

Studium projektowe biomechatronicznego aparatu wspomagającego drenaż limfatyczny kończyn dolnych i górnych

The biomechatronic study of a device supporting the lymphatic drainage of lower and upper limbs

Artykuł recenzowany

PIOTR PROCHOR¹,
ROMAN
TROCHIMCZUK²

¹ Katedra Inżynierii
Materiałowej i Biomedycznej,
Wydział Mechaniczny,
Politechnika Białostocka,
15-351 Białystok,
piotrekprochor@gmail.com

² Katedra Automatyki
i Robotyki,
Wydział Mechaniczny,
Politechnika Białostocka,
15-351 Białystok,
r.trochimczuk@pb.edu.pl

Słowa kluczowe:
konstrukcje biomedyczne,
drenaż limfatyczny,
obrzęk limfatyczny,
mechatronika

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia studium projektowe biomechatronicznego aparatu wspomagającego drenaż limfatyczny kończyn dolnych i górnych. Wprowadzenie do pracy wyjaśnia pojęcie obrzęku limfatycznego, opisuje jego obecność w życiu człowieka oraz przedstawia przyjęty, najczęściej stosowany, trójstopniowy podział tego schorzenia. Następnie przedstawiono najczęstsze sposoby kontroli obrzęku limfatycznego oraz przykłady urządzeń stosowanych w tego typu schorzeniu. W podsumowaniu pracy zawarto kierunki dalszych badań nad zaproponowaną konstrukcją.

Abstract

The following paper is a biomechatronic study of a device supporting the lymphatic drainage of lower and upper limbs. The first part explains the concept of lymphedema, describes its presence in human life and presents the most widely used three-stage division of the disease. It is followed by the most frequent ways to control lymphedema and examples of equipment used in this type of illness. It is concluded by the directions for further research on the proposed design.

WPROWADZENIE

Obrzęk limfatyczny jest schorzeniem obejmującym głównie kończyny dolne i górne, polegającym na nadmiernym magazynowaniu się płynu białkowego w naczyńkach limfatycznych [1]. Powstaje na skutek

uszkodzenia układu limfatycznego i może być wywołany ingerencją chirurgiczną, radioterapią, infekcją lub też zmianami nowotworowymi komórek [2, 3]. Powstała opuchlizna powoduje wzrost liczby komórek w miejscu schorzenia oraz sprzyja penetrowaniu

tkanek skórnych przez mikroorganizmy. Zazwyczaj skutkuje to rozwijającym się procesem zapalnym [3]. Na podstawie danych literaturowych można oszacować, że na obrzęk limfatyczny cierpi nawet 140 mln. ludzi na całym świecie [3].

Wyróżnia się kilka kryteriów podziału obrzęku limfatycznego. Głównym z nich jest trójstopniowy podział przyjęty przez World Health Organization [1]:

- stopień I – obrzęki palpacyjnie miękkie;
- stopień II – obrzęki palpacyjnie twarde;
- stopień III – tzw. słoniowacizna (elephantiasis) – znaczny wzrost objętości obrzęku, często kilkakrotnie większy niż objętość zdrowej kończyny.

Obrzęki I stopnia charakteryzują się tymczasowym ustępowaniem na skutek unoszenia kończyn oraz odpoczynku nocnego. Stopień II obrzęków cechuje natomiast brak możliwości ustąpienia na skutek wykonywanych w/w czynności. W przypadku stopnia III występuje postępowe zwiększanie się obwodu kończyny z obrzękiem limfatycznym. Uniemożliwia to wykonywanie ćwiczeń fizycznych jako formy rehabilitacji, ze względu na zbyt dużą masę kończyny.

Występowanie obrzęku limfatycznego stanowi nie tylko problem fizyczny, z racji na upośledzenie motoryki chorego, ale również problem natury emocjonalnej. Nadmierna opuchlizna obniża satysfakcję z życia codziennego, zarówno kobiet i mężczyzn dotkniętych tym schorzeniem. Równie często eliminuje całkowicie możliwość podjęcia pracy zawodowej [2].

Istnieje kilka sposobów kontroli obrzęku limfatycznego. Wśród nich można wymienić [1]:

- **kompresoterapię** – wywieranie ucisku na kończynę objętą obrzękiem w celu wywarcia możliwie dużego ucisku na całym jej obwodzie przy użyciu opasek [4-6], bandaży lub pończoch – należy jednak pamiętać, że metoda ta nie może być zastosowana w przypadku wystąpienia stanów zapalnych, owrzodzenia lub miażdżycy [1, 7];
- **drenaż limfatyczny** – punktowy, specjalistyczny masaż wykonywany przede wszystkim przez fizjoterapeutę [1, 8, 9], zazwyczaj ręcznie lub rzadziej przy użyciu wspomagającego oprzyrządowania [10-14], w celu pobudzenia układu limfatycznego (nakład siły musi być odpowiednio dostosowany do rodzaju obrzęku i powinien wynosić nie więcej niż 4 kPa [9]);
- **ćwiczenia fizyczne** – najprostsze metody, opierające się przede wszystkim na unoszeniu kończyn, skuteczne przy obrzękach I-go i w niektórych przypadkach II-go stopnia [1].

Możliwie najczęściej stosowanym z w/w sposobów jest drenaż limfatyczny. Pozwala on na najskuteczniejsze pobudzenie układu limfatycznego, przez kontrolowane przepychanie płynu białkowego (chłonki) w określonych i odpowiednich z punktu widzenia masażu kierunkach.

W niniejszej pracy zostanie przedstawiona koncepcja urządzenia do drenażu limfatycznego. Jej głównym celem jest umożliwienie użytkownikowi samodzielności w procesie kontrolowania obrzęku limfatycznego. Jednocześnie ma za zadanie zapewnić wysoką jakość przeprowadzanego procesu rehabilitacji.

CHARAKTERYSTYKA SPRZĘTU MEDYCZNEGO STOSOWANEGO W DRENAŻU LIMFATYCZNYM

Na podstawie przykładowych urządzeń [10-14], sprzęt medyczny stosowany do wspomaganego drenażu limfatycznego można podzielić na dwie główne kategorie: manualny (wymagający nakładu siły własnej) i pneumatyczny (automatyczny, programowalny). Sprzęt manualny [12, 14] w niektórych przypadkach zapewnia drenażowi zalety masażu palpacyjnego i wibracyjnego. Jednak ze względu na konieczność jego ręcznego używania, dokładność i dobór odpowiedniej siły masażu są trudne, a czasami wręcz niemożliwe. W przypadku stosowania sprzętu pneumatycznego [10,11] nieocenioną zaletą jest możliwość oddziaływania na całą powierzchnię obrzęku. Masaż z użyciem tych urządzeń ogranicza się jednak do posiadania zalet płynących głównie z wibracji, gdyż za pośrednictwem mankietów cyklicznie wypełnianych powietrzem trudno uzyskać odpowiednio wysoką, punktową siłę nacisku na obrzęk. Jednak żadne z w/w urządzeń, czy też innych dostępnych na rynku nie pozwala na odpowiednią i jednocześnie samodzielną (bez nakładu siły własnej) kontrolę obrzęku limfatycznego. Z tego powodu istnieje realna potrzeba tworzenia nowych i bardziej funkcjonalnych rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych do drenażu limfatycznego.

Obecnie jednym z najczęściej stosowanych urządzeń do wspomaganego drenażu limfatycznego jest Aquavibron [14]. To ręczne urządzenie z wymiennymi końcówkami, które używane jest do wytworzenia odpowiednich wibracji wspomagających proces masażu. Innym, prostszym konstrukcyjnie przyrządem jest rolka do drenażu limfatycznego [12]. Za jej pośrednictwem wykonuje się standardowy, manualny masaż, a jej zastosowanie sprowadza się jedynie do ochrony osoby wykonującej drenaż, przed ewentualnymi, zakaźnymi schorzeniami skórnymi. Jej budowa utrudnia jednak dobór odpowiedniej siły masażu, a także znacznie zmniejsza jego dokładność. Innym podejściem do drenażu limfatycznego jest zastosowanie pneumatycznych urządzeń obwodowo pobudzających układ limfatyczny schorowanej kończyny [10,11]. Charakteryzują się najczęściej odpowiednimi mankietami, w których krąży powietrze, masując w ten sposób obrzęk. Zalety i wady stosowanego sprzętu do przeprowadzania drenażu limfatycznego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zalety i wady stosowanego sprzętu do drenażu limfatycznego

| Kategoria sprzętu medycznego | Zalety | Wady |
|------------------------------|--|--|
| Manualny | <ul style="list-style-type: none"> prosta budowa, niska cena w porównaniu do rozwiązań pneumatycznych. | <ul style="list-style-type: none"> wymaga nakładu siły własnej, niska jakość przeprowadzanego procesu rehabilitacji, zazwyczaj musi być stosowany przez osoby 3-cie. |
| Pneumatyczny | <ul style="list-style-type: none"> oddziaływanie na cały obwód obrzęku limfatycznego, możliwość automatyzacji procesu. | <ul style="list-style-type: none"> w głównej mierze stosuje jedynie masaż wibracyjny, wysoka cena, skomplikowana budowa, niewielka ilość komercyjnych rozwiązań. |

ZAŁOŻENIA DO PROJEKTU WŁASNEGO ROZWIĄZANIA

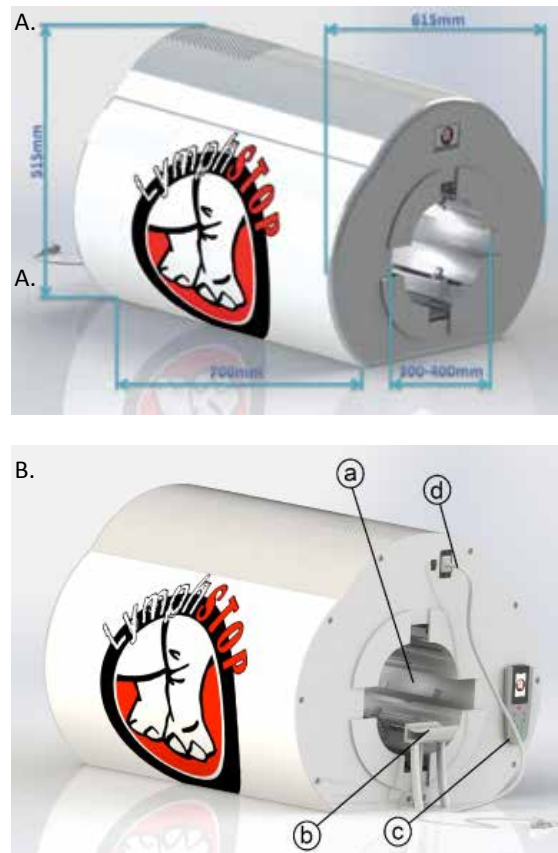
Odpowiedzią na potrzebę określoną w poprzednim rozdziale jest zaprojektowane przez autorów studium projektowe biomechatronicznego aparatu wspomagającego drenaż limfatyczny kończyn dolnych i górnych. W celu zapewnienia jego odpowiedniej funkcjonalności i innowacyjności w stosunku do obecnie użytkowanych urządzeń, poczyniono pewne założenia konstrukcyjne. Uwzględniały one przede wszystkim rozwiązanie wad w produktach komercyjnych, jak i również dodanie nowych, unikatowych cech zaprojektowanemu studium. Do głównych założeń konstrukcyjnych można zaliczyć:

- zapewnienie drenażowi limfatycznemu zalet płynących z masażu manualnego i masażu wibracyjnego w jednym produkcie;
- konstrukcja dopasowana do wymiarów centylowych (na podstawie modeli 50c [15]) długości kończyny dolnej i kończyny górnej oraz możliwość jej dostosowania (w określonym zakresie) do objętości obrzęku limfatycznego;
- zautomatyzowanie procesu rehabilitacji obrzęku limfatycznego;
- stabilność i kompaktowość konstrukcji przy zachowaniu niskiej masy urządzenia wynoszącej ok. 20 kg;
- możliwość bezprzewodowego sterowania urządzeniem;
- możliwość stosowania zarówno w warunkach szpitalnych jak i domowych;
- umożliwienie całkowitej samodzielności użytkownika w procesie kontroli obrzęku limfatycznego.

CHARAKTERYSTYKA ROZWIĄZANIA

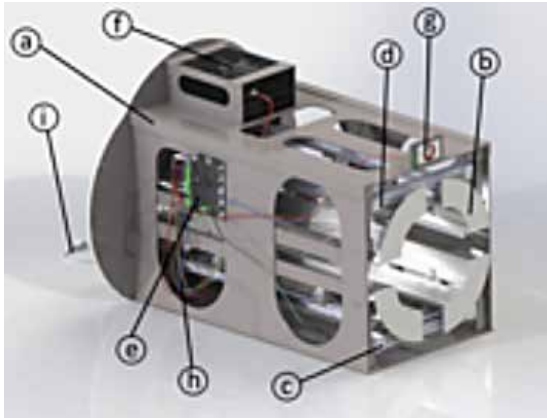
Na podstawie założeń konstrukcyjnych wymienionych w poprzednim rozdziale, powstała unikatowa konstrukcja o przyjętej nazwie „LymphSTOP”, która przedstawiona jest obok (rys. 1, rys. 2).

Najważniejszym elementem, umożliwiającym założone działanie zaprojektowanego urządzenia jest

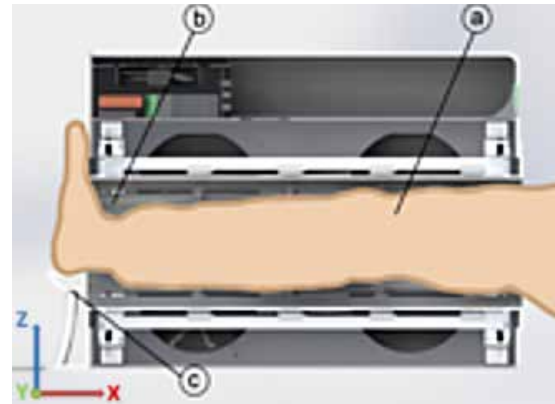


Rysunek 1. Studium projektowe biomechatronicznego aparatu wspomagającego drenaż limfatyczny kończyn dolnych i górnych „LymphSTOP”: A) widok z przodu z wymiarami gabarytowymi, B) widok z tyłu: a – 4-częściowy kanał wewnętrzny, b – podpórka pod kończynę dolną, c – pilot bezprzewodowy, d – kabel zasilający

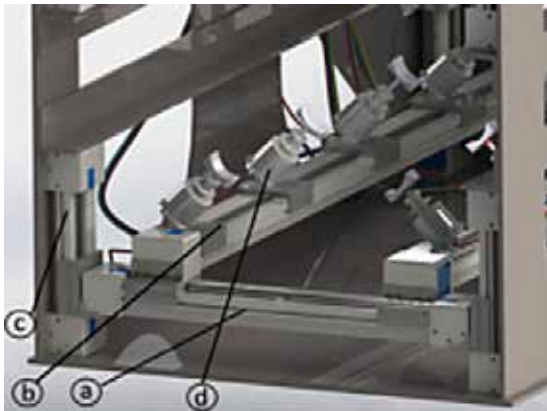
dwumodułowy układ prowadnic (rys. 3). Pozwala on na wykonanie procesu drenażu limfatycznego, przez zapewnienie ruchu posuwistego układów masujących (rys. 3 szczegóły d, h, rys. 5) wzdłuż kończyny. Sposób poruszania poszczególnych prowadnic (rys. 3 szczegóły a, b, c, e, f, g) jest przybliżony do działania obrabiarki sterowanej numerycznie (CNC).



Rysunek 2. Widok wnętrza „LymphSTOP”: a – rama, b – cztery częściowy kanał, c – dolny układ prowadnic, d – górny układ prowadnic, e – sterownik, f – zasilacz, g – wyświetlacz, h – przewody elektryczne, i – kabel zasilający



Rysunek 4. Urządzenie w momencie użytkowania po umieszczeniu w nim kończyny dolnej (przekrój przez urządzenie); a – kończyna dolna, b – kanał wewnętrzny, c – podpórka pod kończynę dolną

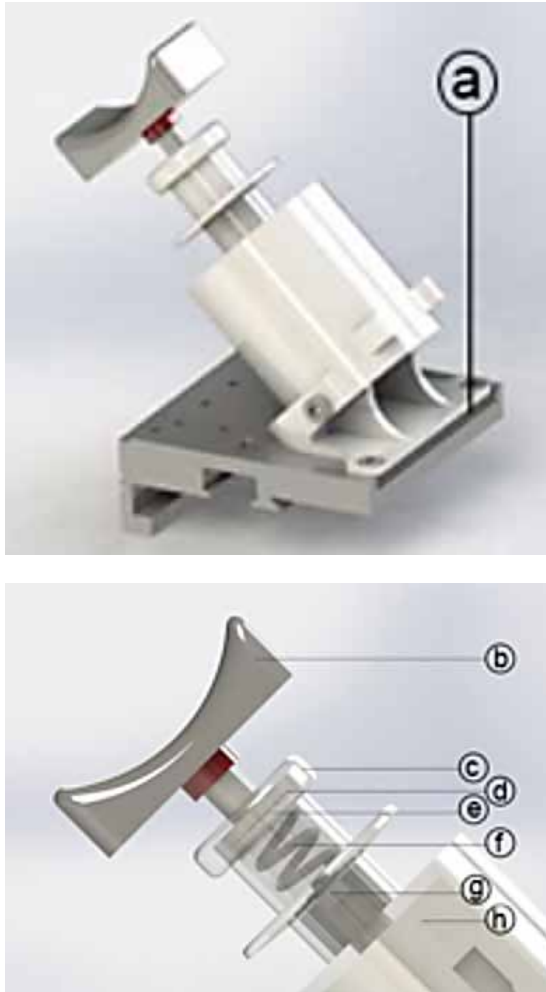


Rysunek 3. Dwumodułowy układ prowadnic A) moduł dolny: a – prowadnica dolna oś X, b – prowadnica dolna oś Y, c – prowadnica dolna oś Z, d – układ masujący dolny; B) moduł górny: e – prowadnica górna oś X, f – prowadnica górna oś Y, g – prowadnica górna oś Z, h – układ masujący górny

ISTOTA DZIAŁANIA PROPOWANEGO ROZWIĄZANIA APARATU DO DRENAŻU

Kończynę pacjenta górną lub dolną (rys. 4 szczegół a) z obrzękiem limfatycznym umieszcza się w kanale wewnętrznym urządzenia (rys. 2 szczegół b, rys. 4 szczegół b), którego rozmiar przy użyciu dwóch układów prowadnic (rys. 3) automatycznie jest dopasowywany do stopnia opuchlizny. Każdy z nich zawiera 8 prowadnic: 2 prowadnice dla osi X (rys. 3 szczegóły a, e), 2 prowadnice dla osi Y (rys. 3 szczegóły b, f) i 4 prowadnice dla osi Z (rys. 3 szczegóły c, g). Dopasowanie kanału do rozmiarów danej kończyny możliwe jest przez zastosowanie czujników nacisku (rys. 5 szczegół d), umieszczonych w układach masujących. Prowadnice Y i Z zmieniają położenie układów masujących, powodując nacisk ich końcówek (rys. 5 szczegół b) na kończynę. Końcówki naciskają na kończynę i wywołują wzrost rezystancji czujnika, co jest sygnałem przetwarzanym przez zastosowany układ mikroprocesorowy (rys. 2 szczegół e). W momencie osiągnięcia odpowiedniej siły oddziaływania końcówek masujących na kończynę, sterownik zatrzymuje dalszy ruch prowadnic Y i Z. Nacisk ten jest programowalny w zależności od intensywności drenażu limfatycznego, indywidualnie dobieranego do obrzęku pacjenta.

Po dostosowaniu kanału odbywa się drenaż limfatyczny, który zapewniają zaprojektowane układy masujące. Są one poruszane ruchem posuwistym wzdłuż kończyny przez prowadnice osi X, co nadaje drenażowi cechy masażu manualnego. Zalety masażu wibracyjnego nadane są przez umieszczenie wewnątrz układów masujących niewielkich silników elektrycznych (rys. 5 szczegół g) z asynchronicznym obciążeniem (rys. 5 szczegół h). W celu uniemożliwienia przenoszenia powstałych drgań na całą kon-



Rysunek 5. Układ masujący: A) widok ogólny: a – elastyczna podkładka; B) umiejscowienie elementów: b – końcówka masująca, c – blokada zewnętrzna gwintowana, d – czujnik nacisku, e – blokada wewnętrzna pod czujnik, f – sprężyna, g – asynchroniczne obciążenie, h – silnik elektryczny

strukcję, zastosowano odpowiednie elastyczne podkładki (rys. 5 szczegół a), które umieszczone zostały pod układami masującymi. W zaprojektowanych układach uwzględniono wymienne długości końcówek masujących, aby zwiększyć możliwości indywidualnej adaptacji urządzenia do obrzęku użytkownika.

Przewidziano również zastosowanie wymiennych kształtów końcówek masujących, dzięki czemu istnieje możliwość doboru dowolnego kształtu, optymalnego z punktu widzenia wykonywanego masażu. W zależności od stanu obrzęku, stopnia zaawansowania choroby oraz rodzaju i wielkości kończyny, istnieje możliwość indywidualnego dopasowania parametrów urządzenia, geometrii końcówek masujących i regulacji stopnia ich nacisku na ciało.

Zastosowany układ mikroprocesorowy nie tylko pozwala na dostosowanie położenia układów masujących względem kończyny, ale również służy do

programowania intensywności i sposobu masażu. W ten sposób można dobrać prędkość i rodzaj wzajemnego ruchu układów masujących, co jest istotne z punktu widzenia rodzaju obrzęku limfatycznego. Cykl masażu (czas, intensywność) jest każdorazowo dobierany przy użyciu bezprzewodowego pilota (rys. 1 szczegół c). Do zwiększenia funkcjonalności i ułatwienia użytkownika zaprojektowanego urządzenia, uwzględniono odpowiedni wyświetlacz LCD (rys. 2 szczegół g) umieszczony z przodu obudowy urządzenia. Wyświetlane są na nim bieżące informacje na temat wybranego procesu drenażu limfatycznego.

■ DYSKUSJA I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Obecnie opracowane i stosowane rozwiązania do kontroli obrzęku limfatycznego [4-6, 10-14] charakteryzują się brakiem możliwości pełnej automatyzacji masażu, odpowiedniego z punktu widzenia danego schorzenia. Często również wymagają odpowiedniego nakładu pracy własnej lub pomocy osoby trzeciej w użytkowaniu. Zaprezentowane studium projektowe biomechatronicznego aparatu wspomagającego drenaż limfatyczny kończyn dolnych i górnych jest propozycją rozwiązania istniejących problemów. Uwzględnione cechy konstrukcyjne pozwalają wykonywać drenaż limfatyczny, posiadający zalety masażu manualnego (wykonywanego w dzisiejszych czasach głównie przez wykwalifikowanego fizjoterapeuty) i wibracyjnego (w tej chwili możliwego do uzyskania jedynie przez określoną grupę urządzeń medycznych).

Zastosowane elementy mechatroniczne takie jak czujniki siły nacisku, czy też układ mikroprocesorowy, pozwalają na zautomatyzowanie całego procesu drenażu i jego odpowiednie dostosowanie do indywidualnych potrzeb użytkownika. Umożliwiają one również dowolną programowalność sposobów masażu, co dodatkowo zwiększa możliwy stopień indywidualnego dobierania do pacjenta. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego kontrolera i wyświetlacza urządzenie jest łatwe zarówno dla fizjoterapeuty, jak i samego użytkownika. Nieocenioną zaletą jest również umożliwienie korzystania z urządzenia w warunkach szpitalnych jak i domowych. Ze względu na unikatowe cechy, zaprezentowana konstrukcja została zgłoszona jako wynalazek w Urzędzie Patentowym RP [18] oraz przeszła do finału Konkursu Technotalenty 2015.

W ramach dalszych badań nad prototypem opisanego rozwiązania planowane są badania numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych, mające na celu znalezienie optymalnego geometrii i rozmiaru końcówki masującej w zależności od stopnia obrzęku limfatycznego. Dodatkowo w przyszłych badaniach będą uwzględniane parametry materiału zastosowanego na końcówkę masują-

cą, wpływy prędkości i przyspieszeń przemieszczania układu masującego, wpływu wibracji i temperatury na efektywność drenażu, powstałych w trakcie użytkowania systemu. W rezultacie utworzony zostanie typoszereg końcówek dostarczanych razem z zakupionym urządzeniem.

Kolejnym etapem rozwoju projektu powinno być opracowanie prototypu konstrukcji i przetestowanie jej na odpowiedniej grupie pacjentów. Dzięki temu umożliwiona byłaby optymalizacja urządzenia pod względem zaobserwowanych wad i ostatecznie wprowadzenie jej na rynek urządzeń medycznych.

Źródła finansowania: Pracę wykonano w ramach projektów MB/WM/17/2016, S/WM/1/2016 i sfinansowano ze środków Funduszu Dydaktycznego Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Addiss D., Bettinger J., Dreyer G., Dreyer P., Norões J., Rio F.: Lymphoedema Staff Manual: Treatment and Prevention of Problems Associated with Lymphatic Filariasis: Part 1. Learner's Guide, World Health Organization, Geneva, Switzerland, November 2001 r.
- [2] Burt J., White G.: A breast cancer patient's guide to prevention and healing, ISBN-13: 978-0-89793-458-9, wyd. Hunter House Publishers 2005 r.
- [3] Brorson H., Ohlin K., Olsson G., Svensson B., Svensson H.: Controlled compression and liposuction treatment for lower extremity lymphedema, *Lymphology* vol. 41, pages 52-63, Sweden 2008 r.
- [4] Barbe-Vicuna L., Hamers HP.: U.S. Patent (nr US5800245A), Compression brassiere and pad for manual lymphatic drainage, data publikacji 1.09.1998.
- [5] Sher JI.: U.S. Patent (nr US5940888A), Lymphatic circulation enhancer, data publikacji 24.09.1999.
- [6] Mankovitz RJ.: U.S. Patent (nr US6086450A), Brassieres which facilitate the drainage of lymphatic fluid from the breast area of the human female, data publikacji 11.07.2000.
- [7] Albertsson M., Ekdahl C., Ingvar C., Johansson K.: Effects of compression bandaging with or without manual lymph drainage treatment in patients with postoperative arm lymphedema, *Departments of Physical Therapy, Oncology and Surgery, Lund University Hospital, Lund, Lymphology* vol. 32, pages 103-110, Sweden 1999 r.
- [8] Avendaño C., Hernández M.A., Martínez H., Martín M.L., Rodríguez F.: Manual lymphatic drainage therapy in patients with breast cancer related lymphoedema, *BMC Cancer* vol. 11, 2011 r.
- [9] French R. M.: *Milady's guide to lymph drainage massage*, ISBN: 1-4018-2472-2, wyd. Thomson Delmar Learning 2004 r.
- [10] Logan K., Logan K.: U.S. Patent (nr US20140088476A1), Intermittent pneumatic compression device, data publikacji 27.03.2014.
- [11] McEwen JA., Jameson M., Nakane JJ.: U.S. Patent (nr US6440093B1), Apparatus and method for monitoring pneumatic limb compression therapy, data publikacji 27.08.2002.
- [12] Caldriola R.: U.S. Patent (nr US20140148744A1), Roller device for lymphatic drainage treatments, data publikacji 29.05.2014.
- [13] Chubinsky V.: U.S. Patent (nr US5843005A), Device for deep tissue massage and ionic therapy, data publikacji 1.12.1998.
- [14] Latosiewicz R., Majcher P., Zaworski K.: Effectiveness of physiotherapeutic treatment of the upper limb lymphedema after a mastectomy procedure, *Medical Rehabilitation* vol. 18, pages 4-10, ISSN 1427-9622, 2014 r.
- [15] Gedliczka A.: *Atlas miar człowieka*, Centralny Instytut Ochrony Pracy, ISBN 83-88703-38-2, Warszawa 2001.
- [16] Materiały firmy BOTLAND; strona internetowa www.botland.com.pl [dostęp: 27.10.2015].
- [17] Materiały firmy CNCshop; strona internetowa www.cncshop.cz [dostęp: 27.10.2015].
- [18] Prochor P., Wróblewska J., Trochimczuk R., Mechatroniczne urządzenie do drenażu limfatycznego; Wniosek o zgłoszenie wynalazku nr P.411811.