krzesła dźwigowe dla osób niepełnosprawnych. Konstrukcje te wspomagają pokonywanie przeszkód, ale są związane z jedną lokalizacją a ich działanie odbiega od problematyki wózków. Propozycje te nie będą szerzej omawiane.

### 1.1.4 Wózki - roboty kroczące

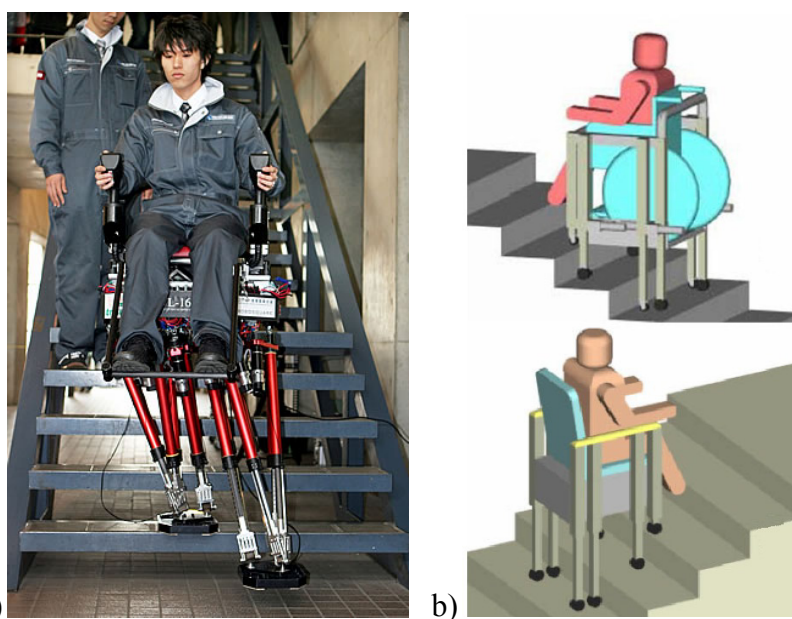
W grupie 4 zaprezentowano konstrukcje pokonujące przeszkody poprzez mechanizmy kroczące. Ciekawa propozycja została przedstawiona w [26], gdzie wózek jest wyposażony

w dwa ramiona – podpory. Posiada on klasyczny układ tylnych kół napędzanych i przednich kół samoskrętnych, do poruszania się po terenie płaskim. Do pokonywania przeszkód wykorzystywane są dwa dwuczłonowe, napędzane ramiona pełniące rolę „nóg”. Proces pokonywania przeszkody przedstawiono na Rys. 7 i jest on formą kroczenia.



Rys. 7 Konstrukcja wózka inwalidzkiego z dwiema nogami podczas pokonywania przeszkody [26]

Ramiona mogą być wykorzystane do pokonywania trudnego terenu, gdzie przeszkody rozmieszczone są niesymetrycznie względem kół wózka lub pełnić rolę prostych manipulatorów np. do otwierania drzwi. Wadą tego rozwiązania, przynajmniej w wersji prototypowej, jest brak możliwości regulacji kąta pochylenia siedziska. Problematiczne wydaje się również pokonywanie schodów zbudowanych z wielu krótkich stopni, ponieważ w takim przypadku trudno jest uzyskać stabilną pozycję przejściową podczas przemieszczania ramion z tyłu na przód.



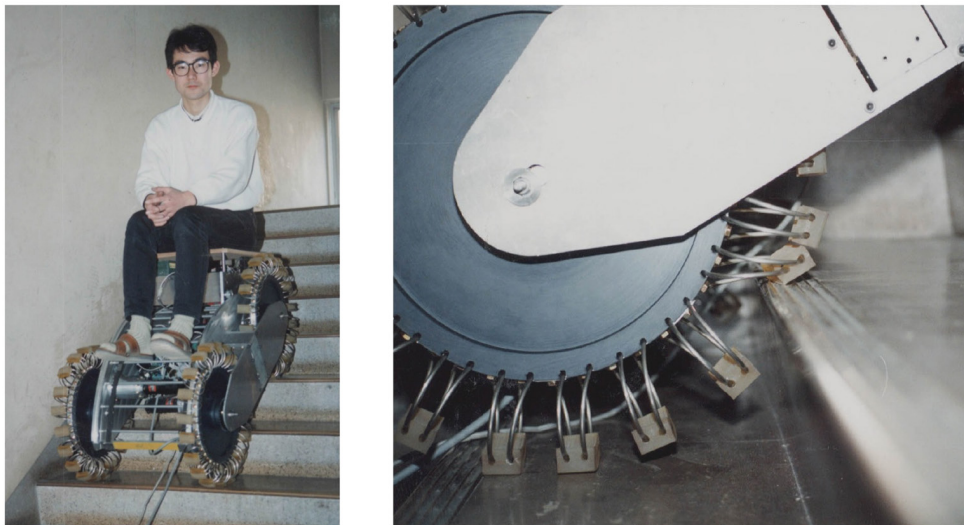
Rys. 8 Roboty kroczące budowane do transportu osób niepełnosprawnych [26]

Rozwiązanie problemu pokonywania schodów poprzez budowę robotów kroczących jest przede wszystkim wyzwaniem dla konstruktorów. Cechy użytkowe są niewspółmierne do

nakładów. Roboty te są w stanie sprawnie kroczyć po schodach, lecz poruszanie się po powierzchniach płaskich jest mniej komfortowe i ze względu na złożoność napędów - bardziej energochłonne.

### 1.1.5 Rozwiązania specjalne

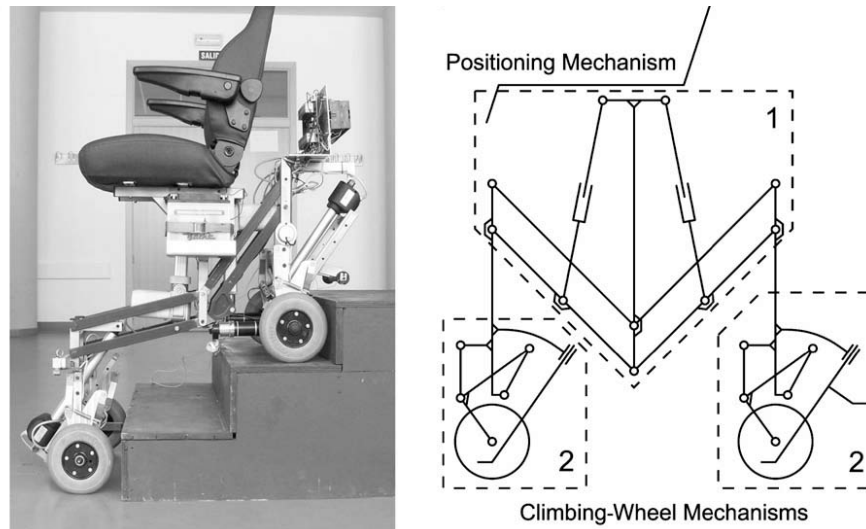
Do ostatniej z omówionych grup zaklasyfikowano konstrukcje łączące cechy poprzednich. Próbą wyeliminowania wad napędu wielokołowego (Rys. 3) jest prototypowa maszyna [26] o nazwie Terrain-AdaptiveQuadru-Track (TAQT) przedstawiona na Rys. 9.



Rys. 9 Konstrukcja o sprężystych kołach tzw. Terrain-AdaptiveQuadru-Track (TAQT)[24]

Konstrukcja posiada specjalne koła, wyposażone w bieżnik na sprężynie (spring-wheel). Bieżnik składa się z segmentów sprężysto połączonych z korpusem koła. Kiedy koło napotyka ostry fragment podłoża lub krawędź stopnia, część segmentów bieżnika ugina się i tworzy punkt podparcia dla koła. Prototyp TAQT posiada również system płynnej regulacji kąta pochylenia siedziska.

Ciekawą koncepcję przedstawił ośrodek z Hiszpanii w pracy [31]. Wózek ten posiada układ jezdny składający się z dwóch zespołów posiadających po 2 koła i układ wspinania na kolejny schodek. W zależności od geometrii schodów lub innej przeszkody układy kontroli, niezależnie dla mechanizmu przedniego i tylnego, wykonują kolejne etapy wspinania. Wózek w sposób ciągły ustawia siedzisko względem kierunku poziomego.



Rys. 10 Konstrukcja wózka wspinającego się po schodach [19] wraz ze schematem kinematycznym

Do tej grupy zaliczono również konstrukcję będącą przedmiotem tej rozprawy. Autorska koncepcja jest w swoim działaniu najbardziej zbliżona do ostatniej z opisanych, lecz znacząco prostsza w budowie. Jej opis został przedstawiony w kolejnych rozdziałach.

## 1.2 Przegląd prac z zakresu wykorzystania symulacji komputerowej w analizie wózków inwalidzkich

Prace z zakresu wykorzystania symulacji komputerowej w analizie elektrycznych wózków inwalidzkich nie są przedmiotem dużej liczby publikacji. Można spotkać prace, w których przedstawiono badania wózków korzystając z narzędzi i doświadczeń pochodzących z problematyki ruchu pojazdów samochodowych [40][44]. Zawężając obszar poszukiwań do publikacji dotyczących modeli symulacyjnych wózków inwalidzkich pokonujących przeszkody można odnaleźć na świecie tylko kilka ośrodków naukowych związanych z tą tematyką. W polskojęzycznych publikacjach prezentowane są prace związane z wózkami o napędzie ręcznym [5] [45] oraz wyniki badań symulacyjnych nowych koncepcji konstrukcji wózków elektrycznych opracowane przez Zakład Teorii Konstrukcji Urządzeń Transportowych na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej. Pierwsze wyniki tych prac opublikowano w 2004 roku w pozycji [12]. Kolejne nowe koncepcje przedstawione zostały w pracach [9], [59]. Modele symulacyjne tam zaprezentowane w sposób bezpośredni

zainspirowały autora do opracowania własnej koncepcji. Te nowe autorskie rozwiązania, będące częścią rozprawy, zostały przedstawione po raz pierwszy w pracach [8], [16], [15].

Autorzy z USA w pracy [14] systematyzują problematykę badania nowych konstrukcji wózków inwalidzkich o specjalnych możliwościach. Poza zdefiniowaniem stanu obecnego proponują nowe kierunki poszukiwań.

Przykładem analizy komputerowej wykorzystującej narzędzia symulacji i optymalizacji parametrów konstrukcji a skończywszy na badaniach na modelu rzeczywistym są opracowania ośrodka University of Castilla-La Mancha Campus, Ciudad Real, Spain. Jest to przykład kompleksowego podejścia do rozwiązania problemu naukowego w zakresie badania nowego środka transportu. W pracach [32], [19], [31] zostały przedstawione kolejne etapy rozważań analitycznych dla modeli statycznych oraz dynamicznych. Analizowany był też wpływ różnych parametrów układu sterowania i jego oddziaływanie na osobę poruszającą się na wózku.

Zbliżoną metodologię analizy problemu przyjął również ośrodek z Włoch. Przedstawiona w pracy [41] koncepcja wózka inwalidzkiego pokonującego przeszkody jest znacząco odmienna, ale zakres i narzędzia analizy problemu są bardzo zbliżone.

W pracach [24], [43], zaprezentowano kolejne rozwiązania konstrukcyjne wózków pokonujących przeszkody kładąc nacisk na rozważania analityczne i badania eksperymentalne. Autorzy z Japonii zaprezentowali również unikatową konstrukcję poruszającą się po schodach, napędzaną siłą mięśni rąk.

Autorzy z Tajwanu w pracy [30] zaprezentowali złożoną mechanicznie konstrukcję w której ograniczyli problematykę analizy pokonywania przeszkód do warunków zachowania statycznej stabilności. Zbliżone podejście zostało zaprezentowane również w pracy [13].

Wszystkie zaprezentowane powyżej prace rozróżniał przedmiot badań. Każdy z ośrodków naukowych zaproponował swoje koncepcje konstrukcji i dla nich prowadził prace badawcze. Pomimo prac nad odmiennymi konstrukcjami naukowcy realizowali swoje projekty w podobnym zakresie, stosując zbliżone metody analizy oraz narzędzia symulacji.

## **2. Sformułowanie celu, tezy oraz zakresu pracy**

### **2.1 Cel pracy**

Celem pracy jest opracowanie modelu matematycznego, badania symulacyjne oraz weryfikacja doświadczalna wybranych własności użytkowych prototypu wózka mechatronicznego. Działania te ukierunkowano na stworzenie prototypu autorskiej koncepcji wózka inwalidzkiego. Główną jego zaletą będzie możliwość pokonywania przeszkód terenowych typu stopień, krawężnik czy schody oraz unoszenie osoby niepełnosprawnej na wysokość osiągalną przez osoby w pełni sprawne.

### **2.2 Teza pracy**

Teza pracy została sformułowana następująco:

- Model matematyczny, symulacja komputerowa i badania doświadczalne prototypu wózka stanowią efektywne narzędzia optymalizacji konstrukcji i syntezy jego własności mechatronicznych.
- W procesie symulacji i testowania prototypu istnieje możliwość oceny wpływu warunków jazdy (rodzaju przeszkód, prędkości jazdy, amplitud i częstotliwości drgań) na osobę poruszającą się wózkiem.

### **2.3 Zakres pracy**

We wstępie rozprawy doktorskiej zawarto przesłanki, jakie skłoniły autora do podjęcia tego tematu. Poruszany problem uwidocznił się w przeglądzie rozwiązań elektrycznych wózków inwalidzkich. Podjęto próbę omówienia literatury poruszającej problem zastosowania symulacji w opracowywaniu konstrukcji wózków inwalidzkich. Podano cel pracy, zakres zadań badawczych oraz tezy pracy.

Poza wstępem i uwagami końcowymi praca składa się z czterech zasadniczych części. Część pierwsza zamieszczona w rozdziale 3 dotyczy zagadnień związanych z opracowywaniem modelu symulacyjnego do badań w obszarze statyki. Celem rozważań tej części pracy było zbudowanie modelu nominalnego zastępującego model rzeczywisty w taki

sposób, aby obejmował on zasadnicze cechy omawianej grupy wózków inwalidzkich i umożliwił jego wykorzystanie do opracowania modelu symulacyjnego celem przeprowadzenia analiz problemu wjazdu na schody. Sposób przedstawienia zagadnienia pozwala na sprzęgnięcie opracowanego modelu wózka z modelem pasażera oraz podłoża przy jednoczesnym modyfikowaniu ich parametrów. Sprecyzowano grupę parametrów mających zasadniczy wpływ na przebieg realizacji celu.

Część drugą (rozdział 4) poświęcono zagadnieniom związanym z analizą modelu dynamiki wózka w trakcie pokonywania przeszkody. Przedstawiono zagadnienia opracowywania modeli z zastosowaniem pakietów MBS. Przedstawiono jeden z podstawowych sposobów opracowywania równań ruchu dla złożonych układów, do których należy zaliczyć rozpatrywany model wózka. Przedstawiono również sposób odzwierciedlenia zjawisk kontaktu na podstawie, którego dobrano program symulacyjny Adams. Na podstawie opisanego modelu nominalnego zbudowano model symulacyjny wózka. Zastosowano ciała sztywne, które zostały połączone ze sobą tworząc strukturę mechaniczną wózka umożliwiającą ich ruch względem siebie. Tak opracowana struktura mechaniczna wózka została uzupełniona opracowanym modelem pasażera. Zastosowano opis wzajemnego oddziaływania człowieka z fotelem wózka zgodnie z modelami zawartymi w cytowanej literaturze.

Część trzecia (rozdział 5) to omówienie badań symulacyjnych z zakresu jazdy po wyznaczonym torze ruchu. Przedstawiono wyniki symulacyjne modelu opracowanego w środowisku Matlab-Simmechanics. Symulacje te zrealizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie zaprezentowano wyniki dla modelu nominalnego dając czytelny obraz do porównań z wynikami symulacji dla zmienionych parametrów.

Część czwarta (rozdział 6) zawiera prezentację prototypowej konstrukcji stanowiącej syntezę parametrów uzyskanych z przeprowadzonych badań symulacyjnych. Prototyp powstał na bazie tej pracy i przy udziale autora. Przedstawiono badania eksperymentalne oddziaływań drgań na osobę poruszającą się na tym wózku. Uzyskane wyniki umożliwiły weryfikację badań symulacyjnych.

W zakończeniu pracy przedstawiono wnioski oraz kierunki dalszych badań w zakresie projektowania innowacyjnych wózków.

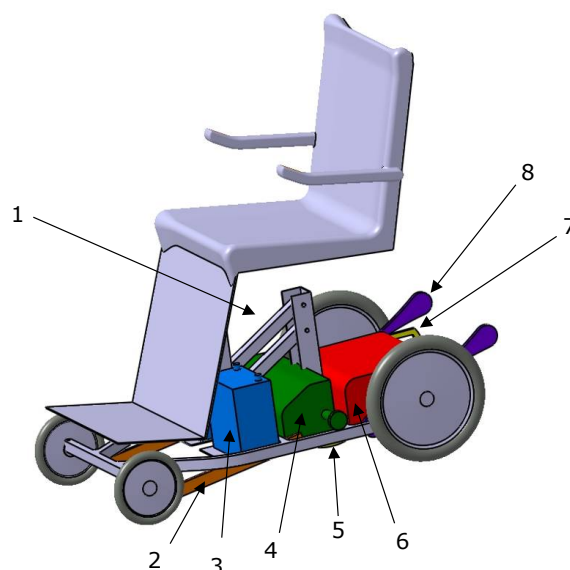
### 2.3.1 Opis autorskiej koncepcji środka transportu dla osób niepełnosprawnych

W niniejszym rozdziale zawarto założenia do budowy wózka inwalidzkiego nowej generacji dla osób niepełnosprawnych ruchowo. Główną zaletą analizowanej koncepcji wózka jest możliwość pokonywania przeszkód terenowych typu stopień, krawężnik albo schody oraz funkcja unoszenia siedziska. Nowa koncepcja budowy wózka dla osoby niepełnosprawnej z autonomicznym napędem elektrycznym spełnia następujące wymagania:

- możliwość ruchu po różnego rodzaju nawierzchniach (nawierzchnia nierówna, piasek, trawnik, itd.);
- możliwie małe gabaryty;
- możliwość jazdy po schodach prostych;
- możliwość samodzielnego wjazdu do autobusu nisko-podłogowego;
- możliwość podnoszenia oraz opuszczania osoby niepełnosprawnej (celem np. zdjęcia towaru z górnej półki w supermarkecie lub załatwienie formalności przy wysokim okienku pocztowym);
- relatywnie niska cena w porównaniu do wózków zbliżonej funkcjonalności.

Na Rys. 11 przedstawiono autorski model koncepcji konstrukcji wózka inwalidzkiego. Główny element konstrukcji - układ napędowy składa się z dwóch silników elektrycznych (4). Poprzez różnicowanie prędkości pomiędzy nimi następuje zmiana kierunku jazdy. Układy wózka będą zasilane przez dwa bezobsługowe akumulatory żelowe - 12V, 2x20Ah. Są one umieszczone możliwie nisko, aby uzyskać najkorzystniejsze położenie środka ciężkości (3). Pod siedziskiem znajduje się układ unoszenia siedziska (1) z opcją ułatwiania wsiadania na wózek. Powiązany z nim jest układ korekcji pochylenia siedziska w trakcie pokonywania przeszkody. W tylnej części wózka znajduje się ramię wiatraka unoszącego wózek na przeszkodę (8). Napędzane jest ono przez moduł silnika z przekładnią (6). W trakcie pokonywania przeszkód dużą rolę odgrywają układy rozpoznawania odległości od krawędzi: przedni (5) oraz tylny (7). Na tym etapie pomocna jest również płoza ślizgowa (2), która poprzez połączony z nią napęd, zapewnia zachowanie odpowiedniego położenia kąтового siedziska.





Rys. 11 Model koncepcji konstrukcji wózka inwalidzkiego

Wózek posiada dwa tryby jazdy: "normalny" i "przeszkoda". Tryb "normalny" służy do poruszania się po powierzchniach płaskich i niewielkich nierównościach. Mamy do wyboru dwa biegi: I i II. Na biegu pierwszym wózek osiąga prędkość maksymalną 1 m/s i jest przewidziany do używania w niedużych pomieszczeniach. Jego zaletą jest ułatwione sterowanie kierunkiem jazdy. Bieg II używany jest do pokonywania dłuższych odcinków. Wymaga większej precyzji w posługiwaniu się manetką sterowania kierunkiem jazdy. W normalnym trybie jazdy istnieje możliwość pokonywania przeszkód typu próg o wysokości do około 0,05 m. Przy przeszkodach większych należy używać trybu schody, w którym prędkości zbliżania się do przeszkód są ograniczone i działają układy rozpoznawania odległości od krawędzi.

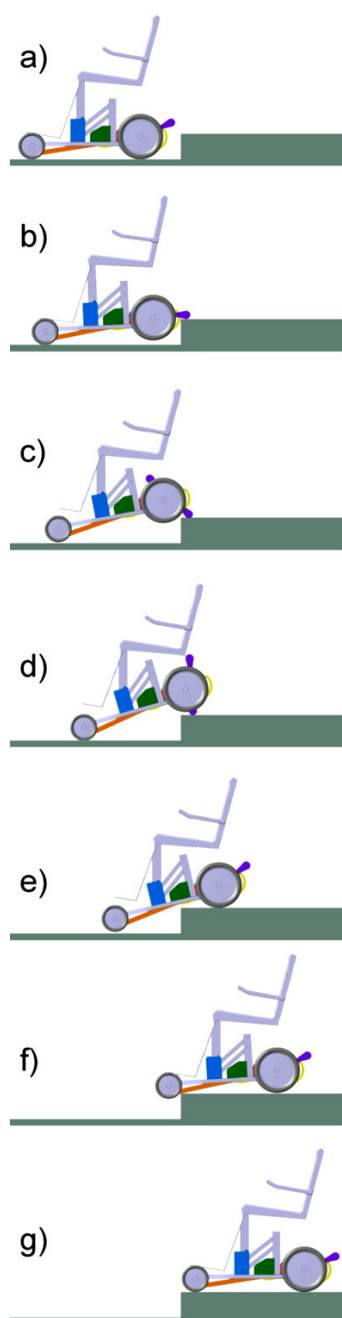
Wózek posiada też funkcję podnoszenia siedziska na wyższy poziom. Jest to ważne dla osób niepełnosprawnych, gdyż daje możliwość sięgania na wysokości dostępne dla osób sprawnych. W trakcie tego procesu koła wózka zostają zablokowane i nie ma możliwości jazdy. Przewidywany jest również system sygnalizacji dźwiękowej przypominający o tym trybie pracy.

### 2.3.2 Algorytm pokonywania przeszkody

Algorytm pokonywania przeszkody został opisany na przykładzie wjazdu i zjazdu z pojedynczego stopnia reprezentującego np. krawężnik. Problem pokonywania schodów jest iteracyjnym powtórzeniem wybranych sekwencji tego algorytmu.

### Wjazd na przeszkodę

Do wjazdu na wszelkiego rodzaju przeszkody wyższe niż 0,05 m należy podjechać tyłem. Zbliżając się do wjazdu na przeszkodę, krawężnik lub schody kierujący przełącza sterowanie na tryb jazdy „przeszkoda”. Prędkości głównych silników zostaną zredukowane a układy rozpoznawania odległości rozpoczną działanie (Rys. 12, faza a). System sterowania zbliży wózek do krawędzi przeszkody na odpowiednią odległość i ustawi go prostopadle. Rozpocznie się faza b). Główne silniki napędowe zostaną wyłączone, a koła napędowe są blokowane. Pracę rozpocznie napęd ramienia unoszącego.



Rys. 12 Sekwencja algorytmu wjazdu na przeszkodę

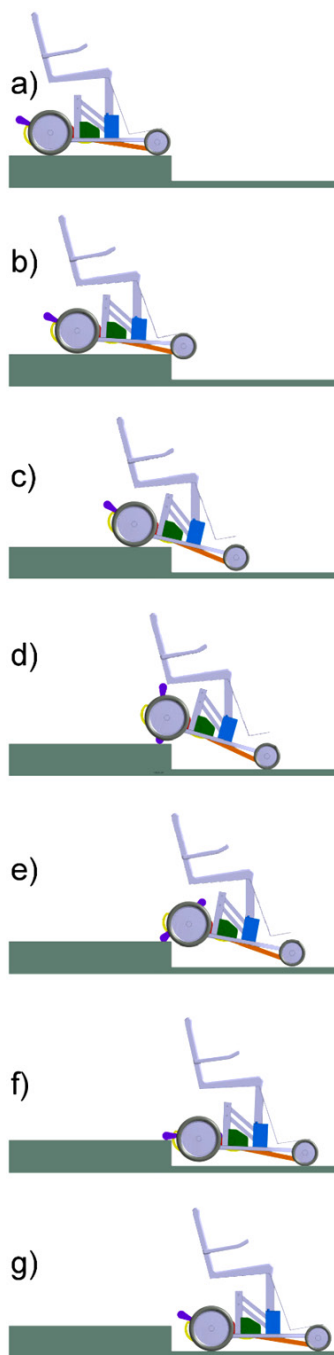
Przechodząc do kolejnych faz c) i d) układ sterownia utrzymuje siedzisko w poziomie. Faza e) rozpocznie się po wykonaniu obrotu o  $180^\circ$  przez ramię unoszące. Zostaną uruchomione główne silniki napędowe i ze zredukowaną prędkością będą wprowadzały wózek na przeszkodę. Działające układy rozpoznawania odległości będą monitorowały czy przed wózkiem stoi zadanie pokonania kolejnego stopnia. Jeśli tak, ponownie rozpocznie się cykl od fazy a). Jeżeli był to ostatni stopień przeszkody, wózek ze zredukowaną prędkością będzie poruszał się do tyłu. W fazie f) krawędź przeszkody przesuwana się po szynie poślizgowej płozy poziomującej i następuje wprowadzenie przednich kół na przeszkodę. W końcowej fazie g) użytkownik przełącza tryb sterownia na „normalny”.

### **Zjazd z przeszkody**

Przygotowując się do zjazdu z różnego rodzaju przeszkód wózek należy ustawić przodem możliwie prostopadle do jej krawędzi. O momencie załączenia tego trybu decyduje użytkownik.

Z chwilą załączenia trybu „przeszkoda” (Rys. 13, faza a) nastąpi redukcja prędkości silników głównych, a układy rozpoznawania odległości, umieszczone pomiędzy osią przednią i tylną wózka, rozpoczną działanie (faza b). Kontynuując zjeżdżanie układ rozpoznawania odległości w odpowiednim momencie zatrzyma główne silniki napędowe (faza c). Rozpocznie się faza d). Koła napędowe zostaną zablokowane. Pracę rozpocznie napęd ramienia wiatraka krocącego. Przechodząc do kolejnych faz e) i f) układ sterownia utrzymuje siedzisko w poziomie. Faza g) rozpocznie się po wykonaniu obrotu o  $180^\circ$  przez ramię unoszące. Zostaną uruchomione główne silniki napędowe i ze zredukowaną prędkością będą oddalały wózek od pierwszego progu przeszkody. Działające układy rozpoznawania odległości będą monitorowały czy przed wózkiem stoi zadanie pokonania kolejnego stopnia. Jeśli tak ponownie rozpocznie się cykl od fazy d). Jeżeli był to ostatni stopień przeszkody wózek ze zredukowaną prędkością będzie poruszał się do przodu.

Po zakończeniu fazy g) użytkownik przełącza tryb sterownia na „normalny”.



Rys. 13 Sekwencja algorytmu zjazdu z przeszkody

W poprawnym działaniu tego algorytmu istotną rolę pełnią układy rozpoznawania odległości od krawędzi przeszkody. Zaproponowano zastosowanie układów ultradźwiękowych, ponieważ nie są wrażliwe na kolor i rodzaj powierzchni przeszkody.

### **3. Budowa modelu symulacyjnego oraz zastosowane narzędzia**

Podstawą syntezy własności autorskiej koncepcji wózka inwalidzkiego były narzędzia symulacji komputerowej. Problemy modelowania i symulacji zostały zrealizowane w trzech grupach tematycznych:

- Model statyczny dla zadania pokonywania przeszkody. Wykorzystano narzędzia opisu analitycznego, który został przedstawiony w tym rozdziale.
- Model dynamiki dla zadania pokonywania przeszkody. Wykorzystano pakiet symulacyjny MSC.Adams. Opis badań przedstawiono w rozdziale 4.
- Badania symulacyjne jazdy po powierzchni płaskiej po zadanym torze jazdy. Wykorzystano środowisko symulacyjne Matlab-SimMechanics. Opis badań przedstawiono w rozdziale 5.

Na wszystkich etapach autor odnosi się do zagadnienia identyfikacji parametrów modeli na podstawie analizy literatury oraz badań eksperymentalnych. Badania symulacyjne ukierunkowano na analizę wrażliwości parametrycznej. Pod pojęciem analizy parametrycznej rozumie się wpływ zmian wartości parametru na wybrane własności modelu symulacyjnego. Zadanie to było realizowane symulacyjnie, więc nie definiowano funkcji wrażliwości [11].

Projektując nowoczesne środki transportu kierujemy się ich funkcjonalnością, a przede wszystkim bezpieczeństwem eksploatacji. Wymusza to konieczność stosowania skutecznych i wydajnych metod badawczych w odniesieniu do analizowanych zagadnień. Badania doświadczalne dostarczają obiektywnych wyników, niestety są kosztowne i czasochłonne. Stosowanie metod komputerowego wspomaganie projektowania zwiększa efektywność pracy inżynierów i skraca proces powstawania produktu. Do prowadzenia symulacji dynamicznych wykorzystywane są gotowe pakiety numeryczne zaliczane do grupy programów MBS (Multi Body System). Umożliwiają one symulacje dynamiki bardzo złożonych układów mechanicznych oraz wizualizację wyników a także animacje ruchu analizowanego wariantu projektu. Najczęściej wykorzystywane modele budowane są z brył sztywnych oraz przypisanych połączeń. Duży zakres możliwości opisanie elementów modelowanego układu pozwala na bliskie odzwierciedlenie rzeczywistych warunków realizacji symulacji.

Do najbardziej rozpowszechnionych systemów, mających zastosowanie do wspomaganie procesu symulacji ruchu układów mechanicznych, można zaliczyć: MSC.Adams, LMS.Virtual.LAB, Matlab-Simmechanics, DADS.

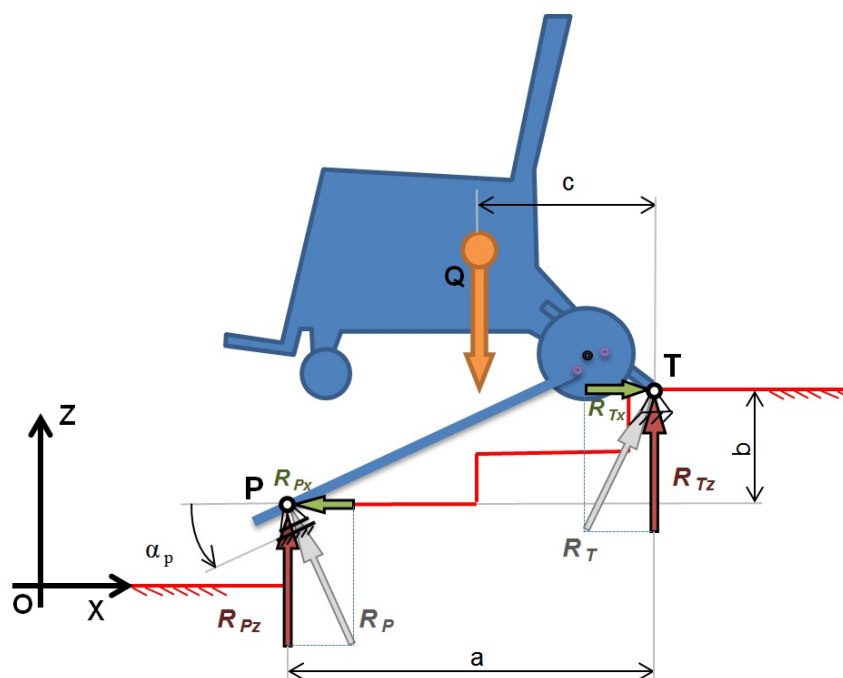
W niniejszym rozdziale przedstawiono model symulacyjny układu statycznego. Podstawą rozważań było zastosowanie uproszczenia sprowadzającego każde kolejne etapy ruchu wózka do sekwencji położeń modelu z zachowaniem równowagi sił oddziałujących na ten układ. Uproszczenie to zostało zweryfikowane w kolejnym rozdziale, gdzie przeprowadzono symulacje dynamiki ruchu wózka. Analizy statyki ograniczono do procesu pokonywania przeszkody. Jako przeszkodę wybrano czterostopniowe schody. W ujęciu statycznym wyniki analiz będą identyczne dla wjazdu, jak i zjazdu ze schodów. Proces pokonywania pierwszego schodka odpowiada problemowi pokonywania krawężnika.

Celem zaprezentowanych w tym rozdziale symulacji było przeanalizowanie wpływu wybranych parametrów na poprawność realizacji zadania pokonania przeszkody.

### **3.1 Model nominalny**

Przez model nominalny rozumiemy uproszczony model struktury obiektu fizycznego stanowiącego podstawę badań symulacyjnych [48].

Opisany w tym rozdziale model został uproszczony do modelu płaskiego względem płaszczyzny XZ zgodnie z Rys. 14. Na rysunku tym określono również orientację układu współrzędnych. W analizach statycznych wózek inwalidzki będzie traktowany jako ciało sztywne podparte w punkcie P (przednia część wózka) oraz w punkcie T (tylna część wózka). Podpora w punkcie P jest podporą ruchomą przenoszącą reakcję tylko w prostym do kierunku określanego przez płożę poziomującą (Rys. 14). Założono, że w tym punkcie modelu tarcie nie występuje. Gdy płoża ta przyjmuje położenia na powierzchni poziomej, reakcje w tym punkcie będą miały kierunek pionowy, a gdy płoża będzie kontaktowała się z krawędzią schodów to kierunek reakcji będzie prostym do płoży. W punkcie T kontakt będzie występował naprzemiennie pomiędzy kołem tylnym i podłożem oraz pomiędzy ramieniem wiatraka krocącego i podłożem. W punkcie T zastosowano podporę stałą, która będzie przenosiła siły w obu kierunkach.



Rys. 14 Model płaski układu statycznego wraz z naniesionymi składowymi reakcji w punktach podparcia

Konsekwencją analizy układu statycznego jest przyjęcie założeń, że w modelu podczas pokonywania przeszkody w punkcie T występuje tarcie nierozwinięte, a w punkcie P nie występują siły tarcia.

### 3.2 Budowa modelu matematycznego

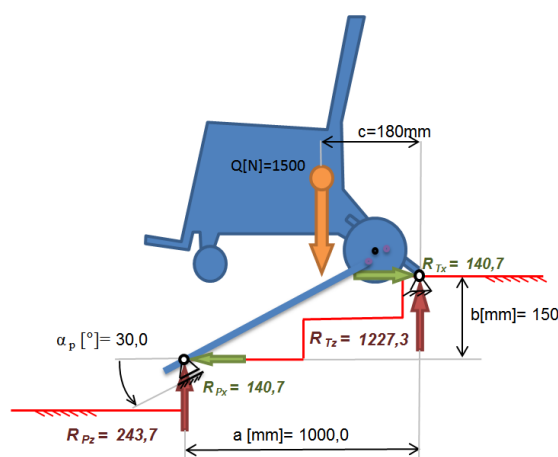
Traktując wózek inwalidzki, jako bryłę sztywną symetryczną względem płaszczyzny XZ (zgodnie z Rys. 14) uproszczono budowę modelu do układu płaskiego, w którym wartości sił będą sumą wartości rozłożonych na części symetryczne po prawej i lewej stronie.

$$\begin{cases} \sum F_x = R_{Tx} - R_{Px} = 0 \\ \sum F_z = R_{Tz} + R_{Pz} - Q = 0 \\ \sum M_T = R_{Px} \cdot b - Q \cdot c + R_{Pz} \cdot a = 0 \\ R_{Px} = R_{Pz} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \end{cases} \quad (1)$$

Wykonując elementarne przekształcenia otrzymano rozwiązanie w postaci:

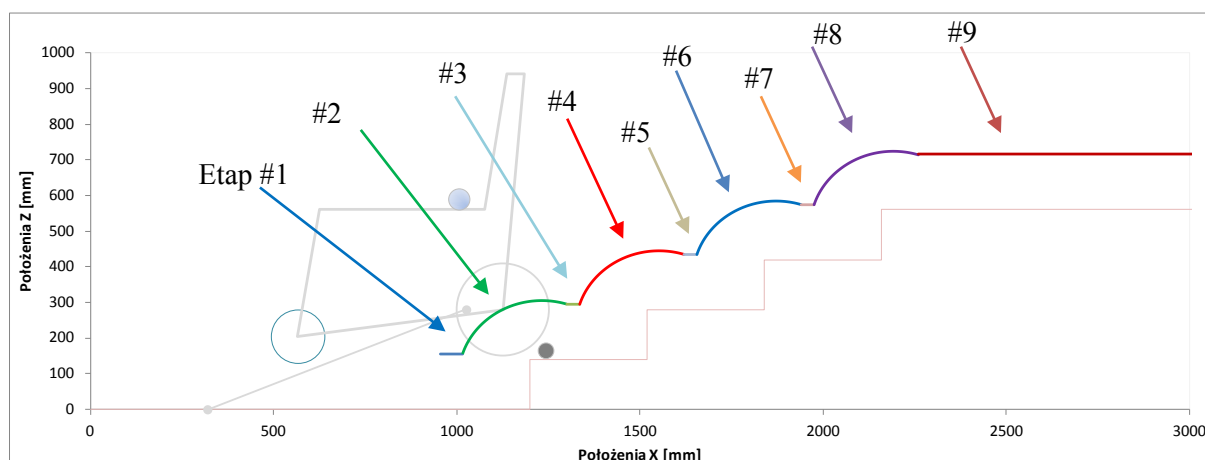
$$\begin{cases} R_{Tx} = R_{Px} = Q \cdot \frac{c \cdot \operatorname{tg}\alpha_p}{a + b \cdot \operatorname{tg}\alpha_p} \\ R_{Pz} = Q \cdot \frac{c}{a + b \cdot \operatorname{tg}\alpha_p} \\ R_{Tz} = Q \cdot \left(1 - \frac{c}{a + b \cdot \operatorname{tg}\alpha_p}\right) \end{cases} \quad (2)$$

Rozwiązanie tych równań dla przykładowych wartości parametrów geometrycznych wózka przedstawiono na Rys. 15. Rysunek ten może być interpretowany jako jedno z położeń jakie zajmuje wózek pokonując przeszkodę o zaproponowanej geometrii.



Rys. 15 Schemat modelu sprowadzonego do układu statycznego wraz z przykładowymi wynikami obliczeń reakcji w punktach podparcia

W celu przeanalizowania całego zadania pokonywania przeszkody przygotowano arkusz kalkulacyjny, w którym zaimplementowano równania (2). Całe zadanie zostało podzielone na etapy, a w każdym z etapów wyznaczono odpowiednią liczbę położeń, przez które przechodzi cały model, aby zrealizować zadanie. Wizualizację (Rys. 16) z podziałem na etapy przedstawiono, jako trajektorię punktu związanego z osią tylną wózka.



Rys. 16 Etapy pokonywania przeszkody przez model wózka

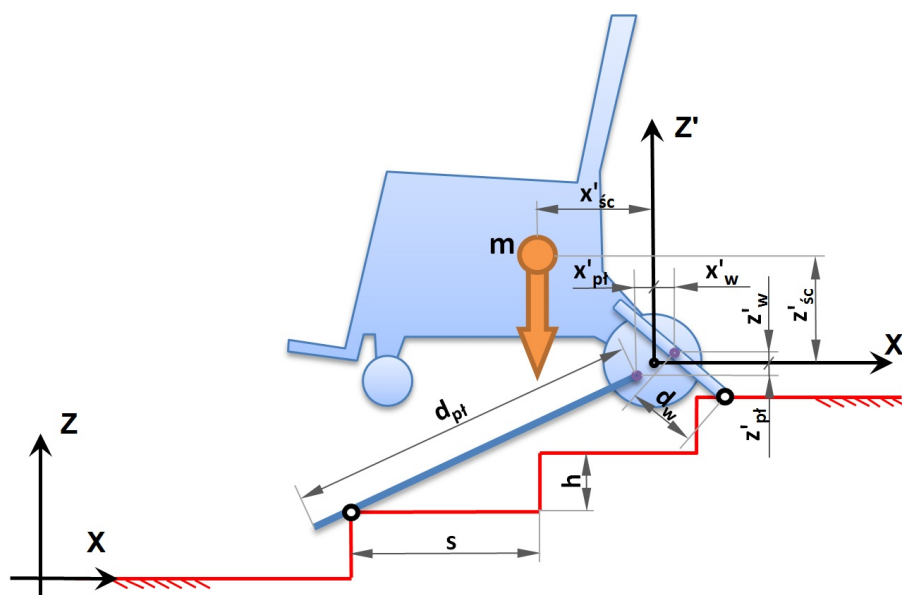
Zestawienie opisów dla kolejnych etapów zestawiono w Tab. 1.



Tab. 1. Kolejne etapy wjazdu na przeszkodę wraz z nr pozycji i wartościami współrzędnych osi kół tylnych.

| Nr etapu | Opis etapu                     | Nr pozycji | X    | Z   |
|----------|--------------------------------|------------|------|-----|
| #1       | dojazd do schodka              | 0          | 955  | 155 |
|          |                                | 1          | 1015 | 155 |
| #2       | wnoszenie na schodek nr 1      | 2          | 1015 | 155 |
|          |                                | 3          | 1019 | 166 |
|          |                                | ...        | ...  | ... |
|          |                                | 30         | 1299 | 295 |
| #3       | dojazd do schodka              | 31         | 1299 | 295 |
|          |                                | 32         | 1317 | 295 |
|          |                                | 33         | 1335 | 295 |
| #4       | wnoszenie na schodek nr 2      | 34         | 1335 | 295 |
|          |                                | 35         | 1339 | 306 |
|          |                                | ...        | ...  | ... |
|          |                                | 62         | 1619 | 435 |
| #5       | dojazd do schodka              | 63         | 1619 | 435 |
|          |                                | 64         | 1637 | 435 |
|          |                                | 65         | 1655 | 435 |
| #6       | wnoszenie na schodek nr 3      | 66         | 1655 | 435 |
|          |                                | 67         | 1659 | 446 |
|          |                                | ...        | ...  | ... |
|          |                                | 94         | 1939 | 575 |
| #7       | dojazd do schodka              | 95         | 1939 | 575 |
|          |                                | 96         | 1957 | 575 |
|          |                                | 97         | 1975 | 575 |
| #8       | wnoszenie na schodek nr 4      | 98         | 1975 | 575 |
|          |                                | 99         | 1979 | 586 |
|          |                                | ...        | ...  | ... |
|          |                                | 102        | 1995 | 618 |
| #9       | odjechanie na spocznik końcowy | 127        | 2259 | 715 |
|          |                                | 128        | 2299 | 715 |
|          |                                | ...        | ...  | ... |
|          |                                | 147        | 3047 | 715 |
|          |                                | 148        | 3107 | 715 |

Prowadzenie dalszych analiz wymagało przyjęcia wartości początkowych dla wybranych parametrów modelu symulacyjnego oznaczonych na Rys. 17.



Rys. 17 Wskazanie wybranych parametrów modelu symulacyjnego

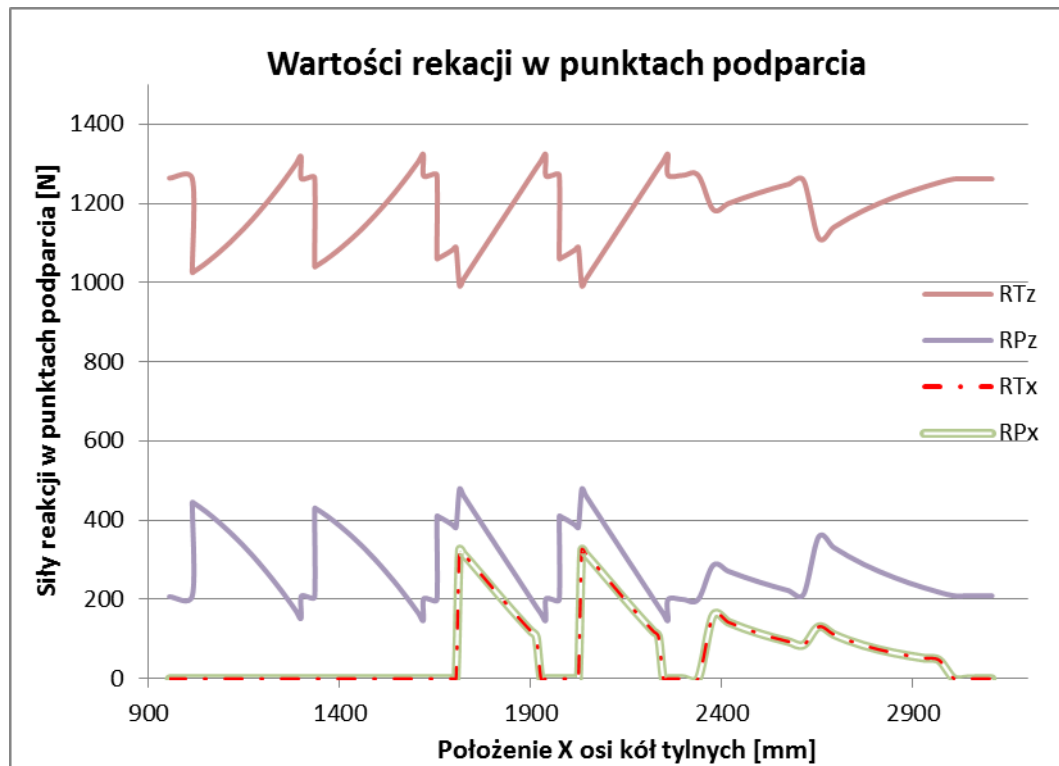
Wartości początkowe parametrów dla modelu zestawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Wartości początkowe parametrów dla modelu symulacyjnego

| Oznaczenie parametru | Opis parametru                  | wartość | jednostka |
|----------------------|---------------------------------|---------|-----------|
| h                    | wysokość schodka                | 140     | mm        |
| s                    | głębokość schodka               | 340     | mm        |
| $x'_w$               | współrzędna X' osi wiatraka     | 25      | mm        |
| $z'_w$               | współrzędna Z' osi wiatraka     | 45      | mm        |
| $d_w$                | długość ramienia wiatraka       | 185     | mm        |
| $x'_{pt}$            | współrzędna X' osi płozy        | -100    | mm        |
| $z'_{pt}$            | współrzędna Z' osi płozy        | 0       | mm        |
| $d_{pt}$             | długość płozy                   | 760     | mm        |
| m                    | masa wózka i człowieka          | 150     | kg        |
| $x'_{sc}$            | współrzędna X' środka ciężkości | -120    | mm        |
| $z'_{sc}$            | współrzędna Z' środka ciężkości | 310     | mm        |
| $r_{kt}$             | promień koła TYŁ                | 155     | mm        |
| $r_{kp}$             | promień koła PRZÓD              | 90      | mm        |
| $r_{rw}$             | promień rolki wiatraka          | 25      | mm        |

Wartości początkowe parametrów dobrano na podstawie analizy cech wózków dostępnych na rynku, zaleceń norm oraz atlasów antropometrycznych i będą one podlegały modyfikacjom w dalszych etapach rozwoju projektu.

Wyniki symulacji dla powyższych wartości parametrów pozwoliły wykreślić na Rys. 18 charakterystyki sił reakcji w trakcie pokonywania przeszkody.



Rys. 18 Wartości reakcji punktach podparcia

Przedstawione charakterystyki (Rys. 18) reprezentują zmienność wartości sił reakcji w punktach podparcia dla wartości początkowych parametrów modelu symulacyjnego. W celu przeprowadzenia syntezy własności modelu, w sposób zapewniający realizację zadania pokonania przeszkody, należy przeprowadzić szereg analiz wpływu zmian wartości wybranych parametrów. Warunek pokonania przeszkody zdefiniowano w kolejnym rozdziale.

### 3.2.1 Warunek realizacji zadania pokonania przeszkody typu schody

Aby pokonać przeszkodę współczynnik tarcia  $\mu_T$  w tylnym punkcie podparcia T musi mieć wartość większą bądź równą proporcji sił  $R_{Tx}$  i  $R_{Tz}$ . W dalszej części pracy proporcję tą określono współczynnikiem proporcji sił reakcji w punkcie T i wyrażono zależnością:

$$k_T = \frac{R_{Tx}}{R_{Tz}} \quad (3)$$

gdzie:

- $k_T$  - współczynnik proporcji sił reakcji w punkcie T,
- $R_{Tx}$ ,  $R_{Tz}$  - reakcje w tylnym punkcie kontaktu dla układu płaskiego,

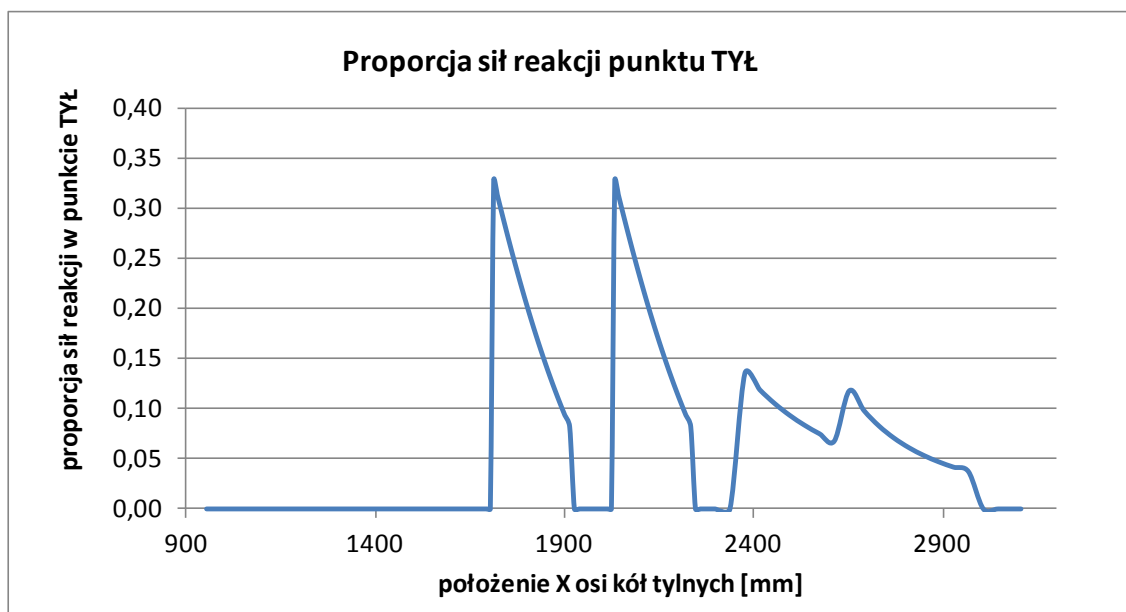
Przy tak zdefiniowanym współczynniku  $k_T$  ogólny warunek realizacji zadania pokonania przeszkody przez wózek przyjmie postać:

$$\mu_T \geq k_T \quad (4)$$

Gdzie:

- $\mu_T$  - statyczny współczynnik tarcia w tylnym punkcie podparcia **T**,

Charakterystykę współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla wartości początkowych parametrów modelu symulacyjnego przedstawiano na Rys. 19.



Rys. 19 Charakterystyka współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla wartości początkowych parametrów modelu symulacyjnego

Z charakterystyki wynika, że wartość maksymalna współczynnika wynosi  $k_{T \max} = 0,33$ .

Oznacza to, że model o parametrach początkowych pokona przeszkodę, gdy współczynnik tarcia w punkcie T będzie większy od tej wartości. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki analiz współczynnika  $k_T$  przy zróżnicowanych parametrach modelu symulacyjnego.

### 3.3 Analiza wpływu doboru parametrów elementów modelu na realizację zadania pokonania przeszkody

Celem analiz wpływu doboru wartości wybranych parametrów na realizację zadania pokonania przeszkody jest wstępna synteza parametrów geometrycznych koncepcji konstrukcji. Jest to pierwszy etap badań, który zostanie w dalszej części rozprawy rozszerzony o analizy bardziej złożonych modeli symulacyjnych. W tej fazie zostaną wykluczone parametry niemające wpływu i wskazane te o znaczeniu krytycznym dla realizacji zadania pokonania przeszkody.

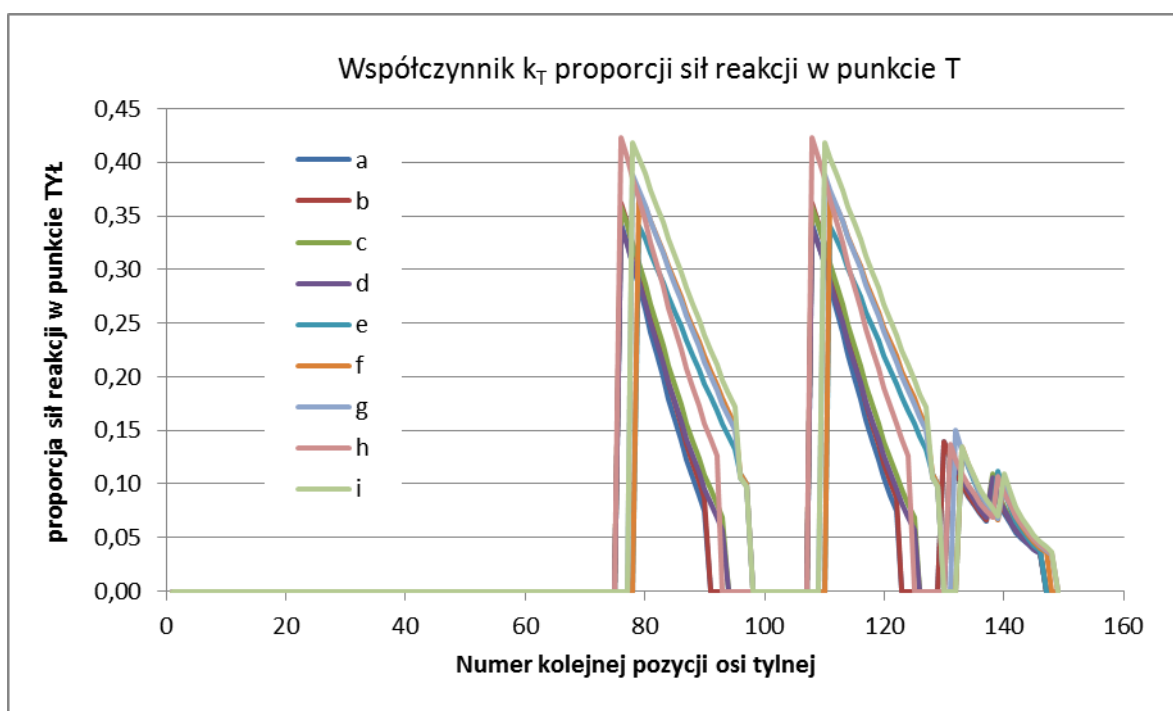
#### 3.3.1 Wpływ parametrów geometrycznych wiatraka kroczącego

Analizując wpływ parametrów geometrycznych wiatraka kroczącego na realizację zadania pokonania przeszkody przeprowadzono symulację dla różnych wartości współrzędnych, położenia osi wiatraka jak również dla jego promienia zgodnie z Rys. 17. Wartości zestawiono w Tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 1

| Indeks | współrzędna $X'_w$ osi wiatraka, [mm] | współrzędna $Z'_w$ osi wiatraka, [mm] | długość ramienia wiatraka $d_w$ , [mm] |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| a      | 10                                    | 10                                    | 180                                    |
| b      | 25                                    | 10                                    | 180                                    |
| c      | 25                                    | 25                                    | 180                                    |
| d      | 10                                    | 25                                    | 180                                    |
| e      | 25                                    | 50                                    | 185                                    |
| f      | 50                                    | 50                                    | 185                                    |
| g      | 50                                    | 75                                    | 210                                    |
| h      | 75                                    | 50                                    | 200                                    |
| i      | 75                                    | 75                                    | 185                                    |

Symulacje przeprowadzone dla parametrów oznaczonych indeksami od "a" do "i" pozwoliły wykreślić na Rys. 20 charakterystyki współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów wiatraka kroczącego.



Rys. 20 Charakterystyka współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów wiatraka kroczącego

Analiza wyników dziewięciu serii symulacji, przedstawionych na Rys. 20 wykazała, że parametry geometryczne wiatraka kroczącego nie mają znaczącego wpływu na poprawność realizacji zadania pokonania przeszkody. Zróżnicowanie wartości maksymalnych współczynnika  $k_T$  dla kolejnych serii może być utożsamiane ze zróżnicowanymi wartościami współczynnika tarcia na kolejnych stopniach schodów. Dlatego też w dalszej części pracy ten parametr nie będzie przedmiotem symulacji wariantowych. Parametry te zostaną dobrane poprzez realizację zadania konstrukcyjnego, co nie jest przedmiotem tej rozprawy.

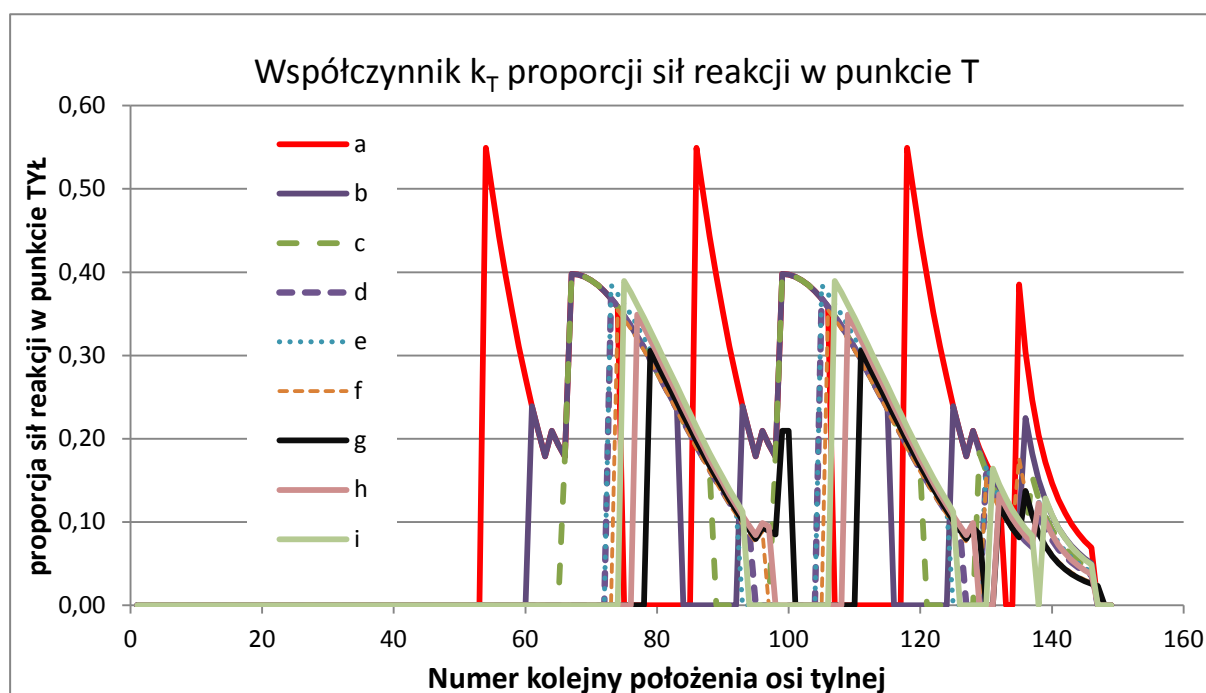
### 3.3.2 Wpływ parametrów geometrycznych płozy poziomującej

Analizując wpływ parametrów geometrycznych płozy poziomującej na realizację zadania pokonania przeszkody przeprowadzono symulację dla różnych wartości położenia osi płozy, jak również dla jej długości zgodnie z Rys. 17. Wartości zestawiono w Tab. 4.

Tab. 4. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 2

| Indeks | Współrzędne $X'_{pt}$<br>płyzy poziomującej | Współrzędne $Z'_{pt}$<br>płyzy poziomującej | długość $d_{pt}$ płyzy<br>poziomującej |
|--------|---|---|--|
| a.     | 0   | 0   | 600                                    |
| b.     | 0   | 0   | 700                                    |
| c.     | 0   | 0   | 760                                    |
| d.     | 0   | 0   | 820                                    |
| e.     | -50   | 0   | 760                                    |
| f.     | -50   | -50   | 760                                    |
| g.     | -100  | -50   | 760                                    |
| h.     | -100  | 0   | 760                                    |
| i.     | -100  | 50  | 760                                    |

Symulacje przeprowadzone dla parametrów oznaczonych indeksami od "a" do "i" pozwoliły wykreślić na Rys. 21 charakterystyki współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów płyzy poziomującej.



Rys. 21 Charakterystyka współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów płyzy poziomującej

Przedstawione powyżej charakterystyki wskazują na duże znaczenie doboru parametrów geometrycznych płyzy poziomującej. Najkorzystniejsze warunki uzyskano dla symulacji o indeksie "f, g, h". Wartości te będą uwzględnione w analizach wariantujących parametry innych elementów modelu.

### 3.3.3 Wpływ masy modelu

Analizę wpływu masy całego modelu na realizację zadania pokonania przeszkody można ograniczyć do zależności wynikającej ze wzorów (3) oraz (2).

$$k_T = \frac{Q \cdot \frac{c \cdot \operatorname{tg} \alpha_p}{a + b \cdot \operatorname{tg} \alpha_p}}{Q \cdot \left(1 - \frac{c}{a + b \cdot \operatorname{tg} \alpha_p}\right)} \quad (5)$$

Wykonując elementarne przekształcenia otrzymano:

$$k_T = \frac{c \cdot \operatorname{tg} \alpha_p}{a - c + b \cdot \operatorname{tg} \alpha_p} \quad (6)$$

gdzie: oznaczenia zgodne z Rys. 14. (rozdział 3.1, strona 31)

Z powyższego równania wynika, że masa modelu nie ma wpływu na realizację zadania pokonania przeszkody.

### 3.3.4 Wpływ położenia środka ciężkości

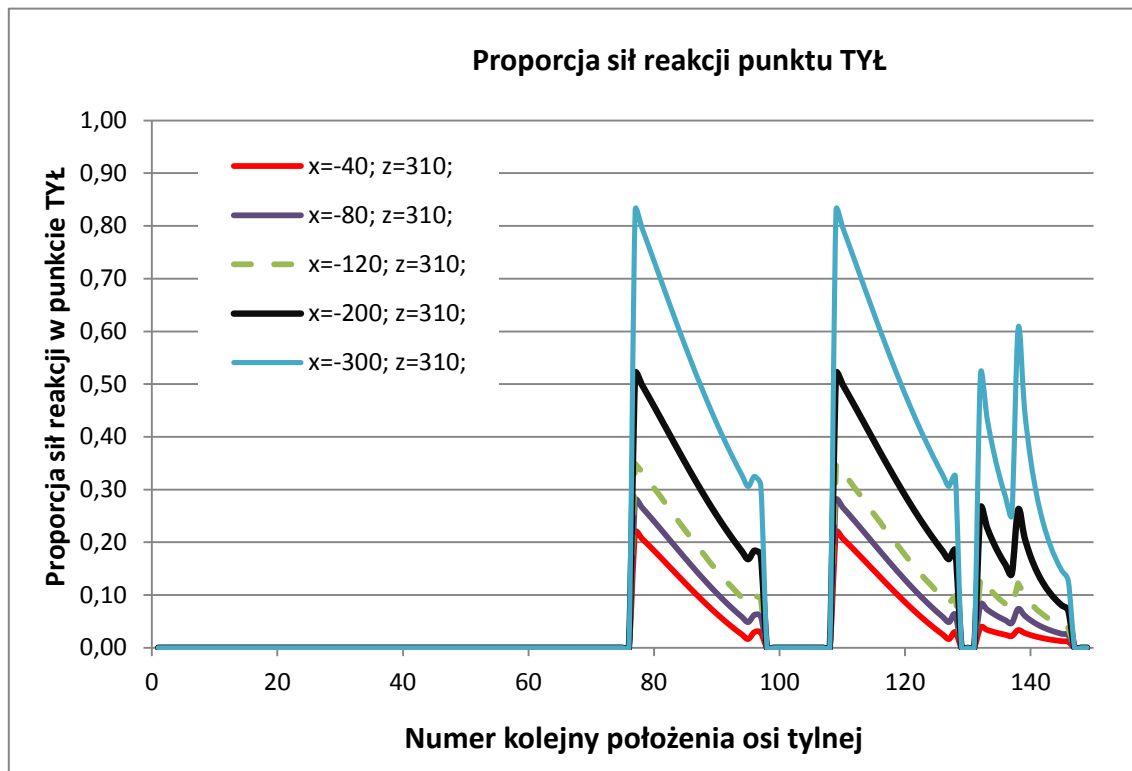
Analizując wpływ położenia środka ciężkości na realizację zadania pokonania przeszkody przeprowadzono symulację dla różnych wartości współrzędnej położenia środka ciężkości w kierunku  $X'$ . Wnika to z analizy wzoru (6), w którym żadna ze zmiennych nie zależy od wartości parametru  $z'_{sc}$ . Wartości zestawiono w Tab. 5. Dobierając je wzięto pod uwagę również warunek konstrukcyjny stateczności. Wartość parametru musi spełnić warunek  $x'_{sc} < 0$  oraz inne sformułowane w dalszej części pracy i związane z modelem symulacji dynamiki.

Tab. 5. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 4

| LP | położenie $X'$ środka ciężkości |
|----|---------------------------------|
| 1. | -40                             |
| 2. | -80                             |
| 3. | -120                            |
| 4. | -200                            |
| 5. | -300                            |



Symulacje przeprowadzone dla zmiennych współrzędnych  $x'_{sc}$  pozwoliły wykreślić na Rys. 22 charakterystyki współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości tego parametru.



Rys. 22 Charakterystyka współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych położen środka ciężkości modelu

Przedstawione powyżej charakterystyki wskazują na bardzo istotny wpływ wartości współrzędnych  $x'_{sc}$  na wartości współczynnika  $k_T$ . Najkorzystniejsze warunki uzyskano dla symulacji o minimalnych wartościach współrzędnych  $x'_{sc}$ . Analizy wpływu tych parametrów mają charakter ogólnego rozpoznania zakresu poszukiwania rozwiązania i muszą zostać poszerzone o analizę cech dynamicznych.

### 3.3.5 Wpływ parametrów geometrycznych przeszkody (schodów)

Analizując wpływ parametrów przeszkody na realizację zadania jej pokonania, przeprowadzono symulację dla różnych wartości parametrów schodka (wysokości  $h$  i szerokości  $s$ ) zgodnie z Rys. 17, rozdział 3.2, str. 34.

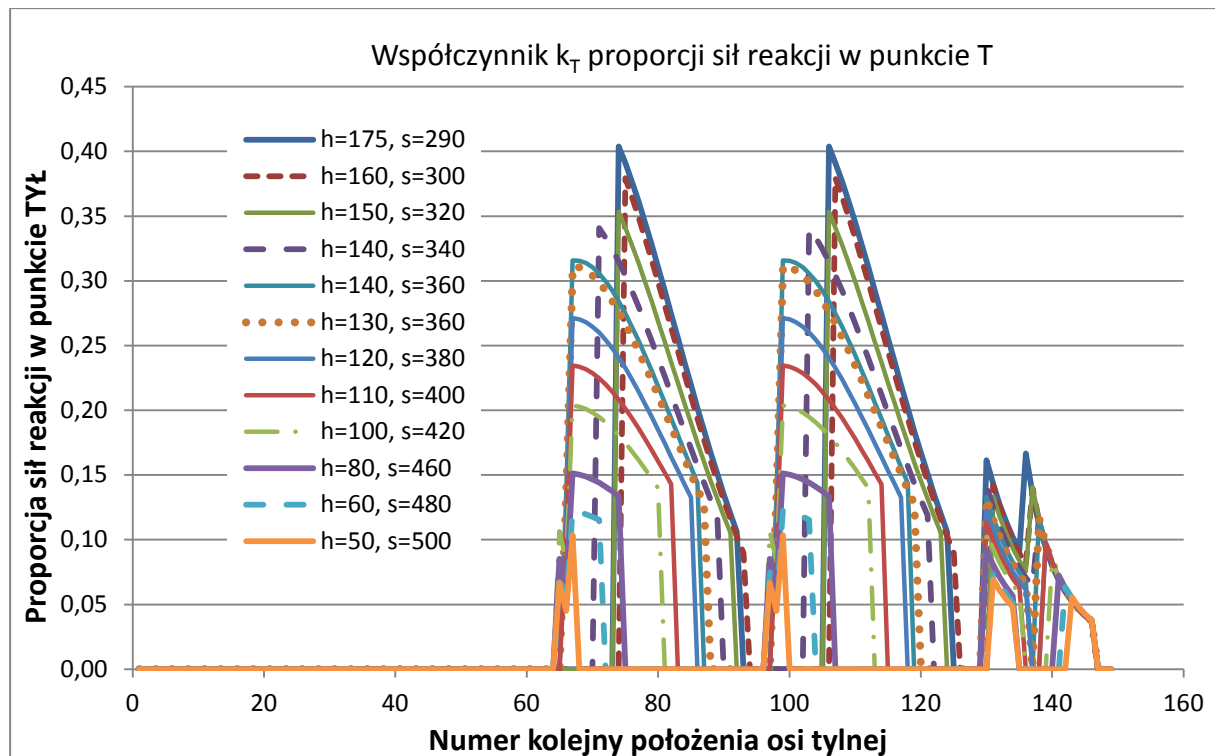
Nominalne zarysy schodów określane są przez Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 2009 roku [42]. Zawarte tam wytyczne określają maksymalną wysokość stopni schodów w zależności od przeznaczenia budynków. Dodatkowo szerokość i wysokość stopni schodów powinny być dostosowane do przeciętnej długości kroku ludzkiego, która wynosi 0,6-0,65m. Uniwersalność konstrukcji wózka wymaga, aby był on dostosowany do budynków użyteczności publicznej oraz budynków wielorodzinnych, w których maksymalna wysokość stopnia wynosi 0,175m. Dla tej wartości szerokość stopnia powinna wynieść 0,29m. W dalszych analizach wykorzystano 12 różnych zarysów schodów i wartości parametrów zestawiono w tabeli Tab. 6

Tab. 6. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 5

| LP  | Wysokość schodka h [mm] | Szerokość schodka s [mm] |
|-----|-------------------------|--------------------------|
| 1.  | 175                     | 290                      |
| 2.  | 160                     | 300                      |
| 3.  | 150                     | 320                      |
| 4.  | 140                     | 340                      |
| 5.  | 140                     | 360                      |
| 6.  | 130                     | 360                      |
| 7.  | 120                     | 380                      |
| 8.  | 110                     | 400                      |
| 9.  | 100                     | 420                      |
| 10. | 80                      | 460                      |
| 11. | 60                      | 480                      |
| 12. | 50                      | 500                      |

Wartości parametrów geometrycznych modelu schodów dobierano tak, aby przeanalizować możliwie szeroki zakres wymiarów spotykanych w budynkach.

Przeprowadzone dla tych parametrów symulacje pozwoliły wykreślić na Rys. 23 charakterystyki współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych schodów.



Rys. 23 Charakterystyka współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów geometrycznych schodów

Przedstawione na charakterystyce wyniki dla dwunastu serii symulacji wykazują znaczący wpływ parametrów geometrycznych schodów na poprawność realizacji zadania pokonania przeszkody. Zróżnicowanie wartości maksymalnych współczynnika  $k_T$  dla kolejnych serii jest związane z kątem nachylenia schodów, rozumianym jako kąt pomiędzy płaszczyzną styczną do krawędzi schodów a kierunkiem poziomym. Im większy kąt nachylenia schodów tym większe wymagania od parametrów tarcia.

Powyższe charakterystyki umożliwiają wyznaczenie zakresów wymiarowych schodów, dla których można stosować badaną koncepcję wózka inwalidzkiego. Jeżeli uzyskamy informację o współczynniku tarcia w punkcie kontaktu T, uzyskiwanym w danym rozwiązaniu konstrukcyjnym, to poprzez analizę tych charakterystyk będziemy mogli wskazać granicę nachylenia schodów, przy której warunki pokonywania ich stają się niestabilne i grożą utratą przyczepności i wywróceniem pojazdu.

### 3.4 Optymalizacja wybranych parametrów konstrukcji

Jak już wykazano istnieje grupa parametrów geometrycznych modelu symulacyjnego, mających decydujący wpływ na poprawność realizacji zadania pokonania przeszkody. Do najistotniejszych należy położenie środka ciężkości modelu, geometria schodów oraz parametry geometryczne płozy poziomującej. Własności te stały się przedmiotem optymalizacji.

W niniejszej rozprawie podjęto próbę znalezienia parametrów zapewniających najszerszy zakres zastosowania proponowanej konstrukcji. Pojęcie „zakres zastosowania” oznacza zapewnienie najkorzystniejszych warunków ruchu po przeszkodach (opisanych w rozdziale 3.3.5), poprzez kształtowanie cechy konstrukcji wózka. Zostanie to osiągnięte poprzez poszukiwanie optymalnych parametrów konstrukcyjnych mających wpływ na przebiegi charakterystyk współczynnika  $k_T$ . Wyniki analiz przedstawione na Rys. 21 wykazały wpływ różnych wartości parametrów płozy poziomującej na wartości współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punkcie T. Na tej podstawie sformułowano założenia procedury optymalizacji. Funkcję celu określono jako minimum wartości szczytowej współczynnika  $k_T$  w trakcie realizacji zadania pokonania przeszkody o zadanej geometrii (parametry  $h, s$ ).

$$F_{celu} = k_{Tpeak}(h,s) \rightarrow \min_{(x'_{pł}, z'_{pł}, d_{pł})} \quad (7)$$

Zmienne decyzyjne to współrzędna  $x'_{pł}$  oraz  $z'_{pł}$  położenia osi płozy. Przyjęto ograniczenie konstrukcyjne wskazując, że zakończenie przednie płozy poziomującej nie może być bardziej odległe od osi tylnej niż 800mm. Stąd uzyskano zależność na długość płozy  $d_{pł}$ :

$$d_{pł} = 800 + x'_{pł} \quad [mm] \quad (8)$$

Ograniczenia wynikają z założeń konstrukcyjnych i przyjęły wartości:

$$-200 \leq x'_{pł} \leq 20 \quad [mm] \quad (9)$$

$$-50 \leq z'_{pł} \leq 100 \quad [mm] \quad (10)$$

Do przeprowadzenia procedury optymalizacji został wykorzystany model matematyczny opisany w podrozdziale 3.2. Analizy prowadzono z wykorzystaniem metody gradientowej [57]. Obliczenia zrealizowano w arkuszu kalkulacyjnym Excel. Wartości początkowe zestawiano w Tab. 7.

Tab. 7. Wartości początkowe parametrów dla zadania optymalizacji

| Oznaczenie parametru | Opis parametru           | wartość | jednostka |
|----------------------|--------------------------|---------|-----------|
| $x'_{pł}$            | współrzędna X' osi płozy | -100    | mm        |
| $z'_{pł}$            | współrzędna Z' osi płozy | 0       | mm        |

W wyniku przeprowadzonej serii symulacji optymalizacyjnej uzyskano minimum funkcji celu dla każdej pary parametrów przeszkody. Poszukiwane wartości parametrów zestawiono w Tab. 8.

Tab. 8. Wyniki dla zadania optymalizacji

| L.P. | Parametry przeszkody | $x'_{pł}$<br>[mm] | $z'_{pł}$<br>[mm] | $k_T$ |
|------|----------------------|-------------------|-------------------|-------|
| a    | h=175, s=290         | 20                | -50               | 0,39  |
| b    | h=160, s=300         | 20                | -50               | 0,36  |
| c    | h=150, s=320         | 20                | -50               | 0,32  |
| d    | h=140, s=340         | 20                | -50               | 0,28  |
| e    | h=140, s=360         | 20                | -50               | 0,25  |
| f    | h=130, s=360         | 20                | -50               | 0,24  |
| g    | h=120, s=380         | 20                | -50               | 0,21  |
| h    | h=110, s=400         | 20                | -50               | 0,18  |
| i    | h=100, s=420         | 20                | -50               | 0,15  |
| j    | h=80, s=460          | 20                | -50               | 0,11  |
| k    | h=60, s=480          | 20                | -50               | 0,07  |
| l    | h=50, s=500          | 20                | -50               | 0,05  |

Przeprowadzone symulacje pozwoliły znaleźć optymalne położenie osi obrotu płozy poziomującej. Dla wyznaczonych parametrów długość płozy wynikająca ze wzoru (8) wynosi  $d_{pł} = 820 \text{ mm}$ .

Wpływ położenia środka ciężkości modelu zostało przeanalizowane w modelach MBS i przedstawione w kolejnych rozdziałach.

## 4. Badania symulacyjne dynamiki modelu

W rozdziale poddano analizie model wózka inwalidzkiego, który był w fazie koncepcyjnej. Celem tych symulacji było przeprowadzenie syntezy własności modelu z uwzględnieniem jego cech dynamicznych. Przedmiotem symulacji była realizacja zadania wjazdu po czterech schodkach w sposób zdefiniowany w rozdziale poprzednim (rozd. 3).

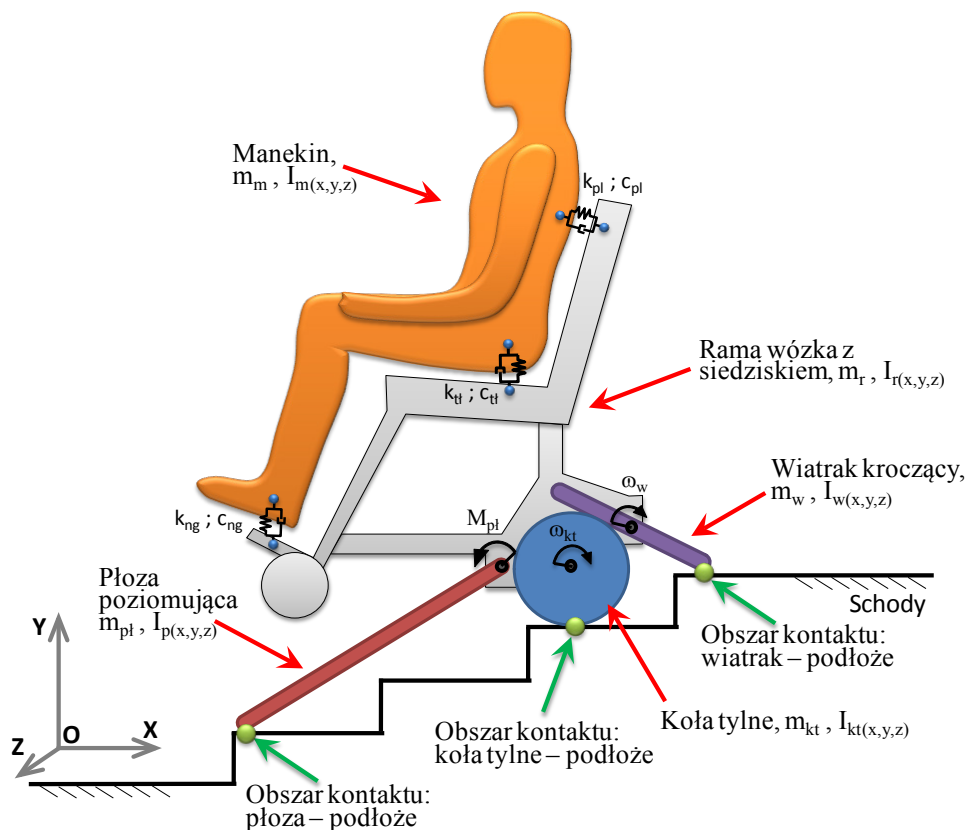
W prezentowanej analizie modelu symulacyjnego wózka inwalidzkiego został wykorzystany program MSC.Adams.

### 4.1 Model nominalny

Budując model nominalny do celów analizy symulacyjnej dynamiki w zakresie pokonywania przeszkody dokonano następujących uproszczeń. Model wózka jest zdefiniowany w 3 wymiarach i posiada symetryczną budowę względem swojej pionowej płaszczyzny XY. Położenie modelu określane będzie względem inercjalnego układu OXYZ, związanego z podłożem i usytuowanego jak na Rys. 24.

Struktura modelu nominalnego składa się z jednobryłowych, trójwymiarowych elementów sztywnych, posiadających parametry masowe. Model człowieka odzwierciedla sztywna bryła o zdefiniowanych parametrach masowych, nazwana dalej manekinem. Model ramy i siedziska wózka reprezentuje jeden element odzwierciedlający również parametry masowe pozostałych podzespołów połączonych z ramą takich jak: akumulatory, siłowniki, koła przednie, moduł elektroniczny, przekładnie itp. Płóza poziomująca połączona jest na jednym z końców poprzez parę kinematyczną obrotową z ramą wózka. Drugi koniec płozy będzie opierał się o podłoże. Wiatrak kroczący połączony jest, w środku swojej długości, poprzez parę kinematyczną obrotową z ramą wózka. Końce ramion wiatraka będą naprzemiennie opierały się o podłoże. Koła tylne w swojej osi połączone są z ramą poprzez parę kinematyczną obrotową. W przedstawionych powyżej parach obrotowych nie występuje tarcie.

Struktura modelu wraz z oznaczeniami została przedstawiona na Rys. 24.



Rys. 24 Model nominalny do badań dynamiki podczas pokonywania przeszkody

Z uwagi na fakt, że w trakcie pokonywania przeszkody typu schody, koła przednie nie kontaktują się z podłożem, nie modelowano ich jako osobny człon, a parametry masowe zostały dołączone do ramy.

## 4.2 Model kontaktu kół, płozy i wiatraka z podłożem

Zjawiska kontaktowe w przebiegach dynamicznych decydują między innymi o stateczności ruchu, intensywności zużycia materiałowego układu koło-podłoże, zdolności do zmiany kierunku przemieszczania itd. [3]. W niniejszym rozdziale zjawiska te będą miały istotny wpływ na wyniki symulacji pokonywania przeszkody. Spojrzenie na zagadnienia modelowania zjawisk kontaktowych dokonano przy założeniu, iż wózek modelowany jest jako układ mechaniczny dyskretny. Ogranicza to zakres stosowalności takiego modelu do stosunkowo niskich częstotliwości. W pracy analizowano zakres 0,44 – 89,09 Hz.

Przyjęto uproszczony model podłoża - jest sztywne i składa się z płaskich elementów odzwierciedlając podłogę i powierzchnie przeszkody. Geometria rzeczywistego stopnia schodów może odbiegać znacznie od wartości nominalnej. Wskutek zjawisk zużycia, technologii wykonania, a zwłaszcza wskutek błędów wykonawczych, powstają odchyłki

(charakteryzowane przez różnego typu nierówności) od parametrów nominalnych. Odchyłki te mogą istotnie wpływać na rzeczywiste zjawiska dynamiczne. Zakres parametrów przyjęto zgodnie z założeniami z rozdziału 3.3.5.

Podczas normalnego pokonywania przeszkody występują: uderzenie, tarcie oraz poślizg. Wszystkie te zjawiska muszą znaleźć odzwierciedlenie w modelowanym układzie, aby poprawnie oddany był przebieg rzeczywisty. Przedstawiony poniżej model kontaktu zostanie użyty do opisanego tego zjawiska pomiędzy podłożem a:

- kołami tylnymi (prawe i lewe),
- wiatrakiem kroczącym (ramię wiatraka prawe i lewe),
- płożą poziomującą.

Do opisu sił normalnych występujących w strefie kontaktu z podłożem wykorzystano zależność:

$$F(y, \dot{y}) = \begin{cases} k(R - y)^e - c\dot{y} & \text{dla } y \leq R \\ 0 & \text{dla } y > R \end{cases} \quad (11)$$

gdzie:

$y$  – odległość między osią koła a powierzchnią podłoża,

$\dot{y}$  – chwilowa prędkość zmiany odległości między osią koła a podłożem,

$R$  – promień koła,

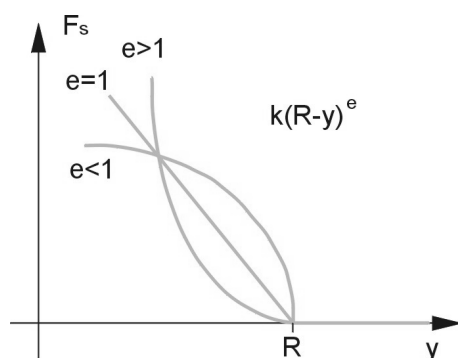
$k$  – współczynnik sprężystości,

$e$  – wykładnik potęgi sprężystości,

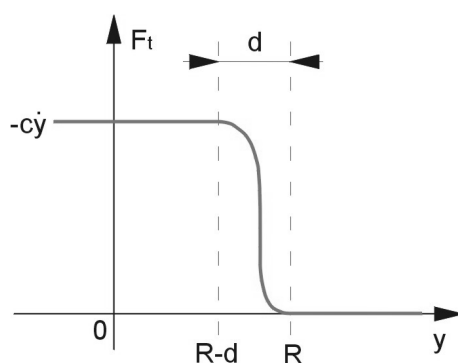
$c$  – współczynnik tłumienia.

Siła normalna jest potęgowo proporcjonalna do wartości odkształcenia oraz proporcjonalna do prędkości tego odkształcenia. W rozpatrywanej analizie poprzez odkształcenie należy rozumieć ugięcie danego elementu podczas kontaktu z podłożem. Charakter przebiegu składowej sprężystości siły normalnej uzależniony jest od wartości wykładnika potęgi i dla wartości  $e=1$  jej przyrost jest proporcjonalny do odkształcenia, dla  $e<1$  jej przebieg odzwierciedla tzw. sprężystość miękką, a dla  $e>1$  jest sprężystość twarda. Przebieg kształtowania się składowych siły normalnej przedstawiony jest na Rys. 25 oraz Rys. 26.



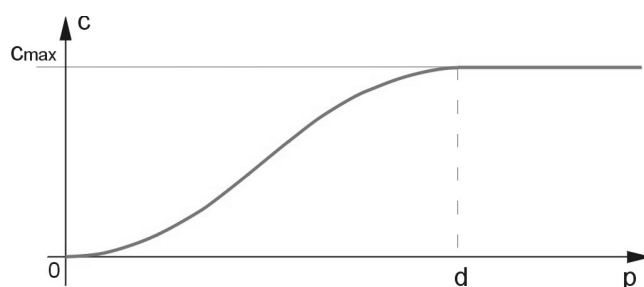


Rys. 25 Przebieg zmian siły sprężystości w kontakcie z podłożem w funkcji odległości  $y$  [55]



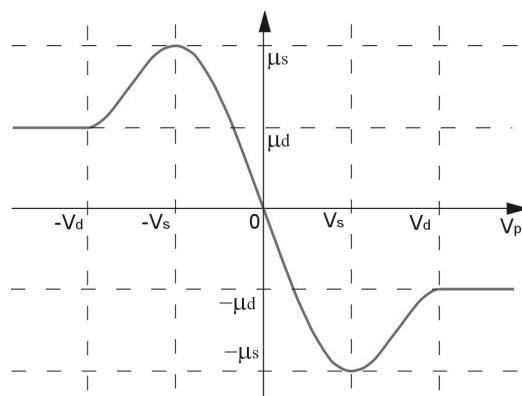
Rys. 26 Przebieg zmian siły tłumienia w kontakcie z podłożem w funkcji odległości  $y$  [55]  
 $d$  – wartość odkształcenia dla którego tłumienie przyjmuje wartość maksymalną.

Przebieg składowej tłumienia uzależniony jest od wartości odkształcenia  $d$  wraz z wartością którego kształtuje się przebieg zmian współczynnika tłumienia  $c$  w okresie przejściowym (Rys. 27). Poza okresem przejściowym, nim element wejdzie w kontakt, składowa tłumienia normalnej jest zerowa natomiast wartość tłumienia dla odkształceń większych od wartości  $d$  zachowuje stałą wartość maksymalną.



Rys. 27 Zależność tłumienia  $c$  od odkształcenia (ugięcia)  $p$  gdzie  $p=R-y$  [55]

W prezentowanym, modelu do odzwierciedlenia zjawisk tarcia, wykorzystywana jest charakterystyka zmiennego przebiegu współczynnika tarcia Rys. 28. W charakterystyce tej uwzględniony jest zarówno współczynnik tarcia statycznego, jak i dynamicznego.

Rys. 28 Przebieg zależności współczynnika tarcia od prędkości poślizgu  $V_p$  [55]

gdzie:

- $\mu_s$  – współczynnik tarcia statycznego,
- $\mu_d$  – współczynnik tarcia dynamicznego,
- $v_s$  – moduł prędkości progowej dla  $\mu_s$ ,
- $v_d$  – moduł prędkości progowej dla  $\mu_d$ ,
- $v_p$  – prędkość poślizgu w punkcie kontaktu.

Przedstawiony model kontaktu będzie stosowany do opisanego zjawisk w modelu symulacyjnym wózka, dla którego przyjęto parametry nominalne i zestawiano je w Tab. 9.

Tab. 9. Parametry nominalne modeli kontaktu

| Nazwa parametru  | Oznaczenie | Parametry kontaktu podłoża z elementem: |                  |                   | Jednostka |
|--|------------|---|------------------|-------------------|-----------|
|  |            | Koła tylne                              | Wiatrak kroczący | Płóza poziomująca |           |
| Współczynnik tarcia statycznego  | $\mu_s$    | 0,7                                     | 0,7              | 0,05              | -         |
| Współczynnik tarcia dynamicznego   | $\mu_d$    | 0,6                                     | 0,6              | 0,01              | -         |
| Sztywność promieniowa  | k          | 4,0 e7                                  | 1,0 e8           | 2,0 e8            | N/m       |
| Stała tłumienia  | c          | 6,0 e3                                  | 1,0 e3           | 1,0 e3            | Ns/m      |
| Wartość deformacji, dla której tłumienie osiąga wartość maksymalną $c_{max}$ | d          | 2                                       | 0,5              | 0,1               | mm        |
| Wykładnik potęgowy zależności siły sprężystości od deformacji                | e          | 2                                       | 2                | 2                 | -         |

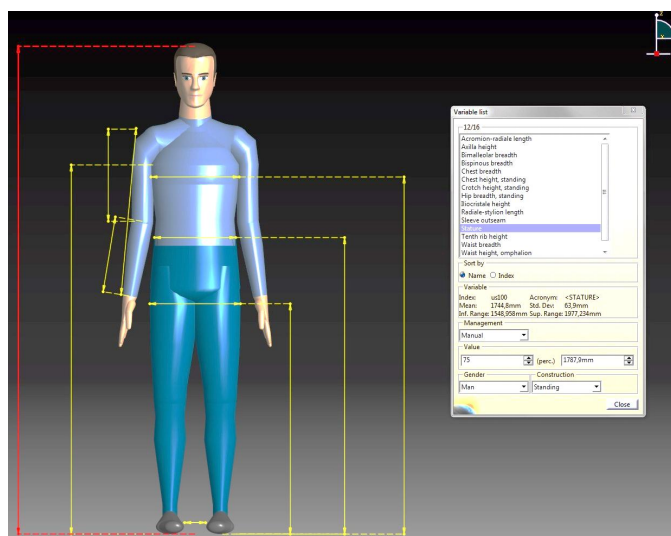
Powyższe parametry będą przedmiotem analiz wariantowych, w których porównane zostaną wyniki symulacji dla ich różnych wartości.

Program Adams posiada wskazany model kontaktu i zostanie on użyty w prowadzonej analizie [55].

### 4.3 Model symulacyjny ciała człowieka oraz model układu wózek – osoba na wózku

Budując model symulacyjny ciała człowieka uproszczono go do bryły sztywnej. Podobne uproszczenie zastosowano w pracy [59] i [39]. Dodatkowo kierowano się wytycznymi zawartymi w normie PN-ISO 7176-11 Wózki inwalidzkie: Manekiny do badań [38] oraz Atlas antropometryczny dorosłej ludności Polski dla potrzeb projektowania [2]. Wskazane prace zawierają opis geometrii członów manekina oraz ich masy, lecz nie podają informacji o położeniu środka ciężkości i momentach bezwładności. Informacje te są niezbędne do poprawnej budowy modelu symulacyjnego ciała człowieka.

Do budowy wieloczłonowego modelu bryłowego manekina przedstawiającego postać ludzką oraz nadania członom jednorodnie rozłożonej masy, odpowiadającej ludzkiemu ciału wykorzystano oprogramowanie CATIA V5R20 a w szczególności moduł *Ergonomics Design & Analysis*. Narzędzie to posiada wbudowaną bibliotekę parametrów antropometrycznych z możliwością ich modyfikacji (Rys. 29). Model generowany przez to narzędzie może służyć analizom ergonomicznym dotyczącym określenia struktury przestrzennej stanowiska pracy.



Rys. 29 Model manekina w programie CATIA V5R20, moduł *Ergonomics Design & Analysis*

Członki tego manekina takie jak uda, podudzia czy ramiona nie mają niezależnych parametrów masowych. Cały manekin posiada przypisaną masę i położenie środka ciężkości, lecz nie posiada informacji o momentach bezwładności. Do określenia ich zbudowano dodatkowe modele geometryczne odpowiadające wskazanym członom. Wytyczne zaczerpnięto z normy [38]. Wskazuje ona wartości masy manekinów wykorzystywanych w badaniach oraz sposób umieszczenia manekina na wózku. Wyróżniono trzy elementy

składowe budowy modelu i ich poszczególne masy: korpus, uda, podudzia. Wybrano trzy warianty modelu o masach: 50kg, 75kg i 100kg a dane przedstawiono w tabeli Tab. 10.

Tab. 10. Wymagane wartości mas członów manekinów do badań według [38]

| Człony manekina | Warianty masowe manekina           |                                   |                                   |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                 | 100 kg                             | 75 kg                             | 50 kg                             |
| Korpus          | 61±3 kg                            | 46±3 kg                           | 28±3 kg                           |
| Uda             | 31±3 kg                            | 22±3 kg                           | 16±3 kg                           |
| Podudzia        | 7±1 kg                             | 7±1 kg                            | 7±1 kg                            |
| Razem           | 100 <sup>+5</sup> <sub>-2</sub> kg | 75 <sup>+5</sup> <sub>-2</sub> kg | 50 <sup>+4</sup> <sub>-2</sub> kg |

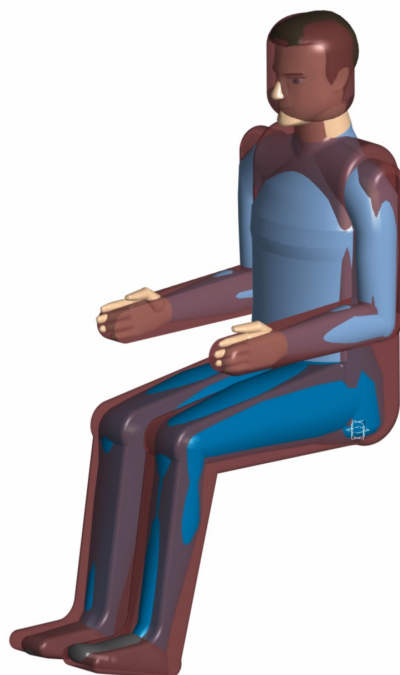
Wybrane warianty odpowiadają: 5 centylowi dla kobiet (48 kg), 50 centylowi dla mężczyzn (76 kg) i 95 centylowi dla mężczyzn (98 kg) według [2]. Wartości te mieszczą się w granicach tolerancji podanych przez normę.

Parametry modelu przedstawionego na Rys. 29 zostały zmodyfikowane i przypisano im wartości pochodzące z atlasu antropometrycznego [2]. Z dostępnych parametrów wybrano jedynie kilka głównych wymiarów na podstawie, których dokonano modyfikacji poszczególnych elementów. W Tab. 11 przedstawiono wykorzystane wartości wymiarów.

Tab. 11. Wymiary antropometryczne użyte do budowy modeli członów manekinów [2]

| Nazwa elementu | Nazwa wymiaru z atlasu   | Wartość cechy [mm] |       |       |
|----------------|--|--------------------|-------|-------|
|                |  | 100 kg             | 75 kg | 50 kg |
| Tułów          | Wysokość podstawy szyi od płaszczyzny siedziska  | 711                | 649   | 558   |
|                | Największa szerokość bioder w pozycji siedzącej  | 405                | 364   | 333   |
|                | Wysokość punktu środka obrotu w stawie biodrowym w pozycji siedzącej                             | 126                | 107   | 63    |
|                | Głębokość punktu środka obrotu w stawie biodrowym w pozycji siedzącej                            | 124                | 105   | 71    |
| Udo            | Głębokość kolanowa w pozycji siedzącej   | 683                | 621   | 523   |
| Goleń          | Wysokość kolana w pozycji siedzącej  | 596                | 534   | 461   |
| Stopa          | Długość stopy  | 278                | 257   | 216   |
| Ramię          | Różnica wymiarów: Wysokość wyrostka barkowego w poz. siedz. i wysokość łokcia w poz. siedz.      | 372                | 364   | 314   |
| Przedramię     | Długość przedramienia i ręki trzymającej chwyt cylindryczny w poz. siedz.                        | 391                | 355   | 293   |
| Głowa          | Różnica wymiarów: Wysokość ciała w poz. siedz. i wysokość podstawy szyi od płaszczyzny siedziska | 244                | 236   | 220   |

Budując modele geometryczne poszczególnych elementów utworzono model sylwetki ludzkiej. Aby zapewnić zgodność z normą w zakresie masy członów, dostosowano ich zarysy geometryczne. Na Rys. 30 przedstawiono wyniki modelowania bryły manekina 75kg. Jest to porównanie zarysu manekina w programie CATIA V5R20, moduł *Ergonomics Design & Analysis* i bryły samodzielnie zbudowanego manekina.



Rys. 30 Porównanie zarysu manekina w programie CATIA V5R20, moduł *Ergonomics Design & Analysis* i bryły samodzielnie zbudowanego manekina (bryła w kolorze brązowym)

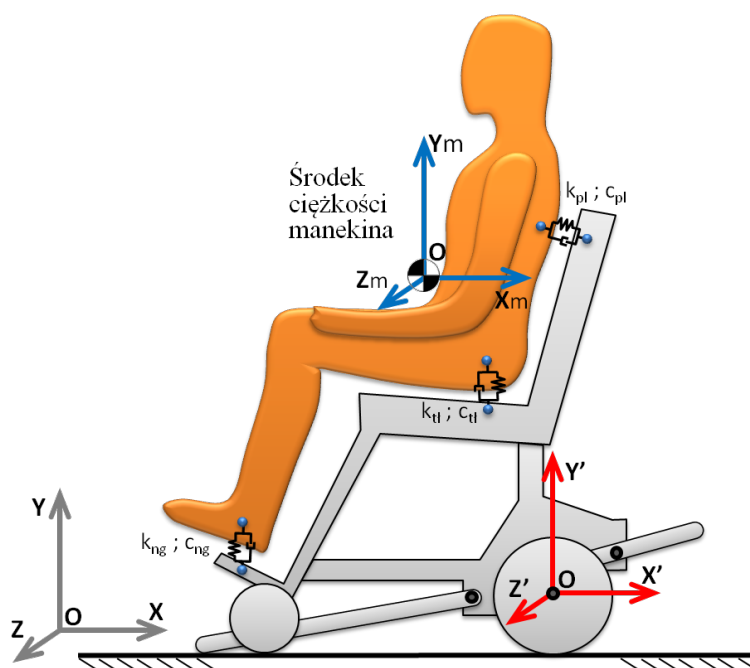
Przy założeniu gęstości ciała ludzkiego wynoszącej  $1000 \text{ kg/m}^3$ , porównywano masę elementów i całości złożenia z wymogami normatywnymi Tab. 10. Różnice znalazły się w dopuszczalnym zakresie a masy wariantów manekina przedstawiono w Tab. 12.

Tab. 12. Wartości mas członów manekinów zbudowanych samodzielnie

| Zamodelowane człony manekina | Warianty masowe manekina |                |                |
|------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|
|                              | 100 kg                   | 75 kg          | 50 kg          |
| Korpus                       | 64,7 kg                  | 49,4 kg        | 29,1 kg        |
| Uda                          | 32,2 kg                  | 22,3 kg        | 16,4 kg        |
| Podudzia                     | 7,8 kg                   | 7,0 kg         | 6,3 kg         |
| <i>Razem</i>                 | <b>104,7 kg</b>          | <b>78,7 kg</b> | <b>51,8 kg</b> |

Model manekina z parametrami masowymi, zgodnymi z przedstawionymi wariantami, został wprowadzony pod postacią jednego członu mechanizmu, któremu nadano wiązania z modelem wózka.

Norma [38] zawiera ogólne wytyczne dotyczące umieszczenia manekinów na wózku, w celu przeprowadzenia badań. Manekin powinien znajdować się możliwie najbliżej oparcia siedziska, w jednakowej odległości od każdego z jego boków. Tylne krawędzie nóg ma pokrywać się z tylną krawędzią podnóżka. Zgodnie z tymi wytycznymi, każdy z modeli został umieszczony na siedzisku wózka, a następnie odczytano parametry masowe. Parametry te zostały określone wg układu wskazanego na Rys. 31.



Rys. 31 Lokalny układ współrzędnych dla definicji modelu manekina usytuowanego na siedzisku

Z uwagi na fakt wykorzystywania tych parametrów również w symulacjach prowadzonych w środowisku Matlab-Simmechanics, usystematyzowano parametry masowe, w sposób ułatwiający wprowadzanie ich do obu systemów. Wartości parametrów zestawiono w tabeli Tab. 13

Tab. 13. Parametry masowe zamodelowanych manekinów w pozycji siedzącej

| Nazwa parametru  | Oznaczenie       | Parametry masowe manekinów o masie: |        |       | Jednostka      |
|--|------------------|-------------------------------------|--------|-------|----------------|
|  |                  | 100 kg                              | 75 kg  | 50 kg |                |
| Położenie środka ciężkości manekina w układzie $OX'Y'Z'$ | $x'_{\text{śc}}$ | -232                                | -227   | -219  | mm             |
|  | $y'_{\text{śc}}$ | 362                                 | 353    | 328   | mm             |
|  | $z'_{\text{śc}}$ | 0                                   | 0      | 0     | mm             |
| Momenty bezwładności w układzie $OX_m Y_m Z_m$           | $I_{XX}$         | 12,751                              | 7,918  | 3,946 | $\text{kgm}^2$ |
|  | $I_{YY}$         | 7,917                               | 4,916  | 2,450 | $\text{kgm}^2$ |
|  | $I_{ZZ}$         | 17,803                              | 11,054 | 5,510 | $\text{kgm}^2$ |

Budując połączenia sprężysto-tłumiące manekina z siedziskiem wózka korzystano z pracy [18]. Dla wszystkich wariantów masowych manekina zastosowano jednakowe wartości parametrów. Należy zwrócić uwagę, że jest to uproszczony model, a wyniki przyspieszeń członu manekina należy traktować jako przybliżone. W wykorzystywanym oprogramowaniu istnieje możliwość budowy bardziej złożonych modeli człowieka, jak również modeli połączeń z siedziskiem. Z uwagi na złożoność takich działań i fakt, że w tej analizie postawiano sobie za cel przede wszystkim rozpoznanie problemu pokonywania przeszkody wskazane modele, nie będą bardziej uszczegóławiane. Zastosowanie jednobryłowego modelu, uniemożliwia również ewentualną ocenę propagacji drgań na różne części ciała.

Sposób połączeń sprężysto-tłumiących manekina z siedziskiem wózka przedstawiono na Rys. 31 zaś wartości parametrów zestawiono w Tab. 14.

Tab. 14. Tabela zastosowanych wartości parametrów połączeń sprężysto-tłumiących modeli manekina i wózka.

| Nazwa połączenia | Stała sprężyny [N/m] | Stała tłumienia [Ns/m] |
|------------------|----------------------|------------------------|
| Plecy            | 30080                | 200                    |
| Tułów            | 40000                | 900                    |
| Nogi             | 50000                | 300                    |

#### 4.4 Model napędu i sterowania

Celem prowadzonych symulacji była analiza warunków związanych z procesem wspinania się wózka po schodach. Na tym etapie nie rozważano doboru konkretnych silników oraz elektronicznego systemu sterowania, dlatego też w modelu zastosowano napęd realizowany poprzez nadanie względnej prędkości członów, określonej w czasie lub momencie siły regulowanego przez układ PID. Przyjęto, że rzeczywiste elementy napędowe i moduły sterujące są w stanie realizować wyznaczone im funkcje.

Do napędu kół tylnych zastosowano narzędzie nadające im prędkości według odpowiednich funkcji czasu. Przy wjeździe po schodach napęd ten służy korekcji położenia wózka względem płaszczyzny pionowej (podstopnicy) kolejnych stopni schodów oraz odjazdu od schodów po pokonaniu ostatniego stopnia. W parach obrotowych łączących koła

napędzane z ramą główną zdefiniowano dwa niezależne napędy tego typu. W przypadku analizowanego modelu prędkości obu kół są jednakowe i wynoszą  $\omega_{kt}=0,2$  rad/s.

W parze obrotowej łączącej wiatrak z ramą zdefiniowano napęd zadający prędkość w funkcji czasu. Napęd wiatraka działa, gdy napęd kół jest wyłączony. i wynosi  $\omega_w=0,3$  rad/s

Kolejny napęd zastosowano do płozy poziomującej. Jej funkcją jest zapewnienie podparcia wózka podczas wspinania się po schodach, jego stabilizacja oraz utrzymanie orientacji siedziska bliskiej poziomej, obserwując rzut modelu na płaszczyznę XY. Ramię posiada jeden, obrotowy stopień swobody względem wózka. Napęd obrotowy realizowany jest poprzez zadanie momentu napędowego o wartości regulowanej przez układ PID. Regulator ten jako uchyb otrzymuje informację z pomiaru przechylenia siedziska i wyznacza chwilową wartość momentu napędowego. Wartości parametrów zdefiniowano następująco:

- $P=5000$
- $I=0,2$
- $D=120$ ;

Wartości te zostały dobrane w wyniku prób symulacyjnych. Na tym etapie rozważań zakłada się, że w konstrukcji prototypowej wózka zastosowany zostanie podzespół realizujący poprawnie zadanie poziomowania siedziska i dlatego parametry tego układu nie będą przedmiotem dalszych analiz

## 4.5 Równania ruchu

Zagadnienia mechaniki analitycznej leżą u podstaw analizy dynamicznej złożonych układów mechanicznych. Analityczny sposób modelowania układów fizycznych pozwala głębiej wniknąć w strukturę dynamiki układów, czyli lepiej je poznać. Finalnym efektem modelowania jest model matematyczny – równania ruchu układu.

Do opisu ruchu układu wykorzystywane są współrzędne określane, jako współrzędne uogólnione [35]. Liczba zastosowanych współrzędnych uogólnionych wystarcza do całkowitego opisu położenia układu określanego układem współrzędnych uogólnionych. Stwierdzenie to wynika z faktu, iż liczba współrzędnych uogólnionych jest równa liczbie stopni swobody układu. W przypadku ogólnym, kiedy rozpatrujemy układ złożony z  $N$  brył



materialnych i nałożonych jest  $m$  więzów holonomicznych lub nieholonomicznych konfiguracja układu jest jednoznacznie wyrażona za pomocą wzoru:

$$n = 6N - m \quad (12)$$

gdzie:  $n$  - określa liczbę niezależnych parametrów  $q_1, \dots, q_n$ . Liczba  $n$ , nazywana liczbą stopni swobody układu, jest stała dla danego układu materialnego i jest jego wielkością charakterystyczną[25].

Współrzędne (parametry) niezależne wykorzystane do opisu układu nazywamy współrzędnymi uogólnionymi. Jest to każdy zbiór współrzędnych, który wystarcza do całkowitego opisanie położenia układu – możemy go nazwać układem współrzędnych uogólnionych, mogą to być współrzędne kartezjańskie  $x, y, z$ , jak i kąty. Wymagany jest warunek, aby współrzędne uogólnione tworzyły układ wzajemnie geometrycznie niezależnych wielkości.

Istnieje kilka sposobów wyznaczania równań równowagi dynamicznej badanych układów. W przypadku prostych układów o niewielkiej liczbie stopni swobody można przy układaniu równań ruchu wykorzystać wprost II prawo Newtona lub zasadę d'Alemberta. Dla układów złożonych o większej liczbie stopni swobody wygodne jest zastosowanie równań Lagrange'a II rodzaju następującej postaci:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_i} + \frac{\delta U}{\delta q_i} + \frac{\delta R}{\delta \dot{q}_i} = Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

gdzie:

$T$  – określa całkowitą energię kinetyczną układu,

$U$  – określa całkowitą energię potencjalną układu,

$Q_i$  – siły uogólnione,

$R$  – dysypacyjna funkcja rozproszenia energii,

$q_i$  – współrzędne uogólnione,

W zakresie tego rozdziału pominięto dalszy etap wyprowadzania równań ruchu analizowanego układu. Postęp oprogramowania do modelowania i analiz symulacyjnych daje narzędzia w znaczącym stopniu usprawniające te działania. Zamierzeniem autora było rozszerzenie wyników pracy o czytelne rezultaty przeprowadzonych symulacji w formie charakterystyk. Narzędzia zastosowane przez autora dają możliwość prostego budowania modelu przy pomocy narzędzi graficznych. W tak zbudowanym z brył sztywnych modelu

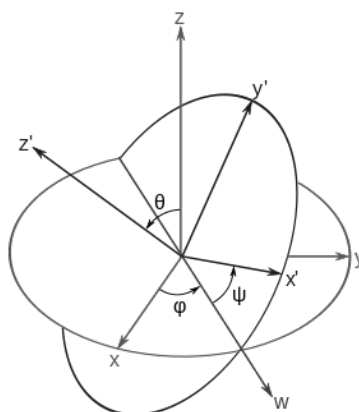
wprowadza się wzajemne połączenia tzw. pary kinematyczne, występujące między poszczególnymi elementami układu. Programy te zaopatrzone są we własne biblioteki typowych materiałów, jak też dają możliwość określenia własnych materiałów. Elementy generujące ruch postępowy, czy obrotowy są dostępne w postaci gotowych elementów - silników, jak również dostępne są takie elementy: sprężyny i tłumiki. Automatycznie wyliczane są wszystkie charakterystyczne parametry zastosowanych elementów.

Do przeprowadzenia w dalszym etapie analizy wózka wykorzystany został program MSC.Adams. Należy zaznaczyć, iż przy wyborze tego programu kierowano się jego uznaniem w środowisku naukowym i inżynierskim w przypadku analizy dynamiki złożonych układów mechanicznych.

Ruch analizowanego modelu wózka jest opisywany względem inercjalnego układu OXYZ. Położenie tego układu przypisane jest do punktu utworzonego przez przecięcie się trzech płaszczyzn, płaszczyzny symetrii wózka, pionowej płaszczyzny przeszkody oraz podłoża poziomego, na którym ustawiony jest wózek.

Ruch ciała sztywnego opisywany jest jako złożenie dwóch ruchów: ruchu postępowego odniesionego do środka masy ciała sztywnego oraz ruchu obrotowego układu własnego ciała sztywnego względem środka masy. Ruch postępowy opisany jest w układzie kartezjańskim za pomocą współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Ruch obrotowy opisywany jest za pomocą kątów Eulera.

1. obrót o kąt  $\varphi$  wokół osi  $Z$ ,
2. obrót o kąt  $\theta$  wokół osi  $X'$ ,
3. obrót o kąt  $\psi$  wokół osi  $Z''$



Rys. 32 Kąty Eulera [48]

Oś  $W$  będąca przecięciem płaszczyzn  $xy$  i  $x'y'$  nosi nazwę linii węzłów,  $\varphi$  jest kątem między osiami  $x$  i  $W$ ,  $\psi$  – między  $W$  i  $x'$ , zaś  $\theta$  między  $z$  i  $z'$ . Kierunek przyrostu kątów jest zaznaczony na rysunku, zmieniają się one w granicach  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ,  $0 \leq \psi \leq 2\pi$ ,  $0 < \theta < \pi$ .

#### 4.6 Badania symulacyjne

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych dotyczących zadania wspinania się układu człowiek-wózek po schodach, była analiza zjawisk dynamicznych. Na jej podstawie podjęto próbę oceny obszaru zastosowań proponowanej koncepcji środka transportu.

Model symulacyjny zbudowano w programie MD.Adams (Rys. 33). Zgodnie z założeniami przyjętymi dla modelu nominalnego, zbudowano pięć członów powiązanych ze sobą odpowiednimi więzami.



Rys. 33 Model symulacyjny przygotowany w MD.Adams

Do całkowania równań ruchu wykorzystano metodę GSTIF-SI2 opracowaną przez C. W. Gear'a. Wykorzystuje ona Backward Differentiation Formula (metoda wstecznego różniczkowania). Jest to metoda całkowania o zmiennym rzędzie, zmiennym kroku i jest dedykowana do rozwiązywania sztywnych układów równań różniczkowych [55].

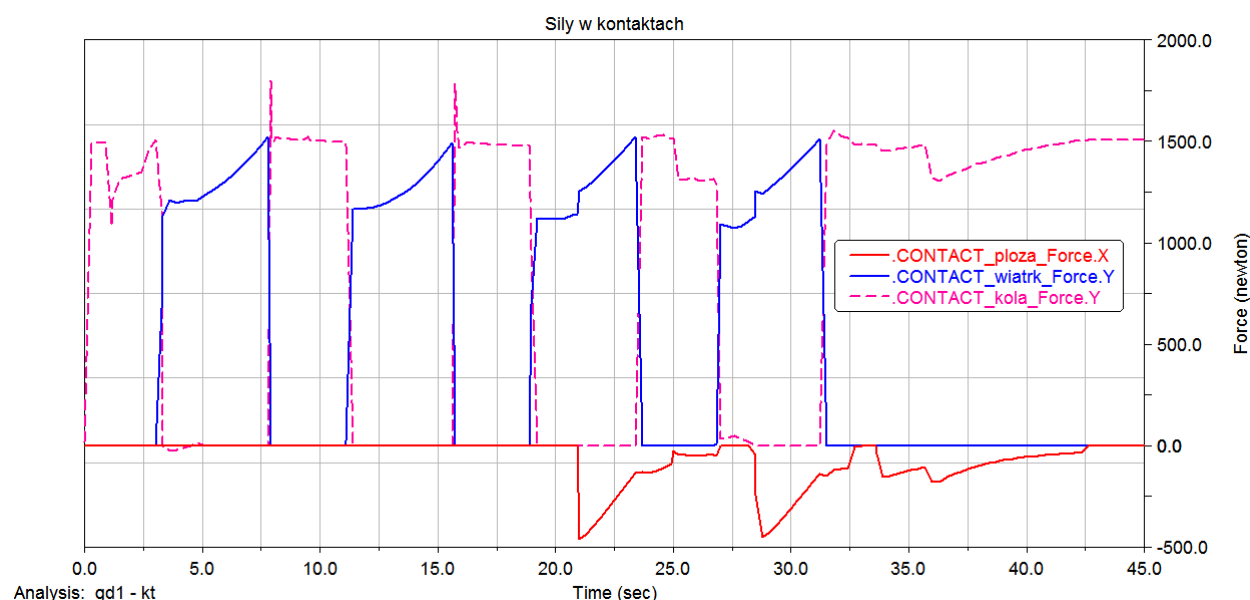
#### 4.6.1 Analiza sił występujących w obszarach kontaktu z podłożem

Prowadząc ten etap badań symulacyjnych analizowano poprawność realizacji zadania wjazdu na schody, gdzie za niepoprawne uważa się poślizg w miejscach kontaktu powodujący zsunięcie się na schodek poniżej.

Przyjęto nominalne wartości parametrów modelu wózka. Symulacje przygotowano dla manekina 75kg. Na Rys. 34 przedstawiono wykresy zmienności sił występujących w obszarze kontaktu członów przy pokonywaniu przez wózek inwalidzki czterech schodów. Przedstawiono proces wjazdu. Można przyjąć, że jest to wielokrotnie powtórzony algorytm przedstawiony na Rys. 12 (str. 26).

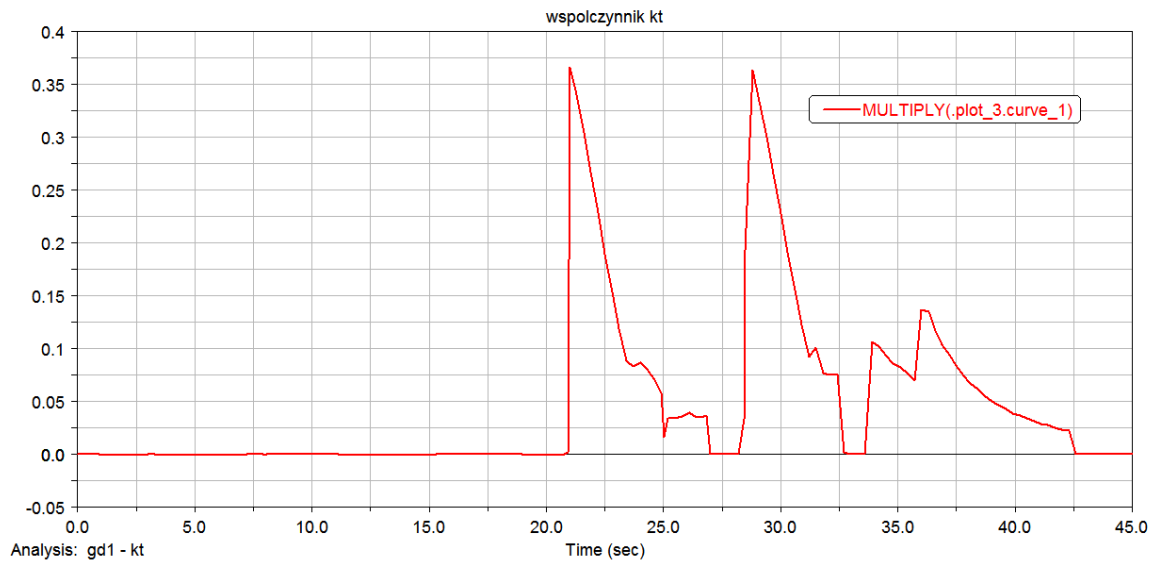
Model wózka, wjeżdżając po schodach, naprzemiennie kontaktuje się w swojej tylnej części z podłożem poprzez koła tylne i wiatrak kroczący. Na Rys. 34 przedstawiono składowe pionowe reakcje podłoża w tych punktach. Wartości sił w tych punktach zostały przedstawione jako sumy dla prawej i lewej strony.

W przedniej części model wózka kontaktuje się z podłożem poprzez płożę poziomującą. Człon ten naprzemiennie oddziałuje na poziome powierzenie schodów i na ich krawędzie. Z punktu widzenia poprawności realizacji zadania wjazdu korzystne jest, aby wartości sił reakcji były jak najmniejsze.



Rys. 34 Składowe siły występujące w kontakcie płoży poziomującej, wiatraka kroczącego i kół tylnych z podłożem

Przeprowadzone symulacje te pozwoliły opracować charakterystykę współczynnika  $k_t$  zdefiniowanego wzorem (3) (str. 35).



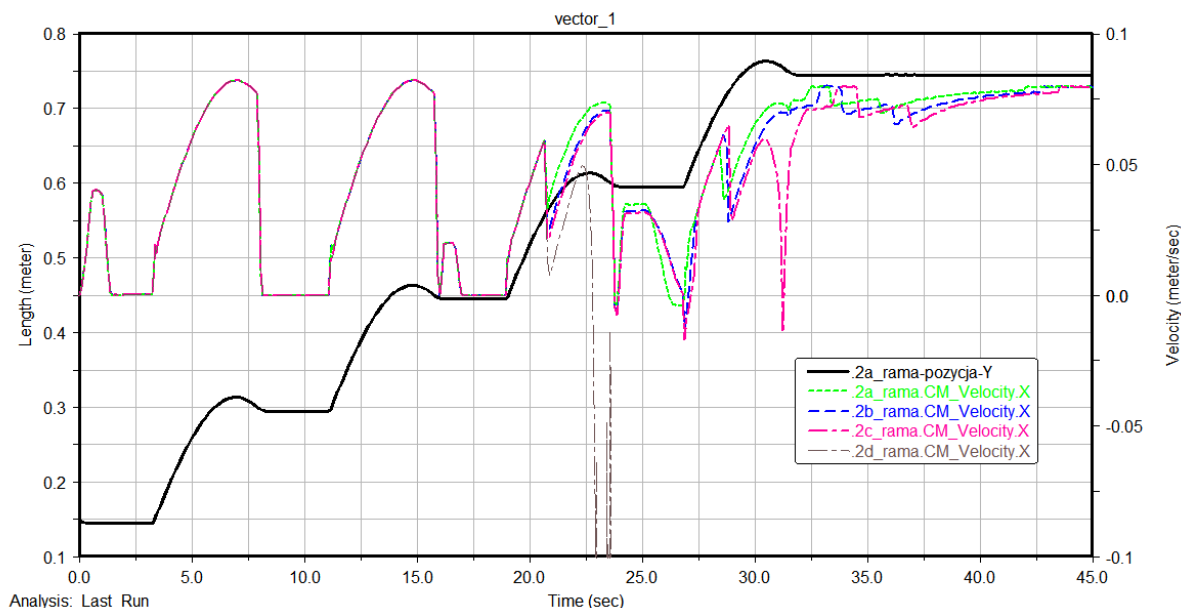
Rys. 35 Charakterystyka współczynnika  $k_T$  proporcji sił reakcji w punktach kontaktu z podłożem dla wartości początkowych parametrów modelu symulacyjnego MBS

Wyniki te potwierdzają zadowalającą zbieżność jakościową z charakterystyką otrzymaną w wyniku analizy modelu z rozdziału 3 (Rys. 19).

#### 4.6.2 Wyznaczenie zakresu wartości parametrów tarcia, przy których wózek poprawnie wjeżdża na różne schody.

Wyznaczenie zakresu wartości parametrów tarcia występującego w kontaktach z podłożem, przy których wózek poprawnie wjeżdża na schody polegało na zrealizowaniu wariantowych symulacji. Dla każdego wariantu geometrii przeszkody poszukiwano zestawu minimalnych wartości współczynników tarcia, przy których wózek w skutek poślizgu nie pokonuje przeszkody. Liczbami porządkowymi oznaczono kolejne warianty geometrii schodów, przy czym wariant 6 i 7 to pojedynczy schodek o wysokości 200mm i 150mm, który może reprezentować krawężnik. Parametry tarcia zebrano w grupy uznając, że ich wartości będą identyczne dla kontaktu kół z podłożem, jak i wiatraka kroczącego z podłożem (Tab. 15).

Wyniki symulacji dla geometrii przeszkody "2" przedstawiono na Rys. 36.



Rys. 36 Wyniki symulacji dla geometrii przeszkody "2" - analiza prędkości w kierunku X

Na powyższej charakterystyce zaobserwowano różnice w wartościach prędkości dla kolejnych symulacji. Wynikają one z różnych poślizgów występujących w obszarze kontaktu.

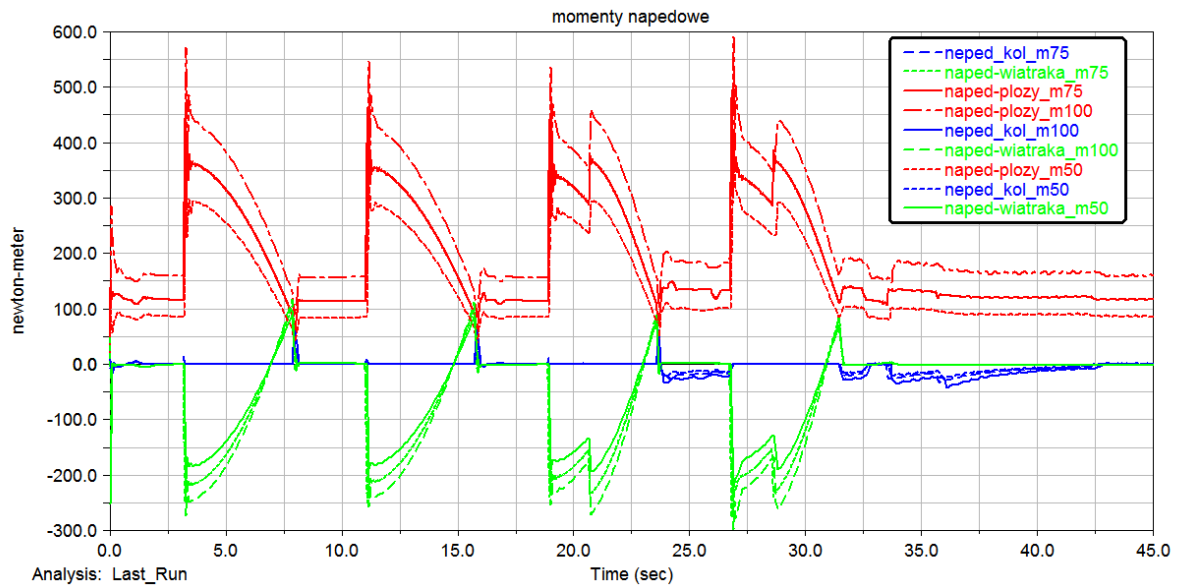
W Tab. 15 przygotowano zestawienie zakresów parametrów tarcia w kontaktach z podłożem przy realizacji zadania wjazdu na przeszkodę. Wyznacza ona zakres możliwych zastosowań modelu konstrukcji wózka inwalidzkiego będącego przedmiotem tej rozprawy.

Tab. 15. Zestawienie zakresów parametrów tarcia w kontaktach dla realizacji zadania wjazdu na przeszkodę

|    |                                      |                   | Parametry tarcia         |                             |                             |                             |                             |                             |                             | Czy wózek wjechał na przeszkodę? |  |
|----|--------------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| LP | Wysokość schodka                     | Szerokość schodka | a                        | b                           | c                           | d                           | e                           | f                           | g                           |                                  |  |
|    | h [mm]                               | s [mm]            | $\mu_s=1$<br>$\mu_d=0.9$ | $\mu_s=0.7$<br>$\mu_d=0.65$ | $\mu_s=0.65$<br>$\mu_d=0.6$ | $\mu_s=0.5$<br>$\mu_d=0.45$ | $\mu_s=0.4$<br>$\mu_d=0.35$ | $\mu_s=0.15$<br>$\mu_d=0.1$ | $\mu_s=0.11$<br>$\mu_d=0.1$ |                                  |  |
| 1. | 175                                  | 290               | tak                      | nie                         | nie                         | -                           | -                           | -                           | -                           |                                  |  |
| 2. | 150                                  | 320               | tak                      | tak                         | tak                         | nie                         | nie                         | -                           | -                           |                                  |  |
| 3. | 140                                  | 360               | tak                      | tak                         | tak                         | nie                         | nie                         | -                           | -                           |                                  |  |
| 4. | 120                                  | 380               | tak                      | tak                         | tak                         | nie                         | nie                         | -                           | -                           |                                  |  |
| 5. | 100                                  | 420               | tak                      | tak                         | tak                         | tak                         | nie                         | nie                         | nie                         |                                  |  |
| 6. | 200 - pojedynczy schodek - krawężnik |                   | tak                      | tak                         | tak                         | tak                         | tak                         | tak                         | tak                         | nie                              |  |
| 7. | 150 - pojedynczy schodek - krawężnik |                   | tak                      | tak                         | tak                         | tak                         | tak                         | tak                         | tak                         | tak                              |  |

### 4.6.3 Analiza momentów napędzających człony modelu

Ten etap analiz miał na celu ocenę momentów napędowych potrzebnych do poruszania członów odpowiedzialnych za wjazd na schody. Na Rys. 37 przedstawiono charakterystyki dla trzech modeli manekina.



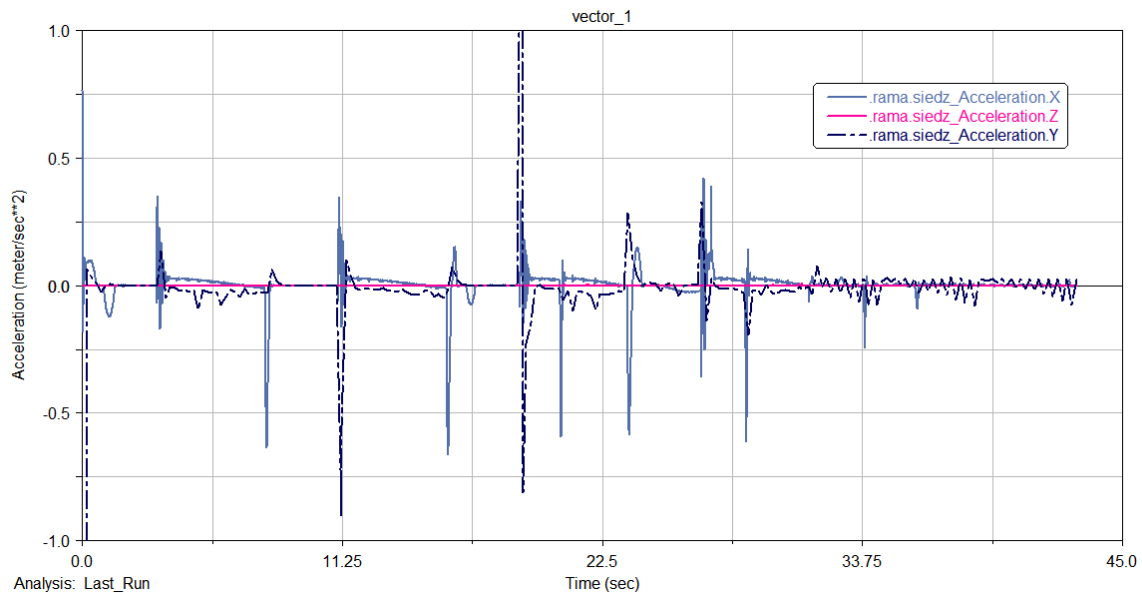
Rys. 37 Momenty napędowe członów odpowiedzialnych za wjazd na schody

Wartości przedstawione na charakterystyce opisują wymagania stawiane zespołom napędowym, które mogą składać się tylko z silnika elektrycznego lub motoreduktorów. Charakterystyka ta została wykorzystana przy pracach projektowych dotyczących układów elektromechanicznych wózka.

### 4.6.4 Wyznaczenie przyspieszeń drgań elementów modelu

Jedną z istotnych cech badanego modelu symulacyjnego jest możliwość określenia przyspieszeń drgań, jakich doznają jego elementy[21]. Jako najistotniejszy, z punktu widzenia oddziaływań na człowieka, przyjęto obszar kontaktu tułowia z siedzeniem wózka [20].

Na Rys. 38 przedstawiono przebieg zmian przyspieszenia drgań w kierunkach X,Y,Z jakie oddziałuje na model manekina.



Rys. 38 Przebieg zmian przyspieszenia drgań, w kierunkach X,Y,Z jakie oddziałują na model manekina

Rys. 38 pozwala ocenić rodzaj oraz parametry zastosowanych elementów amortyzujących między siedziskiem a ramą wózka.

Uzyskane wyniki przyspieszeń zostały wyeksportowane do programu DASYlab w celu analizy drgań oddziałujących na model człowieka w trakcie wjazdu na schody, co pozwoli dokonać oceny komfortu [27], zgodnej z normą ISO 2631-1:1997.

#### 4.7 Analiza drgań oddziałujących na człowieka w trakcie wjazdu na schody

Celem analiz prowadzonych na tym etapie rozwoju koncepcji konstrukcji była ocena wpływu warunków jazdy na osobę poruszającą się wózkiem przy wykorzystaniu symulacji i wirtualne testowanie prototypu. Analiza drgań oddziałujących na człowieka w trakcie wjazdu na schody pozwoli dokonać oceny komfortu, zgodnej z normą ISO 2631-1:1997 - Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-General Requirements [23]. Norma ta dotyczy pomiarów drgań ustalonych i nieustalonych, rozważanych w 3 aspektach: szkodliwości, uciążliwości i komfortu. Uwzględniono w niej następujące parametry oddziaływania drgań: wartość przyspieszeń drgań (wartość równoważna przyspieszenia lub skorygowana), okres oddziaływania drgań, częstotliwość



w pasmach tercjowych lub oktawowych i kierunek oddziaływania. Przyspieszenia analizowane są w kartezjańskim układzie współrzędnych XYZ, którego początek wyznacza miejsce wnikania drgań do organizmu. Kierunek Y wyznaczany jest przez kręgosłup.

W niniejszej pracy wykorzystano jedynie metodę oceny komfortu jazdy. Tylko dla tej procedury podano w normie progowe wartości porównawcze przyspieszeń wynoszące:

|  |                            |
|--|----------------------------|
| mniejsza niż $0,315 \text{ m/s}^2$               | komfortowo                 |
| od $0,315 \text{ m/s}^2$ do $0,63 \text{ m/s}^2$ | nieznacznie niekomfortowo  |
| od $0,5 \text{ m/s}^2$ do $1 \text{ m/s}^2$      | dość niekomfortowo         |
| od $0,8 \text{ m/s}^2$ do $1,6 \text{ m/s}^2$    | niekomfortowo              |
| od $1,25 \text{ m/s}^2$ do $2,5 \text{ m/s}^2$   | bardzo niekomfortowo       |
| powyżej $2 \text{ m/s}^2$                        | ekstremalnie niekomfortowo |

Analizę ograniczono do jednego punktu pomiarowego, zlokalizowanego na siedzisku w miejscu przenoszenia drgań na tułów manekina.

Metoda polega na zarejestrowaniu stacjonarnych przebiegów czasowych przyspieszeń w trzech kierunkach, w przyjętym punkcie pomiarowym. Zapis musi zawierać dane z reprezentatywnego okresu pomiarowego, lecz jego długość nie jest ściśle określona. Następnie należy przeprowadzić ocenę charakteru drgań wypadkowych na podstawie wzoru (10) na współczynnik szczytu.

$$k = \frac{a_{wpeak}}{a_{wRMS}} \quad (14)$$

gdzie:

$a_{wpeak}$  – szczytowa wartość ważona przyspieszenia drgań w  $\text{m/s}^2$

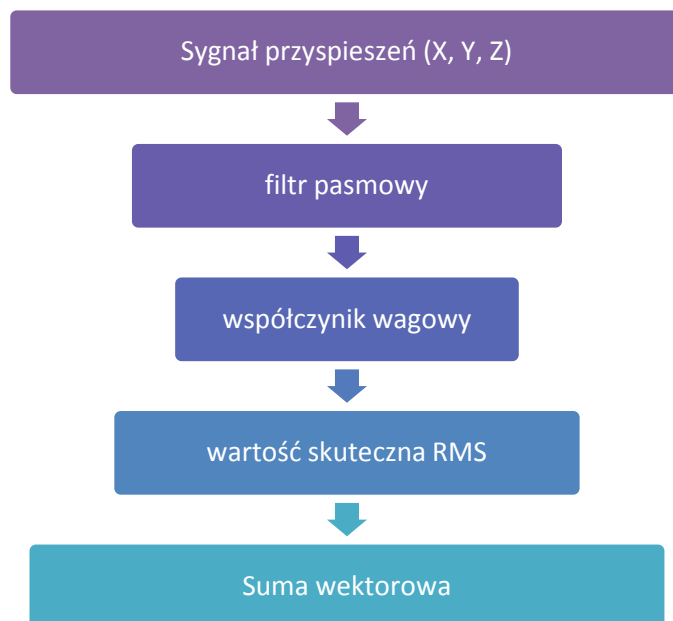
$a_{wRMS}$  – skuteczna wartość ważona przyspieszenia drgań w  $\text{m/s}^2$

W zależności od uzyskanego wyniku stosuje się inne wartości współczynników wagowych. W przypadku, gdy wynosi on od 1 do 9, wykorzystywane są współczynniki podstawowe. Gdy wynosi 9 lub więcej wykorzystywane są współczynniki dodatkowe.

Sygnal dla każdej osi należy następnie podzielić na częstotliwościowe pasma tercjowe. Przebieg każdego pasma przemnaża się przez odpowiadający mu współczynnik wagowy podany w normie. Dla każdego pasma wylicza się wartość skuteczną (RMS). Następnie wartości skuteczne pasm dla trzech kierunków sumuje się wektorowo, a wynik jest podstawą do porównania z wartościami progowymi.

Narzędzie służące do wykonania obliczeń wykonano w oprogramowaniu DASyLab 9.0 firmy National Instruments. Następnym krokiem było wyliczenie wartości współczynnika szczytu. Jego wartość wynosiła 1.34, zatem w kolejnym kroku wykorzystano podstawowe wartości współczynników wagowych (Tab. 16).

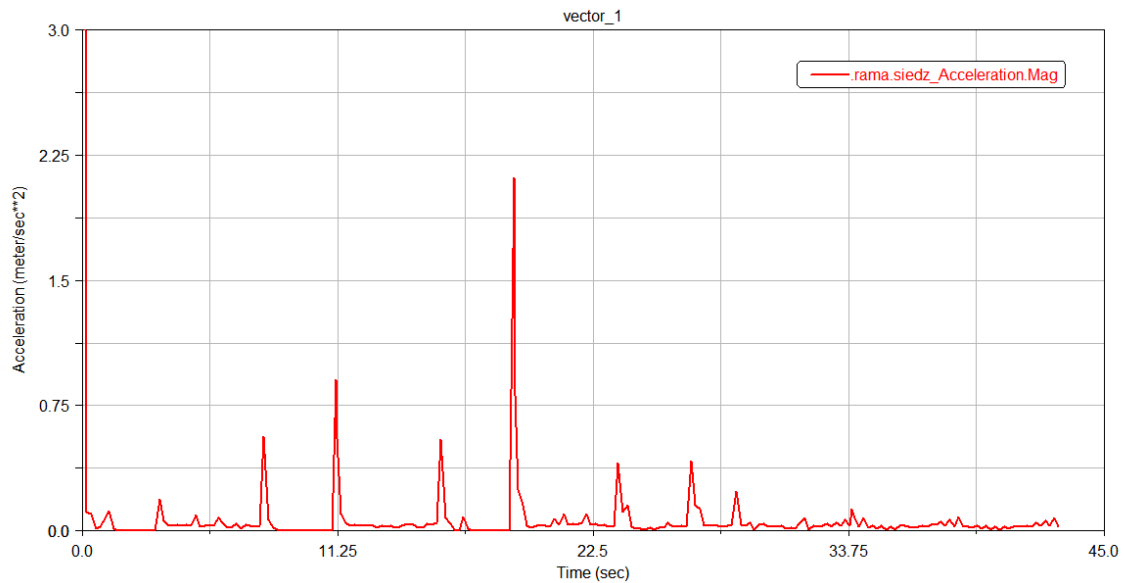
Zbudowano narzędzie służące do wyliczenia wartości RMS ważonych częstotliwościowo. Schemat jego działania przedstawia Rys. 39. Przypisano współczynniki wagowe dla osi Y oraz dla osi X i Z, dla których współczynniki wagowe są takie same.



Rys. 39 Schemat wyliczeń wartości RMS ważonych częstotliwościowo

Sygnał pochodzący z pliku zewnętrznego wprowadzany jest do 23 kanałów odpowiadających pasmom tercjom. Do każdego kanału szeregowo włączono zestaw filtrów górno i dolnoprzepustowych, z częstotliwościami progowymi zamieszczonymi w tabeli (Tab. 16). Wykorzystano filtry „Butterworth” 8 rzędu. Sygnał z każdego pasma mnożony jest przez odpowiadający współczynnik wagowy, a następnie wyliczana jest wartość RMS. Następnie wyliczana jest suma wektorowa dla pasm każdej osi.

Zgodnie z wytycznymi normy wyznaczono punkt pomiarowy odpowiadający miejscu wnikania drgań w organizm człowieka. Punkt związany jest z członem siedziska wózka i znajduje się u podstawy tułowia manekina. Zapis wartości przyspieszeń wypadkowych w przyjętym punkcie pomiarowym, przedstawiono na Rys. 40. W analizach sygnału pominięto zjawiska występujące w 1 sekundzie, gdyż związane są ze stabilizacją modelu w początkowej fazie symulacji.



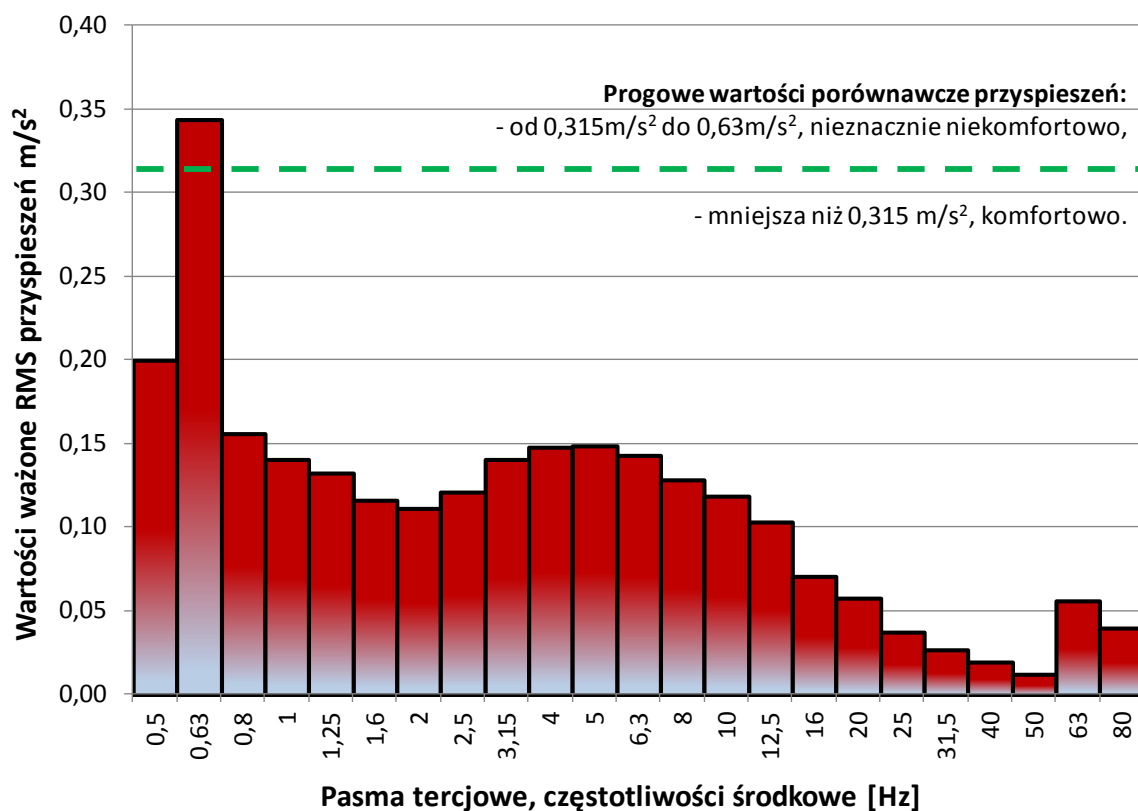
Rys. 40 Wartości wypadkowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w punkcie pomiarowym w funkcji czasu

Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na zestawienie wyników w Tab. 16.

Tab. 16. Zakresy pasm tercjowych, współczynniki wagowe i ważone wartości RMS przyspieszeń w pasmach tercjowych

| Pasma wg ISO | Pasma tercjowe |                    |                             | Współczynniki wagowe dla osi „Y” | Współczynniki wagowe dla osi „X” i „Z” | Ważone wartości RMS przyspieszeń wzdłuż jednej osi |                       |                       | Suma wektorowa wartości RMS [m/s <sup>2</sup> ] |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|--|-----------------------|-----------------------|---|
|              | Nr.            | Dolna granica [Hz] | Częstotliwość środkowa [Hz] |                                  |  | Górna granica [Hz]                                 | X [m/s <sup>2</sup> ] | Y [m/s <sup>2</sup> ] |   |
| -3           | 0,44           | 0,5                | 0,56                        | 0,418                            | 0,853                                  | 0,02   | 0,20                  | 0,00                  | 0,20  |
| -2           | 0,56           | 0,63               | 0,71                        | 0,459                            | 0,944                                  | 0,06   | 0,34                  | 0,00                  | 0,34  |
| -1           | 0,71           | 0,8                | 0,89                        | 0,477                            | 0,992                                  | 0,02   | 0,15                  | 0,00                  | 0,16  |
| 0            | 0,89           | 1                  | 1,11                        | 0,482                            | 1,011                                  | 0,02   | 0,14                  | 0,00                  | 0,14  |
| 1            | 1,11           | 1,25               | 1,42                        | 0,484                            | 1,008                                  | 0,02   | 0,13                  | 0,00                  | 0,13  |
| 2            | 1,42           | 1,6                | 1,78                        | 0,494                            | 0,968                                  | 0,02   | 0,11                  | 0,00                  | 0,12  |
| 3            | 1,78           | 2                  | 2,22                        | 0,531                            | 0,890                                  | 0,02   | 0,11                  | 0,00                  | 0,11  |
| 4            | 2,22           | 2,5                | 2,80                        | 0,631                            | 0,776                                  | 0,02   | 0,12                  | 0,00                  | 0,12  |
| 5            | 2,80           | 3,15               | 3,56                        | 0,804                            | 0,642                                  | 0,01   | 0,14                  | 0,00                  | 0,14  |
| 6            | 3,56           | 4                  | 4,45                        | 0,967                            | 0,512                                  | 0,01   | 0,15                  | 0,00                  | 0,15  |
| 7            | 4,45           | 5                  | 5,61                        | 1,039                            | 0,409                                  | 0,01   | 0,15                  | 0,00                  | 0,15  |
| 8            | 5,61           | 6,3                | 7,12                        | 1,054                            | 0,323                                  | 0,00   | 0,14                  | 0,00                  | 0,14  |
| 9            | 7,12           | 8                  | 8,90                        | 1,036                            | 0,253                                  | 0,00   | 0,13                  | 0,00                  | 0,13  |
| 10           | 8,90           | 10                 | 11,14                       | 0,988                            | 0,212                                  | 0,00   | 0,12                  | 0,00                  | 0,12  |
| 11           | 11,14          | 12,5               | 14,25                       | 0,902                            | 0,161                                  | 0,00   | 0,10                  | 0,00                  | 0,10  |
| 12           | 14,25          | 16                 | 17,82                       | 0,768                            | 0,125                                  | 0,00   | 0,07                  | 0,00                  | 0,07  |
| 13           | 17,82          | 20                 | 22,27                       | 0,636                            | 0,100                                  | 0,00   | 0,06                  | 0,00                  | 0,06  |
| 14           | 22,27          | 25                 | 28                          | 0,513                            | 0,080                                  | 0,00   | 0,04                  | 0,00                  | 0,04  |
| 15           | 28             | 31,5               | 35,63                       | 0,405                            | 0,0632                                 | 0,00   | 0,03                  | 0,00                  | 0,03  |
| 16           | 35,63          | 40                 | 44,54                       | 0,314                            | 0,0494                                 | 0,00   | 0,02                  | 0,00                  | 0,02  |
| 17           | 44,54          | 50                 | 56,12                       | 0,246                            | 0,0388                                 | 0,00   | 0,01                  | 0,00                  | 0,01  |
| 18           | 56,12          | 63                 | 71,27                       | 0,186                            | 0,0295                                 | 0,00   | 0,06                  | 0,00                  | 0,06  |
| 19           | 71,27          | 80                 | 89,09                       | 0,132                            | 0,0211                                 | 0,00   | 0,04                  | 0,00                  | 0,04  |

Wartości ważone RMS przyspieszeń w pasmach tercjowych zostały przedstawione na Rys. 41.



Rys. 41 Wartości skuteczne przyspieszeń drgań zarejestrowanych w punkcie pomiarowym

Obliczone, wypadkowe wartości skuteczne przyspieszeń ważonych częstotliwościowo, odniesiono do progowych wartości porównawczych (Rys. 41). Przyspieszenia w paśmie 0,63 Hz przyjmują największe wartości i w odniesieniu do progowych wartości porównawczych są z granicy zakresów warunków komfortowych i nieznacznie niekomfortowych. Wyniki dla pozostałych pasm mieszczą się w granicy komfortu.

Wyniki tych analiz pozwalają wnioskować, że zaproponowana w pracy metoda pokonywania schodów przez wózek inwalidzki nie niesie ze sobą negatywnych skutków w zakresie komfortu jazdy. Uproszczenia zastosowane na tym etapie symulacji, a polegające na uznaniu członów modelu jako bryły sztywne, mogły spowodować zwiększenie wartości maksymalnych przyspieszenia drgań.

W dalszej części pracy przedstawiono analizę komfortu przeprowadzoną dla prototypu omawianego wózka inwalidzkiego.

## 5. Badania symulacyjne modelu w zakresie podążania za zadaniem torem jazdy

W rozdziale poddano analizie model wózka, który był w fazie budowy prototypu laboratoryjnego. Celem badań było przygotowanie środowiska testowego parametrów układu sterowania kierunkiem jazdy. Na tym etapie powstała już konstrukcja mechaniczna i realizowany był etap programowania głównego układu sterowania. Testowanie algorytmów programistycznych, zawierających niesprawdzone parametry regulatorów na obiekcie fizycznym, nie tylko jest uciążliwe, ale w przypadku środków transportu również niebezpieczne. Problemem badawczym była ocena wpływu parametrów regulacji i cech dynamicznych modelu symulacyjnego na zdolność podążania za zadaną trajektorią ruchu.

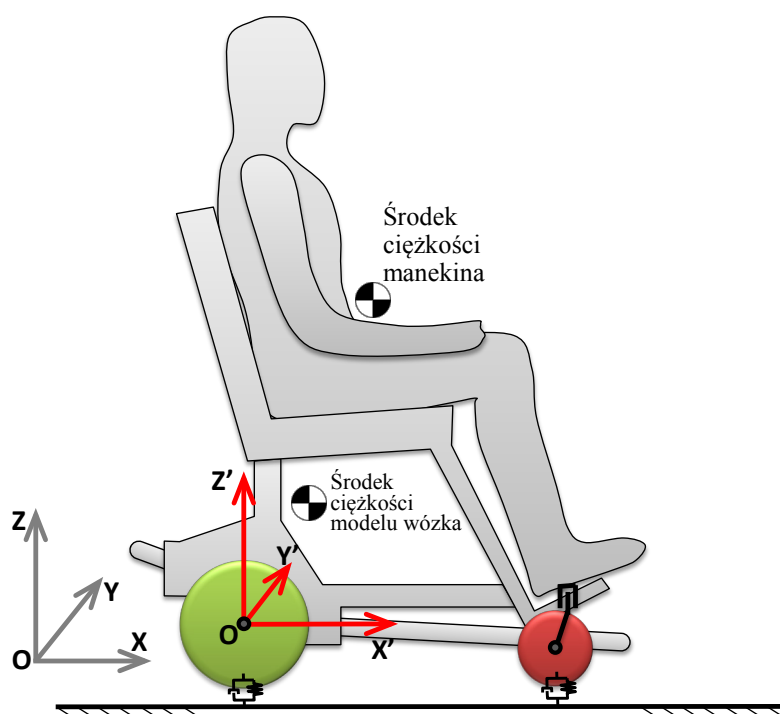
W prezentowanej analizie modelu symulacyjnego wózka inwalidzkiego został wykorzystany program Matlab-Simmechanics.

### 5.1 Model nominalny

Przedmiotem symulacji była realizacja zadania jazdy po powierzchni płaskiej nadążając za zadaniem kierunkiem jazdy. Przy tak postawionym zadaniu model nominalny wózka inwalidzkiego został uproszczony do brył sztywnych o strukturze składającej się z:

- bryły ramy z siedziskiem oraz związanych z nią nieruchomo napędów, przekładni, dźwigni itp.
- bryły reprezentującej człowieka, sztywno połączona z bryłą ramy,
- brył reprezentujących koła tylne prawe i lewe. Koła tylne tworzą z ramą parę kinematyczną obrotową bez tarcia.
- oraz kół przednich (prawe i lewe) wraz ze zwrotnicami. Koła przednie połączone są ze zwrotnicą jako para kinematyczna obrotowa bez tarcia. Zwrotnica połączona jest z ramą jako para kinematyczna obrotowa z tarciami. Oś obrotu zwrotnicy jest pionowa.

Model przedstawiono na Rys. 42, wskazując przyjęte układy współrzędnych. Początek układu współrzędnych związany z bryłą ramy wózka jest usytuowany w środku osi kół tylnych.



Rys. 42 Model nominalny przygotowany do symulacji podążania za zadaniem torem jazdy

W modelu zdefiniowano dwie pary kół różniących się od siebie: przednie i tylne. Wykorzystano program MF-Tyre opracowany przez uniwersytet TU Delft [64] i organizację TNO [63]. MF Delft Tyre dostarcza pół-empiryczny model opony, do stosowania w różnych środowiskach symulacji, m.in. w środowisku Matlab – Simulink – SimMechanics. W opisie przyczepności zastosowano wzory magicznej formuły Pacejki (Pacejka Formula Magic) [53]. Odkształcenia opony opisano tzw. modelem szczotkowym [47]. Model przeznaczony jest do obliczeń sił działających na oponę w stanie statycznym lub w stanie wolnozmiennych oddziaływań dynamicznych, których częstotliwości nie przekraczają 8Hz. Model przeznaczony jest do badań sterowności pojazdu w zakrętach wykonywanych przy badaniach symulacyjnych preprototypowania wirtualnego na nawierzchniach nieodkształconych (równych). Z tego względu model spełnia oczekiwania projektu wózka inwalidzkiego. W tej pracy wykorzystano model w wersji 6.1.2 z definicją opcji kontaktu: *smooth road contact, circular cross section (motorcycle tyres)*.

## 5.2 Identyfikacja parametrów modelu

### 5.2.1 Eksperymentalne wyznaczanie parametrów sztywności promieniowej modelu opon

Ten etap prac został zrealizowany w ramach Projektu Eco-Mobilność i szerzej zaprezentowano go w [52]. W celu wyznaczenia wartości sztywności promieniowej opon zastosowanych w prototypie wózka przeprowadzono eksperyment na obiektach rzeczywistych. Polegał on na wyznaczeniu charakterystyki ugięcia opony w funkcji siły reakcji podłoża. Wykorzystano przy tym całą konstrukcję wózka wraz zamontowanymi kołami. Ugięcie opon wyznaczano poprzez pomiar czujnikiem zegarowym przemieszczenia pionowego, wybranego punktu na ramie wózka znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie opony. Przemieszczenie to następnie odniesiono do położenia wyznaczonego dla opony nieobciążonej. Do pomiaru siły reakcji użyto wagi. Badane opony napompowano do ciśnienia nominalnego określonego przez producenta. Wynosi ono 35 psi (241318 Pa).

Konstrukcję wózka ustawiono następnie na poziomej nawierzchni, badaną oponę umieszczając na wadze. Unosząc wózek i obserwując moment powstania szczeliny między oponą a wagą wyznaczono położenia wysokościowe punktów pomiarowych dla nieugiętych opon. Dla tych wskazań przyjęto wartości ugięcia opon równe 0 i zarejestrowano pierwsze punkty charakterystyk (siły reakcji równe 0).



Rys. 43 Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyki siły reakcji podłoża w funkcji ugięcia opony wózka

Ramę wózka obciążano skokowo, rejestrując na każdym etapie odczyt wagi i przemieszczenie punktu pomiarowego.

Należy zaznaczyć, że zastosowana metoda badawcza nie pozwoliła na wyznaczenie charakterystyk w pełnym zakresie ugięcia opon a jedynie ich części. Aby uzyskać pełne dane należałoby obciążać opony do momentu zetknięcia się ich czoł z krawędziami obręczy.

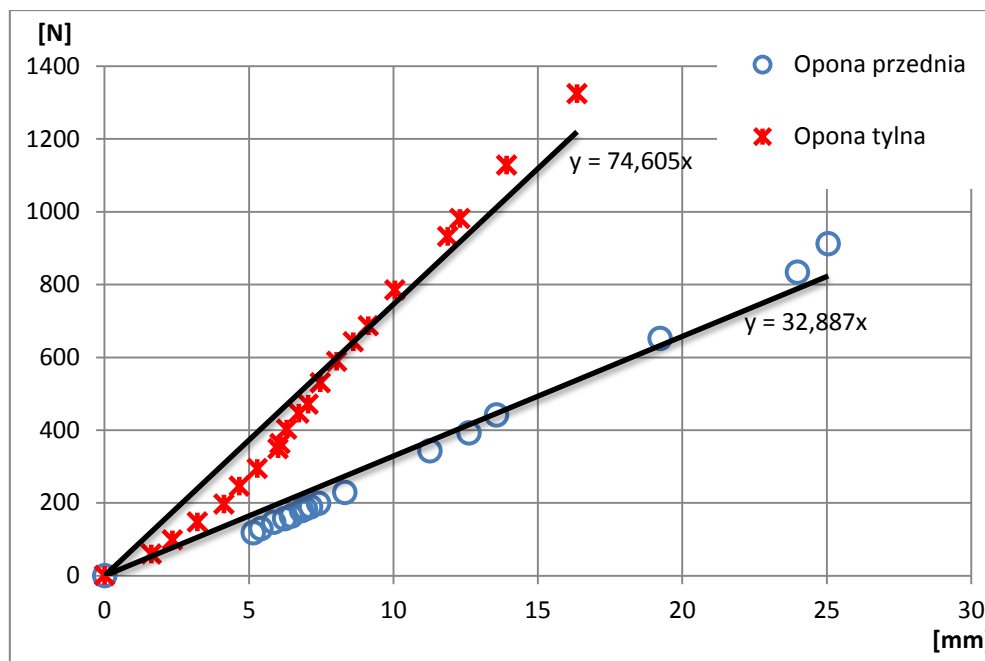
Odczyty wagi (kg) przeliczono na siłę reakcji, a przemieszczenia odniesiono do przemieszczenia dla opony nieugiętej, otrzymując wartość ugięcia. Przetworzone wyniki wraz z wyznaczoną charakterystyką zostały przedstawione w Tab. 17.

Tab. 17. Wyniki pomiarów sił reakcji podłoża i ugięcia opon dla osi przedniej i tylnej

| Opona przednia |                    | Opona tylna |                    |
|----------------|--------------------|-------------|--------------------|
| Siła [N]       | Ugięcie opony [mm] | Siła [N]    | Ugięcie opony [mm] |
| 0              | 0,0                | 0           | 0,0                |
| 117,7          | 5,1                | 58,9        | 1,6                |
| 129,5          | 5,4                | 98,1        | 2,3                |
| 147,2          | 5,9                | 147,2       | 3,2                |
| 156,9          | 6,2                | 196,2       | 4,1                |
| 163,8          | 6,5                | 245,3       | 4,7                |
| 178,5          | 6,8                | 294,3       | 5,3                |
| 184,4          | 6,9                | 348,3       | 6,0                |
| 189,3          | 7,1                | 363,0       | 6,1                |
| 199,1          | 7,4                | 402,2       | 6,3                |
| 228,6          | 8,3                | 446,4       | 6,7                |
| 343,4          | 11,3               | 470,9       | 7,0                |
| 392,4          | 12,6               | 529,7       | 7,5                |
| 441,5          | 13,6               | 588,6       | 8,0                |
| 652,4          | 19,2               | 642,6       | 8,6                |
| 833,9          | 24,0               | 686,7       | 9,1                |
| 912,3          | 25,0               | 784,8       | 10,1               |
| -              | -                  | 932,0       | 11,9               |
| -              | -                  | 981         | 12,3               |
| -              | -                  | 1128,2      | 13,9               |
| -              | -                  | 1324,4      | 16,4               |

Przedstawione dane pozwoliły wykreślić charakterystyki ugięcia opon (Rys. 44).





Rys. 44 Charakterystyka sił reakcji podłoża w funkcji ugięcia opon

Dla wyznaczonych charakterystyk dokonano aproksymacji liniowej krzywych otrzymując dwie proste opisane równaniem  $y=ax$ . Parametr tego równia określa sztywność promieniową kół. Wartości sztywności promieniowych opon wynoszą zatem:

32880 [N/m] – dla opony przedniej

74600 [N/m] – dla opony tylnej

### 5.2.2 Eksperymentalne wyznaczanie stałej tłumienia opon

Z powodu braku dostępu do specjalistycznego sprzętu pomiarowego, który umożliwiłby bezpośrednio wyznaczenie stałych tłumienia omawianych opon, opracowano metodę zastępczą. Wykonano serię odpowiadających sobie eksperymentów na obiektach rzeczywistych, a następnie dokonano analizy wyników. Obserwowano przebieg zjawisk, których charakter związany jest z poszukiwanymi wartościami stałych tłumienia, to jest amplitudy drgań i czasu potrzebnego do wytlumienia drgającego układu. Dane uzyskane z eksperymentów polegających na swobodnym upadku konstrukcji wózka, z określonej wysokości, poddano analizie i wykorzystując zależność opis ruchu tłumionego na logarytmiczny dekrement tłumienia obliczono stałą tłumienia. Należy przy tym zwrócić uwagę na niedokładności wynikające z zastosowanej metody. Wykonanie eksperymentów na całej konstrukcji wózka pozwala obserwować zjawiska fizyczne, będące wypadkową własności kół, ramy i wszystkich elementów związanych z układem prototypu. Wyznaczona

w ten sposób wartość stałej tłumienia jest wartością zastępczą dla całego układu. Model symulacyjny zbudowany jest natomiast w większości z elementów doskonale sztywnych, podatność występuje jedynie w modelach opon. Tym samym zastępcze tłumienie całego układu rzeczywistego odnoszone jest do tłumienia opon. Na tym etapie uznano jednak, że takie uproszczenie jest wystarczające.

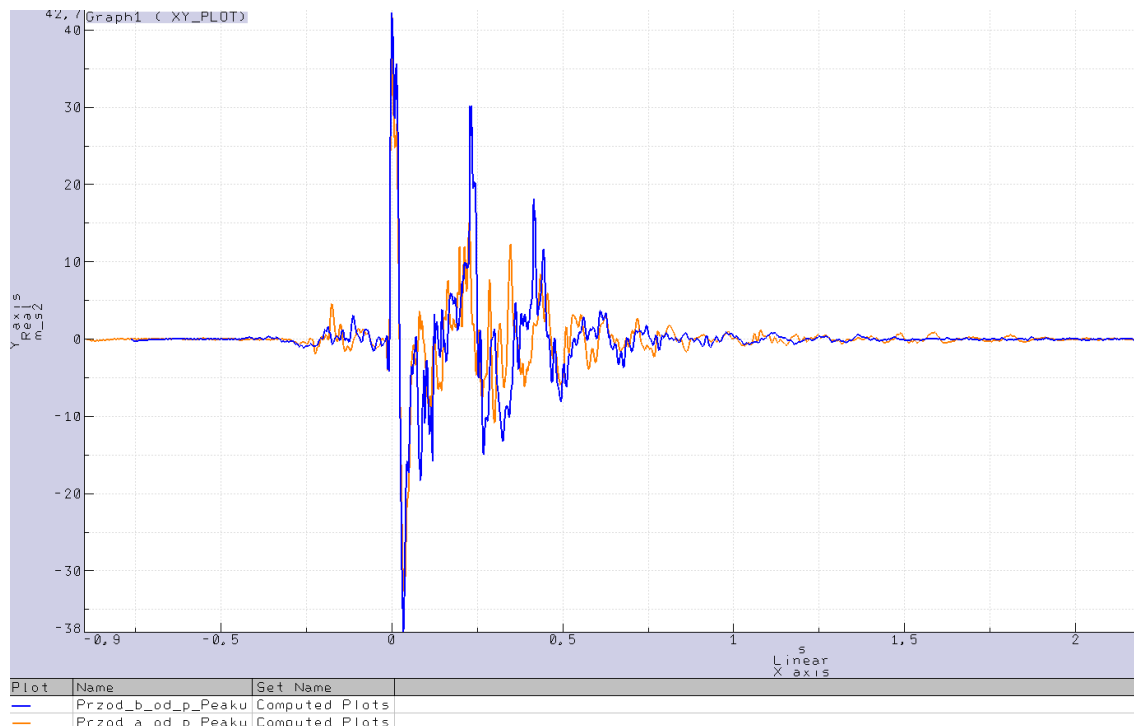
Doświadczenia polegały na uniesieniu przedniej lub tylnej osi wózka na określoną wysokość. Pozostałe koła spoczywały na podłożu. Wysokości odniesiono do charakterystycznych elementów konstrukcji, tak aby ułatwić odtworzenie warunków w środowisku symulacyjnym. Wózek następnie upuszczano swobodnie na podłoże rejestrując przebieg drgań. Do badań upadku zdemontowano fotel wózka.

Do pomiaru drgań wykorzystano akcelerometr jednoosiowy firmy PCB typu 603C01 o zakresie pomiarowym od 5Hz i niepewności pomiarowej w zakresach (5-9Hz +/- 2,0%, 10-99Hz +/- 1,5%). Przyrząd przymocowano do konstrukcji w bezpośrednim sąsiedztwie badanych opon, w taki sposób, aby oś pomiarowa pokrywała się z kierunkiem pionowym.



Rys. 45 Rozmieszczenie akcelerometru na ramie wózka

Założono, że będące obiektem zainteresowania częstotliwości odbić kół od podłoża nie przyjmą wartości wyższych niż 55Hz. Składowe drgań o wyższych częstotliwościach powstają w wyniku ugięcia ramy, zatem nie będą możliwe do odtworzenia symulacyjnie bez uwzględnienia podatności członów ramy. W związku z tym, w celu zwiększenia przejrzystości wyników, zastosowano filtr dolnoprzepustowy 55Hz. Wyniki dwóch serii pomiarowych dla przedniej osi przedstawiono na wykresach Rys. 46.



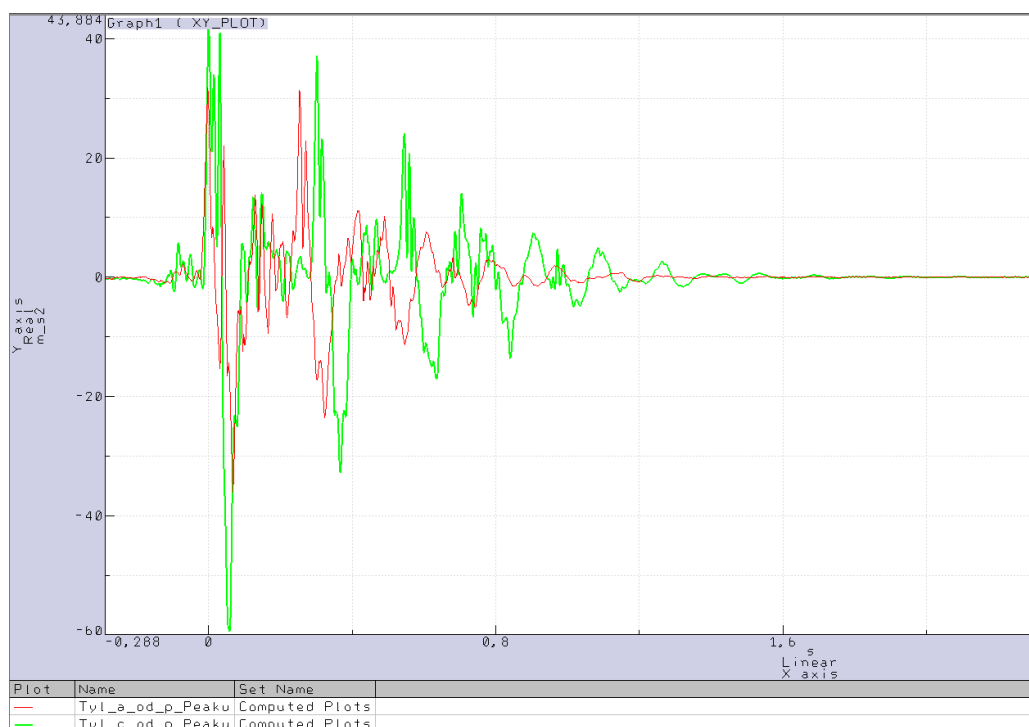
Rys. 46 Charakterystyka przyspieszeń drgań w funkcji czasu. Wyniki eksperymentu dla osi przedniej

Zaprezentowane wyniki pozwalają na odczytanie wartości charakterystycznych dla przebiegu przyspieszeń w eksperymencie dla osi przedniej. Wartości parametrów zestawiano w Tab. 18.

Tab. 18. Parametry zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń drgań w eksperymencie dla osi przedniej

| Nazwa przebiegu, parametry | Przod_a | Przod_b | Jednostka        |
|----------------------------|---------|---------|------------------|
| Amplituda nr 1, A1         | 38      | 42      | m/s <sup>2</sup> |
| Amplituda nr 5 A5          | 3       | 4       | m/s <sup>2</sup> |
| Czas 4 okresów, 4T         | 0,74    | 0,74    | sek              |

Rejestrację przyspieszeń przeprowadzono również dla kół osi tylnej, a wyniki dwóch serii pomiarowych przedstawiono na wykresie na Rys. 47.



Rys. 47 Charakterystyka przyspieszeń drgań w funkcji czasu. Wyniki eksperymentu dla osi tylnej

Zaprezentowane wyniki pozwalają na odczytanie wartości charakterystycznych dla przebiegu przyspieszeń w eksperymencie dla osi tylnej dla obu serii. Wartości parametrów zestawiano w Tab. 19.

Tab. 19. Parametry zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń w eksperymencie dla osi przedniej

| Nazwa przebiegu, parametry | Tyl_a | Tyl_c | Jednostka        |
|----------------------------|-------|-------|------------------|
| Amplituda nr 1, A1         | 33    | 58    | m/s <sup>2</sup> |
| Amplituda nr 6 A6          | 2     | 6     | m/s <sup>2</sup> |
| Czas 5 okresów, 5T         | 1,05  | 1,1   | sek              |

Do wyznaczenia wartości stałej tłumienia opony przedniej i tylnej wykorzystano zależność na logarytmiczny dekrement tłumienia [35], z którego otrzymano zależność opisaną wzorem (15).

$$f_{T,P} = \frac{2m_z}{nT} \ln \frac{A(t)}{A(t+nT)} \tag{15}$$

gdzie:

$f_{T,P}$  - stała tłumienia dla opon tylnych **T** oraz przednich **P**

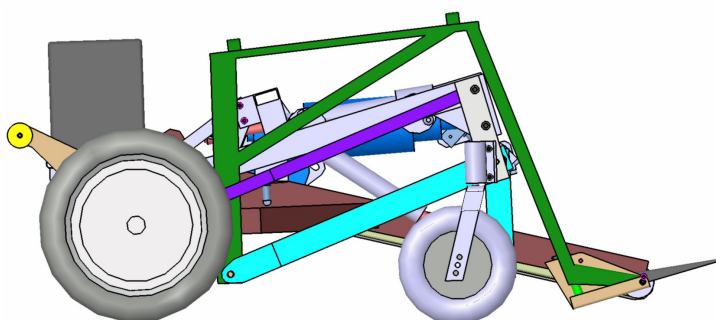
$m_{zT, P}$  - masa zredukowana wózka wyznaczona dla badań opon tylnych **T** oraz przednich **P**

$n$  - liczba analizowanych okresów drgań

$T$  - okres drgań

$A(t), A(t+nT)$  - amplituda drgań w chwili  $t$  oraz po liczbie analizowanych okresów  $nT$

Do przeprowadzenia wyliczeń omawianych parametrów konieczne było określenie parametrów masowych obiektu wykorzystanego w eksperymencie. Posłużono się modelem wykonanym na etapie przygotowywania dokumentacji konstrukcyjno - wykonawczej opracowanej w systemie Catia (Rys. 48).



Rys. 48 Model CAD służący do określenia parametrów masowych

Odczytane parametry masowe zostały zestawione w Tab. 20. Przedstawiono w niej również masy zredukowane, które obliczono uwzględniając sposób prowadzenia eksperymentu - przy badaniu opon przednich tył wózka pozostaje na podłożu a upuszczany jest przód. Podstawą obliczenia mas zredukowanych było uproszczenie analizowanego układu, w którym występują o drgania rotacyjnie do postaci układu translacyjnego o jednym stopniu swobody. Wózek wykonuje ruch obrotowy wokół osi tylnej. Przy badaniu opon tylnych zachodzi zależność odwrotna.

Tab. 20. Parametry masowe obiektu badań eksperymentalnych

| Nazwa parametru                                 | Oznaczenie | Wartość | Jednostka      |
|---|------------|---------|----------------|
| Masa wózka użytego do badań                     | $m_e$      | 70      | kg             |
| Środek ciężkości                                | Śc. X'     | 0,002   | m              |
|   | Śc. Y'     | 0,227   |                |
|   | Śc. Z'     | 0,023   |                |
| Moment bezwładności                             | $I_{ox}$   | 9,334   | $\text{kgm}^2$ |
|   | $I_{oy}$   | 4,658   |                |
|   | $I_{oz}$   | 10,018  |                |
| Rozstaw osi wózka                               | $D_{os}$   | 0,514   | m              |
| Masa zredukowana dla eksperymentu osi przedniej | $m_{zP}$   | 67,5    | kg             |
| Masa zredukowana dla eksperymentu osi tylnej    | $m_{zT}$   | 78,7    | kg             |

Stosując wzór (15) dla każdej serii badań eksperymentalnych wyznaczono stałe tłumienia i zestawiono je w Tab. 21.

Tab. 21. Wartości stałej tłumienia wyznaczone w eksperymencie

|                                | Nazwa serii | Wartość | Wartość średnia |
|--------------------------------|-------------|---------|-----------------|
| Stała tłumienia opon przednich | Przod_a     | 463,1   | 446,0           |
|                                | Przod_b     | 428,8   |                 |
| Stała tłumienia opon tylnych   | Tyl_a       | 420,5   | 372,6           |
|                                | Tyl_c       | 324,8   |                 |

Różnice w wartościach stałej tłumienia wynikają z uproszczeń zastosowanych w przygotowaniu eksperymentu. Do dalszych obliczeń brano pod uwagę wartości średnie wyznaczone z serii eksperymentu.

W dokumentacji technicznej [54] producent wymienia przykładowe wartości omawianych w tym rozdziale parametrów, dla opon różnego typu. Podane wartości dotyczą opon samochodowych i ciężarowych.

Tab. 22. Porównanie wartości wyznaczonych parametrów z wartościami przykładowymi.

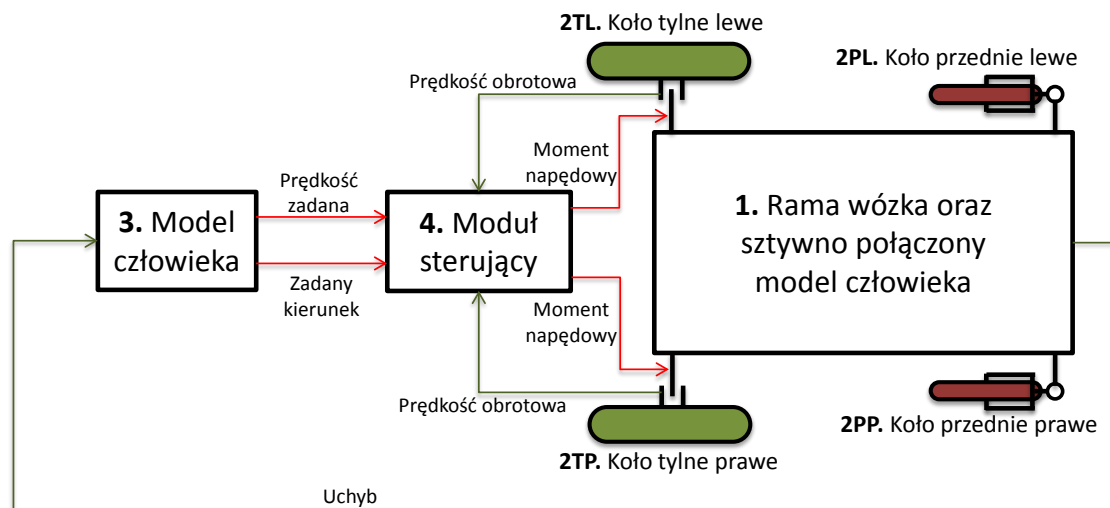
| Wielkość                   | Przykład z dokumentacji  | Wartości parametrów opon wózka Wektor         |
|----------------------------|--|---|
| Szywność promieniowa [N/m] | Samochód osobowy:<br>150'000-300'000<br>Samochód ciężarowy:<br>150'000-1'000'000 | Opona przednia: 32'880<br>Opona tylna: 74'600 |
| Stała tłumienia [kg/s]     | Samochód osobowy:<br>1'000-3'500<br>Samochód ciężarowy:<br>1'700-15'000          | Opona przednia: 446,0<br>Opona tylna: 372,6   |

Opony stosowane w wózkach inwalidzkich są znacząco mniejsze od stosowanych w samochodach osobowych lub ciężarowych. Wyliczone wartości są zgodne z ogólną zależnością związaną z rozmiarem opony. Parametry opon wózka są bliższe do stosowanych w motocyklach i rowerach.

### 5.3 Model symulacyjny

W rozdziale poddano analizie model wózka inwalidzkiego, który był w fazie prototypu laboratoryjnego. Celem symulacji była synteza własności modelu sterowania z uwzględnieniem jego cech dynamicznych. Przedmiotem symulacji była realizacja zadania jazdy po powierzchni płaskiej uwzględniającej podążanie za zadaną trajektorią.

Do budowy modelu symulacyjnego wykorzystano środowisko Matlab – Simmechanics. Strukturę tego modelu przedstawiono na Rys. 49. Wskazano na nim podział na główne moduły modelu. Moduł stanowi połączenie w grupę elementów wspólnie realizujących określoną funkcję.



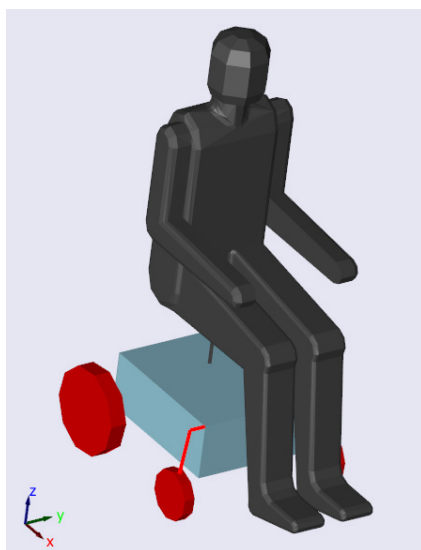
Rys. 49 Schemat blokowy przedstawiający strukturę modelu symulacyjnego przygotowany w Simmechanics

Każdy ze wskazanych modułów tego modelu jest zdefiniowany zgodnie z założeniami modelu nominalnego i odpowiednio reprezentuje:

- **1.** – moduł zawierający parametry masowe ramy z siedziskiem oraz związane z nią nieruchomo napędy, przekładnie, dźwignie itp.
- **2.(TP, TL, PP, PL)** – moduł reprezentujący koła : TP i TL to koła tylne prawe i lewe, PP i PL to koła przednie prawe i lewe wraz ze zwrotnicami. Koła tylne tworzą z ramą parę kinematyczną obrotową bez tarcia. Koła przednie połączone są ze zwrotnicą, jako para kinematyczna obrotowa bez tarcia. Zwrotnica połączona jest z ramą jako para kinematyczna obrotowa z tarciami. Oś obrotu zwrotnicy jest pionowa.

- **3.** – moduł reprezentujący decyzje osoby kierującej wózkiem. Zadaniem tego modułu jest odzwierciedlenie reakcji człowieka, który stara się podążać za zadaniem torem jazdy utrzymując przy tym określoną prędkość.
- **4.** – moduł reprezentujący elektroniczny system sterujący wózkiem inwalidzkim. Dla potrzeb tych symulacji ograniczono jego budowę do układów regulacji prędkości i kierunku jazdy.

Cechy każdego z wymienionych modułów modelu zostały opisane w kolejnych podpunktach zaś wizualizacja modelu symulacyjnego została przedstawiona na Rys. 50.



Rys. 50 Wizualizacja modelu symulacyjnego przygotowana w Matlab-SimMechanics

Oprogramowanie użyte do prac nad tym modelem stosuje duże uproszczenia w wizualizacji geometrii modeli symulacyjnych. W zakresie symulacji prowadzonych w tym rozdziale nie jest to istotne.

Orientacja głównego układu współrzędnych, oznaczona na Rys. 50, jest odmienna od stosowanej we wcześniej przedstawionych modelach symulacyjnych. Wynika to z wymogów stosowanego narzędzia symulacyjnego kół i opony.

### 5.3.1 Moduł ramy

Własności modułu reprezentującego ramę i elementy powiązane z nią zostały zamodelowane jako dwa połączone sztywno człony:

- rama i elementy konstrukcyjne wraz z siedziskiem,
- model manekina.



Podział ten został przygotowany w celu analizy wpływu zmiany parametrów masowych manekina na zdolność podążania po zadanej trajektorii. W Tab. 23 zestawiono wartości nominalne wielkości definiujących wskazane elementy.

Tab. 23. Parametry masowe modeli manekinów

| Nazwa parametru  | Oznaczenie      | Parametry masowe manekinów o masie: |        |       | Jednostka      |
|--|-----------------|-------------------------------------|--------|-------|----------------|
|  |                 | 100 kg                              | 75 kg  | 50 kg |                |
| Położenie środka ciężkości manekina w układzie $OX'Y'Z'$                 | $x'_{\dot{sc}}$ | 222                                 | 217    | 209   | mm             |
|  | $z'_{\dot{sc}}$ | 562                                 | 553    | 528   | mm             |
|  | $y'_{\dot{sc}}$ | 0                                   | 0      | 0     | mm             |
| Momenty bezwładności w układzie $OX_mY_mZ_m$ (środek ciężkości manekina) | $I_{xx}$        | 12,751                              | 7,918  | 3,946 | $\text{kgm}^2$ |
|  | $I_{zz}$        | 7,917                               | 4,916  | 2,450 | $\text{kgm}^2$ |
|  | $I_{yy}$        | 17,803                              | 11,054 | 5,510 | $\text{kgm}^2$ |

Modelując ramę opisano jej parametry masowe odłączając od całości parametry masowe elementów obracających się kół. Wartości zestawiono w Tab. 24.

Tab. 24. Parametry definiujące model ramy

| Nazwa parametru                                      | Oznaczenie      | Parametry masowe modelu ramy | Jednostka      |
|--|-----------------|------------------------------|----------------|
| Masa   | $m_{zr,r}$      | 60,5                         | kg             |
| Położenie środka ciężkości ramy w układzie $OX'Y'Z'$ | $x'_{\dot{sc}}$ | 303                          | mm             |
|  | $z'_{\dot{sc}}$ | 64,3                         | mm             |
|  | $y'_{\dot{sc}}$ | 0                            | mm             |
| Momenty bezwładności w układzie $OX'Y'Z'$            | $I_{xx}$        | 3,4                          | $\text{kgm}^2$ |
|  | $I_{yy}$        | 7                            | $\text{kgm}^2$ |
|  | $I_{zz}$        | 7,8                          | $\text{kgm}^2$ |
| Rozstaw osi  |                 | 514                          | mm             |
| Rozstaw kół tylnych                                  |                 | 640                          | mm             |
| Rozstaw kół przednich                                |                 | 600                          | mm             |

### 5.3.2 Moduły kół

Moduł kół składa się z różniących się od siebie dwóch par modeli koła z oponą. W pracy wykorzystano model opony i koła MF Delft Tyre w wersji 6.1.2 z definicją opcji kontaktu: *smooth road contact, circular cross section (motorcycle tyres)*.

Środki ciężkości kół leżą w ich środkach geometrycznych i względem układu związanego z tą lokalizacją zdefiniowano momenty bezwładności.

Parametry definiujące model koła tylnego przedstawiono w Tab. 25, zaś koła przedniego w Tab. 26.

Tab. 25. Parametry definiujące model koła tylnego

| Nazwa parametru      | Oznaczenie        | Parametry masowe modelu koła tylnego | Jednostka      |
|----------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------|
| Masa                 | $m_{kT}$          | 6,7                                  | kg             |
| Momenty bezwładności | $I_{xx} = I_{zz}$ | 0,048                                | $\text{kgm}^2$ |
|                      | $I_{yy}$          | 0,09                                 | $\text{kgm}^2$ |
| Promień koła         | $r$               | 155                                  | mm             |
| Promień opony        | $r$               | 30                                   | mm             |

Tab. 26. Parametry definiujące model koła przedniego

| Nazwa parametru      | Oznaczenie        | Parametry masowe modelu koła przedniego | Jednostka      |
|----------------------|-------------------|---|----------------|
| Masa                 | $m_{kT}$          | 1                                       | kg             |
| Momenty bezwładności | $I_{xx} = I_{zz}$ | 0,002                                   | $\text{kgm}^2$ |
|                      | $I_{yy}$          | 0,005                                   | $\text{kgm}^2$ |
| Promień koła         | $r$               | 90                                      | mm             |
| Promień opony        | $r$               | 20                                      | mm             |

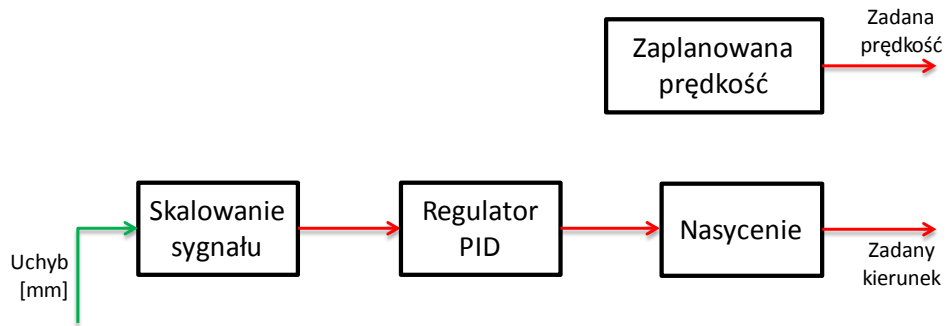
Parametry niewymienione w tym miejscu zostały zaczerpnięte z otrzymanych od TNO Delf-Tyre definicji opon stosowanych w motocyklach.

### 5.3.3 Moduł reprezentujący decyzje osoby kierującej wózkiem

Zadaniem modułu reprezentującego decyzje osoby kierującej wózkiem jest odzwierciedlenie reakcji człowieka, który stara się podążać za zadaniem torem jazdy utrzymując przy tym określoną prędkość. Do opisu zachowania człowieka na wózku zastosowano tzw. antycypacyjny blok kierujący [1], [7], [46].

Zastosowany regulator PID opisuje reakcję osoby kierującej w procesie sterowania kątem wychylenia joysticka. Regulator odzwierciedla własności psychomotoryczne kierującego. Człon „nasylenie” opisuje maksymalną wartość wychylenia dźwigni joysticka,

którą może realizować osoba kierująca. Na wyjściu układu otrzymuje się sygnał sterujący różnicą momentów napędzających koła, o wartościach nadążających za wartościami zadanymi, przy uwzględnieniu typowych reakcji kierowcy i ograniczeń technicznych działania układu zadawania [34].



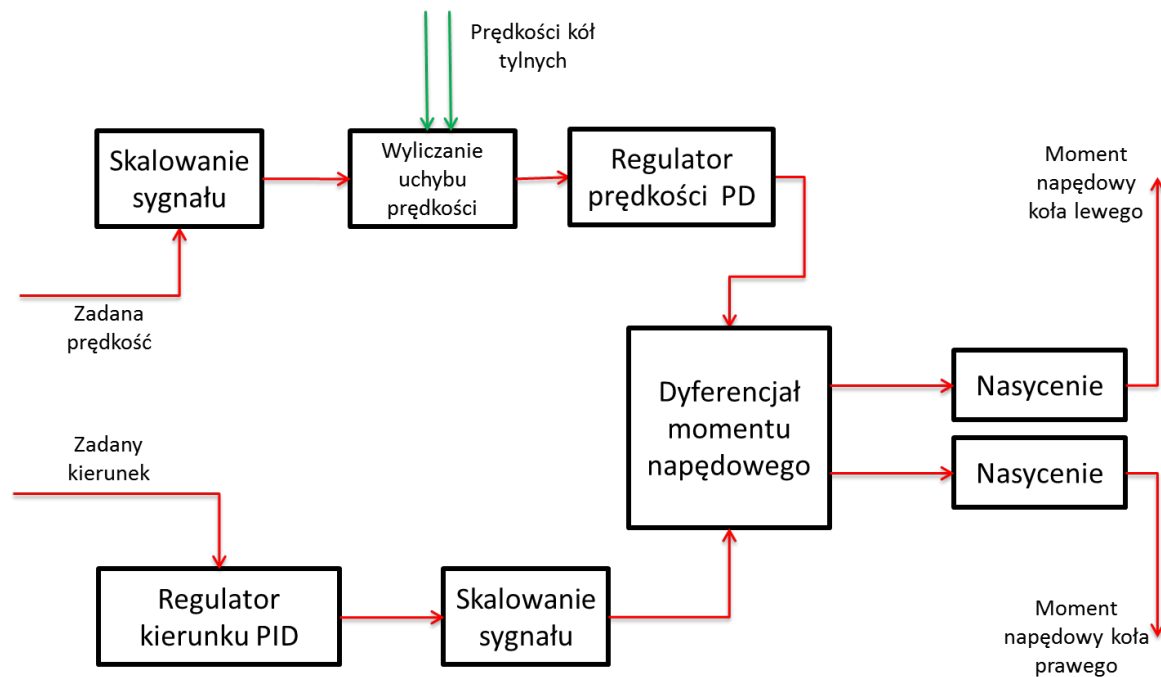
Rys. 51 Schemat modułu reprezentującego decyzje osoby kierującej wózkiem

Parametry zastosowanego regulatora analizowano w dalszej części pracy. Jako wartości nominalne przyjęto:  $P=1$ ;  $I=0.1$ ;  $D=1$ ;

Prędkość poruszania się modelu jest zadawana poprzez zdefiniowaną charakterystykę. Wartość maksymalna prędkości [37], z jaką wózek inwalidzki może się poruszać to  $v=3.33\text{m/s}$ .

### 5.3.4 Moduł systemu sterowania

Budowę modułu reprezentującego elektroniczny system sterowania wózkiem inwalidzkim ograniczono do układów regulacji prędkości i kierunku jazdy [22] [29]. Schemat tego modułu przedstawia Rys. 52.



Rys. 52 Schemat modułu reprezentującego elektroniczny system sterowania wózkiem inwalidzkim

Moduł ten działa w oparciu o sprzężenie prędkości obrotowej kół. Układ ten posiada strukturę z regulatorem prędkości średniej [29].

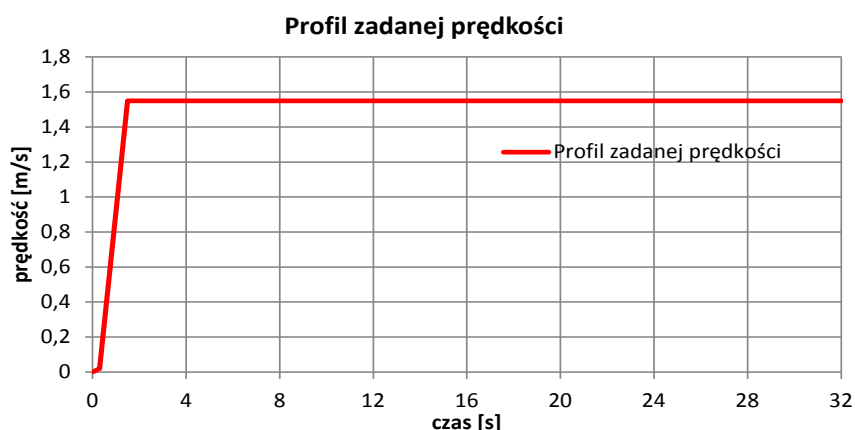
Parametry zastosowanych regulatorów analizowano w dalszej części pracy. Jako wartości nominalne przyjęto:

- regulator prędkości:  $P=1$ ;  $D=-0.3$  ,
- regulator kierunku:  $P=1$ ;  $I=0.02$ ;  $D=3$ .

## 5.4 Badania symulacyjne

Przedmiotem symulacji był przejazd modelu podążającego za zadaniem torem i według określonego profilu prędkości. Badania symulacyjne prowadzone były w środowisku Matlab-Simmechanics. Do obliczeń wykorzystano solver "ode15s stiff/NDF".

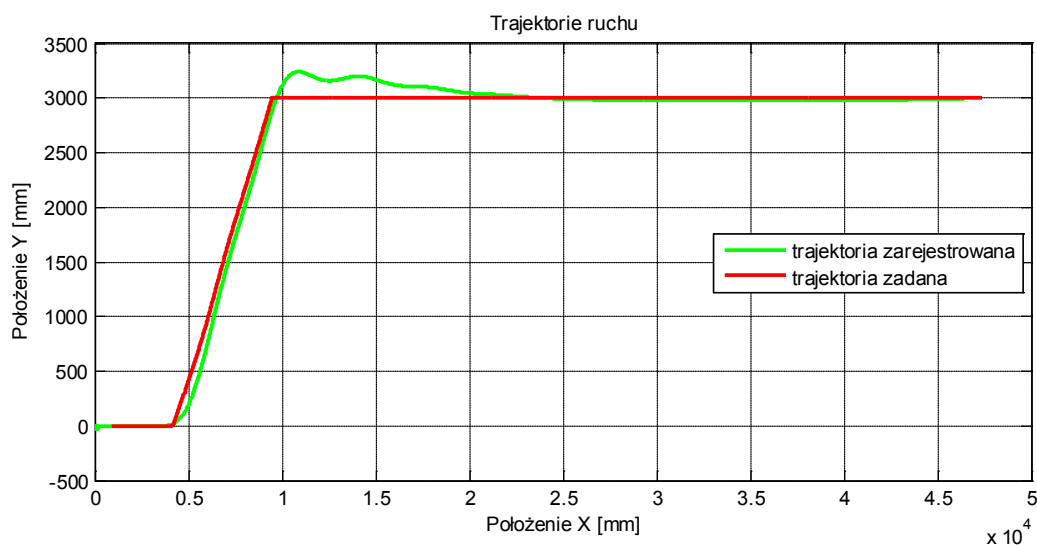
Dla pierwszej serii symulacji przyjęto jeden zadany profil prędkości i przedstawiono go na Rys. 53.



Rys. 53 Zadany profil prędkości

Wartości zadanej prędkości są wprowadzane do modelu jako sygnał o zakresie  $\langle -1,1 \rangle$  w którym wartość 1 odpowiada maksymalnej prędkości do przodu określonej w [37] czyli  $v=12\text{km/h}$  ( $3.33\text{m/s}$ ).

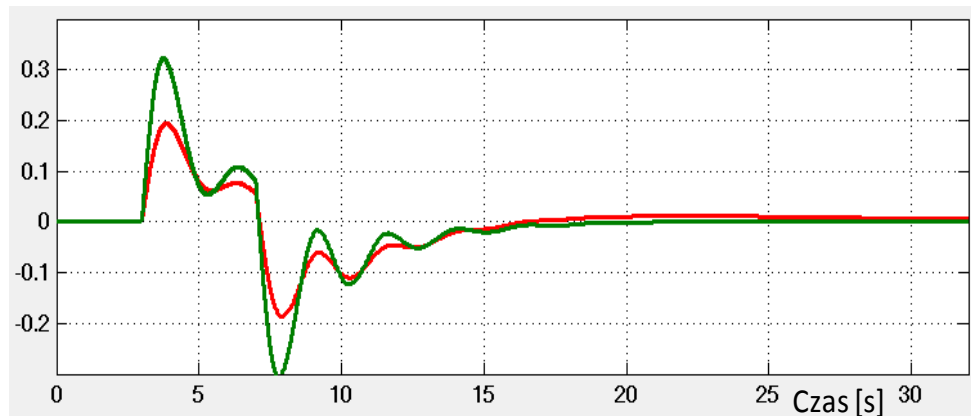
Przeprowadzone badania pozwoliły przygotować charakterystykę odpowiedzi całego modelu na wymuszenie, jakim jest zadany tor jazdy. Na Rys. 54 przedstawiono wyniki dla początkowych wartości parametrów.



Rys. 54 Trajektoria ruchu modelu wózka: linia czerwona - zadana, linia zielona - zarejestrowana

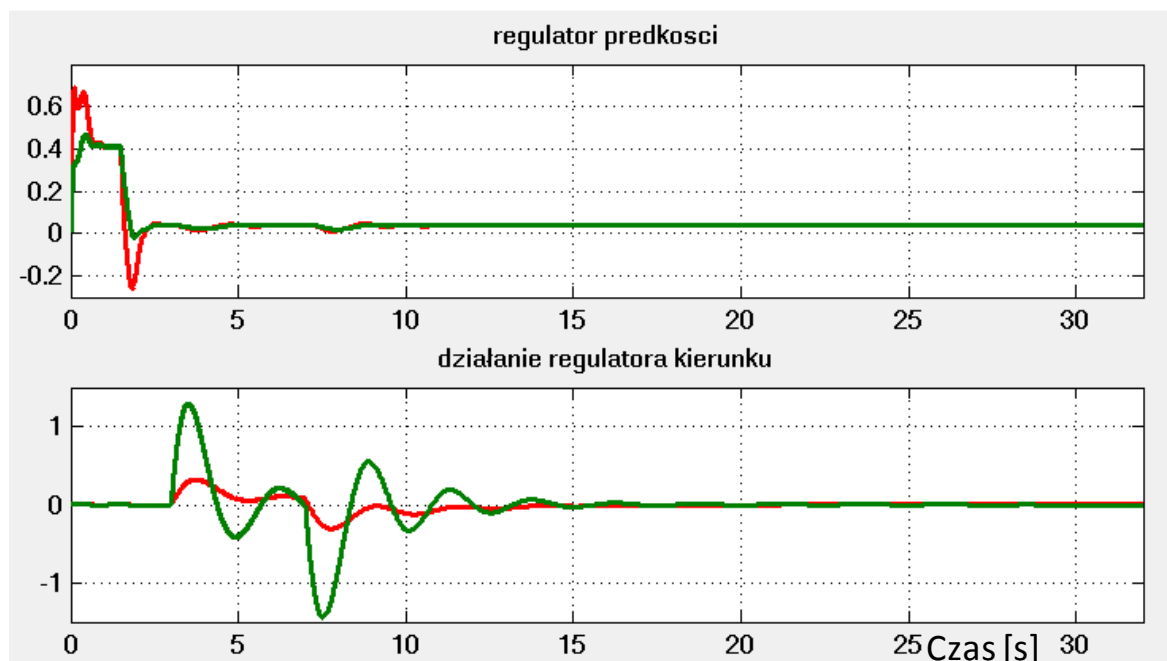
Trajektoria po jakiej porusza się wózek jest zależna od parametrów masowych modelu, parametrów kontaktu oraz od elementów układu sterowania. Istotne są też właściwości psychomotoryczne osoby kierującej wózkiem i zadana prędkość. Dopiero połączenie ze sobą cech tych elementów pozwala analizować zachowanie się całego modelu. W dalszej części pracy zaprezentowano wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów opisujących wymienione elementy.

Na Rys. 55 przedstawiono charakterystykę działania regulatora PID reprezentującego własności człowieka.



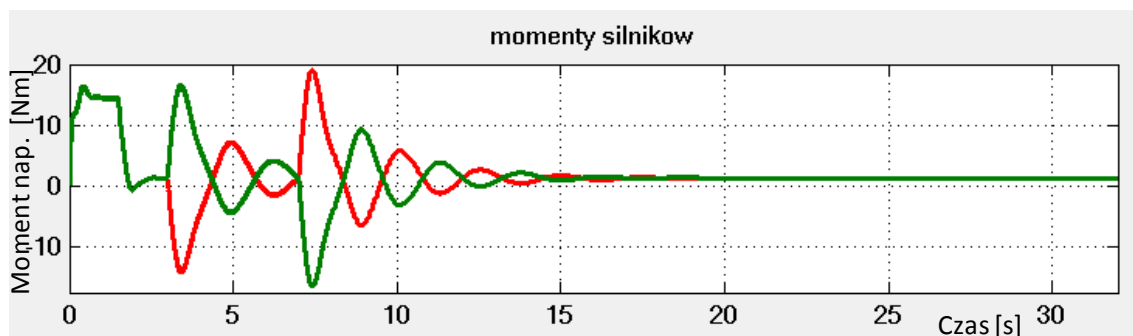
Rys. 55 Działanie regulatora PID - człowiek:  
linia czerwona - uchyb, linia zielona - zarejestrowana wartość na wyjściu regulatora

Analizując budowę układu sterowania wyróżniono w nim dwa podstawowe układy regulacji: prędkości i kierunku ruchu. Układ regulacji prędkości zapewnia utrzymanie zadanej wartości prędkości przy zmieniających się obciążeniach. Układ regulacji kierunku ruchu wspomaga osobę kierującą w zakresie odpowiedniego rozdziału momentów na koła napędzane. Wynik działania wskazanych regulatorów przedstawiano na Rys. 56.



Rys. 56 Działanie regulatorów prędkości i kierunku:  
linia czerwona - uchyb, linia zielona - wartości wyjściowe

Sygnał pochodzący od regulatora kierunku trafia do dyferencjału momentów napędowych. Gdy wartość sygnału wynosi 1 koła napędzane są momentami o jednakowej wartości. W przypadku innych wartości następuje ich zróżnicowanie. Na Rys. 57 przedstawiano przebieg tych momentów dla symulacji omawianej w tym rozdziale.



Rys. 57 Działanie dyferencjału momentów napędowych:  
linia czerwona - silnik lewy, linia zielona - silnik prawy

W dalszej części pracy zostanie przeprowadzona analiza ruchu modelu uwzględniająca różne parametry modelu osoby kierującej.

## 5.5 Analiza wrażliwości modelu

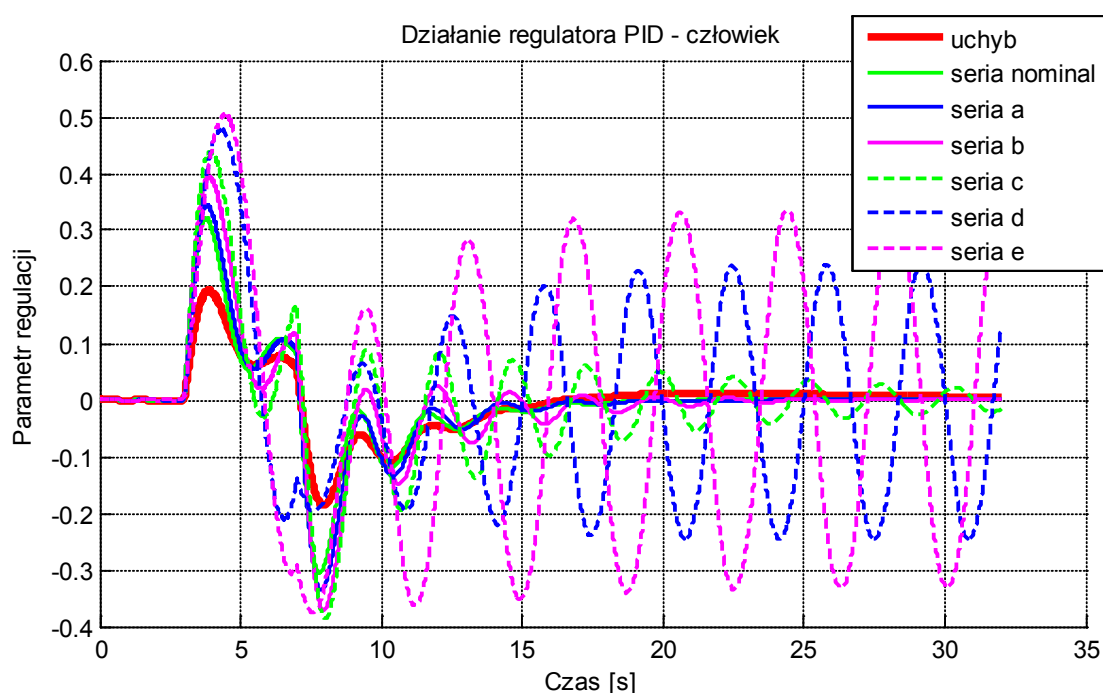
Do istotnych elementów badań własności układów dynamicznych zaliczamy badanie zależności odpowiedzi modelu układu od zmian jego parametrów. Wyniki analiz przedstawione dotychczas zostały przygotowane dla parametrów nominalnych. W dalszej części pracy podjęto próbę oceny wrażliwości parametrycznej względem własności modelu człowieka. Przyjmując różne wartości parametrów modelu symulowano sytuację, w której wózkiem sterują osoby o różnych predyspozycjach psychomotorycznych.

Parametry nominalne regulatora PID stanowiącego model człowieka przyjęto na podstawie [1] [7] [22]. Literatura dotycząca modeli osób kierujących wózkami inwalidzkimi nie jest znana autorowi, przyjęto więc parametry opisujące kierowców pojazdów samochodów. Wartości nominalne oraz wartości parametrów regulatora PID dla kolejnych serii symulacji zestawiano w Tab. 27.

Tab. 27. Parametry regulatora PID modelu człowieka

| Seria         | P | I   | D   |
|---------------|---|-----|-----|
| n - nominalne | 1 | 0.1 | 1   |
| a             | 1 | 0.4 | 1   |
| b             | 1 | 1   | 1   |
| c             | 1 | 1.5 | 1   |
| d             | 1 | 1.5 | 0.3 |
| e             | 1 | 1.5 | 0.3 |

W wyniku przeprowadzonych symulacji zaobserwowano wpływ parametrów modelu elementu człowiek na zachowanie się modelu symulacyjnego. W celu zobrazowania różnic w działaniu tego regulatora przygotowano wykres (Rys. 58) na którym pokazano uchyb i regulację dla symulacji z parametrami nominalnymi oraz kolejne serie (a-e) ze zmienionymi wartościami parametrów.

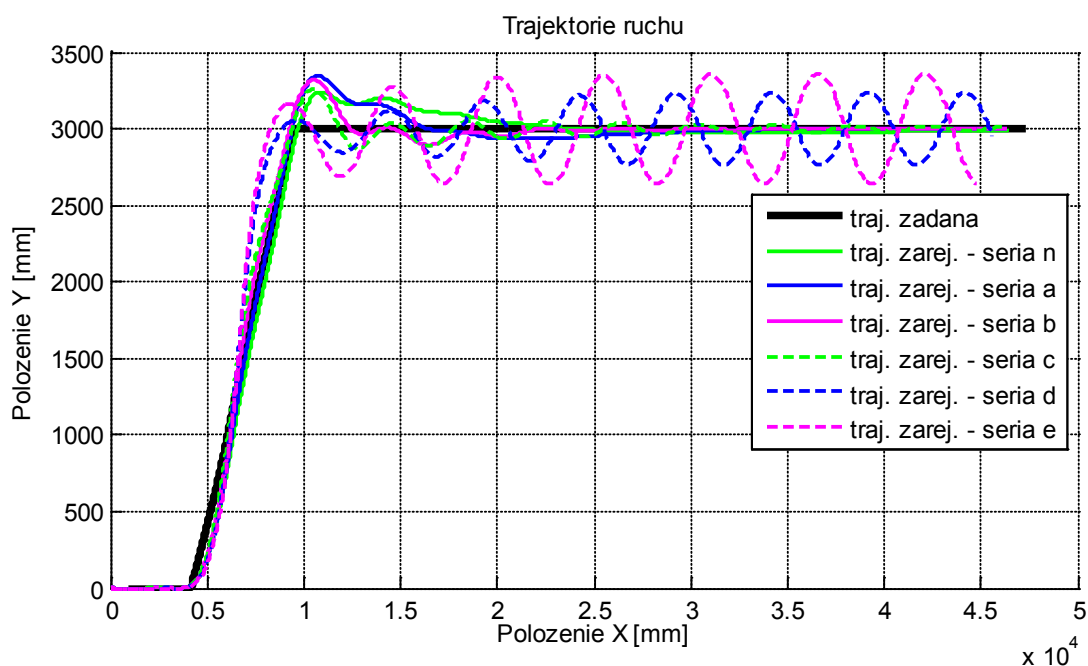


Rys. 58 Działanie regulatora PID modelu człowieka przy różnych jego nastawach

Powyższa charakterystyka obrazuje działanie omawianego regulatora.

Opracowana charakterystyka, przedstawiająca trajektorie ruchu modelu wózka dla kolejnych serii symulacji (Rys. 59), prezentuje wrażliwość parametryczną całego układu.





Rys. 59 Trajektorie wyznaczone przez model wózka uzyskane przy różnych nastawach regulatora PID modelu człowieka

Analizując powyższe wykresy można zaobserwować serię, dla których model po wykonaniu manewrów oscyluje wokół zadanego kierunku stopniowo zmniejszając amplitudę. Są to serie n, a, b, c. Przypadki te odpowiadają prawidłowemu działaniu układu sterowania.

W seriach d, e zaobserwowano utrzymywanie się amplitudy wychyleń od zadanego kierunku w całym okresie symulacji, co oznacza brak ustabilizowania kierunku jazdy wózka.

Przy założonym układzie sterowania, wózek zachowuje się różnie w zależności od przyjętych parametrów modelu człowieka.

Wyniki symulacji wskazały potrzebę budowy modelu sterowania o innych parametrach, jak również o innej strukturze (np. uwzględniającej uczący się model człowieka). Słusznym wydaje się podjęcie prac zmierzających do identyfikacji parametrów modelu człowieka sterującego wózkiem inwalidzkim. Uzyskane wyniki należy traktować jako wstępną analizę problemu, gdyż w symulacjach wykorzystano opisy modeli człowieka będącego kierowcą samochodu, co do którego, ze względu na większe prędkości jazdy, formułuje się inne wymagania.

Powyższe symulacje pozwoliły odrzucić parametry, które przy zastosowaniu do układu sterowania w prototypie mogłyby w trakcie jego testów zagrazać bezpieczeństwu osób prowadzących wózek. Działania te pozwoliły też ograniczyć zakres parametrów testowanych na omawianej konstrukcji prototypowej.

## 6. Budowa prototypu wózka

Budowy prototypu wózka inwalidzkiego stanowiącego przedmiot analiz tej rozprawy została zrealizowana w ramach projektu „Budowa modelu i badania symulacyjne pojazdu do przemieszczania osób z opcją pokonywania przeszkód - jako podstawa budowy prototypu mechatronicznego wózka inwalidzkiego,, dofinansowanego przez Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych. Konstrukcja ta została opracowana przez zespół z Zakładu TKUT, a pomysły w niej zawarte są częścią zgłoszenia patentowego [49] autorstwa: Choromański W. (udział 30%), Dobrzyński G. (udział 40%), Potyński A. (udział 30%).

### 6.1 Laboratoryjne badania doświadczalne własności jezdnych prototypowej konstrukcji wózka

W badaniach laboratoryjnych podjęto próbę oceny komfortu jazdy osoby poruszającej się na wózku inwalidzkim. Do prób wykorzystano dwie konstrukcje:

- EXPLORER - wózek gąsienicowy opisany wcześniej
- WEKTOR – konstrukcja, prototyp laboratoryjny - opracowana przez Zakład Teorii Konstrukcji Urządzeń Transportowych, zaprezentowana szerzej w poprzednich rozdziałach i stanowiąca przedmiot tej rozprawy.



Rys. 60 Wózek „Explorer”, na którym przeprowadzono serię badań doświadczalnych

Na Rys. 60 przedstawiono wózek „Explorer” na którym przeprowadzono serię badań doświadczalnych. Wózek ten został zakupiony przez Wydział Transportu PW i skierowany do badań w Międzyzakładowym Laboratorium Badań Doświadczalnych i Symulacyjnych Układu Człowiek-Środki Transportu-Otoczenie. W dalszej części pracy zostaną zaprezentowane wyniki tych badań.

Pojazd ten ma dwa układy jezdne. Do poruszania się po równym terenie wykorzystuje układ trzech kół, z których dwa tylne są napędzane zaś przednie odpowiada za nadawanie kierunku jazdy. Po schodach natomiast przemieszcza się za pomocą gąsienic z niezależnym napędem na każdą z nich, co pozwala na pokonanie każdego typu schodów.

Ze względu na dokonywane porównania wózka prototypowego z wózkiem Explorer poniżej przedstawiono jej najważniejsze cechy eksploatacyjne Explorera. Wózek jest przeznaczony dla osób z niepełnosprawnością ruchową i posiadających wystarczające właściwości psychomotoryczne do samodzielnego użytkowania urządzeń technicznych jezdnych. Jest zaprojektowany i wytworzony, jako urządzenie kompleksowo zapewniające funkcję zjazdu i wjazdu po schodach oraz funkcję swobodnego przemieszczania się po powierzchniach płaskich. Zalecana jest eksploatacja urządzenia w powietrzu o niewielkiej wilgotności w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+40^{\circ}\text{C}$ . Do najważniejszych parametrów eksploatacyjnych należy zaliczyć:

- minimalna/maksymalna wysokość stopnia 6/18cm
- minimalna/maksymalna głębokość stopnia 27cm/32 cm
- akumulator 12V, 2x40Ah,
- autonomia (czas pracy) 5 godzin
- maksymalny udźwig 110kg
- masa wózka 118kg
- minimalny promień skrętu na gąsienicach 68cm
- minimalny promień skrętu na kołach 100cm
- minimalna przestrzeń wymagana do manewru 115x115cm
- prędkość na pierwszym biegu 3km/h
- prędkość na drugim biegu 6km/h
- prędkość jazdy po schodach (na gąsienicach) 0,5km/h
- minimalna szerokość schodów 80cm
- maksymalna pochyłość do pokonania  $33^{\circ}$

Do rejestracji drgań wykorzystano akcelerometry trójosiowe połączone z układem rejestracji. Czujnik trójosiowy został umieszczony w obszarze środkowym siedziska, w miejscu przyjmowanym, jako miejsce wypadkowej reakcji siedzenia na pasażera. Usytuowanie tego akcelerometru wraz z kierunkami działania pokazano na Rys. 61



Rys. 61 Lokalizacja i kierunki działania trójosiowego czujnika przyspieszeń

## 6.2 Analiza oddziaływań dynamicznych na osobę poruszającą się na wózku inwalidzkim

Z uwagi na charakter ruchu do dalszych analiz wykorzystano sygnały zarejestrowane w kierunkach Y i Z, gdzie w kierunku Z zaobserwowano największe wartości energii drgań. Po umieszczeniu czujnika w wybranym punkcie pomiarowym (Rys. 61) wózki poddano obciążeniu o masie 75 kg. Rozmieszczenie obciążników w przybliżony sposób pozwoliło zastąpić model człowieka. Ten etap przygotowań zaprezentowano na Rys. 62.

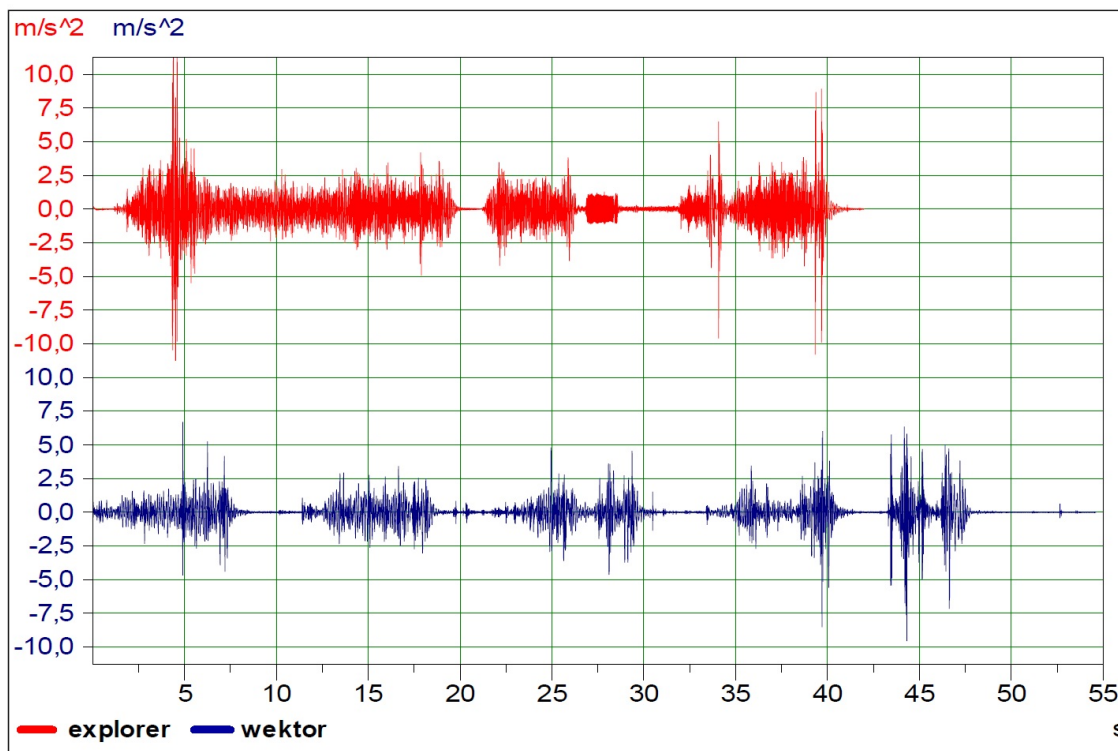


Rys. 62 Sposób obciążenia wózków inwalidzkich

Dla każdego z wózków rejestrowano oddzielnie etap wjazdu i zjazdu. Badane wózki mają różną metodę pokonywania schodów i czas tego zadania jest uzależniony od wielu czynników. Dla potrzeb tej pracy w badaniach oparto się na założeniu, że ważniejszy jest zakres zadania rozumiany, jako praca do wykonania, czyli możliwość pokonania 4 schodów pokazanych na Rys. 62.

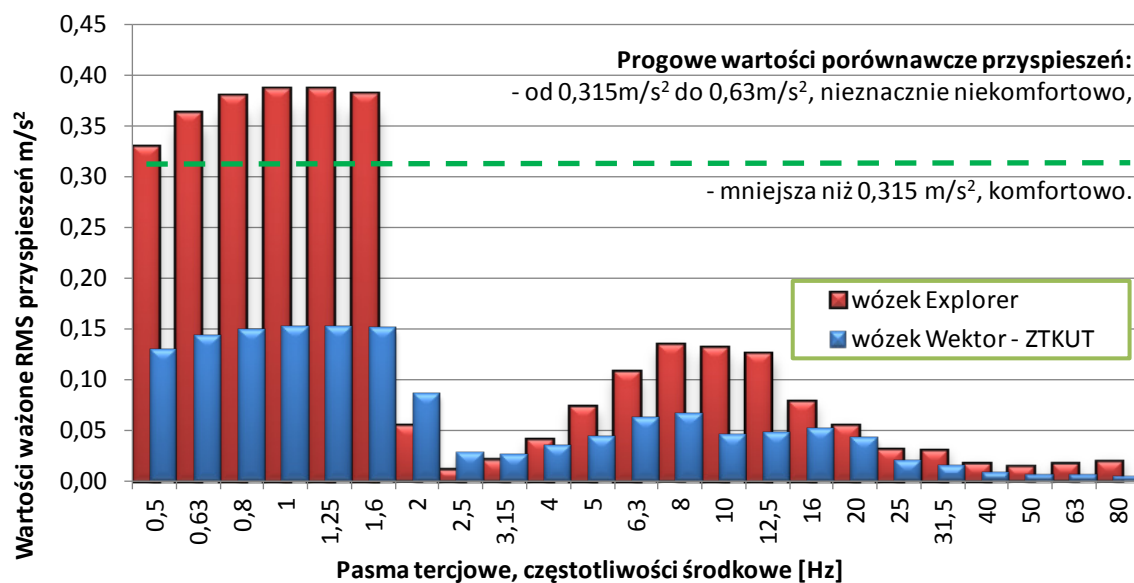
Sygnał pomiarowy rejestrowany był od chwili przełączania się wózków w tryb jazdy po schodach, aż do momentu wjechania na część końcową schodów i przełączenia się w tryb jazdy po powierzchniach poziomych.

Poniżej na Rys. 63 przedstawiono przebiegi czasowe drgań dla wózków podczas wjazdu na schody. Wózek Explorer do pokonania tych schodów potrzebował 42 sek., zaś wózek Wektor 54 sek. Porównanie przebiegów czasowych przyspieszeń drgań wykazały różnice maksymalnych wartości dla obu wózków.



Rys. 63 Przebiegi czasowe drgań dla wózków podczas wjazdu na schody

Przeprowadzona analiza drgań oddziałujących na człowieka w trakcie wjazdu na schody umożliwiła ocenę komfortu [28] [33], zgodną z normą ISO 2631-1:1997 - Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration- General Requirements [23]. Do analizy wyników wykorzystano algorytm opisany w rozdziale 4.7 (str. 64). Wyniki te zobrazowano na wykresie Rys. 64.



Rys. 64 Wykres wartości ważonych RMS przyspieszeń drgań dla wózka Explorer oraz Wektor

Na wykresie zaprezentowano wartości ważonych RMS przyspieszeń drgań dla wózka Explorer oraz Wektor. Porównanie wyliczonych wartości z progowymi wartościami porównawczymi przyspieszeń wykazało, że autorska koncepcja osiąga wyniki w zakresie komfortowym zaś wózek Explorer w zakresie niskich częstotliwości osiąga wartości z zakresu nieznacznie niekomfortowo. Przedstawione wyniki wskazują na poprawność założeń metody pokonywania schodów zastosowanej w konstrukcji wózka Wektor. Ta autorska metoda daje lepsze efekty niż handlowa i znana konstrukcja wózka Explorer.

## **7. Podsumowanie i wnioski**

W pracy przedstawiono zagadnienia syntezy własności mechatronicznego wózka inwalidzkiego jako elementu systemu transportu osób niepełnosprawnych. Wstęp zawiera uzasadnienie podjęcia tematu, poparte przeglądem literatury dotyczącej rozwiązań elektrycznych wózków inwalidzkich, jak również problematyki zastosowania badań symulacyjnych w projektowaniu tego rodzaju konstrukcji.

Wyniki pracy podzielono na cztery zasadnicze części. Część pierwsza (rozdział 3) dotyczy zagadnień związanych z opracowaniem modelu symulacyjnego do badań w obszarze statyki. Celem rozważań tej części pracy było zbudowanie modelu nominalnego, zastępującego model rzeczywisty w taki sposób, aby obejmował on zasadnicze cechy omawianej grupy wózków inwalidzkich i umożliwiał jego wykorzystanie do opracowania modelu symulacyjnego celem przeprowadzenia analizy zadania wjazdu na schody. Sposób przedstawienia zagadnienia pozwolił na sprzęgnięcie opracowanego modelu wózka z modelem pasażera oraz podłoża przy jednoczesnym modyfikowaniu ich parametrów. Sprecyzowano grupę parametrów mających zasadniczy wpływ na przebieg realizacji celu.

Część drugą (rozdział 4) poświęcono zagadnieniom związanym z analizą modelu dynamiki wózka pokonującego przeszkodę. Przedstawiono zagadnienia budowy modeli z zastosowaniem pakietu MBS, jak również sposób opracowania równań ruchu dla złożonych układów, do których należy zaliczyć analizowany model wózka. Przedstawiono również sposób odzwierciedlenia zjawisk kontaktu z podłożem, dla którego dobrano program symulacyjny MSC.Adams. Na podstawie opisanego modelu nominalnego zbudowano model symulacyjny wózka. Do budowy struktury mechanicznej wózka zastosowano bryły sztywne, połączone ze sobą w taki sposób aby umożliwić ich ruch względem siebie. Tak opracowana struktura mechaniczna wózka została uzupełniona opracowanym modelem pasażera. Zastosowano opis wzajemnego oddziaływania człowieka z fotelem wózka zgodnie z modelami zawartymi w cytowanej literaturze.

Część trzecia (rozdział 5) to omówienie badań symulacyjnych z zakresu jazdy po wyznaczonym torze ruchu. Przedstawiono wyniki symulacyjne modelu opracowanego w środowisku Matlab-Simmechanics. Symulacje te zrealizowano w dwóch etapach. W wyniku I etapu uzyskano wyniki dla modelu nominalnego, które stały się podstawą porównania z wynikami symulacji dla zmienianych parametrów w II etapie.



Część czwarta (rozdział 6) dotyczy prototypowej konstrukcji stanowiącej syntezę parametrów uzyskanych z przeprowadzonych badań symulacyjnych. Prototyp powstał na bazie tej pracy i przy udziale autora. Przedstawiono badania eksperymentalne oddziaływań drgań na osobę poruszającą się na tym wózku. Uzyskane wyniki umożliwiły weryfikację badań symulacyjnych w zakresie komfortu jazdy.

Przeprowadzone badania pozwalają wysnuć dwie grupy wniosków. Pierwsze dotyczą metod modelowania i symulacji układów wieloczłonowych przy pomocy oprogramowania MBS. Drugie natomiast, to wnioski odnoszące się do prototypowej konstrukcji wózka.

W prezentowanej pracy wykazano przydatność narzędzi symulacyjnych w procesie projektowania układów mechanicznych. Wykorzystanie technik symulacyjnych pozwala skrócić czas rozwoju projektu i ograniczyć koszty związane z prototypowaniem.

Kolejnym ważnym aspektem badań symulacyjnych był dobór parametrów. Znaczącą część tego opracowania poświęcono opisowi procesu identyfikacji parametrów modelu. Parametry te określono na podstawie źródeł literaturowych i wyników pomiarów przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym.

Innym aspektem zagadnienia identyfikacji parametrów, było ich zgrubne oszacowanie. Tam gdzie uznano, że pewne zjawiska nie są krytyczne dla badanego procesu, niektóre wartości wytypowano na podstawie prób symulacyjnych. Przykładem są parametry sprężysto-tłumiące modeli stref kontaktu wiatraka kroczącego wózka i schodów.

Kolejnym ważnym zagadnieniem badań symulacyjnych była walidacja modelu, która pozwoliła ocenić zgodność symulowanych procesów z zachodzącymi w rzeczywistości. Wyniki symulacji porównywano z wynikami badań na prototypie uzyskując jakościową zgodność w zakresie komfortu jazdy.

Dokonana walidacja modelu, w zakresie na jaki pozwalały warunki laboratoryjne, wykazała zgodność z prototypem. Pozwala to autorowi potwierdzić tezę dotyczącą możliwości skutecznego zastosowania metod symulacyjnych w fazie pre-prototypowej projektowania.

Wykazano również, że oprogramowanie MBS jest tylko jednym z wielu narzędzi, którymi należy się posługiwać w procesie projektowania. Wykorzystywany w tej pracy program MSC.Adams nie posiada, na przykład, funkcji obróbki wyników symulacji. W tym celu autor wykorzystał oprogramowanie Dasy.LAB.



Sformułowane wnioski odnoszące się do konstrukcji wózka dotyczą, z jednej strony komfortu jazdy, a z drugiej sposobu sterowania. Wykonane badania i ocena ich wyników wykazały, że model symulacyjny konstrukcji zapewnia wystarczający komfort podczas jazdy w warunkach, które mogą wystąpić podczas rzeczywistej eksploatacji. Podkreślenia wymaga fakt, że zastosowane uproszczenie członu ramy wózka, jako bryły doskonale sztywnej, jak również sposób zamodelowania manekina, może mieć wpływ na zmianę wartości przyspieszeń przekazywanych na manekina.

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły dobrać wartości parametrów, dla których analizowana konstrukcja jest w stanie realizować zadanie pokonania przeszkody o geometrii spotykanej w budynkach użyteczności publicznej. W kolejnych krokach symulacji wykazano, że pełna realizacja zadania pokonania przeszkody jest możliwa jedynie przy określonym zakresie parametrów tarcia występującego w obszarach kontaktu z podłożem.

W przekonaniu autora, zgromadzony w pracy materiał daje podstawę do stwierdzenia, że sformułowana na początku pracy teza została udowodniona.

Przygotowane modele symulacyjne dają możliwość prowadzenia dalszych prac badawczych, w których należałoby:

- Zmodyfikować model wózka z uwzględnieniem podatności jego członów.
- Przeanalizować budowę modelu człowieka o złożonej strukturze.
- Dokonać analizy bibliotek parametrów modeli opon o złożonej budowie.
- Rozszerzyć analizę struktur sterowania pojazdami napędzanymi przez dwa silniki elektryczne.
- Przeanalizować wprowadzenie modyfikacji struktury modelu uzupełniając go o dodatkowe napędy. Pozwoli to określić czy możliwy jest szerszy zakres zastosowań wózka przy różnych wartościach współczynników tarcia.
- Przeanalizować proponowane zmiany konstrukcyjne. Mogą finalnie okazać się zasadne, lecz będzie to możliwe do potwierdzenia dopiero po wykonaniu szczegółowych badań na kolejnych wersjach konstrukcji. W przypadku symulacji zadania wspinania się układu po schodach, wyniki mogą posłużyć podjęciu decyzji o wprowadzeniu zmian konstrukcyjnych na obecnym etapie prac.

## 8. Bibliografia

- [1] Augustynowicz A.: Modelowanie typu kierowcy samochodu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2009. URL: [http://www.dbc.wroc.pl/Content/3706/SiM\\_232\\_scal\\_popr.pdf](http://www.dbc.wroc.pl/Content/3706/SiM_232_scal_popr.pdf).
- [2] Batogowska A., Słowikowski J.: Atlas antropometryczny dorosłej ludności Polski dla potrzeb projektowania. Instytut wzornictwa przemysłowego, Warszawa 1994.
- [3] Blundell M., Harty A.: „The Multibody Approach to Vehicle Dynamics”, Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington-Oxford, UK, 2004.
- [4] Branowski B., Sydor M.: „Uwagi o kształceniu i aktywizacji zawodowej osób niepełnosprawnych. Studium przypadku pewnego pracownika nauki” Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Bariery W Aktywizacji Zawodowej Osób Niepełnosprawnych. KIG-R. Łódź 26 października 2006 r. Opubl. w Aktywizacja Zawodowa Osób Niepełnosprawnych. Vol 3-4(7-8) nakładem Krajowej izby Gospodarczo – Rehabilitacyjnej. Łódź 2006 r. (s.79-90), ISSN 1734-0713.
- [5] Branowski B., Zabłocki M., Kreacja i kontaminacja zasad projektowania i zasad konstrukcji w projektowaniu dla osób niepełnosprawnych. Rozdział 3 w pracy zbiorowej pod redakcją Jana Jabłońskiego pt.: Ergonomia produktu, str. 73-106, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2006r.
- [6] Branowski Bogdan, Torzyński Dariusz: Proinnowacyjne kształcenie inżynierów konstruktorów, MECHANIK NR 3/2008, str. 224-229.
- [7] Bułka D., Walczak S., Wolak S., Antycypacyjny model kierowcy zastosowany w programie do symulacji ruchu i zderzeń pojazdów v-sim, Zeszyt naukowy Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 84, s.147. Kielce 2006.
- [8] Choromanski W., G. Dobrzyński, J. Kowara, The dynamics of a mechatronic wheelchair with the function of overcoming physical obstacles; Proceedings of IAVSD 2009 - 21st International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 17 – 21 August 2009, KTH, Stockholm, Sweden, CD - volume I, p.143-146.
- [9] Choromański W., Dobrzyński G., Kowara J.; Simulation Studies of New Solutions of Wheelchairs. Archives of Transport, vol. 19, issue 3, Warszawa 2007, str. 31-37.
- [10] Choromański W., Fiok K., Dobrzyński G.: Optimizing the lever propelling system for manual wheelchairs, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, (artykuł przyjęty do druku) Warszawa, 2012r.
- [11] Choromański W., Kowara J.: Wybrane zagadnienia modelowania transportu typu personal rapid transit, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Zeszyt "Transport" nr 72, Badania elementów i systemów transportowych, (str. 5-24), Warszawa, 2010r.
- [12] Choromański Włodzimierz, Roman Staszalek; „Problemy transportu osób niepełnosprawnych – nowe koncepcje w budowie mechatronicznych wózków inwalidzkich” Materiały Konferencji: Transport XXI wieku, Wydział Transportu PW, Komitet Transportu PAN, wrzesień 2004.

- [13] Chun-Ta Chen; Hoang-Vuong Pham; "Enhanced development and stability analysis of a new stair-climbing robotic wheelchair," *Advanced robotics and Its Social Impacts*, 2008. ARSO 2008. IEEE Workshop on , vol., no., pp.1-6, 23-25 Aug. 2008 doi: 10.1109/ARSO.2008.4653582; URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4653582&isnumber=4653578>.
- [14] Ding, D.; Cooper, R.A.; "Electric powered wheelchairs," *Control Systems, IEEE* , vol.25, no.2, pp. 22- 34, April 2005, doi: 10.1109/MCS.2005.1411382; URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1411382&isnumber=30578>.
- [15] Dobrzyński G., Choromański W.; Wózek inwalidzki z opcją jazdy po schodach – metodyka konstruowania, *Acta Mechanica Et Automatica*, rok: 2010, Vol. 4, no. 2, s. 37-42.
- [16] Dobrzyński G.; Badania symulacyjne i eksperymentalne wózka inwalidzkiego z opcją jazdy po schodach jako elementu systemu transportu osób niepełnosprawnych. Materiały konferencyjne „Transport XXI wieku”, Białowieża 21-24.09.2010r.
- [17] Frączek J., Modelowanie mechanizmów przestrzennych metodą układów wieloczłonowych, *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej: Zeszyt Mechanika nr 196*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, , Warszawa, 2002r.
- [18] Gągorowski A.; Metoda syntezy mechatronicznych siedzisk pojazdów z punktu widzenia minimalizacji oddziaływania drgań na człowieka. Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska 2009 rok.
- [19] Gonzalez A., E. Ottaviano, M. Ceccarelli; On the kinematic functionality of a four-bar based mechanism for guiding wheels in climbing steps and obstacles, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 44, Issue 8, August 2009, Pages 1507-1523, ISSN 0094-114X, 10.1016/j.mechmachtheory.2008.12.004. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X08002401>)
- [20] Grabarek I.: „Ergonomia – technika i technologia – zarządzanie” : Metodyczne aspekty diagnozowania ergonomicznego układu operator – pojazd szynowy – otoczenie. /pod red. Marka Fertscha, Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009, s. 59-68.
- [21] Grabarek I.: „Zasady ergonomiczne w projektowaniu układów operator-pojazd”. Wydawnictwo BEL Studio Sp. z o.o. ISBN 83-89968-28.
- [22] Grzesiak L., Choromański W., Grabarek I., Kamiński G., Ufnalski B., Sczypior J., Brach P., Choromański K., Ambrożak A., Nowak J., Kozłowski M., Tomczuk K., Barwicki M., Orłowski J., New Concept of an Electrical City Car and its Infrastructure, materiały z seminarium polsko-chińskiego, PAN, ECO-Mobilność, Politechnika Warszawska, ITS, Warszawa 16 – 17 czerwiec 2011,
- [23] ISO 2631-1:1997 - Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration -- General Requirements.
- [24] Ito, T.: "Simulation-Based Study Using a Stair Climbing Wheelchair," *Modelling & Simulation*, 2009. AMS '09. Third Asia International Conference on , vol., no., pp.537-542, 25-29 May 2009; doi: 10.1109/AMS.2009.89; URL:

- <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5072044&isnumber=5071935>.
- [25] Jarzębowska Elżbieta: „Mechanika analityczna.” Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [26] Jianjun Yuan: Study on the mechanism and control of leg-wheel hybrid stair climbing wheelchair, Dissertation Submitted to Department of Mechanical and Aerospace Engineering For the Degree of Doctor of Engineering, Tokyo Institute of Technology, December 2004.
- [27] Kardas-Cinal Ewa: Ride comfort for various passenger positions in a railway vehicle - simulation study, Archives of Transport, Volume 22, Number 2/2010, p. 189-199, Versita, Warsaw, 2010.  
URL: <http://versita.metapress.com/content/L5574X15L782G225>
- [28] Korzeb J.: Analiza drgań komunikacyjnych z zastosowaniem teorii falek, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Zeszyt "Transport" nr 77, Narzędzia, metody i badania elementów systemów transportowych, (str. 45-58), Warszawa, 2011r.
- [29] Kozłowski M., Tomczuk K., Szczypior J. Methodology of determining basic technical parameters of electric-drive car, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), issn 0033-2097, r. 87 nr 10/2011 pp. 299 – 304
- [30] Lawn, M.J.; Ishimatsu, T.: "Modeling of a stair-climbing wheelchair mechanism with high single-step capability," Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on , vol.11, no.3, pp.323-332, Sept. 2003. doi: 10.1109/TNSRE.2003.816875.  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1231243&isnumber=27583>
- [31] Morales R., A. González and V. Feliu: Mechanical and Kinematics Design Methodology of a New Wheelchair with Additional Capabilities, Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots, Book edited by: Maki K. Habib, ISBN 978-3-902613-15-8, pp. 544, I-Tech, Vienna, Austria, EU, September 2007.
- [32] Morales R., V. Feliu, A. González, P. Pintado: Coordinated Motion of a New Staircase Climbing Wheelchair with Increased Passenger Comfort, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida - May 2006, pp 3995-4001.
- [33] Nader M., Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka, Prace Naukowe Transport z.46, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2001r.
- [34] Niezgoda M., Ucińska M., Psychologiczne modele zachowań kierowców, Kwartalnik Transport Samochodowy, Nr 1-2012, ITS, Warszawa, 2012r.,  
<http://www.its.waw.pl/transportsamochodowy/upload.php?id=454&key=50e927488008ace106b2e3a16da0ea97>
- [35] Osiński Z.: „Teoria drgań”, PWN, Warszawa 1980.
- [36] Patent: Battery powered stair-climbing wheelchair, US Patent 6,484,829 B1.

- [37] PN-EN 12184:2010 Wózki inwalidzkie z napędem elektrycznym, skutery i ich zasilanie - Wymagania i metody badań.
- [38] PN-ISO 7176-11:1998 Wózki inwalidzkie - Manekiny do badań.
- [39] Praca zbiorowa pod redakcją Włodzimierza Choromańskiego: Transport osób niepełnosprawnych – wózki innowacyjne dla osób z upośledzonym układem ruchowym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [40] Quaglia G., Walter Franco, Riccardo Oderio: Wheelchair.q, a mechanical concept for a stair climbing wheelchair, Proceedings of the 2009 IEEE, International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 800-805, December 19 -23, 2009, Guilin, China.
- [41] Quaglia G., Walter Franco, Riccardo Oderio: Wheelchair.q, a motorized wheelchair with stair climbing ability, Mechanism and Machine Theory, Volume 46, Issue 11, November 2011, Pages 1601-1609, ISSN 0094-114X, 10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.005.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X1100139X>)
- [42] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dziennik Ustaw Nr 56, Poz. 461, Warszawa 2009r.
- [43] Sugahara, Y.; Yonezawa, N.; Kosuge, K.: "A novel stair-climbing wheelchair with transformable wheeled four-bar linkages," Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.3333-3339, 18-22 Oct. 2010. doi: 10.1109/IROS.2010.5648906; URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5648906&isnumber=5648787>
- [44] Suyang Yu, Ting Wang, Xiaofan Li, Chen Yao, Zhong Wang and Di Zhi: Configuration and Tip-Over Stability Analysis for Stair-Climbing of a New-Style Wheelchair Robot, Proceedings of the 2010 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1387-1392, August 4-7, 2010, Xi'an, China.
- [45] Sydor M.: "Wykorzystanie metodycznych środków oceny bezpieczeństwa wózka aktywnego" - Materiały konferencyjne IX Międzynarodowej konferencji pt. Ergonomia niepełnosprawnym. Łódź 2003 r.
- [46] Ucińska M., Niezgoda M., Mitraszewska I., Nowacki G., Kamiński T.: Truck and Bus Simulator as an Element of the Professional Driver Training System – Experience from the European Project “TOT to FCO”, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Zeszyt "Transport" nr 82, Systemy, podsystemy i środki w transporcie drogowym, morskim i śródlądowym, (str. 103-115), Warszawa, 2012r.
- [47] Zegelaar P. W. A., The dynamic response of tyres to brake torque variations and road unevennesses, Delft University of Technology 1998, podręcznik ze strony web page: <http://www.tno.nl> .
- [48] Żółtowski B.: Badania dynamiki maszyn, Akademia Techniczno – Rolnicza w Bydgoszczy, wydawnictwo MAKAR – B.Ż., 2002; ISBN – 83-916198-3-4, <http://www.zpid.utp.edu.pl/e-ksiazki/4/>

**Raporty wewnętrzne Projektu Eco-Mobilność, zgłoszenia patentowe oraz inne źródła:**

- [49] Choromański W., Dobrzyński G., Potyński A., zgłoszenie patentowe pt.: „Środek transportu”, zgłoszenie patentowe nr P.393063; z dn. 26.11.2010r. BIULETYN URZĘDU PATENTOWEGO Nr 12 (1003) z dnia 4.06.2012 r.
- [50] Dobrzyński G, Barwicki M., Choromański W., Modyfikacja modelu oraz badania symulacyjne elektrycznego wózka inwalidzkiego z uwzględnieniem modułu napędowego pasa ramienia poziomującego Raport z prac zrealizowanych w Projekcie Eco-Mobilność. UD/0044/1160/2011.
- [51] Dobrzyński G, Barwicki M., Choromański W., Opracowanie modelu symulacyjnego MBS dla parametrycznego modelu wózka elektrycznego pokonującego schody z wykorzystaniem systemu LMS.Virtual.Lab i Catia, Raport z prac zrealizowanych w Projekcie Eco-Mobilność. UD/0033/1160/2011.
- [52] Dobrzyński G, Barwicki M., Identyfikacja parametrów dla modelu symulacyjnego opony „Simple Tire” stosowanego w elektrycznym wózku inwalidzkim. Raport z prac zrealizowanych w Projekcie Eco-Mobilność. UD/0145/1160/2011.
- [53] Dokumentacja aplikacji TNO-Delf-Tyre.
- [54] Dokumentacja techniczna „Online Help” programu LMS Virtual.Lab.
- [55] Dokumentacja techniczna „Online Help” programu MD.Adams.
- [56] Fiok K., Dobrzyński G., Potyński A., Deszczyński J., Zalewski T., Wózek inwalidzki - analiza założeń konstrukcyjnych do innowacyjnego wózka z napędem ręcznym i elektrycznym oraz zakresu prac doświadczalnych z uwzględnieniem wymagań ergonomicznych. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych już istniejących rozwiązań (SWOT). Raport z prac zrealizowanych w Projekcie Eco-Mobilność. UD/0046/1160/2009.
- [57] Frontline Systems Inc., Algorytmy optymalizacji w Excel 2010, Witryna sieci Web: <http://www.solver.com>
- [58] Informacje producenta, SunwaStair-Ship TRE-52, Sunwa CO. Ltd. Sendagaya, shiuya-ku, Tokyo Japan, 2008 ; URL:[www.sunwa-jp.co.jp](http://www.sunwa-jp.co.jp) .
- [59] Kowara J., Koncepcja konstrukcji i badania symulacyjne wózka inwalidzkiego nowej generacji, Praca dyplomowa magisterska, SiMR-PW 2005r,
- [60] Ofeta firmy TGR Srl, <http://www.tgr.it/> .
- [61] Ofeta firmy TopChair SAS, <http://www.topchair.net/> .
- [62] Ofeta firmy Ulrich Alber GmbH, <http://www.alber.de/> .
- [63] TNO: Netherlands Organisation for Applied Scientific Research TNO - Web Page: <http://www.tno.nl> .
- [64] TU Delft: Delft University of Technology – Web Page: <http://home.tudelft.nl/>.

## 9. Spis rysunków

|         |  |    |
|---------|--|----|
| Rys. 1  | Struktura podziału konstrukcji posiadających możliwość pokonywania przeszkód .   | 13 |
| Rys. 2  | a) Wózek EXPLORER firmy TGR, b) wózek TopChair [61].....   | 14 |
| Rys. 3  | Wózki posiadające zespoły wielokołowe na obu osiach: a) SunwaStair freedom [58],<br>b) prototyp opracowany na Nagasaki University [24], c) model Politecnico di Torino<br>[41];..... | 15 |
| Rys. 4  | Wózek posiadający parę układów trzykołowych [36] .....   | 16 |
| Rys. 5  | Wózek IBOT 3000 [14]: a) podczas jazdy w pozycji uniesionej b) podczas<br>wjeżdżania na schody z pomocą dodatkowej osoby .....   | 16 |
| Rys. 6  | Schodołazy: a) podnośnik gąsiennicowy TR-93 [26], b) fotel do transportu po<br>schodach, c) urządzenie Scalamobil S30 [62] ; .....   | 17 |
| Rys. 7  | Konstrukcja wózka inwalidzkiego z dwiema nogami podczas pokonywania<br>przeszkody [26].....  | 18 |
| Rys. 8  | Roboty kroczące budowane do transportu osób niepełnosprawnych [26].....  | 18 |
| Rys. 9  | Konstrukcja o sprężystych kołach tzw. Terrain-AdaptiveQuadru-Track (TAQT)[24]<br>.....   | 19 |
| Rys. 10 | Konstrukcja wózka wspinającego się po schodach [19] wraz ze schematem<br>kinematycznym .....   | 20 |
| Rys. 11 | Model koncepcji konstrukcji wózka inwalidzkiego.....   | 25 |
| Rys. 12 | Sekwencja algorytmu wjazdu na przeszkodę.....  | 26 |
| Rys. 13 | Sekwencja algorytmu zjazdu z przeszkody .....  | 28 |
| Rys. 14 | Model płaski układu statycznego wraz z naniesionymi składowymi reakcji w<br>punktach podparcia .....   | 31 |
| Rys. 15 | Schemat modelu sprowadzonego do układu statycznego wraz z przykładowymi<br>wynikami obliczeń reakcji w punktach podparcia.....   | 32 |
| Rys. 16 | Etapy pokonywania przeszkody przez model wózka.....  | 32 |
| Rys. 17 | Wskazanie wybranych parametrów modelu symulacyjnego .....  | 34 |
| Rys. 18 | Wartości reakcji punktach podparcia .....  | 35 |
| Rys. 19 | Charakterystyka współczynnika $k_T$ proporcji sił reakcji w punkcie T dla wartości<br>początkowych parametrów modelu symulacyjnego .....   | 36 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| Rys. 20 | Charakterystyka współczynnika $k_T$ proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów wiatraka krocząco.....  | 38 |
| Rys. 21 | Charakterystyka współczynnika $k_T$ proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów płozy poziomującej.....   | 39 |
| Rys. 22 | Charakterystyka współczynnika $k_T$ proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych położzeń środka ciężkości modelu .....  | 41 |
| Rys. 23 | Charakterystyka współczynnika $k_T$ proporcji sił reakcji w punkcie T dla różnych wartości parametrów geometrycznych schodów .....                                    | 43 |
| Rys. 24 | Model nominalny do badań dynamiki podczas pokonywania przeszkody.....   | 47 |
| Rys. 25 | Przebieg zmian siły sprężystości w kontakcie z podłożem w funkcji odległości $y$ [55] .....   | 49 |
| Rys. 26 | Przebieg zmian siły tłumienia w kontakcie z podłożem w funkcji odległości $y$ [55] d – wartość odkształcenia dla którego tłumienie przyjmuje wartość maksymalną. .... | 49 |
| Rys. 27 | Zależność tłumienia $c$ od odkształcenia (ugięcia) $p$ gdzie $p=R-y$ [55] .....   | 49 |
| Rys. 28 | Przebieg zależności współczynnika tarcia od prędkości poślizgu $V_p$ [55] .....   | 50 |
| Rys. 29 | Model manekina w programie CATIA V5R20, moduł Ergonomics Design & Analysis.....   | 51 |
| Rys. 30 | Porównanie zarysu manekina w programie CATIA V5R20, moduł Ergonomics Design & Analysis i bryły samodzielnie zbudowanego manekina (bryła w kolorze brązowym) .....     | 53 |
| Rys. 31 | Lokalny układ współrzędnych dla definicji modelu manekina usytuowanego na siedzisku.....  | 54 |
| Rys. 32 | Kąty Eulera [48].....   | 58 |
| Rys. 33 | Model symulacyjny przygotowany w MD.Adams .....   | 59 |
| Rys. 34 | Składowe siły występujące w kontakcie płozy poziomującej, wiatraka kroczącego i kół tylnych z podłożem.....   | 60 |
| Rys. 35 | Charakterystyka współczynnika $k_T$ proporcji sił reakcji w punktach kontaktu z podłożem dla wartości początkowych parametrów modelu symulacyjnego MBS....            | 61 |
| Rys. 36 | Wyniki symulacji dla geometrii przeszkody "2" - analiza prędkości w kierunku X. 62  |    |
| Rys. 37 | Momenty napędowe członów odpowiedzialnych za wjazd na schody.....   | 63 |



|  |    |
|--|----|
| Rys. 38 Przebieg zmian przyspieszenia drgań, w kierunkach X,Y,Z jakie oddziałują na model manekina .....                               | 64 |
| Rys. 39 Schemat wyliczeń wartości RMS ważonych częstotliwościowo.....  | 66 |
| Rys. 40 Wartości wypadkowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w punkcie pomiarowym w funkcji czasu .....                            | 67 |
| Rys. 41 Wartości skuteczne przyspieszeń drgań zarejestrowanych w punkcie pomiarowym  | 68 |
| Rys. 42 Model nominalny przygotowany do symulacji podążania za zadanym torem jazdy   | 70 |
| Rys. 43 Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyki siły reakcji podłoża w funkcji ugięcia opony wózka .....                   | 71 |
| Rys. 44 Charakterystyka sił reakcji podłoża w funkcji ugięcia opon .....   | 73 |
| Rys. 45 Rozmieszenie akcelerometru na ramie wózka .....  | 74 |
| Rys. 46 Charakterystyka przyspieszeń drgań w funkcji czasu. Wyniki eksperymentu dla osi przedniej.....                                 | 75 |
| Rys. 47 Charakterystyka przyspieszeń drgań w funkcji czasu. Wyniki eksperymentu dla osi tylnej.....                                    | 76 |
| Rys. 48 Model CAD służący do określenia parametrów masowych .....  | 77 |
| Rys. 49 Schemat blokowy przedstawiający strukturę modelu symulacyjnego przygotowany w Simmechanics .....                               | 79 |
| Rys. 50 Wizualizacja modelu symulacyjnego przygotowana w Matlab-SimMechanics.....  | 80 |
| Rys. 51 Schemat modułu reprezentującego decyzje osoby kierującej wózkiem .....   | 83 |
| Rys. 52 Schemat modułu reprezentującego elektroniczny system sterowania wózkiem inwalidzkim.....                                       | 84 |
| Rys. 53 Zadany profil prędkości .....  | 85 |
| Rys. 54 Trajektoria ruchu modelu wózka: linia czerwona - zadana, linia zielona - zarejestrowana.....                                   | 85 |
| Rys. 55 Działanie regulatora PID - człowiek: linia czerwona - uchyb, linia zielona - zarejestrowana wartość na wyjściu regulatora..... | 86 |
| Rys. 56 Działanie regulatorów prędkości i kierunku: linia czerwona - uchyb, linia zielona - wartości wyjściowe .....                   | 86 |
| Rys. 57 Działanie dyferencjału momentów napędowych: linia czerwona - silnik lewy, linia zielona - silnik prawy .....                   | 87 |

|   |    |
|---|----|
| Rys. 58 Działanie regulatora PID modelu człowieka przy różnych jego nastawach .....                                   | 88 |
| Rys. 59 Trajektorie wyznaczone przez model wózka uzyskane przy różnych nastawach regulatora PID modelu człowieka..... | 89 |
| Rys. 60 Wózek „Explorer”, na którym przeprowadzono serię badań doświadczalnych .....                                  | 90 |
| Rys. 61 Lokalizacja i kierunki działania trójosiowego czujnika przyspieszeń .....                                     | 92 |
| Rys. 62 Sposób obciążenia wózków inwalidzkich.....  | 92 |
| Rys. 63 Przebiegi czasowe drgań dla wózków podczas wjazdu na schody .....   | 93 |
| Rys. 64 Wykres wartości ważonych RMS przyspieszeń drgań dla wózka Explorer oraz Wektor.....                           | 94 |

## 10. Spis tabel

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1. Kolejne etapy wjazdu na przeszkodę wraz z nr pozycji i wartościami współrzędnych osi kół tylnych.....       | 33 |
| Tab. 2. Wartości początkowe parametrów dla modelu symulacyjnego.....  | 34 |
| Tab. 3. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 1.....   | 37 |
| Tab. 4. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 2.....   | 39 |
| Tab. 5. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 4.....   | 40 |
| Tab. 6. Zestawienie wartości parametrów zmienianych w symulacji nr 5.....   | 42 |
| Tab. 7. Wartości początkowe parametrów dla zadania optymalizacji.....   | 45 |
| Tab. 8. Wyniki dla zadania optymalizacji.....   | 45 |
| Tab. 9. Parametry nominalne modeli kontaktu.....  | 50 |
| Tab. 10. Wymagane wartości mas członów manekinów do badań według [38].....  | 52 |
| Tab. 11. Wymiary antropometryczne użyte do budowy modeli członów manekinów [2].....                                 | 52 |
| Tab. 12. Wartości mas członów manekinów zbudowanych samodzielnie.....   | 53 |
| Tab. 13. Parametry masowe zamodelowanych manekinów w pozycji siedzącej.....   | 54 |
| Tab. 14. Tabela zastosowanych wartości parametrów połączeń sprężysto-tłumiących modeli manekina i wózka.....        | 55 |
| Tab. 15. Zestawienie zakresów parametrów tarcia w kontaktach dla realizacji zadania wjazdu na przeszkodę.....       | 62 |
| Tab. 16. Zakresy pasm tercjowych, współczynniki wagowe i ważone wartości RMS przyspieszeń w pasmach tercjowych..... | 67 |
| Tab. 17. Wyniki pomiarów sił reakcji podłoża i ugięcia opon dla osi przedniej i tylnej.....                         | 72 |
| Tab. 18. Parametry zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń drgań w eksperymencie dla osi przedniej.....            | 75 |
| Tab. 19. Parametry zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń w eksperymencie dla osi przedniej.....                  | 76 |
| Tab. 20. Parametry masowe obiektu badań eksperymentalnych.....  | 77 |
| Tab. 21. Wartości stałej tłumienia wyznaczone w eksperymencie.....  | 78 |
| Tab. 22. Porównanie wartości wyznaczonych parametrów z wartościami przykładowymi....                                | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Tab. 23. Parametry masowe modeli manekinów .....          | 81 |
| Tab. 24. Parametry definiujące model ramy .....           | 81 |
| Tab. 25. Parametry definiujące model koła tylnego.....    | 82 |
| Tab. 26. Parametry definiujące model koła przedniego..... | 82 |
| Tab. 27. Parametry regulatora PID modelu człowieka .....  | 88 |