

prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztof Jaworek  
 Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki  
 mgr inż. Marcin Głębocki  
 Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki

## **O KROCZENIU DWUNOŻNEGO ANTROPOMORFICZNEGO ROBOTA – typu DAR\***

*W pracy opisano sposób wykonania, w warunkach krajowych, pierwszego dwunożnego antropomorficznego robota zwanego przez autorów pracy dwunożną maszyną – DAR. Zaprezentowana konstrukcja robota ma osiem stopni swobody i składa się z dwóch nóg wyposażonych w duże stopy i korpus. Pary kinematyczne maszyny – DAR napędzane są silnikami prądu stałego, o regulowanej mocy chwilowej (tak jak to jest w „silownikach” mięśniowych nóg człowieka). Wzorce przebiegów mocy chwilowych, w trzech głównych „stawach” nóg rzeczywistej maszyny – DAR, „pobrano” z normalnego chodu człowieka, podczas kroczenia, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni, w warunkach laboratoryjnych. Zastosowano liczbę Froude’a do zaprojektowania jej wymiarów geometrycznych, znalezienia podobieństwa dynamicznego między kroczeniem robota typu DAR a człowiekiem. Rzeczywista maszyna dwunożna typu DAR pod względem geometrycznym i masowym będzie e razy mniejsza od wielkości ciała człowieka, gdzie: e – liczba Eulera.*

**Słowa kluczowe:** *dwunożny antropomorficzny robot DAR, moce chwilowe napędów maszyny – DAR, liczba Froude’a, liczba Eulera.*

## **ABOUT GAIT OF TWO LEGGED ANTHROPOMORPHIC WALKING ROBOT – DAR**

*In this paper was described how to build two legged machine (robot) named DAR. The construction of this robot has eight degrees of freedom and consists: trunk and two legs equipped with two relatively big two feet. Kinematics pairs of robot – DAR are propelled by DC motors, with regulated instantaneous power (similar from “servomotors” e.m. produced by group of muscles of human legs during walking). Model of instantaneous power was taken from shape of instantaneous power developed by group of muscles of a man, during walking in sagittal plane, over relatively flat surface – in laboratory condition. Proposed robot – DAR is e-time smaller than a man (where: e – is Euler number). Model of instantaneous power developed by DC control motor of artificial joints of a robot – DAR was elaborated by using Froude number Fr.*

**Keywords:** *two legs anthropomorphic robot – DAR, instantaneous power developed by two legged robot – DAR, Froude number, Euler number.*

---

\* Done for Statute Work S/WM/03/06 at Chair of Automatics & Robotics Dept. Mechanics of Bialystok University of Technology.

## 1. WPROWADZENIE

Badaniem lokomocji kończynowej człowieka i czteronożnych ssaków lądowych zajmowano się już w starożytności, kiedy to Arystoteles – przeszło 2300 lat temu zainteresował tą tematyką badaczy z basenu Morza Śródziemnego [8].

Następnie prawie przez 1000 lat, począwszy czasów wczesnego średniowiecza zaprzestano zajmowania się badaniem lokomocji dwunożnej i czteronożnej ssaków lądowych. W XVII wieku ojciec włoskiej bioinżynierii i biomechaniki A. Borelli wznowił badania oraz zauważył wielkość i złożoność procesu, jakim jest chód człowieka [4, 8]. W 1836 roku powstał pierwszy model matematyczny fazy wymachu nogi człowieka opracowany przez braci W. i E. Weberów z Getyngi [4, 8]. Dalsze badania nad chodem człowieka umożliwiło w 1986 roku podjęcie próby budowy dwunożnego antropomorficznego robota, w którym wykorzystano badania nad chodem człowieka [1, 6, 7]. Pierwsze działające konstrukcje powstały już w 60 i 70 latach ubiegłego wieku w Japonii. Konstrukcje tych maszyn kroczących były oparte o trzy główne elementy (stopa, noga, korpus), będące niezbędnym minimum konstrukcyjnym, napędzanych przy pomocy sztucznych pneumatycznych „mięśni”.

Zespół naukowy Robotyki i Biomechaniki Technicznej pod kierownictwem nieżyjącego już polskiego uczonego-biomechanika prof. dr inż. i dr h.c. A. Moreckiego (przy współpracy z włoskim Centrum Bioinżynierii w Mediolanie) rozpoczął w latach 70. ubiegłego wieku prace nad badaniem chodu i biegu człowieka [5]. Wynikiem tych badań było uzyskanie przebiegów sygnałów fizycznych występujących podczas chodu człowieka w normie jak i patologii, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, po płaskiej i względnie utwardzonej powierzchni, w warunkach laboratoryjnych.

Zdobyte doświadczenie szczególnie w zakresie mocy chwilowych rozwijanych przez trzy główne zespoły mięśniowe nogi człowieka, podczas chodu w płaszczyźnie strzałkowej ruchu), pozwoliły na rozpoczęciem prac nad zbudowaniem dwunożnej maszyny – DAR, w warunkach krajowych. Proponowana konstrukcja została opracowana na podstawie modelu referencyjnego, który stanowił szkielet człowieka. Składa się ona z dwóch nóg i trzech sztucznych „stawów” w każdej nodze maszyny typu – DAR oraz korpusu o dwóch stopniach swobody. Uprościło to do minimum konstrukcję maszyny typu – DAR tylko do ośmiu stopni swobody, niezbędnych do odwzorowania chodu człowieka, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu.

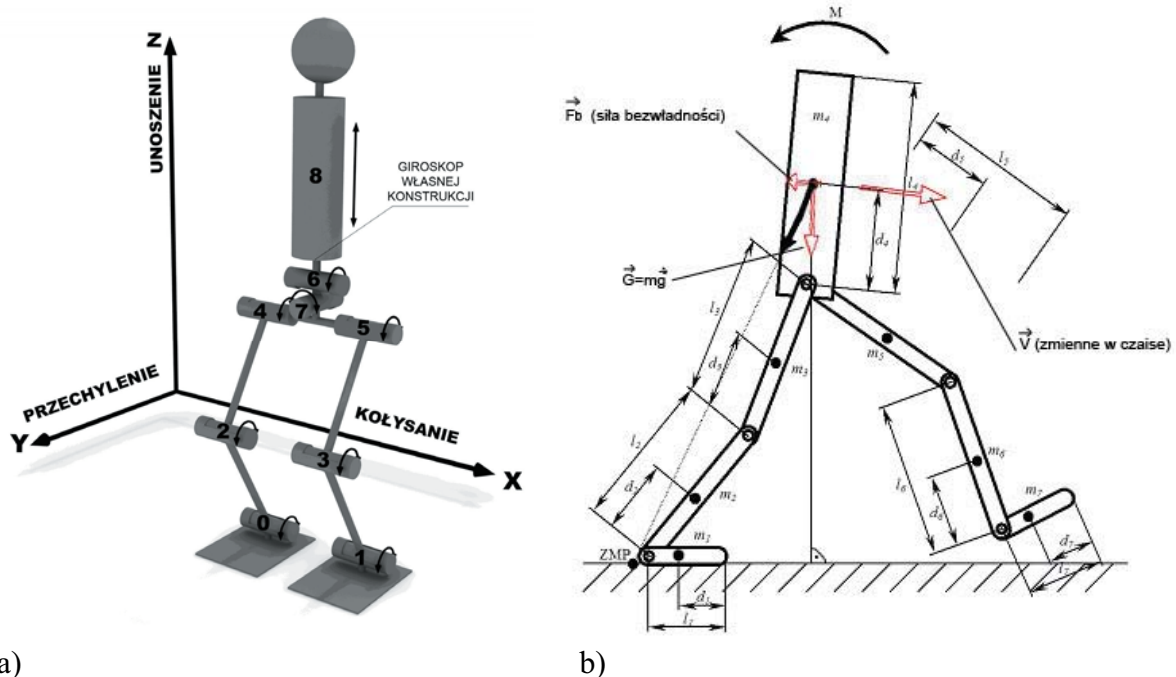
Podstawowym problemem staje się jak zapewnić maszynie typu – DAR ruch, w płaszczyźnie strzałkowej, o przebiegach mocy chwilowych podobnych do rozwijanych przez główne napędy w trzech „stawach” (biodrowym, kolanowym i skokowo-goleniowym) nóg idealnej maszyny typu – DAR, zbliżonych do przebiegów mocy chwilowych rozwijanych przez trzy główne zespoły mięśniowe nóg człowieka – podczas chodu. Rozwiązaniem przedstawionego problemu jest techniczna realizacja nowego typu napędu w którym będzie istniała możliwość regulacji mocy chwilowej w zależności od zapotrzebowania na niezbędną średnią moc, podczas kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. Drugim ważnym problemem konstrukcyjnym (mającym na celu utrzymanie stabilności maszyny typu – DAR) są duże stopy o odpowiedniej konstrukcji. U człowieka stopy amortyzują siły reakcji podłoża i eliminują uderzenie przy kontakcie stopy z podłożem. W przypadku maszyny typu – DAR nie jest możliwe wierne odwzorowanie konstrukcji ludzkiej stopy, ze względu na jej złożoność, ponieważ stopa człowieka składają się z 19 mięśni, 26 kości, 33 stawów oraz 197 więzadeł.

Zaproponowano uproszczony model stopy maszyny typu – DAR spełniający główne zadania ludzkiej stopy. Eliminacja uderzenia maszyny typu – DAR, podczas kroczenia odbywać się będzie poprzez kontrolowanie w sposób dyskretny różnicy odległości między punktem Zero Moment Point (ZMP) a Center of Actual Total Ground Reaction Force (C-ATRGF) [1, 7].

Minimalizacja tej odległości zapobiega przechylaniu się robota do przodu i do tyłu. Model prototypowy robota ze względów finansowych nie będzie miał ludzkich rozmiarów. Rzeczywista maszyna typu – DAR pod względem geometrycznym i masowym będzie e razy mniejsza w stosunku do idealnej maszyny typu – DAR (gdzie: e – liczba Eulera).

## 2. DWUNOŻNA MASZYNA TYPU – DAR

Na poniższych dwóch rysunkach pokazano schemat strukturalny dwunożnego robota kroczącego zwanego przez autorów maszyną – DAR.



a)

b)

Rys.1. a) Struktura proponowanej maszyny – o ośmiu stopniach swobody z postępowymi parami kinematycznymi, w głównych „stawach” nóg rzeczywistej maszyny typu – DAR. b) „chód” rzeczywistej maszyny typu – DAR, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, z zachowaniem dynamicznej równowagi podczas kroczenia po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni – w warunkach laboratoryjnych.

### 2.1. Dynamiczne podobieństwo idealnej i rzeczywistej maszyny typu – DAR

Angielski inżynier i konstruktor statków W. Froude opracował dynamiczny wskaźnik podobieństwa modelu statku do projektowanego statku rzeczywistego [4].

Wiadomo, że przed budową statku należy wykonać jego model i przeprowadzić niezbędne obliczenia projektowe. Następnie model statku wypróbować w basenie doświadczalnym, w warunkach laboratoryjnych. Froude poszukiwał wskaźnika dynamicznego podobieństwa a nie geometrycznego! Wskaźnik podobieństwa dynamicznego wg Froude'a ma postać:

$$F_r = \frac{v^2}{g \cdot l}, \text{ niemianowana} \quad (1)$$

gdzie:

- v – prędkość strugi cieczy opływającej model statku lub obiektu rzeczywistego w m/s,
- l – długość obiektu (lub jego modelu) w m,
- g – natężenie pola grawitacyjnego ziemi w m/s<sup>2</sup>.

Okazało się, że biomechanicy badający lokomocję kończynową ssaków lądowych odkryli, że za pomocą liczby Froude'a można szukać podobieństwa dynamicznego dwóch ssaków lądowych, podczas ich lokomocji kończynowej, po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni ziemi, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. Biomechanicy Aleksander R. McNeill [4] i Jave, w 1983 roku stwierdzili, na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych, że:

*„Jeżeli dwoje zwierząt lądowych (ssaków) o różnych wymiarach geometrycznych chodzą lub biegną z taką prędkością, że ich liczby Froude'a ( $F_r$ ) są takie same, to ich ruch jest taki sam, w sensie możliwym do zidentyfikowania”[4].*

Jest rzeczą znaną, że to kryterium nie stosuje się do zwierząt poruszających się w wodzie! Podobną sytuację mamy w przypadku chodu idealnej i rzeczywistej maszyny kroczonej typu – DAR.

Niech  $F_{ri}$  – oznacza liczbę Froude'a dla idealnej maszyny typu – DAR, zaś  $F_{rr}$  – oznacza liczbę Froude'a dla rzeczywistej maszyny typu – DAR. Jeżeli ich kroczenie ma być podobne w sposób dynamiczny, to ich liczby Froude'a muszą być takie same:

$$F_{ri} = F_{rr} , \quad (2)$$

lub w postaci

$$\frac{v_i^2}{g \cdot l_i} = \frac{v_r^2}{g \cdot l_r} , \quad (3)$$

gdzie:

$v_i$  – prędkość kroczenia idealnej maszyny typu – DAR, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (m/s),

$l_i$  – długość nogi idealnej maszyny typu – DAR (m),

$v_r$  – prędkość kroczenia rzeczywistej maszyny typu – DAR, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (m/s),

$l_r$  – długość nogi rzeczywistej maszyny typu – DAR (m).

Na podstawie wzoru (3) można, przy znanej prędkości kroczenia  $v_i$  i długości nogi  $l_i$  można wyznaczyć prędkość kroczenia rzeczywistej maszyny – DAR w postaci:

$$v_r = v_i \sqrt{\frac{l_r}{l_i}} , m/s . \quad (4)$$

W pracy [3, 5] podano wzór (uzyskany z badań doświadczalnych nad chodem idealnej maszyny typu – DAR) opisujący zależność ilorazu wskaźnika mocy  $P_{M-}$  i jej masy, w fazie podporowej nogi idealnej maszyny typu – DAR, w funkcji średniej prędkości  $\bar{v}$  jego chodu, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu:

$$P_{M-} = 1.8 \cdot \bar{v}^{1.5} \frac{W}{kg} , \quad (5)$$

gdzie:

$\bar{v}$  – średnia prędkość chodu idealnej maszyny typu – DAR, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu w m/s,

$[1.8] = m^{0.5} \cdot s^{-1.5}$  – stała niemająca interpretacji fizycznej.

Zapotrzebowanie na średnią moc (w pełnym cyklu chodu idealnej maszyny typu – DAR) można wyrazić wzorem, w następujący sposób:

$$(P_{M-/++})_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^3 \sqrt{\frac{1}{T_{-/++}} \int_{t_1}^{t_2} p_i^2(t) dt} \quad \frac{W}{kg}, \quad (6)$$

gdzie:

$p_i(t)$  – moc chwilowa rozwijana przez główne zespoły mięśniowe obsługujące staw biodrowy, kolanowy i skokowo-goleniowy idealnej maszyny typu – DAR, podczas kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (W/kg),

$T_{-/++}$  – czas trwania fazy podporowej i wymachu nogi idealnej maszyny typu – DAR (s),

$m$  – masa idealnej maszyny typu – DAR (kg).

Ze wzoru (5) wynika, że ze wzrostem średniej prędkości  $\bar{v}$  chodu idealnej maszyny typu – DAR, średnia moc rozwijana przez jej główne zespoły mięśniowe nogi jest proporcjonalna do jej średniej prędkości chodu  $\bar{v}$  w potęgze 3/2. Z badań nad fazą wymachu nogi idealnej maszyny typu – DAR wynika, że średnia moc  $P_{M+}$  znormalizowana do jej masy  $m$  a rozwijana przez jej główne zespoły mięśniowe, obsługujące staw biodrowy i kolanowy w tej fazie stanowi zaledwie kilkanaście procent ( $x$ ) wartości średniej mocy  $(P_{M-/++})_i$  rozwijanej w fazie podporowej i wymachu nogi idealnej maszyny typu – DAR, podczas jej chodu w płaszczyźnie strzałkowej ruchu:

$$P_{M-/++} = P_{M-} + P_{M+}, \quad W/kg, \quad (7)$$

gdzie:

$P_{M-}$  – średnia moc znormalizowana do masy rzeczywistej maszyny typu – DAR; jest to moc rozwijana przez główne zespoły mięśniowe nogi obsługujące stawy: biodrowy, kolanowy i skokowo-goleniowy, w fazie podporowej nogi w W/kg,

$P_{M+}$  – średnia moc znormalizowana do masy idealnej maszyny typu – DAR; jest to moc rozwijana przez główne zespoły mięśniowe nogi obsługujące stawy: biodrowy, kolanowy, w fazie wymachu nogi w W/kg,

Wzór na średnią moc rozwijaną przez trzy główne napędy rzeczywistej maszyny typu – DAR ma postać:

$$(P_{M-/++})_r = 1.8 \cdot (1+x) \cdot \left( \frac{\bar{v}_i}{\sqrt{l_i}} \sqrt{\frac{l_r}{l_i}} \right)^{3/2}, \quad \frac{W}{kg}, \quad (8)$$

gdzie:  $x$  – ( $0 < x < 1$ ) ułamek udział znormalizowanej średniej mocy  $(P_{M-/++})_r$  w fazie wymachu nogi, rozwijanej przez trzy główne napędy mięśniowe rzeczywistej maszyny typu – DAR.

W rozprawie [5] podano wzory na średnią moc, znormalizowaną do masy idealnej maszyny typu – DAR, rozwijaną przez jej główne zespoły mięśniowe, w fazie podporowej nogi, dla stawu biodrowego, kolanowego i skokowo-goleniowego.

Ze wzoru (8) wynika, że zapotrzebowanie na średnią moc (w fazie podporowej i wymachu) rozwijaną przez napędy par kinematycznych, rzeczywistej maszyny typu – DAR zależą od trzech parametrów takich jak:  $\bar{v}_i$ ,  $l_r/l_i$ ,  $x$ .

Wykresy mocy chwilowych rzeczywistej maszyny typu – DAR rozwijanych w nogach robota należy uzyskać mnożąc przez czynnik skalujący  $c_{sj}$ , przebiegi mocy chwilowych idealnej maszyny typu – DAR,

gdzie:  $j = 1, 2, 3$  odpowiednio dla pary kinematycznej pełniące funkcje sztucznego stawu: biodrowego, kolanowego, skokowo-goleniowego wg wzoru:

$$c_{sj} = \frac{(P_{M-l+})_{rj}}{(P_{M-l+})_{ij}}, \text{ niemianowany,} \quad (9)$$

dla  $0 < c_{sj} < 1$ , gdy  $l_r < l_i$ .

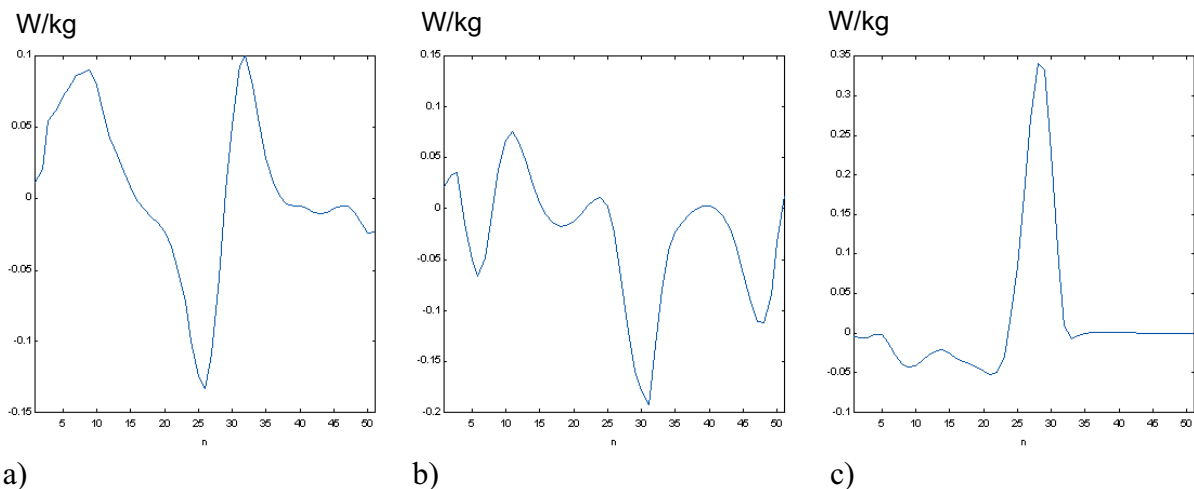
Wzory na wyznaczanie średniej mocy rozwijanej przez główne zespoły mięśniowe obsługujące stawy: biodrowy, skokowy i skokowo-goleniowy idealnej maszyny typu – DAR podano w monografii [8].

Wyznaczenie współczynników normalizujących przebiegi mocy chwilowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe w idealnej maszynie typu – DAR  $c_{SB}$ ,  $c_{SK}$ ,  $c_{SSK-G}$ , umożliwiają obliczenie (dla zadanej średniej prędkości kroczenia  $\bar{v}_r$ ) – dla rzeczywistej maszyny typu – DAR przebiegów mocy chwilowych rozwijanych (dla pełnego cyklu kroczenia) w poszczególnych parach kinematycznych pełniących funkcje „stawów” biodrowych, kolanowych i skokowo-goleniowych rzeczywistej maszyny typu – DAR.

### 3. TYPOWE PRZEBIEGI MOCY CHWILOWYCH ROZWIJANYCH W GŁÓWNYCH „STAWACH” NOGI IDEALNEJ MASZINY TYPU – DAR

Poniższe trzy wykresy – przebiegi mocy chwilowych rozwijanych przez główne zespoły „mięśniowe” idealnego dwunożnego robota antropomorficznego (zwanego idealną dwunożną maszyną – DAR) uzyskano, w warunkach laboratoryjnych, w Światowym Centrum Bioinżynierii, w Mediolanie [8].

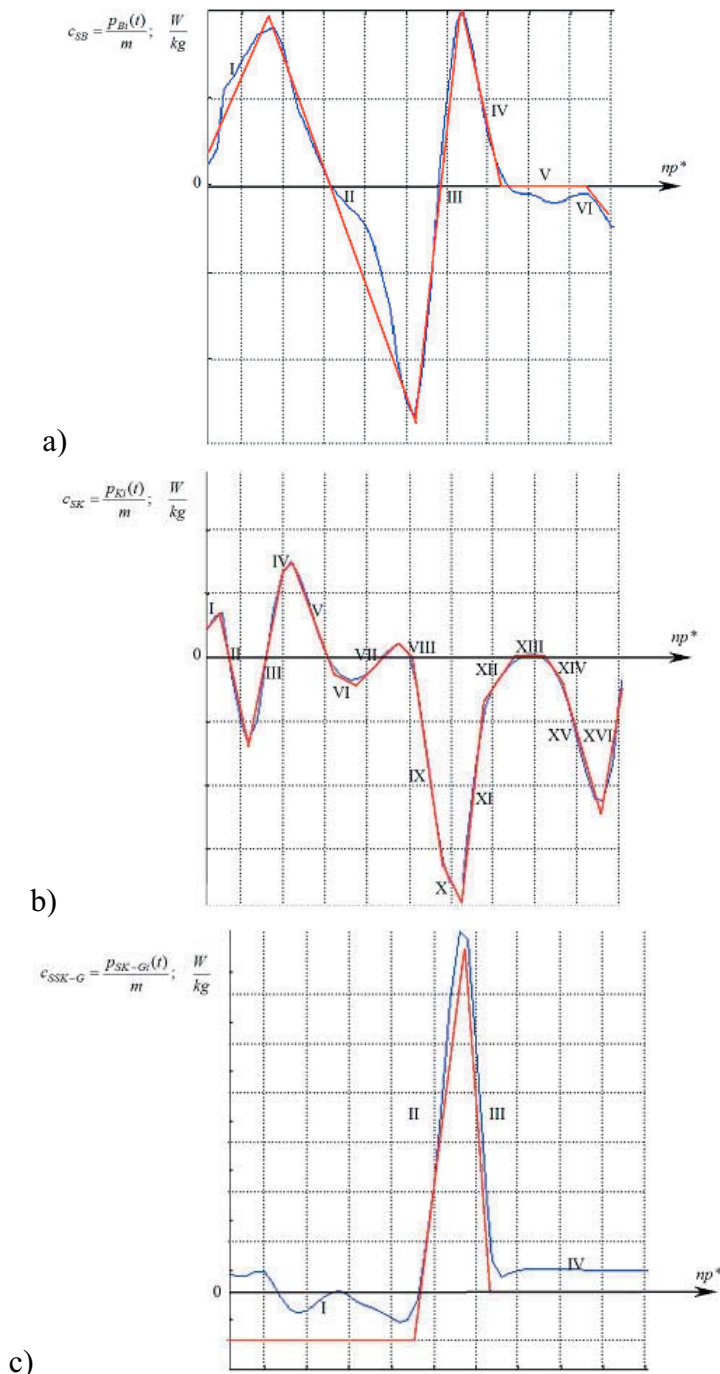
Okres impulsowania biosygnalów dobrano w sposób optymalny (korzystając z twierdzenia o próbkowaniu sygnałów analogowych Kotelnikowa-Shannona z poprawką na krzyżowanie się widm w sygnale z spróbkowanym) i wynosił  $\Delta T_{opt.} = 0,02$  s.



Rys. 2. Typowy przebieg mocy chwilowej dla a) „stawu” biodrowego, b) „stawu” kolanowego, c) „stawu” skokowo-goleniowego idealnej maszyny typu – DAR, podczas normalnego kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (czas trwania biosygnалу  $0,02 \cdot 51 = 1,02$  s) liczba pobranych próbek z biosygnалу analogowego



W warunkach rzeczywistych, tzn. dla rzeczywistej maszyny typu – DAR nie będziemy w stanie zapewnić takich przebiegów mocy chwilowych w „stawach” – realizowanych przez napędy mięśniowe idealnej maszyny typu – DAR. Spowodowane jest to mniejszą liczbą stopni swobody nóg rzeczywistej maszyny typu – DAR, a ponadto sterowanie jej ruchem będzie sterowaniem dyskretnym. Przebiegi dyskretnych mocy chwilowych rozwijanych w parach kinematycznych rzeczywistej maszyny typu – DAR przyjmą następującą postać.



Rys. 3. Zlinearyzowany typowy przebieg mocy chwilowej dla a) „stawu” biodrowego, b) „stawu” kolanowego, c) „stawu” skokowo-goleniowego idealnej maszyny typu – DAR, podczas normalnego jej kroczenia, w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (gdzie:  $np^*$  – liczba próbek)

Należy zauważyć, że dyskretne przebiegi mocy chwilowych rozwijanych w poszczególnych parach kinematycznych rzeczywistej maszyny – DAR można aproksymować odcinkami prostych i tak, dla pary kinematycznej pełniące funkcje stawu :

- biodrowego na sześć liniowych części,
- kolanowego na szesnaście liniowych części,
- skokowo goleniowego na cztery liniowych części.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Do tej pory badacze lokomocji dwunożnej człowieka i konstruktorzy opanowali budowę dwunożnych robotów antropomorficznych. Koncerny japońskie HONDA i SONY zbudowały dwa roboty antropomorficzne (tzw. człekopodobne), które nawet potrafią już nawet biegać [6, 7].

Podstawy teoretyczne (konstrukcja, układy sterowania) zostały opracowane na Uniwersytecie Waseda, w Tokyo, w Japonii – pod kierownictwem już nie żyjącego prof. I. Kato. Konstrukcje robotów ASIMO i QUIRO mają kilkadziesiąt stopni swobody... chociaż człowiek podczas kroczenia ma ich powyżej 250. Proponowany w pracy dwunożny robot kroczący typu DAR ma tylko 8 stopni swobody. Jego antropomorficzność nie dotyczy jego wyglądu, ale zachowaniu w przebiegach mocy chwilowych (rozwijanych w silnikach prądu stałego), w jego trzech sztucznych stawach: biodrowym, kolanowym i skokowo-goleniowym –dynamicznie podobnych u człowieka podczas chodu.

Wtedy jego kroczenie będzie podobne do kroczenia człowieka. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że roboty dynamiczne ASIMO i QUIRO mają podobne sterowania sztucznymi stawami jak proponowane w tej pracy, dla robota typu DAR.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Hirai , M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka: “The development of Honda Humanoid Robot”, 1998.
- [2] Alexander R. McNeill: The gait of bipedal and quadrupedal animals. The Int. Journal of Robotics Research, 1984, 3, 2, pp. 49–60.
- [3] C.J. Pennycuik: Newton rules biology. A physical approach to biological problems. Pergamon Press, Glasgow, 1992.
- [4] K. Jaworek: O lokomocji kręgowców. Materiały XII Szkoły Biomechaniki, Wrocław Szklarska-Poreba, 20-23 października, 1994, pp. 150–157.
- [5] K. Jaworek: Metoda wskaźnikowej oceny lokomocji człowieka na przykładzie chodu i biegu. Rozprawa habilitacyjna. Wyd. IBiB-PAN, Zeszyt nr 32, Warszawa, 1992.
- [6] Strona internetowa – The Honda Humanoid Robot ASIMO
- [7] Strona internetowa – P3 and ASIMO
- [8] K. Jaworek Metoda oceny stanu aparatu ruchu człowieka na przykładzie chodu. Monografia (w przygotowaniu do druku 2009).