

# Mechatroniczne urządzenie rehabilitacyjne zbudowane na bazie pozycjonera planarnego

## Mechatronic rehabilitation device based on a planar positioning system

TOMASZ HUŚCIO  
ROMAN TROCHIMCZUK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.10.519

Przedstawiono rozwiązanie mechatronicznego urządzenia rehabilitacyjnego wspomagającego bierne i aktywne ćwiczenia osób z dysfunkcjami ruchowymi kończyny górnej w obrębie stawu łokciowego i barkowego. Bazą do stworzenia tego rozwiązania był mechatroniczny pozycjoner planarny z łożyskowaniem aerostatycznym, zintegrowany z autorskim oprogramowaniem i specjalnym systemem sterującym. Zastosowanie w pozycjonersze sprężonego powietrza – jako czynnika smarującego – praktycznie eliminuje opory tarcia, będące główną przyczyną drgań relaksacyjnych w układzie. Ponadto zaprezentowano wybrane rozwiązania urządzeń do ćwiczeń biernych i aktywnych. Opisano budowę i zasadę działania współrzędnościowego pozycjonera planarnego, a także elementy zbudowanego systemu przeznaczonego do wspomagania terapii prowadzonej przez rehabilitanta. System w podstawowej konfiguracji umożliwia zadawanie ruchów w płaszczyźnie poziomej, z dopasowaniem ich właściwych trajektorii, dla określonych wartości prędkości i przyspieszenia. W konfiguracji rozszerzonej (dzięki możliwości umieszczenia pozycjonera planarnego na blacie stołu rehabilitacyjnego, pozwalającego na zmianę kąta nachylenia pozycjonera względem osoby ćwiczącej) ruch roboczy kończyny może być realizowany również w płaszczyźnie pionowej, co wydaje się istotne w przypadku niektórych form rehabilitacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** urządzenie mechatroniczne, rehabilitacja, pozycjoner planarny

*This article presents a mechatronic solution of a rehabilitation devices supporting active and passive exercises for persons with motor dysfunctions of the upper limb in the area of the elbow and shoulder joints. A mechatronic planar positioner with aerostatic lubrication (aerostatic bearing), integrated with original software and a control system, served as the basis for creating the present solution. The application of compressed air as a lubricant practically eliminates frictional resistance, which is the main cause of relaxation oscillations in the system. Selected solutions of devices for active and passive exercises are presented. The design and operating principle of the planar coordinate positioner are described. Next, the components of the designed system for supporting therapy conducted by a rehabilitation specialist are presented. In its basic configuration, the system enables the performance of movements in the horizontal plane with adjustment of their proper trajectories, at preset values of speed and acceleration. In the expanded configuration, thanks to the possibility of placing a planar positioner on the top of a rehabilitation table that would provide the capability of changing the positioner's angle of inclination relative to the exercising person, the limb's working movement can also be performed in the sagittal (vertical) plane, which may be important in certain forms of rehabilitation.*

**KEYWORDS:** mechatronic system, rehabilitation process, planar positioning system

Wydłużenie przeciętnego okresu życia człowieka, późniejsze odchodzenie na emeryturę, propagowanie przez media aktywnego spędzania wolnego czasu sprawiają, że współczesna medycyna musi sprostać nowym wyzwaniom. To, co jeszcze kilkanaście lat temu z medycznego punktu widzenia

było trudne lub niemożliwe do zrealizowania, obecnie coraz częściej da się wykonać. Wynika to m.in. z faktu, że w typowej praktyce medycznej i rehabilitacyjnej stosuje się ultranowoczesne narzędzia i urządzenia mechatroniczne wspomagające czynności lekarzy i rehabilitantów. Przykładowo, wprowadzenie robotów na sale operacyjne i powierzenie im części procedur chirurgicznych jest zasadne nie tylko z punktu widzenia precyzji, z jaką roboty wykonują dane czynności, lecz przede wszystkim dlatego, że pozwala na skrócenie okresu rekonwalescencji pacjenta, a w konsekwencji na jego szybszy powrót do normalnego życia i pracy.

Pośród wielu technik rehabilitacji na szczególną uwagę zasługują rozwiązania wspomagające kinezyterapię ogólną i miejscową. Leczenie ruchem (gimnastyka lecznicza) ma na celu maksymalne usunięcie niesprawności fizycznej lub przygotowanie do dalszej rehabilitacji. Osobom, które z różnych przyczyn mogą utracić pewne funkcje ruchowe w obrębie kończyn (np. na skutek urazów mechanicznych lub neurologicznych, przebytych chorób albo wad wrodzonych), zależy na szybkim powrocie do pełnej sprawności. Głównym celem działań pacjenta i rehabilitanta jest zatem przywrócenie pacjentowi wszystkich funkcji pierwotnych bądź maksymalizacja czynności ruchowych w przypadku nieodwracalnego stanu schorzenia. Rehabilitacja kończyny górnej może polegać na pracy nad mięśniami i stawami – od obręczy barkowej, przez łokieć i nadgarstek, po palce dłoni. W zależności od rodzaju dysfunkcji, a także jej przyczyny, wykorzystuje się różne środki techniczne i typy ćwiczeń ruchowych:

- bierne,
- izometryczne – zmieniające napięcie mięśnia bez zmiany jego długości,
- czynno-bierne – wspomagane przez terapeutę, lecz wykorzystujące siłę pacjenta,
- samowspomagane, podczas których pacjent siłą mięśni kończyny zdrowej wspomaga chorą,
- czynne w odciążeniu,
- czynne z obciążeniem.

W trakcie ćwiczeń, a zwłaszcza podczas pierwszych powtórzeń, wskazana jest obecność rehabilitanta, który sprawuje kontrolę nad ich zakresem i poprawnością wykonania. Zastosowanie urządzeń wspomagających rehabilitację pozwala zredukować czas poświęcany jednemu pacjentowi.

Przedstawione w artykule autorskie urządzenie rehabilitacyjne wspomaga bierne i aktywne ćwiczenia ruchowe osób z dysfunkcjami kończyny górnej w obrębie stawu łokciowego i barkowego. Rozwiązanie to bazuje na mechatronicznym pozycjonersze planarnym z łożyskowaniem aerostatycznym, który jest zintegrowany z autorskim oprogramowaniem i systemem sterującym. Zastosowanie sprężonego powietrza jako czynnika smarującego praktycznie eliminuje opory tarcia (współczynnik tarcia wynosi  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ ), a więc główną przyczynę drgań relaksacyjnych (zjawisko *stick-slip*) [19, 20].

### Wybrane systemy do rehabilitacji kończyn górnych

Współczesny rynek oferuje wiele gotowych urządzeń, które wspomagają rehabilitanta bądź wyręczają go w określonych czynnościach związanych z wykonywaniem przez pacjenta biernych i aktywnych ćwiczeń ruchowych kończyn górnych. Do najprostszych przyrządów wspomagających

\* Dr inż. Tomasz Huścio (t.huscio@pb.edu.pl), dr inż. Roman Trochimczuk (r.trochimczuk@pb.edu.pl) – Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej

gimnastykę leczniczą zalicza się m.in.: przyrządy do ściskania dłoni (ściski, piłeczki itp.), siatki i gumki do rozciągania, drabinki i drążki do podciągania, ciężarki. Ich przykładowe konstrukcje można obejrzeć na stronach internetowych firm zajmujących się sprzedażą sprzętu rehabilitacyjnego i ortopedycznego [6].

Drugą grupę stanowią mechaniczne przyrządy do rozciągania, zginania i odwodzenia kończyny, a także proste przyrządy pozwalające na podparcie kończyny oraz jej ruchliwość w określonym stawie – najczęściej łokciowym lub barkowym. Wybrane rozwiązania zaprezentowano w pracach [9, 11]. Grupę tę uzupełniają szyny CPM (*continuous passive motion*) przeznaczone do ciągłej, biernej mobilizacji stawów i mięśni pacjentów z porażeniami wiotkimi, spastycznymi lub też z niedowładem o znacznym stopniu [1, 7, 8]. Te urządzenia są przeznaczone do ćwiczeń na jedną, wybraną kończynę lub wykonywanych równocześnie przez dwie kończyny.

Łącznikiem pomiędzy systemami biernymi i aktywnymi są typowe systemy oporowe. Urządzenia te składają się zazwyczaj z cięgien z dodatkowymi obciążeniami. Poprzez system dźwigni oraz dobierane przez rehabilitanta obciążenia i zakres ruchu pacjent aktywnie pobudza kończynę do pracy, sukcesywnie wzmacniając jej mięśnie i zwiększając zakres ruchu – ROM (*range of motion*).

Kolejną grupę stanowią zaawansowane technicznie biologiczne urządzenia, tj. egzoszkielety o różnym stopniu funkcjonalności. Urządzenia te wspomagają utracone funkcje nerwowo-mięśniowe kończyn górnych i dolnych. Przykładowe rozwiązania zaprezentowano w [12, 13]. Na uwagę zasługuje egzoszkielec rehabilitacyjny LUNA EMG firmy EgzoTech z Gliwic. Robot prowadzi automatyczną rehabilitację ruchową pacjenta z wykorzystaniem elektromiografii [22].

Niektóre z wymienionych rozwiązań dają możliwość wykonywania złożonego ruchu ramienia tylko w płaszczyźnie poziomej, a inne w płaszczyźnie pionowej (naturalnej dla wielu ruchów kończyn górnych). Istnieją też systemy pozwalające na łączenie obu płaszczyzn ruchu. W trakcie takich ćwiczeń kończyna górna (jej poszczególne człony) jest zginana/rozszerzana w stawach – zachodzi jej rotacja w kierunku supinacji i pronacji. Bez względu na zastosowane rozwiązanie należy jednak pamiętać, że ma ono za zadanie powiększyć zakres ruchliwości (ROM) kończyny górnej w określonych stawach i nie może być rekomendowane jako jedyna metoda rehabilitacji.

### Charakterystyka pozycjonera planarnego

Głównymi elementami planarnego układu pozycjonującego (rys. 1) są induktor (podpora współrzędnościowa) i stator (nieruchoma podstawa). Podpora przemieszcza się bezstykowo po nieruchomej podstawie dzięki zastosowaniu łożyskowania aerostatycznego. Pomiędzy podporą a podstawą znajduje się poduszka powietrzna, dlatego opory tarcia w układzie są na tyle małe, że ich wpływ na dokładność pozycjonowania można pominąć.

Induktor (rys. 2) składa się z: aluminiowej ramy, modułów elektromagnetycznych i instalacji pneumatycznej (zespołu przygotowania sprężonego powietrza – reduktora i filtra, przewodu zasilającego, otworów dławiących, komory nośnej, rowków rozprowadzających powietrze).

Powierzchnia nośna podpory zawiera dwie grupy ortogonalnych elektromagnetycznych modułów (I i II), które odpowiadają za przemieszczanie się podpory względem podstawy oraz przyciąganie podpory do podstawy. Moduły I odpowiadają za przesunięcie podpory wzdłuż osi X, a moduły II – wzdłuż osi Y.

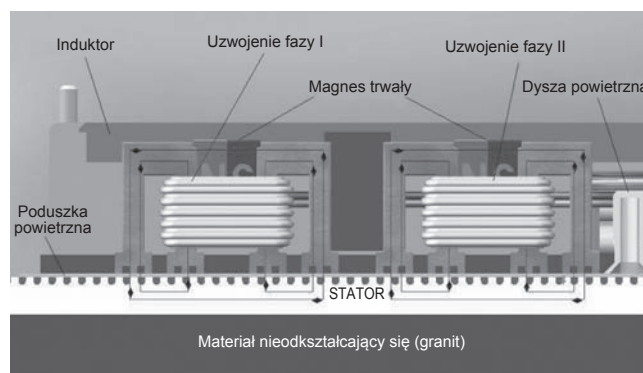
Na rys. 3 pokazano położenie podpory w zależności od sił występujących w układzie. Szywność  $j$  układu „podpora – szczelina powietrzna – podstawa” określa się jako stosunek przyrostu obciążenia zewnętrznego  $\Delta P_r$  do zmiany wysokości szczeliny powietrznej  $\Delta h$  wywołanej tą zmianą obciążenia:

$$j = \frac{\Delta P_r}{\Delta h}$$

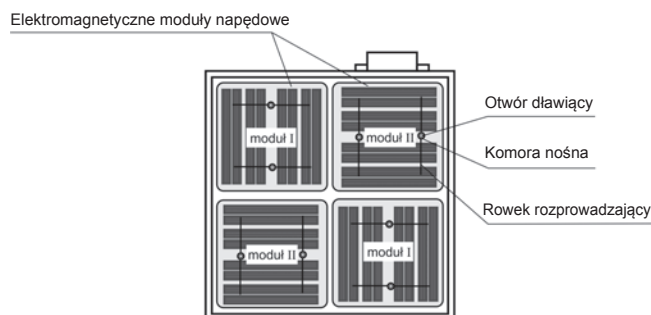
Siła nośna podpory  $F_n$  (siła reakcji warstwy powietrznej) równoważy obciążenia wynikające z sił ciężkości (sumy ciężaru podpory  $P_p$  oraz ciężaru przedmiotów zamocowanych na podporze, stanowiącego obciążenie robocze  $P_r$ ) i sił magnetycznego przyciągania  $F_p$ . Siła przyciągania podpory do podstawy  $F_p$  powstaje wskutek przyciągania magnesów trwałych (wchodzących w skład modułów elektromagnetycznych) do ferromagnetycznej (stalowej) podstawy.

Warunek równowagi sił w układzie „podpora – szczelina powietrzna – podstawa” ma postać:

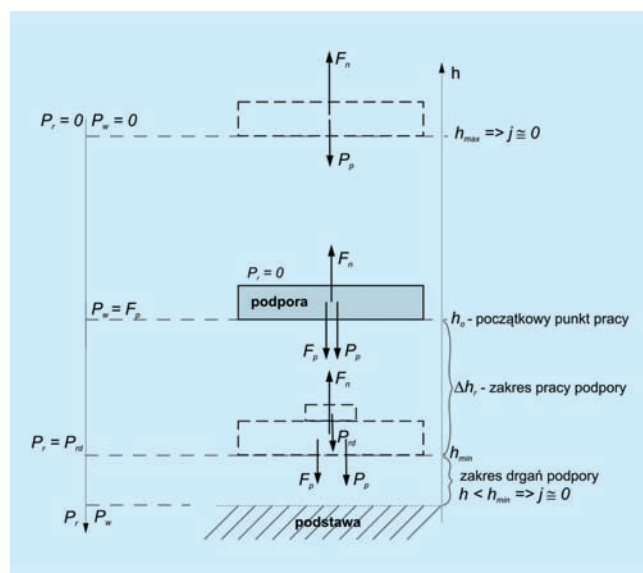
$$F_n = P_p + P_r + F_p$$



Rys. 1. Przekrój poprzeczny pozycjonera planarnego [5]



Rys. 2. Powierzchnia nośna podpory współrzędnościowej [21]



Rys. 3. Położenie podpory w zależności od sił występujących w układzie [21]

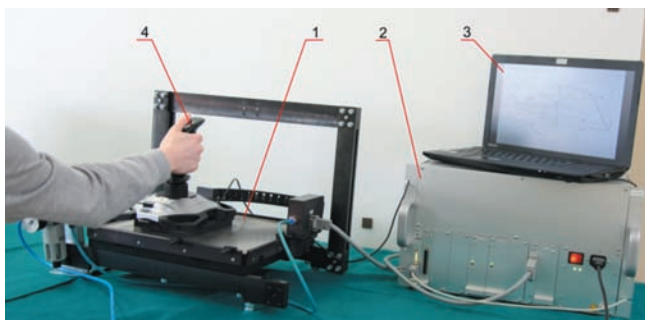
W przypadku opracowanego urządzenia rehabilitacyjnego obciążeniem roboczym  $P_r$  jest ciężar rehabilitowanej kończyny górnej znajdującej się na podporze.

### Elementy mechatronicznego systemu rehabilitacyjnego

Elementy mechatronicznego systemu rehabilitacyjnego wspomagającego biernie i aktywne ćwiczenia osób z dysfunkcjami ruchowymi kończyny górnej przedstawiono na rys. 4.

Uchwyt stanowi kontroler do gier Extreme 3D Pro firmy Logitech. Zaprojektowany przez producenta ergonomiczny kształt zadajnika (konturowe krzywizny) przekłada się na optymalne dopasowanie urządzenia do ręki człowieka i stabilność uchwytu. Szersza podstawa zapewnia wsparcie ćwiczonej ręki w trakcie długotrwałych ćwiczeń biernych.

Opracowany system jest programowalny. Umożliwia wykonywanie poszczególnych zadań terapeutycznych z zachowaniem niezmiennych części sprzętowej. Realizacja kolejnych etapów oraz faz ćwiczeń wymaga jedynie zmiany zawartości pamięci programu komputerowego.



Rys. 4. Elementy mechatronicznego systemu rehabilitacyjnego: 1 – pozycjoner planarny, 2 – karta sterująca przemieszczeniami podpory, 3 – komputer z oprogramowaniem sterującym, 4 – uchwyt zamontowany na podporze

### Terapia kończyny górnej z wykorzystaniem mechatronicznego urządzenia rehabilitacyjnego

Umożliwienie pacjentowi wykonania ruchu ręką podczas terapii kończyny górnej wymaga:

- wyeliminowania obciążenia – w przypadku ćwiczeń biernych,
- kontrolowanego zmniejszania obciążenia układu kostno-mięśniowego – w przypadku ćwiczeń aktywnych z odciążeniem.

Bez odciążenia wykonywanie ruchów wymaganych podczas terapii nie byłoby możliwe ze względu na osłabienie mięśni lub odczuwanie przez pacjenta ból w stawach. Efekt odciążenia zapewniają nośne powierzchnie poślizgowe podpory współrzędnościowego pozycjonera planarnego. Ręka pacjenta jest przesuwana za pomocą podpory po określonej trajektorii zgodnie z treningowym programem sterującym. Dzięki odciążeniu ręki jej ruch jest płynny i precyzyjny, co przekłada się na efektywność terapii. Kolejnym etapem terapii mogą być ćwiczenia bez odciążenia, a następnie – w zależności od poczynionych przez pacjenta postępów i jego możliwości – ćwiczenia z odpowiednio dobranym oporem.

Położenie pozycjonera podczas ćwiczeń bez odciążenia oraz ćwiczeń z oporem jest określane za pomocą czujnika Halla zainstalowanego na podporze. Ćwiczenia bez odciążenia polegają na przesunięciu podpory zgodnie z trajektorią wyświetlaną na ekranie monitora. Pacjent obserwuje trajektorię, po której powinna się przemieszczać jego ręka, oraz trajektorię rzeczywistą. Z kolei w przypadku ćwiczeń z oporem pacjent musi dodatkowo przesunąć wirtualne przedmioty – przeszkody. Podczas przesuwania danego wirtualnego przedmiotu na dotykowym urządzeniu wejściowym (tj. podporze) generowana jest siła, którą pacjent musi pokonać [2].

Ponadto w zależności od zaangażowania w terapię pacjent jest stymulowany dźwiękowo. Informacje zwrotne motywują pacjenta do intensywnych, zaleconych ćwiczeń.

Sterowanie podpory, odpowiednio do żądanej trajektorii, odbywa się zgodnie z treningowym programem komputerowym zainstalowanym na komputerze. Specjalnie przygotowany program komputerowy umożliwia realizację kolejnych etapów treningu bez konieczności dokonywania zmian części sprzętowej.

### Podsumowanie

Omówiony w artykule autorski mechatroniczny system rehabilitacyjny do ćwiczeń ruchowych kończyn górnych powstał po konsultacjach ze specjalistami z dziedziny rehabilitacji. Na razie jest prototypem. W docelowym urządzeniu zostanie wykorzystana podstawa (stator) o większej powierzchni, dzięki czemu zwiększą się przestrzeń robocza i zakresy możliwych przemieszczeń.

Proponowane rozwiązanie z powodzeniem będzie można stosować w miejscowej kinezyterapii kończyny górnej w odniesieniu do stawu barkowego i łokciowego.

W przypadku zastosowania przedstawionego urządzenia ćwiczenia biernie są wykonywane bez czynnego udziału pacjenta, co zapewnia podpora (induktor) współrzędnościowego pozycjonera planarnego, na której znajduje się ćwiczona kończyna. Podpora przemieszcza się bezstykowo po podstawie i umożliwia bezpieczne przywracanie sprawności rehabilitowanej kończyny górnej, stopniowo zwiększając jej zakres ruchów. Pacjent dopasowuje zakresy ruchu do swoich możliwości, samopoczucia i progę bólu, co pozwala zmniejszyć stany lękowe oraz dyskomfort podczas wykonywania ćwiczeń.

Urządzenie może być również stosowane w kolejnych fazach rehabilitacji bazujących na aktywnych ćwiczeniach ruchowych.

### LITERATURA

1. Trochimczuk R., Kuźmierowski T. „Kinematic analysis of CPM machine supporting to rehabilitation process after surgical knee arthroscopy and arthroplasty”. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 19, No. 4 (2014): pp. 841+848.
2. Hućcio T. „Płaska aerostatyczna podpora współrzędnościowa z elektromagnetycznym napędem jako urządzenie haptyczne do terapii kończyny górnej”. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2014: s. 153+160.
3. Hućcio T. „Haptic devices based on planar stepping motor”. *Solid State Phenomena*. Durnten-Zurich: Trans-Tech Publication, 2013: pp. 372+377.
4. Kuźmierowski T., Trochimczuk R. „Application of planar positioning system in selected mechatronic structure”. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 17, No. 4 (2012): pp. 1377+1384.
5. Trochimczuk R. „Mechatroniczne pozycjonowanie wiązki lasera impulsowego w urządzeniach do formowania obiektów trójwymiarowych w szkłe”. Rozprawa doktorska. Kraków: AGH, 2009.
6. Strona internetowa: [www.zdrowapolka.pl/category/dla-twojego-zdrowia-cwiczenia-i-rehabilitacja-reki-dloni-palcow/2](http://www.zdrowapolka.pl/category/dla-twojego-zdrowia-cwiczenia-i-rehabilitacja-reki-dloni-palcow/2) (dostęp: 26.05.2015).
7. O'Driscoll S.W., Giori N.J. „Continuous passive motion (CPM): theory and principles of clinical application”. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. Vol. 37, No. 2 (2000): pp. 179+188.
8. Saringer J. „Engineering aspect of the design and construction of continuous passive motion device for humans”. Salter R. „Continuous Passive Motion: A Biological Concept for the Healing and Regeneration of Articular Cartilage, Ligaments, and Tendons”. From Origination to Research to Clinical. Baltimore: Williams&Wilkins, 1993.
9. Jin, XueJun et al. „Workspace analysis of upper limb for a planar cable-driven parallel robots toward upper limb rehabilitation”. *Control, Automation and Systems (ICCAS)*. 14th International Conference on IEEE. (2014): pp. 352+356.
10. Kaewboon W., Phukpattaranont P., Limsakul Ch. „Upper limbs rehabilitation system for stroke patient with biofeedback and force”. *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*. 6th IEEE. (2013): pp. 1+5.

11. Jeong-Ho Park, Kyoung-Soub Lee, Kyeong-Hun Jeon, Dong-Hyun Kim, Hyung-Soon Park. „Low cost and light-weight multi-DOF exoskeleton for comprehensive upper limb rehabilitation”. *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) – 11th International Conference*. 12÷15 Nov. 2014: pp. 138–139.
12. Yong-Kwun Lee. „Design of exoskeleton robotic hand/arm system for upper limbs rehabilitation considering mobility and portability”. *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 11th International Conference*. 12÷15 Nov. 2014: pp. 540÷544.
13. Pignolo L., Dolce G., Basta G., Lucca L.F., Serra S., Sannita W.G. „Upper limb rehabilitation after stroke: Aramis a „robomechatronic” innovative approach and prototype”. *4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, Roma, Italy. June 24÷27 2012: pp. 1410÷1413.
14. T. Hušcio, Falkowski K. „Modeling of magnetic attraction force of electromagnetic module in a relative base-air-gap-absolute base system”. *Solid State Phenomena*. Zurich: Trans Tech Publications, 2009.
15. Kiwerski J. „Fizjoterapia ogólna”. Warszawa: PZWL, 2012.
16. Kwolek A. (red.). „Rehabilitacja medyczna”. T. 1–2. Wrocław: Elsevier Urban & Partner, 2011÷2013.
17. Garrison S.J. „Podstawy rehabilitacji i medycyny fizykanej”. Warszawa: PZWL, 1997.
18. Zembaty A. (red.). „Kinezyterapia”. T. 1–2. Kraków: Wydawnictwo Kasper, 2002÷2003.
19. Wiercioch W. „Konstrukcja i zastosowanie przewodnic aerostatycznych”. *Mechanik*. Nr 4 (1981).
20. Wiercioch W. „Parametry konstrukcyjno-technologiczne aerostatycznych połączeń przewodnicowych”. *Trybologia*. Nr 3 (1988).
21. Hušcio T. „Modelowanie płaskich podpór pneumatycznych z napędem elektromagnetycznych”. Rozprawa doktorska. Białystok: Politechnika Białostocka, 2009.
22. Serwis internetowy firmy EgzoTech: [www.egzotech.com](http://www.egzotech.com) (dostęp: 29.06.2015). ■