

13.04.2017

Dr hab. inż. Damian Gąsiorek, prof. nzw. w Pol. Śl.

Gliwice 11.04.2017 r.

Instytut Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Politechnika Śląska

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Ul. Konarskiego 18A

44-100 Gliwice

e-mail: [Damian.Gasiorek@polsl.pl](mailto:Damian.Gasiorek@polsl.pl)

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgra inż. Pawła FUDALEGO

pod tytułem:

#### ***Wpływ parametrów geometrycznych na cechy ergonomiczne siedziska wózka dla osób niepełnosprawnych***

podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dra hab. inż. Jarosława Sępa nr RM-530-2-02-2016 z dnia 08.02.2017, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

#### **1. Zakres rozprawy**

Historia rozwoju pojazdów dla osób niepełnosprawnych zwanych wózkami inwalidzkimi sięga VI wieku. W Europie pierwsze wzmianki pochodzą z XVI wieku, a dotyczą wózka dla króla Hiszpanii Filipa II. Wózek ten jednak do napędu potrzebował dodatkowego użytkownika. Dopiero w 1795 roku w Anglii opracowano wózek inwalidzki, który napędzany mógł być bezpośrednio przez samego użytkownika. Obecnie stosowane konstrukcje wózków czyli tzw. konstrukcje składane krzyżakowo powstały w XX w., a dokładnie w 1932 roku w Ameryce.

W recenzowanej rozprawie podjęto aktualny i ważny, ze społecznego punktu widzenia, problem projektowania urządzeń dla osób niepełnosprawnych. Stosowanie takich urządzeń ma na celu poprawę jakości funkcjonowania osób z niepełnosprawnościami. Te problemy dotyczą znacznej części naszego społeczeństwa, zajęcie się tą problematyką, jako celem badań, posiada aspekt użyteczny.

Problem niepełnosprawności dotyczy coraz większej grupy społeczeństwa. Powodem niepełnosprawności mogą być bowiem zarówno wypadki komunikacyjne czy też choroby, ale również starzenie się społeczeństwa. Problem ten nie jest nowy. Systemy poprawy funkcjonowania osób niepełnosprawnych ruchowo znane są od szeregu lat. Jednak największy rozwój konstrukcji z zakresu inżynierii rehabilitacyjnej nastąpił dopiero pod koniec XX w. i na początku XXI. Przykładem tego postępu może być ewolucja wózka inwalidzkiego od zwykłego fotela do mobilnych systemów transportu indywidualnego z funkcją pionizacji oraz stabilizacji ruchu. Bardziej zaawansowanym przykładem tego rozwoju może być konstrukcja egzoszkieletu rehabilitacyjnego, który jest rozwinięciem - połączeniem rozwiązań kul ortopedycznych, oraz pionizatora dynamicznego. Problemem w tego typu rozwiązaniach jest odpowiednie zamodelowanie obszaru kontaktu układu człowiek-maszyna, a w szczególności uwarunkowania ergonomiczne. Jako, że temat ten nie jest szeroko poruszany w literaturze, podjęcie pracy z tego zakresu przez Autora wydaje się być szczególnie cenne. W systemach transportu indywidualnego, jak również w konstrukcjach egzoszkieleatów, problem ten jest często marginalizowany.

Celem rozprawy doktorskiej było określenie wpływu geometrii podparcia na ciało człowieka oraz zaprojektowanie ergonomicznego siedziska dla mobilnych pojazdów.

Zakres przedstawionego w rozprawie doktorskiej celu badawczego obejmował następujący zakres:

- analizę literatury oraz istniejących rozwiązań,
- wykonanie modeli numerycznych siedziska oraz ciała człowieka z uwzględnieniem wewnętrznych cech anatomicznych,
- przeprowadzenie statycznych symulacji rozkładu nacisków siedziska na ciało człowieka,
- opracowanie autorskiej wersji siedziska z uwzględnieniem przyjętych założeń,
- wykonanie prototypu funkcjonalnego opracowanego rozwiązania,
- badania eksperymentalne weryfikujące poprawność przyjętych założeń modelowych.

Rozprawa doktorska obejmuje 121 stron tekstu wraz z bibliografią w liczbie 98 pozycji oraz 15 adresów stron internetowych. Praca podzielona została na 7 rozdziałów wraz z podrozdziałami. Recenzowana rozprawa mieści się w szeroko pojętej dyscyplinie naukowej mechanika.

## 2. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedmiotem badań w recenzowanej pracy jest określenie wpływu geometrii podparcia na ciało człowieka oraz zaprojektowanie ergonomicznego siedziska dla mobilnych pojazdów. Rozprawa doktorska została podzielona na siedem rozdziałów.

W dwustronicowym wstępie do pracy, który stanowi rozdział pierwszy pracy, przedstawiono ogólny zarys problemów związanych z możliwościami przemieszczania się osób niepełnosprawnych. Autor zdefiniował pojęcie ergonomii i wskazał, że 95% ogólnie dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych wózków inwalidzkich bazuje na klasycznym rozwiązaniu przypominającym fotel.

W obszernym rozdziale drugim, pod tytułem *Przegląd literatury*, Autor przedstawił wyczerpująco podstawowe zagadnienia związane ze istniejącymi rozwiązaniami wózków inwalidzkich. W tym rozdziale zaprezentował krótko historię tych urządzeń. Na uwagę zasługują wymienione ograniczenia standardowych rozwiązań układu podparcia ciała takie jak zmiany skórne, mogące powstać wady kręgosłupa, problemy podczas przesiadania się z i na pojazd mobilny oraz problemy związane ze stabilnością jazdy, które wynikają z wysoko położonego środka ciężkości pojazdu. W dalszej części rozdziału Autor wskazał klasyczne rozwiązania siedzisk ale również specjalistycznych stosowanych np. w sporcie. Następnie zaprezentował przykładowe rozwiązanie krzesła typu klękosiad jako rozwiązanie, które stosuje się w przypadku osób długo przebywających w pozycji siedzącej, a mających pozytywny wpływ na obciążenie kręgosłupa. W kolejnym punkcie Doktorant opisał badania jakim poddaje się siedziska, wymieniając badania numeryczne, analityczne i eksperymentalne. W przypadku badań analitycznych i numerycznych ważnym elementem jest przyjęcie modelu ciała człowieka i uproszczeń jakie należy zastosować aby oddać skomplikowaną budowę ciała człowieka. Przyjęcie uproszczeń w modelu zależne jest od rodzaju stawianych badań: wpływu drgań przenoszonych na ciało lub nacisków powierzchniowych. Po wyborze modelu ciała człowieka ważnym elementem jest przyjęcie danych materiałowych. Autor przedstawia w pracy najczęściej stosowane modele materiałowe ciała, czyli modele materiału hiperelastycznego Mooney-Rivlin'a, Neo-Hookean'a lub model uwzględniający duże odkształcenia Ogden'a oraz modele materiału elastycznego. W tej części pracy Doktorant przedstawił również przykłady badań doświadczalnych jakim poddaje się siedziska. Rozdział zakończony jest podsumowaniem przeglądu literatury.

W rozdziale trzecim, zatytułowanym *Cel i zakres pracy*, Autor określił cel swojej pracy oraz zaprezentował zadania, które zostały zrealizowane w trakcie wykonywania pracy.

Rozdział czwarty poświęcony został projektowi autorskiego siedziska wózka dla osób niepełnosprawnych. W pierwszej części Autor zaprezentował założenia konstrukcyjne, które powinno spełniać siedzisko i wózek. W celu zapewnienia założeń konstrukcyjnych przedstawił opracowany układ podparcia. Autorskie siedzisko wraz z układem podparcia zostało zgłoszone jako rozwiązanie patentowe w UP pod numerem P.408447 oraz objęte międzynarodowym zgłoszeniem patentowym w procedurze PTC, a w dniu 23.08.2016 objęte międzynarodową ochroną patentową PAT.224969.

Najbardziej obszernym, bo mającym aż 66 stron jest rozdział piąty, zatytułowany *Badania cech ergonomicznych układu wózek-człowiek*. Badanie te Autor prowadził jako badania analityczne, numeryczne i doświadczalne. Celem badań było określenie rozkładu nacisków siedziska na ciało człowieka, co stanowi jeden z głównych parametrów określających komfort użytkowania siedziska. Jako pierwsze Autor przedstawił analizę algebraiczną. Rozpatrywany model człowieka został rozpatrywany jako dwuwymiarowy. Doktorant uprościł model ośmiobryłowy człowieka do pięciu brył, łącząc dłonie z przedramionami, stopy z podudziami oraz głowę z tułowiem, oraz modelu o sześciu bryłach. Dla przyjętych modeli opisał statyczne równania równowagi, a dzięki temu mógł sprawdzać wartość sił nacisków w zależności od wartości kątów związanych z przyjętą sylwetką człowieka na siedzisku wózka. W tabeli 5.2 Autor zestawiał wyznaczone wielkości sił nacisku dla modelu 5-cio bryłowego, 6-cio bryłowego oraz 6-bryłowego z tarciem. Znając pola powierzchni nacisku na podudziach oraz na klatce piersiowej wyznaczył wartości średnich nacisków powierzchniowych dla rozważanych modeli analitycznych, a wyniki zestawiał w tabeli 5.3. Analizę wartości sił Autor wykonał dla autorskiego rozwiązania siedziska i dla klasycznego rozwiązania siedziska. Drugim parametrem, który był rozważany analitycznie w pracy było wyznaczenie środka ciężkości ciała człowieka, co stanowi ważny punkt związany ze stabilnością konstrukcji wózka inwalidzkiego.

Kolejną analizą przedstawioną w pracy jest analiza numeryczna przeprowadzona metodą elementów skończonych w środowisku Abaqus. Pierwszym krokiem jaki zaproponował Doktorant było opracowanie modelu fizycznego człowieka na podstawie tomografii komputerowej z zastosowaniem środowiska 3D Slicer. W celu porównania wyników z badaniami analitycznymi Autor opracował 3 modele zgodnie z przyjętymi kątami w badaniach analitycznych. W wyniku analiz numerycznych otrzymał wartości nacisków dla autorskiego siedziska i siedziska klasycznego.

Trzecim rodzajem analiz zaprezentowanym w pracy była analiza doświadczalna. W pierwszej kolejności Autor opracował stanowisko badawcze, w którym możliwa jest zmiana pozycji zajmowanej przez człowieka i umożliwia badanie nacisków powierzchniowych dla różnych przyjętych sylwetek osoby badanej. Do pomiaru sił nacisku Doktorant użył mat pomiarowych firmy Tekscan. Pierwsza mata została usytuowana między podparciem, a udem i pośladkiem. Druga mata umiejscowiona jest pomiędzy siedziskiem, a udem i klatką piersiową. W tabeli 5.7 Autor zestawiał wyniki sił nacisku dla metody doświadczalnej. Rozdział zakończony jest porównaniem wyników wypadkowych sił nacisku ciała człowieka na elementy siedziska dla analizy analitycznej, numerycznej i eksperymentalnej.

Rozdział szósty poświęcony jest koncepcji rozwiązania wózka z nowatorskim systemem podnoszenia. W celu opracowania nowatorskiej konstrukcji wózka Autor rozpoczął od przyjęcia założeń i modelu fizycznego człowieka. Autor skupił się na modelu wózka z napędem elektrycznym. Na zakończenie rozdziału Doktorant zaprezentował wykonany w skali model funkcjonalny koncepcyjnego wózka. Do wykonania modelu rzeczywistego zastosował technologie przyrostowe, w obudowę wykonał w technologii FDM.

W rozdziale siódmym Autor zamieścił podsumowanie pracy i przedstawił kierunki dalszych badań.

Kolejna część pracy stanowi spis literatury. W załączniku Autor zestawiał nagrody i wyróżnienia zdobyte na międzynarodowych targach. Praca zakończona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim.

### **3. Najważniejsze osiągnięcia pracy**

**Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionej pracy doktorskiej należy zaliczyć:**

- Praca doktorska mgr inż. Pawła Fudali pt. *Wpływ parametrów geometrycznych na cechy ergonomiczne siedziska wózka dla osób niepełnosprawnych*, dotyczy zagadnień kontaktu - nacisku ciała ludzkiego na siedziska pojazdów (wózków) dla osób niepełnosprawnych. Zastosowane w pracy metody: analityczna, MES, oraz weryfikacja doświadczalna, a zwłaszcza ich korelacja, może być efektywnym narzędziem oceny nowych, innowacyjnych rozwiązań - systemów podparcia ciała w inżynierii rehabilitacyjnej takich jak: aktywne pionizatory, egzoszkielety rehabilitacyjne, przyrządy zaopatrzenia ortopedycznego itp.

- W pracy Autor przeanalizował inne konstrukcje, oraz porównał je pod względem ergonomii. Najkorzystniejszy wariant został rozbudowany, aby móc spełniać rolę siedziska dla urządzenia mobilnego. Określono wpływ parametrów geometrycznych na podstawowe cechy ergonomiczne siedziska. Zaproponowane przez Autora rozwiązanie może być zastosowane jako siedzisko dla wózków dla osób niepełnosprawnych napędzanych elektrycznie. Odpowiednia budowa fotela zapewnia stabilizację podczas jazdy również dla osób z niedowładem dolnych partii ciała. Istotnym zagadnieniem również uwzględnionym w pracy jest sposób przygotowania modelu ciała ludzkiego, t.j. etap modelowania medycznego, oraz metod pozyskiwania danych geometrycznych.
- Prace wykonane w związku z realizacją tematu obejmowały dwie części: teoretyczną i badawczą. Część teoretyczna dotyczyła analizy parametrów geometrycznych oraz konstrukcji systemu podparcia, z uwzględnieniem wymienionych uwarunkowań. Autor wyznaczył wpływ wybranych parametrów geometrii podparcia na rozkład nacisków na ciało człowieka. Poprzez odpowiedni dobór tych parametrów Autor doprowadził do zmniejszenia wartości maksymalnych nacisków w wybranych partiach ciała. Jest to niezwykle ważne zagadnienie pod względem medycznym tj. profilaktyki przeciwoleżynowej.
- Poprawność przyjętych metod analitycznych i numerycznych, odwzorowania geometrii podparcia, przyjętych założeń konstrukcyjnych, została przez Autora zweryfikowana przy użyciu badań doświadczalnych. Autor wykonał stanowisko do badań z wykorzystaniem mat naciskowych.
- Opracowanie autorskiego rozwiązania siedziska i podparcia, zostało zgłoszone jako zgłoszenie patentowe w UP pod numerem P.408447 oraz objęte międzynarodowym zgłoszeniem patentowym w procedurze PTC, a w dniu 23.08.2016 objęte międzynarodową ochroną patentową PAT.224969.
- Autor otrzymał liczne nagrody i wyróżnienia przyznane przez międzynarodowe jury:
  - srebrny medal na targach innowacyjności Brussels INNOVA (2014),
  - srebrny medal na 43rd International Exhibition of Inventions of Geneva (2015),
  - złoty medal na Międzynarodowych Targach Innowacji Gospodarczych i Naukowych INTARG w Krakowie (2015).

Pod względem metodycznym rozprawa jest poprawna. Literatura specjalistyczna została dobrana trafnie. Układ rozprawy i podział treści między poszczególne rozdziały jest logiczny.

#### **4. Uwagi do pracy**

Praca dotyczy złożonych i trudnych zagadnień, co zrodziło kilka pytań i wątpliwości:

##### Uwaga ogólna:

Analiza wyników zawarta w pracy mogła być bardziej szczegółowa. Autor otrzymał szereg wyników analiz analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych. W pracy brakuje walidacji modelu numerycznego na podstawie badań doświadczalnych. Na końcu pracy brakuje zestawienia tabelarycznego otrzymanych wyników i porównania poszczególnych modeli. Model rzeczywisty wykonany jako model pokazowy z zastosowaniem technologii przyrostowych nie pozwala na sprawdzenie poprawności przyjętego modelu, bo wykonany jest w skali. Model rzeczywisty jest niedopracowany, technologia FDM pozwala na wykończenie modelu poprzez jego szlifowanie, a następnie malowanie. W pracy brakuje obliczeń dla niesymetrycznego podziału mas podczas siedzenia na siedzisku. Praca dotyczy jedynie obliczeń statycznych, w przypadku wózka mobilnego ważnym elementem jest zmiana sił nacisku podczas jazdy wózka, a w szczególności w trakcie przejazdu przez przeszkody. W pracy występują błędy stylistyczne, skróty myślowe oraz drobne błędy redakcyjne, które mogą utrudniać odbiór treści zawartych w pracy.

W mojej opinii w pracy brakuje również opisu innych zastosowań opracowanego systemu podparcia. Poza wyszczególnieniem innych zastosowań, nie ma konkretnego opisu, w jakich urządzeniach rehabilitacyjnych i dla kogo to rozwiązanie mogłoby być pomocne. Osoba niepełnosprawna, ze względu na swoją niesamodzielność, potrzebuje wsparcia i pomocy osób trzecich. Przydatne byłoby więc pokazanie, w jaki sposób opracowane rozwiązanie mogłoby pomóc np. opiekunom osoby niepełnosprawnej, rehabilitantom oraz innym osobom związanym z opieką. Skonstruowany oraz opisany w pracy system podparcia może być zastosowany w innych prostych aplikacjach ułatwiających życie, tj. przesiadanie, przenoszenie pacjenta na sali rehabilitacyjnej, układ podparcia ciała osoby niepełnosprawnej do masażu w pozycji siedzącej, czy też wykorzystanie opracowanego mechanizmu do pionizacji pacjentów. Autor nie opisał w pracy cennej funkcjonalności zaproponowanego rozwiązania, jaką jest możliwość przenoszenia obszaru kontaktu - podparcia ciała w inne miejsca, niezmienione chorobowo. Długie przebywanie pacjentów w tej samej pozycji siedzącej czy leżącej powoduje powstawanie szeregu zmian skórnych, odleżyn itp. W niektórych przypadkach, np. pacjentów z cukrzycą, u których występują rany cukrzycowe,

ucisk w takich miejscach może utrudniać gojenie takich ran. Dlatego też zastosowanie tego rozwiązania, korzystne z punktu widzenia aplikacji praktycznych, w mojej opinii nie zostało w pracy wystarczająco naświetlone.

Uwagi szczegółowe:

- strona 66 – brak optymalizacji wartości sił nacisku.
- Strona 76 – zbyt mało informacji o warunkach brzegowych przyjętych w modelu numerycznym, brak rysunku z założonymi warunkami brzegowymi.
- Strona 74 – brak informacji o użytym elemencie skończonym w symulacjach, w pracy podano jedynie jaki typ elementu wybrał Autor w programie Abaqus.
- Strona 75 – opis materiału zastosowanego przez Autora do symulacji jest bardzo lakoniczny, w pracy brakuje informacji, co oznaczają poszczególne współczynniki przyjęte do symulacji.
- Strona 76 – zbyt mało informacji o zastosowanym kontakcie bez tarciovym, brak rysunku przedstawiającego miejsce kontaktu w modelu.
- Strona 99 - Autor zdecydował się na opis modelu jako wózka elektrycznego, w opisie brakuje danych zastosowanych elementów do budowy koncepcyjnego wózka (dotyczy sterowania i napędów zastosowanych w kołach oraz układu zasilania).
- Strona 67, 71 – Autor często używa sformułowania stworzenie modelu itp. jako konstruktor powinien opisać to jako: skonstruowanie, opracowanie.
- Strona 99, 100 – w opisie rysunku jest model CAD, w języku inżynierskim powinno być model fizyczny,
- Strona 102 – Autor używa sformułowania „do plastików”, w języku inżynierskim powinno być „do tworzyw sztucznych”.
- Strona 102 – rysunek nie przedstawia pliku STL, a jedynie wizualizację modelu zapisanego w pliku STL, jako model powierzchniowy.

Uwagi krytyczne nie umniejszają osiągnięć Autora, często mają charakter dyskusji naukowej.

Ponadto należy stwierdzić, że praca została zredagowana starannie i zgodnie z zasadami przygotowania rozpraw o charakterze naukowym. Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne. Rozprawa pisana jest jasnym, poprawnym językiem. Dobór rysunków i wykresów uważam za właściwy.



## 5. Ocena końcowa

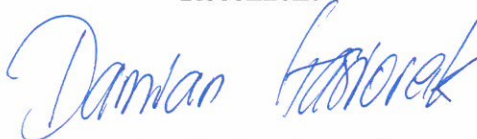
Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską należy podkreślić aktualność jej tematyki z punktu widzenia potrzeb rozwoju urządzeń wspomagających życie osób niepełnosprawnych. Zawiera ona elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny, jaką jest mechanika. Praca doktorska mgr inż. Pawła Fudali pt. *Wpływ parametrów geometrycznych na cechy ergonomiczne siedziska wózka dla osób niepełnosprawnych*, dotyczy zagadnień kontaktu - nacisku ciała ludzkiego na siedziska pojazdów (wózków) dla osób niepełnosprawnych. Zastosowane w pracy metody: analityczna, MES, oraz weryfikacja doświadczalna, a zwłaszcza ich korelacja, może być efektywnym narzędziem oceny nowych, innowacyjnych rozwiązań - systemów podparcia ciała w inżynierii rehabilitacyjnej takich jak: aktywne pionizatory, egzoszkielety rehabilitacyjne, przyrządy zaopatrzenia ortopedycznego itp.

Uważam, że opiniowaną pracę Pana mgra inż. Pawła Fudali cechuje interdyscyplinarne podejście do zagadnień modelowania układów o złożonej naturze fizycznej, co stanowi stosowny wkład w zakres budowy nowoczesnych siedzisk przeznaczonych dla osób niepełnosprawnych. Przeprowadzone analizy, opracowane metodyka badawcza, oraz przeprowadzone badania eksperymentalne świadczą o odpowiednim przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo - badawczej.

Recenzowana praca spełnia wymogi przewodu doktorskiego, określone w **Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki**.

Zatem uważam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Fudalego zatytułowana „*Wpływ parametrów geometrycznych na cechy ergonomiczne siedziska wózka dla osób niepełnosprawnych*” odpowiada w pełni wymogom stawianym pracom doktorskim w myśl ustawy i na tej podstawie stawiam wniosek Wysokiej Radzie Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Recenzent



**Dr hab. inż. Damian Gąsiorek, prof. nzw. w Pol. Śl.**

