

mgr inż. Krzysztof Kamil Żur, prof. dr hab. inż. Krzysztof Jaworek  
Politechnika Białostocka

## NOWA KONCEPCJA STEROWANIA DWUNOŻNYM ANTROPOMORFICZNYM ROBOTEM KROCZĄCYM TYPU DAR

*W pracy opisano nową koncepcję sterowania kroczeniem dwunożnego, antropomorficznego robota typu DAR. Pomysł sterowania powstał na podstawie wzorca biologicznego, którym jest człowiek kroczący w polu grawitacyjnym Ziemi. Układ sterowania jest układem ciągłym w okresach impulsowania. Wektorem sterowania jest przebieg mocy chwilowej rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe nóg człowieka – obsługujące i-ty staw nogi podczas chodu. Podano schemat otwartego układu sterowania jedną osią robota kroczącego typu DAR. Zaproponowano koncepcję zamkniętego układu sterowania jedną osią robota, w którym będzie aktywne rozmyte sprzężenie zwrotne.*

### A NEW CONCEPTION OF CONTROL SYSTEM FOR TWO-LEGGED ANTHROPOMORPHIC ROBOT DAR TYPE

*In this paper a new conception of control system for two-legged, anthropomorphic robot DAR type was described. Master of walking control robot DAR type was a man during two-legged locomotion in gravitational field of Earth. State equations of two-legged robot were elaborated. Input data for state equations is instantaneous power developed by driving control system. Output data of state equations are angular velocities of particular main axes of robot legs. Open control system is continuous type during impulsive period of time. Control vector of robot DAR type, as pattern, is instantaneous power developed by muscles of a man during walking in sagittal plane. A new conception of closed control circuit of walking robot DAR type (with active fuzzy closed loop) was announced.*

#### 1. WSTĘP I WPROWADZENIE

W monografii pt. „Podstawy Robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów” [2] niezyczący już mechanik i biomechanik prof. A. Morecki napisał: „...wydaje się, że w stosunkowo niedalekiej przyszłości roboty, szczególnie typu antropomorficznego będą posiadały układy sterowania wykorzystujące różne własności układu nerwowo-mięśniowego człowieka”.

W Katedrze Automatyki i Robotyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej podjęto prace mające na celu zbudowanie dwunożnego, antropomorficznego robota kroczącego typu DAR, w warunkach krajowych.

W układzie sterowania robota typu DAR wykorzystuje się niektóre własności układu nerwowo-mięśniowego nóg człowieka – podczas chodu. Powstaje naturalne pytanie: jak sterować chodem tego robota? Czy należy wykorzystać klasyczne podejście przez opracowanie dla niego:

- równań Newtona-Eulera
- równań Lagrange’a II rodzaju,

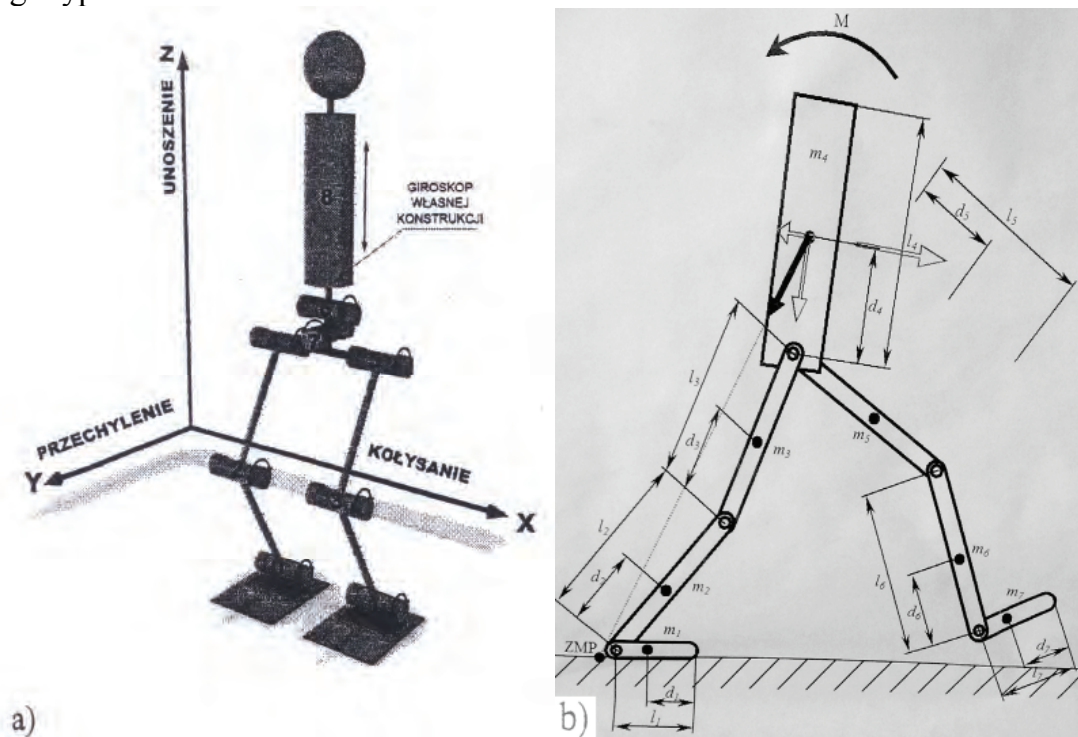
czy też opracować nową koncepcję sterowania tego typu robotów antropomorficznych?

Do tej pory, w robotyce, każde połączenie ruchowe manipulatora czy też robota zazwyczaj ma oddzielny napęd. Siły i momenty napędowe, działające na połączenia ruchowe są przenoszone przez człony mechaniczne manipulatora albo robota, na które oddziałują siły i momenty otoczenia.

W klasycznych układach sterowania zależność między siłami i momentami sił wejściowych (tzn. napędów) i wyjściowych (tzn. działających na człon roboczy manipulatora albo robota) jest podstawą działania układów sterowania współczesnych manipulatorów albo robotów. W pracy podjęto próbę opracowania nowej, nieklasycznej metody sterowania dwunożnym robotem antropomorficznym typu DAR [6–9]. Realizacja pomysłu prof. Moreckiego w zastosowaniu do układu sterowania robotem antropomorficznym typu DAR będzie możliwa, gdy zrezygnuje się z klasycznego podejścia (tzn. sterowania za pomocą równań typu Newtona-Eulera, czy też Lagrange'a II rodzaju), a zastosuje się podejście nieklasyczne z użyciem równań stanu, dobrze znanych z [3]. W pracy wykorzystano wyniki wieloletnich badań chodu człowieka, podczas jego kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni [1, 4, 5, 10, 12, 13] w laboratorium albo po powierzchni Ziemi.

## 2. OBIEKT STEROWANIA

Na poniższych dwóch rysunkach pokazano schemat strukturalny dwunożnego robota krocącego typu DAR.



Rys. 1. a) struktura antropomorficznego, dwunożnego robota typu DAR;  
b) chód rzeczywistego robota typu DAR w płaszczyźnie strzałkowej ruchu

Konstrukcja robota (rys. 1a) ma osiem stopni swobody i składa się z dwóch nóg i trzech sztucznych stawów w każdej nodze robota typu DAR oraz z korpusu o dwóch stopniach swobody [1]. Uproszczono do minimum konstrukcję maszyny krocącej (robota) do ośmiu stopni swobody, niezbędnych do odwzorowania chodu człowieka w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. Antropomorficzność robota polega na podobieństwie przebiegów mocy chwilowych rozwijanych przez główne napędy w trzech sztucznych „stawach” (biodrowym, kolanowym i skokowo-goleniowym) zbliżonych do przebiegów mocy w głównych zespołach

mięśniowych nóg człowieka podczas chodu w szczególności strzałkowej ruchu. W zorce przebiegów mocy chwilowych „pobrano” z normального chodu człowieka [4]. Ze względów praktycznych poddano je procesowi linearyzacji, w celu uproszczenia układu sterowania chodem robota typu DAR [6].

Robot ma duże stopy o odpowiedniej konstrukcji. Obecnie nie jest możliwe wierne odwzorowanie stopy człowieka ze względu na jej złożoność (liczba kości, mięśni oraz więzadeł). Zaproponowano uproszczony model stopy robota typu DAR spełniającego główne zadanie stopy ludzkiej, a mianowicie eliminację udaru, podczas kroczenia robota. Odbywa się to przez minimalizację różnicy między punktem zerowania sił momentu pochodzącego od sumy sił ciężkości i sił bezwładności działającej na korpus maszyny kroczącej, przechodzącej przez najbardziej wysuniętą część sztucznej pięty robota (ZMP – *Zero Moment Point* [4]) a aktualnym punktem przyłożenia siły reakcji między „stopą” a podłożem, po którym kroczy robot. Minimalizacja tej odległości zapobiega przechyleniu się maszyny kroczącej (robota) do przodu i do tyłu.

Ze względów finansowych model prototypowy nie będzie miał ludzkich wymiarów. Będzie rzy pomniejszony w stosunku do typowych wymiarów młodego, zdrowego i sprawnego mężczyzny (gdzie:  $e$  – liczba Eulera).

### 3. WZORCE BIOLOGICZNE

Badacze i uczeni od przeszło 2300 lat interesowali się lokomocją dwu- i czterożną ssaków lądowych po powierzchni Ziemi. Pierwsze prace z tego zakresu datowane są sprzed 2300 lat, kiedy to badania lokomocji ssaków lądowych rozpoczął Arystoteles. Do dnia dzisiejszego znane są prace tego uczonego, jak np. „O ruchu zwierząt” oraz „O poruszaniu się przestrzennym zwierząt”. W okresie istnienia Cesarstwa Rzymskiego na Zachodzie nie zajmowano się tą tematyką. Podobnie było w średniowiecznej Europie. Dopiero w okresie Renesansu, w Italii zaczęto ponownie zajmować się tą tematyką. Znane są prace Leonarda da Vinci z tego zakresu. W okresie Baroku kontynuowano badania chodu i biegu ssaków lądowych. Ojciec włoskiej biomechaniki A. Borelli opisał swoje badania w dwutomowym dziele pt. „O lokomocji zwierząt”. Do czasów prac badacza francuskiego E. Mareya (do 1873 r.) były to badania jako jakościowe, a nie ilościowe. Dopiero po zbudowaniu pierwszej kamery filmowej przez E. Mareya badania lokomocji kręgowców zmieniły swój charakter, bo stały się badaniami ilościowymi. To E. Marey pierwszy zaproponował filmowanie np. chodu człowieka, ubranego w czarny, ściśle dopasowany do ciała kostium, na którym były zaznaczone główne punkty anatomiczne ciała osoby badanej. Białe okrągłe znaczniki (o średnicy kilkunastu milimetrów) umieszczał na osobach badanych w głównych stawach nóg i rąk. Znaczniki te połączone były białymi liniami i ujawniały główne łańcuchy kinematyczne człowieka podczas kroczenia w szczególności strzałkowej ruchu. Sfilmowany ruch osoby badanej tworzył tzw. cyklokinogram. Do dnia dzisiejszego jest on stosowany w laboratoriach lokomocji dwunożnej człowieka [6, 13].

Do czasu wybuchu I Wojny Światowej nie potrafiono mierzyć i rejestrować sił reakcji podłoża podczas chodu i biegu człowieka.

Bardzo duża liczba kalek z I Wojny Światowej wymusiła potrzebę opracowania rozmaitych protez, przede wszystkim kończyn dolnych. Badacze francuscy Amari i Lauru [6] wykorzystując zjawisko piezoelektryczne braci Piotra i Pawła Curie, zbudowali platformy dynamometryczne, które są stosowane do dnia dzisiejszego w laboratoriach lokomocji dwunożnej człowieka.

Szwajcarska firma KISTLER udoskonaliła platformy Amara i Laurus, które są produkowane i stosowane na całym świecie. Jednakże filmowanie osób badanych i rejestrowanie ich sił reakcji podłóża, np. podczas chodu, jest bardzo pracochłonne, a obróbka danych długotrwała i męcząca. Spowodowane jest to dużą ilością danych, uzyskiwanych z analizy ruchu.

Proces ten zautomatyzowano, budując optoelektroniczne systemy rejestrujące (według pomysłu E. Mareya) ruch osób badanych wraz z rejestracją ich sił reakcji podłóża podczas chodu, czy też biegu, na początku w płaszczyźnie strzałkowej ruchu [6, 13].

Najlepszym w pełni zautomatyzowanym systemem rejestracji ruchu człowieka jest system ELITE-3D zbudowany we włoskiej firmie BTS z Mediolanu, a zainstalowany m.in. w Centrum Bioinżynierii w Mediolanie.

Rejestracja ruchu człowieka za pomocą systemów optoelektronicznych (sprzężonych z platformami dynamometrycznymi) i układów do pomiaru aktywności elektrycznej wybranych mięśni dostarcza następujących przebiegów:

- kątów względnych między wybranymi segmentami kończyn – połączonych stawem
- składowych sił reakcji podłóża, po którym kroczy osoba badana
- momentów sił mięśniowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe obsługujące główne stawy, np. nogi w lokomocji dwunożnej
- aktywności elektrycznej wybranych głównych mięśni, np. nóg człowieka podczas biegu i chodu.

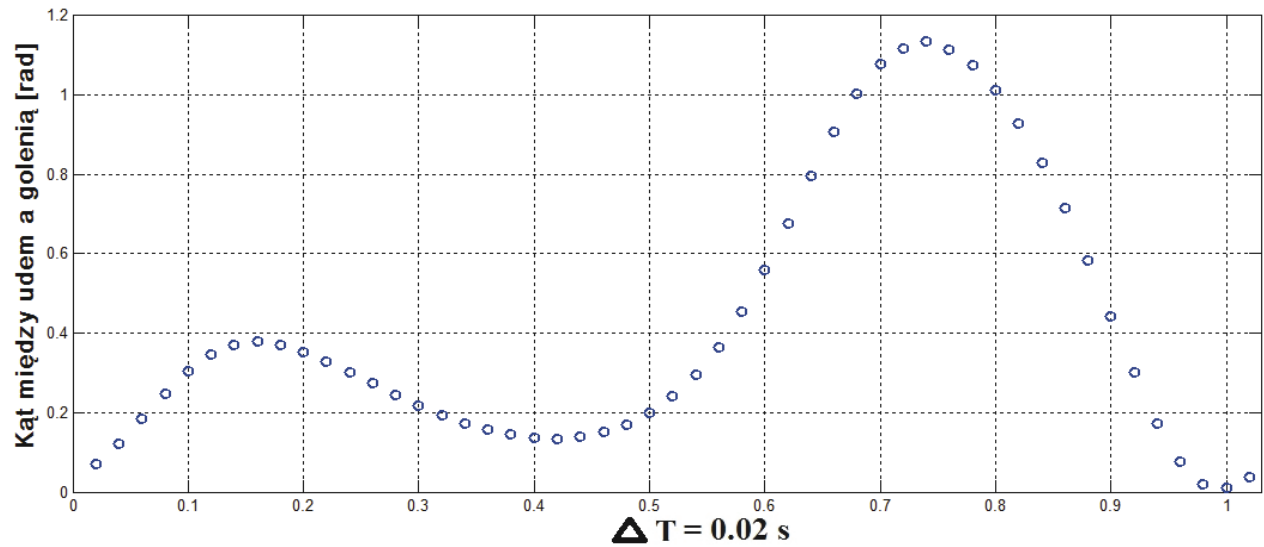
Większość badaczy lokomocji dwunożnej człowieka zadawała się tymi czterema rodzajami przebiegów generowanych przez człowieka podczas chodu i biegu. Znane są z tego zakresu publikacje badacza i biomechanika kanadyjskiego z Waterloo University w Kanadzie Davida A. Wintera [5]. D.A. Winter badał i rejestrował chód człowieka, zarówno normalny jak i patologiczny. Wyniki opublikował w wielu publikacjach i monografiach, np. [5]. Autorzy pracy wykorzystali niektóre badania i wyniki D.A. Wintera, m.in. takie przebiegi jak:

- wybranych kątów względnych podczas chodu osób badanych w płaszczyźnie strzałkowej ruchu
- momentów sił reakcji podłóża względem głównych osi stawów nogi osób badanych
- mocy chwilowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe obsługujące główne stawy nogi człowieka, podczas kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu.

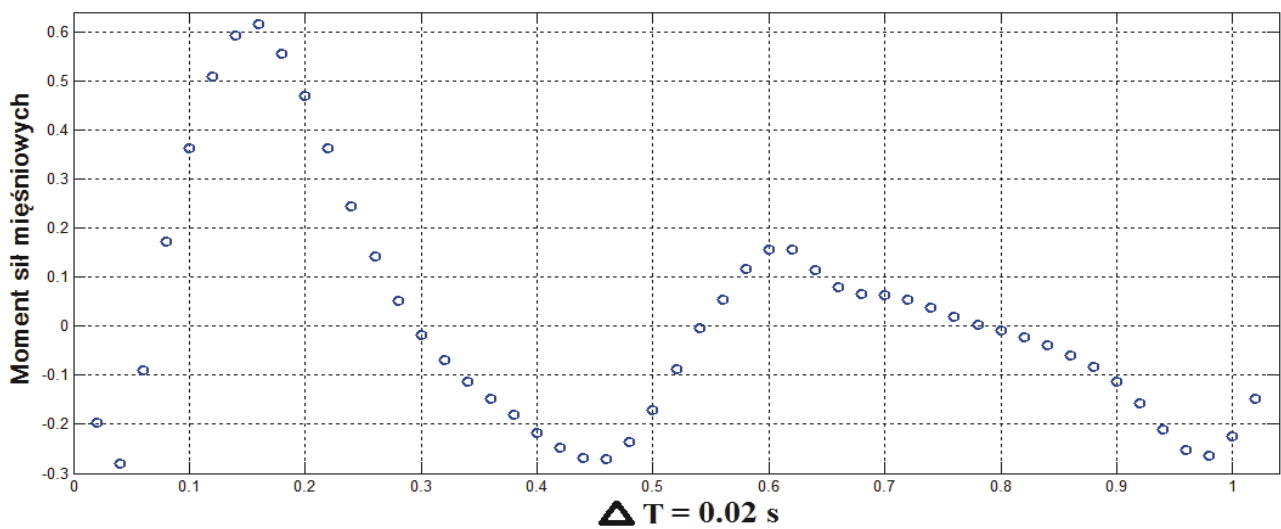
Zostaną tu przytoczone (jako przykładowe) trzy przebiegi:

- kąta względnego między udem a golenią osób badanych, dla naturalnej prędkości kroczenia, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (rys. 2)
- momentu sił mięśniowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe obsługujące główne stawy nogi badanych, dla naturalnej prędkości kroczenia, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (rys. 3)
- mocy chwilowej rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe obsługujące główne stawy nogi osób badanych (rys. 4).

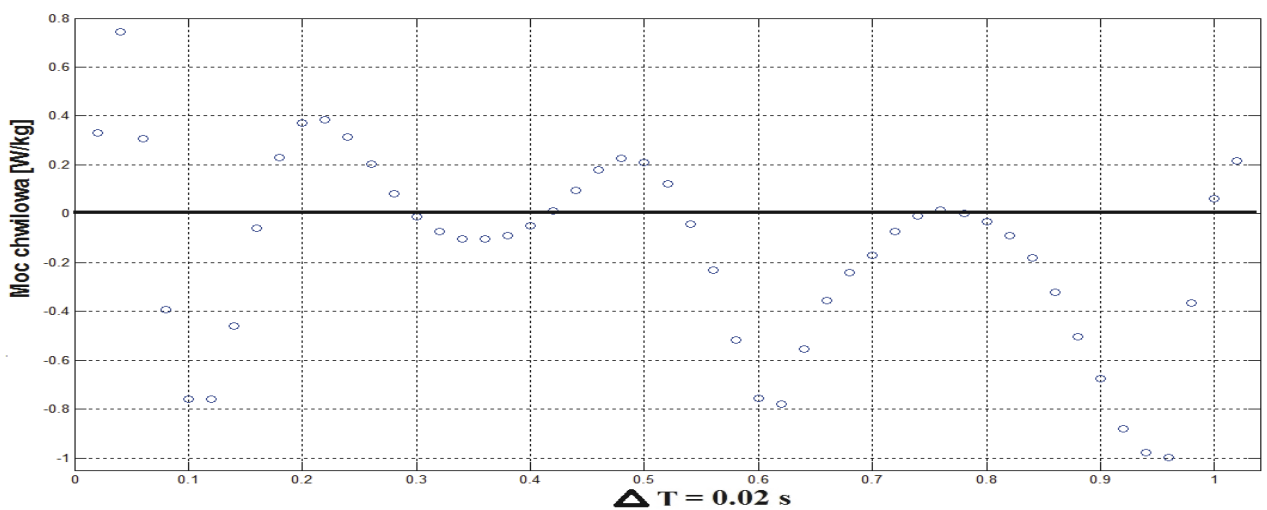
Niestety w monografii D.A. Wintera [5] nie zamieszczono przebiegów prędkości kątowych rozwijanych przez główne osie stawów nogi podczas chodu wolnego, naturalnego i szybkiego, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. Autorzy pracy, posługując się własną metodą numeryczną (rachunkiem wyrównawczym [6, 13]) wyznaczyli prędkości kątowe głównych osi stawów nogi człowieka podczas chodu. Do wyznaczenia prędkości kątowej  $\vec{\omega}_k$ , dla stawu kolanowego osób badanych, posłużono się przebiegiem kąta względnego między udem a golenią (rys. 2) dla naturalnej prędkości kroczenia (rys. 5).



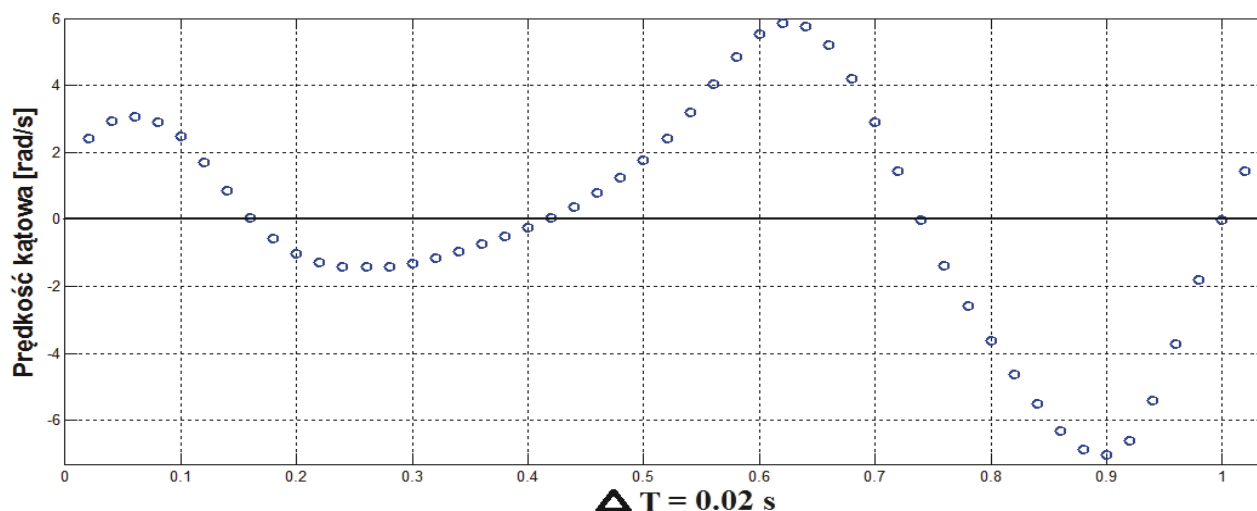
Rys. 2. Przebieg kąta względnego dla stawu kolanowego osób badanych, kroczących z prędkością naturalną, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu



Rys. 3. Przebieg momentu sił mięśniowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe obsługujące staw kolanowy osób badanych, kroczących z prędkością naturalną, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu



Rys. 4. Przebieg mocy chwilowej rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe obsługujące staw kolanowy, podczas kroczenia z prędkością naturalną, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu



Rys. 5. Przebieg prędkości kątowej osi stawu kolanowego, osób kroczących z prędkością naturalną, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (własna metoda numeryczna)

Korzystając ze wzoru mechaniki klasycznej w postaci:

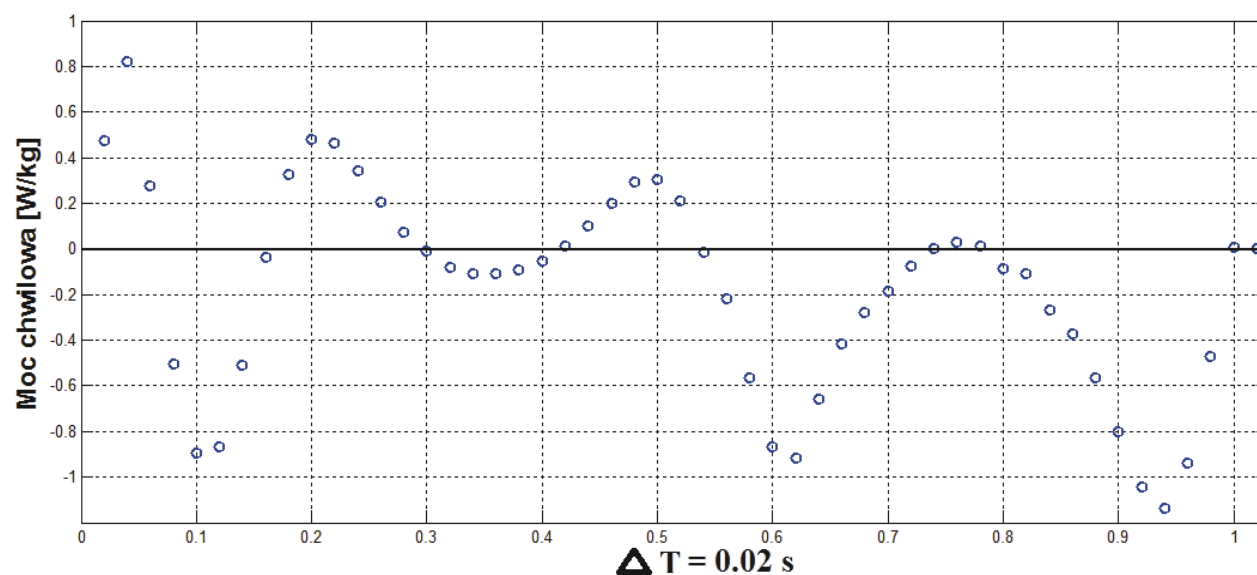
$$\frac{P_k(t)}{m} = \frac{\overline{M}_k(t)}{m} \cdot \omega_k, \quad \frac{W}{kg}, \quad (1)$$

gdzie:

$\omega_k$  – prędkość kątowa osi stawu kolanowego osób badanych (rad/s),

$\frac{\overline{M}_k(t)}{m}$  – znormalizowany moment sił mięśniowych, dla stawu kolanowego osób badanych

(N ° m/kg), wyznaczono przebiegi momentów chwilowych, w głównych stawach nogi osób badanych. Na rys. 6 pokazano przebieg momentów chwilowej rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe obsługujące staw kolanowy podczas chodu osób badanych.



Rys. 6. Przebieg mocy chwilowej rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe obsługujące staw kolanowy osób badanych, kroczących z prędkością normalną, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (obliczenia autorów)

#### 4. RÓWNANIA STANU CZŁOWIEKA I DWUNOŻNEGO ROBOTA ANTROPOMORFICZNEGO TYPU DAR PODCZAS CHODU, W PŁASZCZYŹNIE STRZAŁKOWEJ RUCHU

W pracy [9] podano hipotezę badawczą dotyczącą wektora sterowania głównymi zespołami nóg człowieka podczas chodu i dwunożnego robota antropomorficznego typu DAR, która brzmi: „Sterowanie  $u_i(t)$ , to odpowiednio zaprogramowany przebieg zmian mocy chwilowej rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe i-tego stawu nogi człowieka, a w antropomorficznym robocie typu DAR, siłownikach i-tego sztucznego stawu nogi, podczas pełnego cyklu chodu, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu”.

Z tej hipotezy wynika, że znormalizowane sterowanie to  $\Delta u_i(t) = \frac{\Delta p_i(t)}{m}$ , gdzie:  $\Delta p_i(t)$  – to zmiana mocy chwilowej rozwijanej w naturalnym jak i w sztucznym stawie nogi robota typu DAR (W/kg),  $m$  – masa człowieka lub robota (kg). Na podstawie wzoru (1)  $\Delta u_i(t)$  przyjmuje postać:

$$\Delta u_i(t) = \frac{\Delta(\bar{M}_i(t) \cdot \bar{\omega}_i)}{m}, \quad \frac{W}{kg}, \quad (2)$$

gdzie:

$\bar{\omega}_i$  – prędkość kątowna rozwijana w i-tym stawie człowieka i robota typu DAR (rad/s),

$\frac{\bar{M}_i(t)}{m}$  – znormalizowany moment rozwijany w i-tym stawie nogi (N · m/kg)

Zgodnie z podaną hipotezą badawczą równanie stanu podczas chodu człowieka i robota typu DAR, przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_i(t) = a_i \cdot \varphi_i(t) + b_i \cdot p_i(t), & rad / s, \\ \varphi_i(t = t_0) = \varphi_{i0} = CONST, \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

$\varphi_i(t)$  – kąt względny między głównymi segmentami nogi, tzn. tułowia i uda, uda i goleni oraz goleni i stopy człowieka lub robota (rad),

$\dot{\varphi}_i(t) = \omega_i$  – prędkość kątowna rozwijana w i-tym głównym stawie nogi człowieka albo robota typu DAR (rad/s),

$\frac{p_i(t)}{m}$  – moc chwilowa rozwijana przez główne siłowniki napędzające staw biodrowy,

kolanowy oraz skokowo-goleniowy nóg człowieka lub antropomorficznego robota typu DAR (W/kg),

$a_i$  i  $b_i$  – współczynniki zwane odpowiednio: współczynnikiem stanu (1/s) oraz współczynnikiem sterowania ( $\frac{rad \cdot kg}{W \cdot s}$ ).

Powstaje pytanie: w jaki sposób wyznaczyć wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$  dla człowieka i robota typu DAR? W procesie wyznaczania powyższych współczynników dla człowieka krocącego w płaszczyźnie strzałkowej ruchu ze względnie stałą prędkością i częstotliwością

lokomocji skorzystano z danych umieszczonych przez badacza kanadyjskiego D.A. Wintera [5].

Autorzy w swoich badaniach skorzystali z danych D. Wintera dla stawu kolanowego, kroczących osób w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, z prędkością lokomocji  $\sim 1,1$  m/s. Dalsze rozważania i obliczenia współczynników  $a_i$  i  $b_i$  dotyczą tylko stawu kolanowego, „uogólnionej”, młodej, zdrowej i sprawnej osoby badanej, poruszającej się w płaszczyźnie strzałkowej ruchu.

#### 4.1. Metoda wyznaczania współczynników $a_i$ i $b_i$ w równaniu stanu człowieka i dwunożnego antropomorficznego robota typu DAR

Zastosowano metodę całkową do poszukiwania wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$ . Scałkowano stronami równanie stanu (3), w przedziale czasowym  $t \in \langle 0, t_c \rangle$ , gdzie  $t_c$  – czas trwania pełnego cyklu pojedynczego kroku, w ruchu płaskim:

$$\int_0^{t_c} \dot{\varphi}_i(t) dt = \int_0^{t_c} a_i \cdot \varphi_i(t) dt + \int_0^{t_c} b_i \cdot \frac{p_i(t)}{m} dt. \quad (4)$$

Dla scałkowanego równania stanu (4) warunek początkowy  $\varphi_i(t = t_0) = \varphi_{i0}$  został przesunięty do nieskończoności.

Zakładając, że współczynniki  $a_i$  i  $b_i$ , dla względnie stałej prędkości, w przedziale  $i, i+1$  są stałe, równanie (4) można zapisać w postaci:

$$\int_0^{t_c} \dot{\varphi}_i(t) dt = a_i \int_0^{t_c} \varphi_i(t) dt + b_i \int_0^{t_c} \frac{p_i(t)}{m} dt, \quad (5)$$

gdzie poszczególne całki oznaczone, w przedziale całkowania, dla  $t \in \langle 0, t_c \rangle$  mają stałe wartości:

$$\int_0^{t_c} \dot{\varphi}_i(t) dt = CONST_{1i}, \quad \int_0^{t_c} \varphi_i(t) dt = CONST_{2i}, \quad \int_0^{t_c} \frac{p_i(t)}{m} dt = CONST_{3i}. \quad (6)$$

Wtedy scałkowane równanie stanu (5) możemy zapisać w postaci:

$$CONST_{1i} = a_i \cdot CONST_{2i} + b_i \cdot CONST_{3i}, \quad (7)$$

przy czym stałe w równaniu (7) mają następujące wymiary fizyczne:

$$[CONST_{1i}] = rad, \quad [CONST_{2i}] = rad \cdot s, \quad [CONST_{3i}] = \frac{rad \cdot kg}{W \cdot s}. \quad (8)$$

Zależności (3) i (7) pozwalają wyznaczyć wzory na obliczenie wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$  w następującej postaci:

$$a_i = \frac{\dot{\varphi}_i(t) + \frac{CONST_{1i}}{CONST_{3i}} \cdot \frac{p_i(t)}{m}}{\varphi_i(t) + \frac{CONST_{2i}}{CONST_{3i}} \cdot \frac{p_i(t)}{m}}, \quad 1/s, \quad (9)$$

$$b_i = \frac{CONST_{1i} - a_i \cdot CONST_{2i}}{CONST_{3i}}, \quad \frac{rad \cdot kg}{W \cdot s}. \quad (10)$$



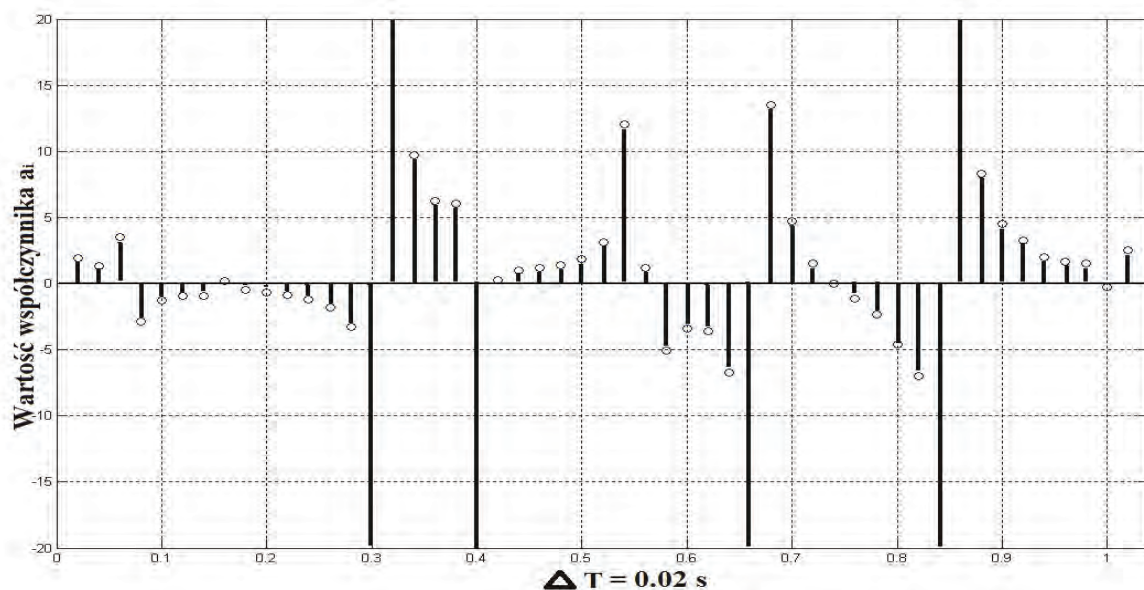
Należy zauważyć, że istnieje zależność między współczynnikami  $a_i$  i  $b_i$ :

$$a_i = F_{1i} \left( \varphi_i, \dot{\varphi}_i(t), \frac{p_i}{m} \right), \quad b_i = F_{2i}(a_i). \quad (11)$$

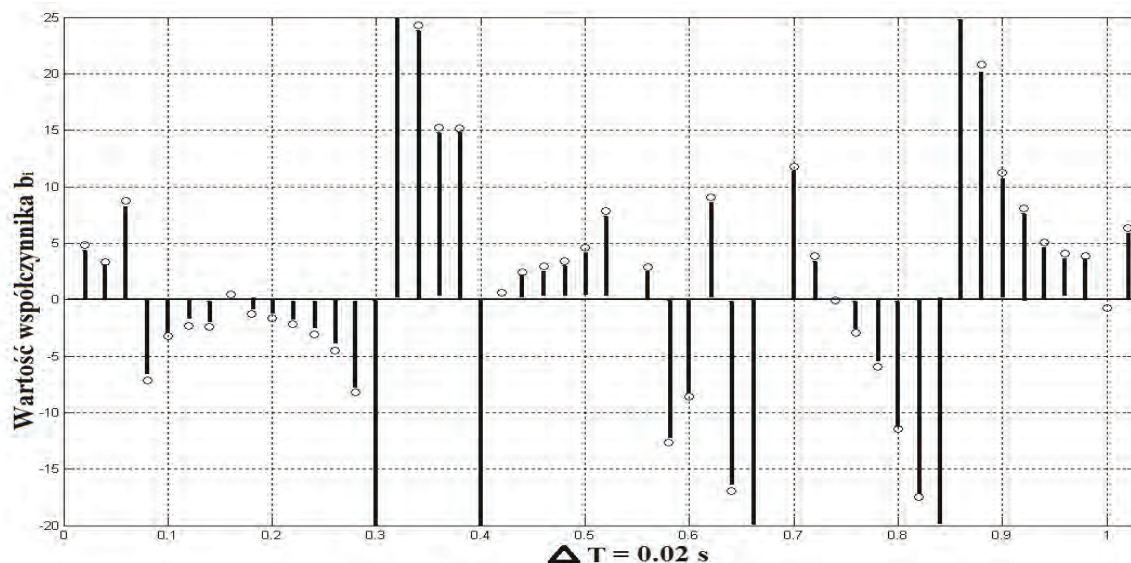
Z zależności (11) wynika, że wynika że, „przebieg” wartości współczynników  $b_i$  w funkcji  $n$ , gdzie  $i$  – numer próbki dla  $n \in (0, 51)$ ,  $\Delta t \approx 0,02$  s (okres próbkowania), nadaje kształt „przebiegu” wartości współczynników  $a_i$ .

Na rys. 7 i 8 przedstawiono odpowiednio „przebiegi” wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$  dla stawu kolanowego osób młodych, zdrowych i sprawnych poruszających się w płaszczyźnie strzałkowej ruchu z naturalną prędkością  $\sim 1,1$  m/s.

Zauważono, że iloraz wartości współczynników  $\frac{b_i}{a_i}$  przyjmuje wartości oscylujące wokół wartości 2,5 z błędem zaledwie kilku procent.



Rys. 7. „Przebieg” wartości współczynników  $a_i$  stawu kolanowego w funkcji  $n$



Rys. 7. „Przebieg” wartości współczynników  $b_i$  stawu kolanowego w funkcji  $n$

## 4.2. Wyznaczenie transmitancji operatorowych z równania stanu człowieka i antropomorficznego robota typu DAR

Równanie stanu (3) poddane obustronnie przekształceniu Laplace'a daje:

$$s \cdot \phi_i(s) = a_i \cdot \phi_i(s) + b_i \cdot \frac{p_i(s)}{m}. \quad (12)$$

Zakładając, że sygnałem sterującym jest znormalizowana moc chwilowa  $\frac{p_i(t)}{m}$ , otrzymujemy następującą transmitancję operatorową:

$$G_i(s) = \frac{\phi_i(s)}{\frac{p_i(s)}{m}} = \frac{b_i}{s - a_i}, \quad \frac{\text{rad} \cdot \text{kg}}{\text{W}}, \quad (13)$$

przy zerowych warunkach początkowych.

Z „przebiegów” wartości współczynników  $a_i$  dla  $i \in [0, 51]$  wynika, że transmitancja operatorowa  $G_i(s)$  może być: stabilna, gdy  $a_i < 0$  oraz niestabilna, gdy  $a_i > 0$ . Należy zauważyć, że czas trwania stabilności bądź niestabilności tej transmitancji  $G_i(s)$  wynosi zaledwie  $\Delta t = 0,02$  s (okres impulsowania układu sterującego).

Zakładamy, że sygnał sterujący zmianą kąta względnego z kroku  $i$  na krok  $i+1$  w głównym stawie nogi człowieka albo robota typu DAR będzie się zwiększać albo zmniejszać z kroku  $i$  na krok  $i+1$  w sposób liniowy, czyli:

$$\Delta u_i = k_i \cdot \Delta \frac{P_i(t)}{m} \cdot L^{-1} \left[ \frac{1}{s^2} \cdot \frac{b_i}{s - a_i} \right] \cdot 1(\Delta t_i), \quad \text{gdzie}, \quad (14)$$

gdzie:

$b_i$  – wzmacnienie członu inercyjnego I rzędu,  $\frac{\text{rad} \cdot \text{kg}}{\text{W} \cdot \text{s}}$ ,

$\Delta \frac{P_i(t)}{m}$  – zmiana mocy znormalizowanej z kroku  $i$  na krok  $i+1$  (W/kg),

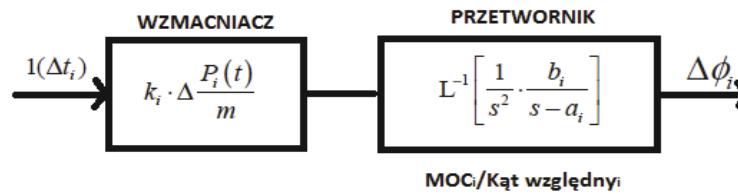
$k_i$  – odpowiednio dobrane wzmacnienie, z kroku  $i$  na krok  $i+1$ ,  $\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{rad} \cdot \text{kg}}$ .

Autorzy nazywali ten typ sterowania biomechanizmem albo mechanicznym echanizmem antropomorficznym – sterowaniem przyrostowym.

## 5. STEROWANIE LINIOWE W UKŁADZIE OTWARTYM ORAZ MATEMATYCZNY OPIS POJEDYNCZEGO NAPIĘDU

Schemat blokowy układu sterowania robotem typu DAR przedstawiono na rys. 8. Dla wartości współczynnika  $0 < a_i < \infty$  przetwornik moc/kąt względny jest stabilny, a podczas odpowiedzi otwartego układu sterowania na skok jednostkowy, prawo sterowania przyjmie postać:

$$\Delta u_i = k_i \cdot \Delta \frac{P_i(t)}{m} \cdot b_i \cdot \left( \frac{1}{a_i^2} \cdot e^{-a_i \Delta T_i} + \frac{1}{a_i} \cdot \Delta T_i - \frac{1}{a_i^2} \right) 1(\Delta T_i). \quad (15)$$

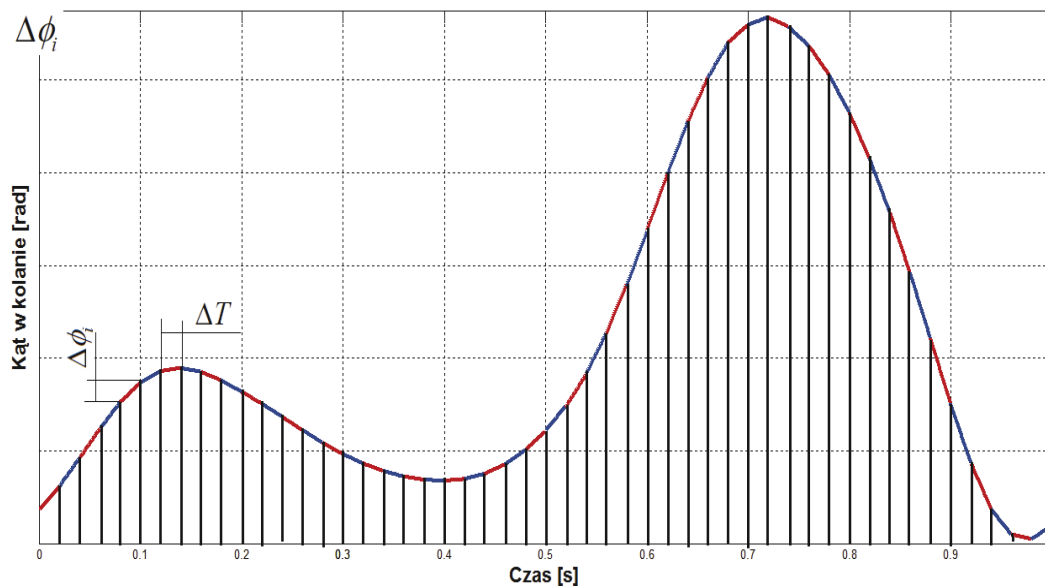


Rys. 8. Otwarty układ sterowania pojedynczym napędem robota typu DAR

Dla wartości współczynnika  $0 < a_i >$  przetwornik moc/kąt jest niestabilny, a odpowiedź otwartego układu sterowania na skok jednostkowy przyjmuje postać [12]:

$$\Delta u_i = k_i \cdot \Delta \frac{P_i(t)}{m} \cdot b_i \cdot \left( \frac{1}{a_i^2} \cdot e^{a_i \Delta T_i} - \frac{1}{a_i^2} - \frac{1}{a_i} \cdot \Delta T_i \right) 1(\Delta T_i). \quad (16)$$

Przebieg zmian kąta względnego  $\Delta\phi_i$  dla stawu kolanowego, podczas kroczenia człowieka i robota typu DAR jest przedstawiony na rys. 9.



Rys. 9. Przebieg liniowych zmian kąta względnego między udem a golenią podczas sterowania  $\Delta u_i$  w układzie otwartym jedną osią robota typu DAR

Przebieg z rys. 9 pokazuje liniowe przyrosty w poszczególnych okresach impulsowania  $\Delta T_i$ .

## 6. WNIOSKI

W pracy podano nową koncepcję sterowania kroczeniem dwunożnego, antropomorficznego robota typu DAR. Ułożono równania stanu dla trzech głównych osi stawów nóg człowieka i sztucznego robota typu DAR. Trzy współrzędne stanu dla człowieka i robota, to kąty względne między naturalnym i sztucznym tułowiem a udem, udem a golenią i golenią a stopą. W równaniach stanu człowieka i robota typu DAR sterowaniem jest moc chwilowa rozwijana przez siłowniki napędzające główne osie stawów. U człowieka są to siłowniki mięśniowe, a u robota silniki prądu stałego. W pracy podano układ sterowania otwartego jednej osi robota typu DAR.

W dalszych pracach nad układem sterowania trzema osiami nóg robota antropomorficznego jest opracowywany zamknięty układ sterowania tymi osiami. Dla układu opracowano aktywną pętlę sprzężenia zwrotnego [14]. W pętli sprzężenia zwrotnego

obliczane są uchyby względnego położenia kąowego i prędkości kąowej między wybranymi segmentami nogi robota kroczącego typu DAR.

W aktywnej pętli sprzężenia zwrotnego zastosowano logikę rozmytą, która pozwala na obliczanie poprawek wzmocnienia  $\pm \Delta k_i$  dla wzmocnienia  $k_i$  układu otwartego [14]. Przygotowywany jest model symulacyjny sterowania, w środowisku MATLAB/Simulink, trzema osiami robota kroczącego typu DAR w układzie zamkniętym.

## BIBLIOGRAFIA

1. Morecki A., Ekiel J., Fidelus K.: CYBERNETIC SYSTEMS of LIMB MOVEMENTS in MAN, ANIMALS and ROBOTS. PWN-Polish Scientific Publishers Warszawa, 1979, Ellis Horwood Limited Publishers. Chester, 1984.
2. Morecki A., Knapczyk J. i in.: PODSTAWY ROBOTYKI. Teoria i elementy manipulatorów i robotów. WNT, Warszawa 1993 i dalsze (ostatnie 1999).
3. Kaczorek T. i inni: Teoria Sterowania. PWN, Warszawa, 2005.
4. Vukobratovic M., Borovac B.: ZERO-MOMENT-POINT – THIRTY FIVE YEARS OF IT'S LIFE. International Journal of Humanoid Robotics. Vol. 1, No. 1 (2004) pp. 157–173. World Scientific Publishing Company.
5. Winter D.A.: THE BIOMECHANICS AND MOTOR CONTROL OF HUMAN GAIT: NORMAL, ELDERLY AND PATHOLOGICAL. Ed. by University of Waterloo Press, Ontario, Canada, 1991.
6. Jaworek K.: Metoda wskaźnikowa oceny lokomocji dwunożnej człowieka na przykładzie chodu i biegu. Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Zeszyt nr 32, Warszawa, 1992.
7. Jaworek K., Głębocki M.: O kroczeniu dwunożnego antropomorficznego robota typu DAR. Pomiary, Automatyka i Robotyka PAR, nr 2/2009, ss. 258–266.
8. Głębocki M., Jaworek K.: O zapasie bezpieczeństwa podczas kroczenia dwunożnego antropomorficznego robota typu DAR. Pomiary, Automatyka i Robotyka. PAR, nr 2/2009, ss. 267–273.
9. Jaworek K., Żur K.K.: Metoda oceny koordynacji ruchowej układu kroczonego człowieka i dwunożnego antropomorficznego robota typu DAR. Dydaktyka Nauk Stosowanych, Wyd. Wydziału Matematyczno-Fizycznego, Uniwersytet Szczeciński, Tom 5, 2009.
10. Żur K.K., Jaworek K.: Równania stanu ruchu człowieka i dwunożnego antropomorficznego robota typu DAR. Dydaktyka Nauk Stosowanych, Wyd. Wydziału Matematyczno-Fizycznego, Uniwersytet Szczeciński, Tom 5, 2009.
11. Zielińska T.: Maszyny kroczące: podstawy, projektowanie, sterowanie i wzorce biologiczne. PWN, Warszawa, 2003.
12. Korn G., Korn T.: Poradnik z matematyki. Wyd. „NAUKA”. Główna redakcja fizyczno-matematycznej literatury. Moskwa, 1973 (wydanie rosyjskie).
13. Jaworek K.: Biocybernetyczne metody oceny lokomocji dwunożnej człowieka (monografia przygotowana do druku w 2011 r.).
14. Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 1999.