

doi:10.15199/48.2017.10.05

Zadawanie i programowa kontrola obciążeń w rehabilitacji narządów ruchu

Streszczenie. Urządzenia rehabilitacyjno-diagnostyczne służą do rzetelnej i obiektywnej oceny postępów podczas rehabilitacji pacjenta. Autorzy niniejszego artykułu opracowali koncepcje układu sterująco-pomiarowego do zadawania i kontroli obciążenia badanego stawu z wykorzystaniem modułu akwizycji danych NI 6351 oraz środowiska labVIEW firmy National Instruments.

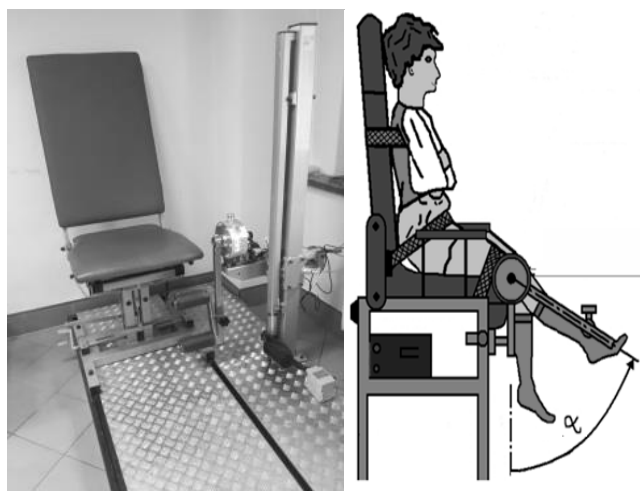
Abstract. Rehabilitation and diagnostic devices can be used to assess progress objectively in during rehabilitation of patient. The authors of this article have developed concepts of control and measuring unit. The system allows controlling load torque of joint and muscles limbs. The authors used data acquisition module NI 6351 and development environment LabVIEW from National Instruments. **(Programmable load control device in rehabilitation of movement organs).**

Słowa kluczowe: moment siły, sterowanie obciążeniem, akwizycja danych

Keywords: Torque, load control, data acquisition

Wstęp

Urządzenia rehabilitacyjno-diagnostyczne pozwalają monitorować zmiany zakresu ruchu głównych stawów człowieka, zadawać obciążenia izokinetyczne i izotoniczne oraz generować różne funkcje oporowe podczas wykonywania ćwiczeń [2,4]. W Instytucie Systemów Elektronicznych WAT zostało opracowane uniwersalne stanowisko do pomiarów dynamicznych, statycznych i ćwiczeń rehabilitacyjnych mięśni stawu kolanowego. Urządzenie umożliwia realizację kompleksowych badań zarówno lewej jak i prawej kończyny człowieka dla funkcji prostowania i zginania. Badania mogą być prowadzone w okresie procesu rehabilitacji po przebytych urazach lub operacjach. Inną dziedziną są badania wydolnościowe mięśni np. sportowców w ośrodkach sportowo-lekarskich. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko diagnostyczne

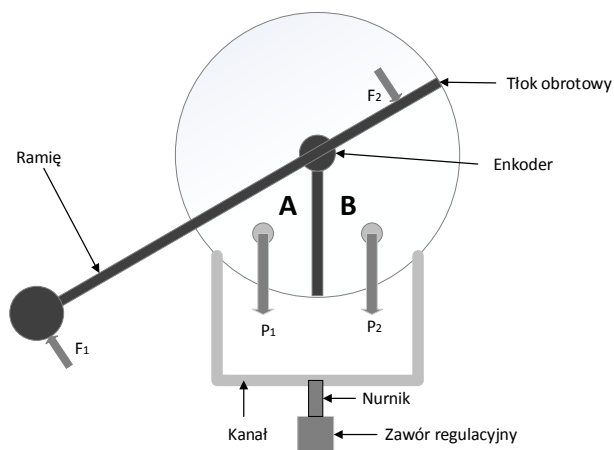
Zasadniczym podzespołem tego urządzenia jest głowica hydrauliczna (rys. 2) umożliwiająca zadawanie obciążenia, pomiar położenia kąтового stawu oraz pomiar momentu siły. Jej funkcjonalność jest możliwa dzięki zastosowaniu następujących elementów:

- 1) przetworników ciśnienia MBS 3000 firmy Danfoss,
- 2) enkoder optycznego MOK40 firmy WObit
- 3) silnika krokowego 42BYGH802U firmy WObit



Rys. 2. Głowica hydrauliczna

Uproszczony schemat głowicy przedstawiono na rysunku 3. Tłok obrotowy z odpowiednio ukształtowaną obudową dzieli cylinder na dwie komory: A oraz B. Wnętrze głowicy wypełnione jest olejem hydraulicznym o odpowiednich właściwościach. Przyłożenie siły do ramienia F_1 powoduje powstawanie siły F_2 . Przemieszczenie tłoka obrotowego zmienia objętości komór a tym samym wytwarza nadciśnienie P_2 oraz podciśnienie P_1 .



Rys. 3. Schemat głowicy hydraulicznej

Różnica ciśnień wytwarza przepływ oleju z komory B do komory A poprzez kanał łączący obie komory. Istotnym elementem głowicy jest zawór regulujący pole powierzchni przepływu. Silnik krokowy umożliwia zmianę położenia nurnika z rozdzielczością 0,02mm. Zmiana przekroju poprzecznego kanału łączącego obie komory pozwala na pośrednią regulację momentu oporowego. Napięciowe przetworniki ciśnienia o liniowej charakterystyce przetwarzania umożliwiają pośredni pomiar momentu siły przyłożonego do ramienia zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad M_o = S \cdot p \cdot r$$

gdzie: S- powierzchnia czynna tłoka, p- ciśnienie w komorze A lub B, r- długość ramienia.

Enkoder optyczny pozwala na pomiar położenia kąowego badanego stawu z rozdzielczością 0,09 °.

Problematyka

Wykonanie systemu pozwalającego na pomiar momentu siły działającego na ramię oraz regulowanie momentem obciążającym wymaga określenia procedur pozwalających na wyznaczenie charakterystyk przetwarzania toru pomiarowego oraz sterującego [3].

Metoda wyznaczenia charakterystyki toru pomiarowego

Opracowano następującą procedurę wyznaczenia charakterystyki toru pomiarowego:

- umieszczenie ramienia w położeniu $\pi / 2$ [rad]
- zamknięcie zaworu łączącego obie komory,
- zadanie momentu siły poprzez umieszczenie ciężarka o znanej masie w odległości 0,5m od osi obrotu ramienia. W przypadku gdy ramię znajduje się w położeniu poziomym (prostopadle do działającej siły grawitacji), na ramię działa moment siły zgodny z zależnością:

$$(2) \quad M_s = m \cdot g \cdot r$$

gdzie: m- masa, g- przyspieszenie grawitacyjne, r- długość ramienia,

- zwolnienie blokady ramienia,
- odczyt napięcia na wyjściu przetwornika ciśnienia dla poziomego położenia ramienia,
- uśrednienie wartości napięcia wyjściowego po przeprowadzeniu 10 pomiarów dla każdego z dostępnych obciążeń,
- wykreślenie charakterystyki momentu siły w funkcji napięcia z przetwornika ciśnienia z wykorzystaniem odpowiedniej funkcji aproksymującej.

Metoda wyznaczenia charakterystyki toru sterującego

Zanim przystąpiono do wyznaczenia charakterystyki toru sterowania wykonano następujące badanie. Zamknięto zawór w głowicy (położenie nurnika na 8 mm) a ramię pomiarowe ustawiono prostopadle do działającej siły grawitacji. Następnie zadawano moment siły poprzez umieszczanie ciężarków o znanej masie. W trakcie wykonywania pomiarów ramię pomiarowe z ciężarkami opadało powoli a nurnik zaworu regulacyjnego był przesuwany co 0,02mm powodując sukcesywne zwiększanie powierzchni przekroju połączenia między komorami głowicy. Rejestrowano sygnały z przetworników ciśnienia P1 i P2 oraz położenia kąowe w czasie. Pomiaru były wykonywane aż do momentu zatrzymania się ramienia. Wyniki pomiarów dla czujnika P1 przedstawia rysunek 4.

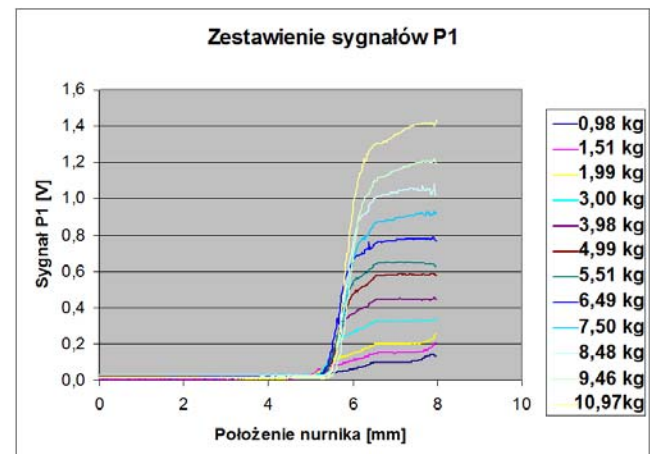
Na rysunku 4 widoczna jest zależność ciśnienia w głowicy od położenia nurnika, przy czym zmiana ta zachodzi dla położzeń od 5,5 mm do 7,0 mm. W związku z tym dalsze badania były prowadzone tylko w tym zakresie zmian a punktem odniesienia było ustawienie nurnika w położeniu 5,5 mm.

Opracowano następującą procedurę wyznaczenia charakterystyki toru sterującego:

- umieszczenie ramienia prostopadle do działającej siły grawitacji,
- otwarcie zaworu łączącego obie komory,
- dziesięciokrotny pomiar czasu swobodnego opadania ramienia (bez dodatkowego ciężarka) od położenia kąowego $\pi / 2$ [rad] do $\frac{\pi}{3}$ [rad]. Uśrednienie wyników

pomiarów,

- zadanie momentu siły poprzez umieszczenie ciężarka o znanej masie w odległości 0,5m od osi obrotu ramienia,
- dobranie takiego położenia nurnika, aby uzyskać taki sam czas jak przy swobodnym opadaniu (zrównanie momentu siły działającego na ramię i momentu oporowego),
- wykreślenie charakterystyki położenia nurnika w funkcji momentu obciążającego z wykorzystaniem odpowiedniej funkcji aproksymującej.



Rys.4. Zmiana sygnału z przetwornika P1 w funkcji położenia nurnika

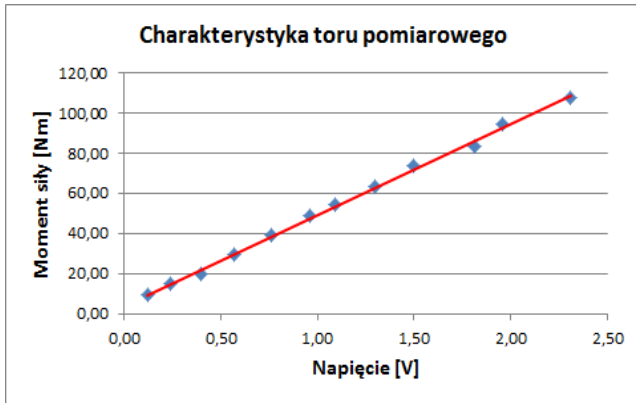
Widok stanowiska laboratoryjnego do wyznaczenia charakterystyk: toru pomiarowego oraz toru sterującego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowisko do wyznaczenia charakterystyki toru pomiarowego i toru sterującego

Wyniki badań toru pomiarowego

Poniżej przedstawiono charakterystykę toru pomiarowego dla czujnika ciśnienia P₁, wykreśloną na podstawie przeprowadzonych pomiarów.



Rys. 6. Charakterystyka toru pomiarowego

Przeprowadzona aproksymacja pokazuje, że dopasowanie wykonanych pomiarów do funkcji liniowej jest bardzo dobre. Wyliczony współczynnik korelacji liniowej wynosi 0,9989. Funkcję liniową opisującą zależność momentu siły od sygnału z przetwornika wyznaczono wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów [5,7]. Postać równania jest następująca:

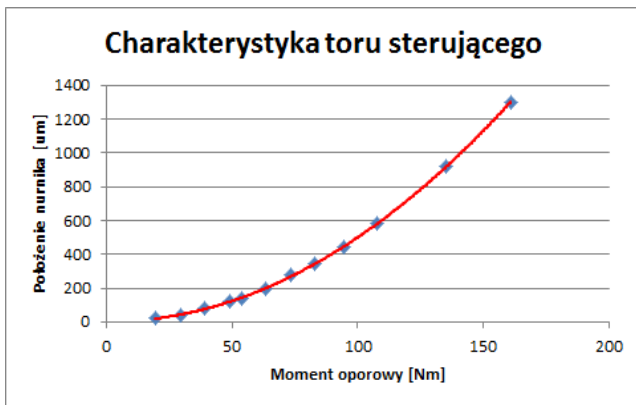
$$(3) \quad M_S = 45,4 [Nm/V] \cdot U_{WY} + 3,9 [Nm]$$

gdzie: M_S - moment siły, U_{WY} - napięcie na wyjściu przetwornika ciśnienia,

Należy przypuszczać, że dla różnych głowic oraz różnych czujników ciśnienia, wartości współczynników równania będą się różnić ze względów technologicznych np. dokładności wykonania.

Wyniki badań toru sterującego

Poniżej przedstawiono charakterystykę toru sterującego wykreśloną na podstawie przeprowadzonych pomiarów.



Rys. 7. Charakterystyka toru sterującego

W związku z tym, że pomiary wykazywały wielomianową zależność położenia nurnika od momentu oporowego została przeprowadzona analiza reszt modelu. Zbadano stopień zgodności modelu od pierwszego do piątego rzędu z wynikami eksperymentu poprzez weryfikację hipotezy:

H_0 : model jest adekwatny gdy unormowane reszty mają rozkład normalny $N(0,1)$ i są efektem oddziaływania czynnika losowego, oraz hipotezy alternatywnej:

H_1 : model jest nieadekwatny.
Jako statystykę testową wykorzystano następującą zależność [8]:

$$(4) \quad M = \sum_{i=1}^N \frac{(y_{pi} - y_{mi})^2}{\sigma_i^2}$$

gdzie: y_{pi} - wartość zmierzona, y_{mi} - wartość wyznaczona z modelu, σ_i - odchylenie standardowe, N - liczba danych.

Przy prawdziwości hipotezy H_0 statystyka M ma rozkład chi-kwadrat z liczbą stopni swobody [8]:

$$(5) \quad V = N - r - 1$$

gdzie: N - liczba danych, r - liczba wyznaczonych parametrów modelu

Na podstawie wartości statystyki M uzyskanej w eksperymencie oraz informacji o liczbie stopni swobody V wyznaczono odpowiadającą jej wartość p -Value. Na podstawie tego parametru określono, które modele są adekwatne na poziomie istotności 5%.

Tabela 1. Wyniki analizy reszt modelu

Stopień wielomianu	M	p- Value [%]
1	342,5667	0
2	1,3055	99,8349
3	1,3051	99,5492
4	1,3049	98,8307
5	1,1619	97,8724

Z przeprowadzonej analizy wynika, że model pierwszego rzędu jest nieadekwatny, ponieważ wartość p -Value nie przekracza założonego poziomu istotności 5%. Dla pozostałych rzędów wielomianu nie ma powodu do podważenia hipotezy H_0 . W związku z tym, że model regresji wielomianowej rzędu drugiego charakteryzuje się największym poziomem p -Value, a zarazem prostym sposobem wykonywania obliczeń stwierdzono, że jest on optymalny. Postać równania opisującego wartość położenia nurnika w funkcji momentu obciążającego wyraża się wzorem:

$$(6) \quad L = 0,0508 \left[\frac{\mu m}{Nm^2} \right] \cdot M_O^2 - 0,1094 \left[\frac{\mu m}{Nm} \right] \cdot M_O + 2,2427 [\mu m]$$

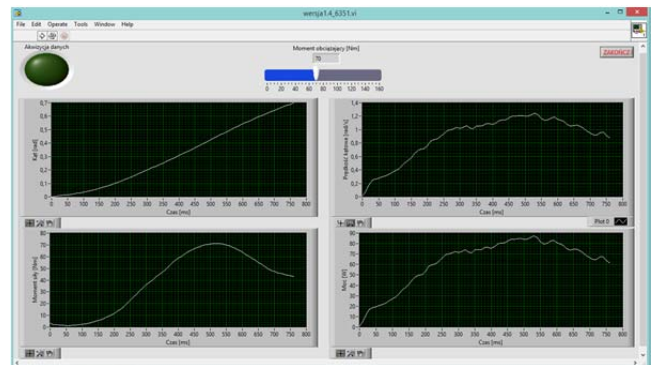
gdzie: L - położenie nurnika, M_O - moment obciążający.

Programy w środowisku LabVIEW

Autorzy niniejszego artykułu w oparciu o wyznaczone charakterystyki opracowali koncepcje systemu do zadawania i kontroli obciążenia badanego stawu z wykorzystaniem modułu akwizycji danych NI 6351 oraz środowiska *labVIEW* firmy *National Instruments*.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykonano następujące oprogramowanie:

- 1) aplikacji odpowiedzialną za ustawienie nurnika do poziomu odniesienia tj. 5,5 mm,
- 2) aplikacji umożliwiającą wykonywanie badań dynamicznych.



Rys. 9. Interfejs graficzny programu umożliwiającego wykonywanie testów dynamicznych

Aby możliwe było zadawanie prawidłowego momentu obciążającego (zgodnego z charakterystyką toru sterowania- rys.7), uruchomienie aplikacji drugiej musi być zawsze poprzedzone uruchomieniem pierwszej.

Program do wykonywania badań dynamicznych umożliwia zadawanie momentu obciążającego oraz pozwala rejestrować położenie kątowe, prędkość kątową, moment siły i generowaną moc w funkcji czasu.

Wnioski

W pracy przedstawiono metodykę wyznaczania charakterystyki toru pomiarowego oraz toru sterującego głowicy hydraulicznej. Na podstawie zastosowania odpowiednich funkcji aproksymujących wykonano oprogramowanie umożliwiające zadawanie obciążenia oraz pozwalające wyznaczyć podstawowe charakterystyki badań dynamicznych głównych stawów człowieka.

Autorzy: mgr inż. Rafał Białek, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, Zakład Systemów Informacyjno- Pomiarowych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.bialek@wat.edu.pl;
dr hab. inż. Marek Kuchta, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, Zakład Systemów Informacyjno- Pomiarowych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.kuchta@wat.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Instrukcja pomiarowa platformy programowej LabView ver.6i, National Instruments, Austin Texas 2000
- [2] Morecki A., Ekiel J, Fidelus K.: *Bionika ruchu*, PWN, Warszawa 1991
- [3] Zmysłowski W.: *Wybrane zagadnienia sterowania ruchem dowolnym*, Problemy Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, tom 1 Biosystemy, WKiŁ, 1991r
- [4] Będziński R.: *Biomechanika inżynierska. Zagadnienia wybrane*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997
- [5] Brandt S.: *Analiza danych*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1998
- [6] Hellwig Z.: *Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1998
- [7] Macukow B., Wąsowski J. : *Metody numeryczne*. Wydawnictwo WNT. Warszawa 2015
- [8] Leitner R., Zacharski J.: *Zarys matematyki wyższej dla studentów. Część 3*. Wydawnictwo WNT. Warszawa, 2015