mgr inż. Marcin Głębocki
Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki

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

O ZAPASIE BEZPIECZEŃSTWA PODCZAS KROCZENIA DWUNOŻNEGO ANTROPOMORFICZNEGO ROBOTA TYPU DAR*

W pracy opisano sposób regulacji prędkości robota typu DAR i wyznaczenie dla niego krytycznej prędkości kroczenia za pomocą (nigdzie dotychczas niepublikowanego) wskaźnika bezpieczeństwa chodu (ang. gait safety faktory – GSF). Wskaźnik GSF będzie wyznaczany w robocie DAR, w trybie on-line (tzn. na bieżąco) podczas kroczenia robota. W tym celu stosowana będzie metoda funkcji regresji – zwanej w metodach identyfikacji metodą MFR. W pracy podano równanie zmiennej zespolonej „kroczenia" robota typu DAR na płaszczyźnie Gaussa. „Kroczenie" robota DAR na płaszczyźnie Gaussa umożliwia wyznaczenie (w trybie on-line) wskaźnika bezpieczeństwa kroczenia i prędkość krytyczna chodu robota typu DAR, co zapobiegnie jego np. przewracania się podczas kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni.

Słowa kluczowe: *dwunożny antropomorficzny robot typu DAR, płaszczyzna Gaussa, wskaźnik bezpieczeństwa chodu – GSF, moce chwilowe napędów maszyny – DAR, identyfikacja metodą funkcji regresji – MFR*

ABOUT GAIT SAFETY FACTOR OF TWO LEGGED ANTHROPOMORPHIC WALKING ROBOT – DAR

In this paper was described how to build two legged machine (robot), in domestic circumstances, called by authors two legged machine – DAR. The construction of robot has eight degrees of freedom and consists of trunk and two legs equipped with two big feet. Kinematics pairs of machine – DAR are propelled by DC motors, with regulated instantaneous power (similar from "servomotors" of human legs developed by a man muscles). Model of instantaneous power developed at three main "joints" at real the machine – DAR "were taken" from instantaneous power developed from normal of human walk, in sagittal plane, under laboratory condition. In machine – DAR is provided regulation of it's speed and is calculated maximal speed by means of (nowhere published) Gait Safety Factor – GSF. Coefficient GSF will be calculated in the machine – DAR on-line by the (MFR) method well known from identification methods during "gait" of the two legged machine – DAR, on complex plane, named Gauss plane.

Keywords: *two legs anthropomorphic robot, the two legged machine – DAR, Froude number, Gait Safety Factor – GSF, instantaneous power developed by the two legged machine – DAR, identification method (MFR)*

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

1. WPROWADZENIE

Badanie antropomorficznego robota kroczącego typu – DAR wymaga poznania kroczenia człowieka. Od czasu E. Marey'a (1873 r.) [1], kiedy to zbudowano pierwsze kamery filmowe, a następnie platformy dynamometryczne (Lauru i Amara) [1,9] do (pomiaru i rejestracji sił reakcji podłoża – podczas kroczenia człowieka) udało się wyznaczyć przebiegi mocy chwilowych rozwijanych przez siłowniki mięśniowe obsługujące trzy główne stawy nogi człowieka (tj. staw biodrowy, kolanowy i skokowo-goleniowy). W części 1 tej pracy zostały przedstawione typowe takie przebiegi wyznaczone podczas normalnego kroczenia człowieka w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. W proponowanym robocie typu – DAR zostaną wykorzystane charakterystyki przybliżone odcinkami prostymi, a to ze względu na bardzo zmniejszoną liczbę stopni swobody robota typu – DAR, w porównaniu do liczby stopni swobody podczas normalnego kroczenia człowieka (t.j. z ~250 do 8).

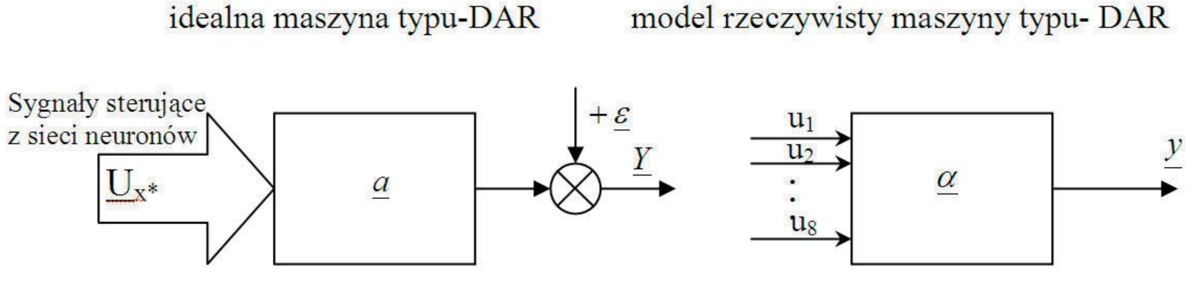
Mimo tak ograniczonej liczby stopni swobody zostanie zachowane podobieństwo dynamiczne w przebiegach mocy chwilowej rozwijanej przez silniki prądu stałego, będące siłownikami sztucznych stawów nóg robota typu – DAR. Sposób zachowania podobieństwa dynamicznego opisano w 1. części niniejszej pracy.

Do tej pory nie udało się robotykom (zajmującymi się konstrukcją i budową dwunożnych robotów antropomorficznych) opracować wskaźnik bezpieczeństwa kroczenia i metodę wyznaczenia maksymalnej prędkości chodu tego typu robotów. W pracy proponuje się zastosowanie wybranych metod identyfikacji np. metody funkcji regresji (MFR) do [1, 5] identyfikacji przebiegów mocy chwilowych rozwijanych przez sztuczne siłowniki (t.j. silniki prądu stałego) napędzające sztuczne stawy nóg robota typu – DAR. Identyfikacja tych mocy (podczas kroczenia robota typu – DAR) umożliwi wyznaczenie:

- wskaźnika bezpieczeństwa kroczenia i jego maksymalnej prędkości chodu robota,
- maksymalnej prędkości kroczenia robota.

Część II niniejszej pracy jest poświęcona temu zagadnieniu, które jest nowością nie tylko w Polsce.

2. IDENTYFIKACJA RÓWNAŃ RÓŻNICOWYCH (METODĄ FUNKCJI REGRESJI – MFR) MOCY CHWILOWYCH ROZWIJANYCH PRZEZ IDEALNĄ MASZYNĘ TYPU – DAR



Rys. 1. Identyfikacja modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR. $\underline{a}$ – współczynniki równań idealnej maszyny typu – DAR, $\underline{\alpha}$ – współczynniki równań modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR, $\underline{\varepsilon}$ – sygnał zakłóceń, $\underline{Y}$ – sygnał wyjściowy z idealnej maszyny typu – DAR (moce chwilowe), $\underline{y}$ – sygnał wyjściowy z modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR (moce chwilowe)

Istota poszukiwania modelu matematycznego jest przedstawione na rys. 1 [1, 5]. Na rysunku uwzględniono sygnały wejściowe $\underline{U}_{x*}$, idealnej maszyny typu – DAR (x* – oznacza nieznaną dotychczas liczbę sygnałów sterujących pochodzących z sieci neuronów idealnej maszyny typu – DAR). Liczba sygnałów sterujących w modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR jest równa liczbie stopni swobody jej mechanizmów (tzn. par kinematycznych).

Równanie opisujące idealną maszynę – DAR i jej model można przedstawić dla n-tej chwili czasowej w postaci równania różnicowego:

$$Y_n = a_1 \cdot Y_{n-1} + a_2 \cdot Y_{n-2} + \ldots + a_{n-k} \cdot Y_{n-k} + \varepsilon_n, \tag{1}$$

$$Y_n = \underline{u}_n \cdot \underline{a} + \varepsilon_n, \tag{2}$$

gdzie: $\underline{a}$ – współczynniki równań idealnej maszyny typu – DAR,

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \ldots & a_{n-k} \end{bmatrix}^T, \tag{3}$$

$\underline{u}_n$ – macierz wielkości wyjściowych z idealnej maszyny typu – DAR, w n poprzednich chwilach czasowych,

$$\underline{u}_n = \begin{bmatrix} Y_{n-1} & Y_{n-2} & \ldots & Y_{n-k} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

k – liczba współczynników identyfikacji idealnej maszyny typu – DAR,
ε_n – zakłócenie n-tego pomiaru.

Model rzeczywistej maszyny – DAR można przedstawić w postaci równania różnicowego dla n-tego pomiaru (n-tej chwili czasowej) następującą zależnością:

$$y_n = \underline{u}_n \cdot \underline{\alpha}, \tag{5}$$

dla $np.$ = 0, 1, 2 … gdzie: $N_{p.}$ – ostatni pomiar,

y_n – wartość wielkości wyjściowej z idealnej maszyny typu – DAR w n-tej chwili pomiarowej,
$\underline{\alpha}$ – macierz poszukiwanych współczynników równań modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR,

$$\underline{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \ldots & \alpha_x \end{bmatrix}^T, \tag{6}$$

$\underline{u}_n$ – macierz wielkości wyjściowych z idealnej maszyny typu – DAR.

$$\underline{u}_n = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 & \ldots & U_x \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Celem wyznaczenia współczynników identyfikacji $\underline{\alpha}$ (6) modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR (metodą najmniejszej sumy kwadratów błędów [4, 5]) budujemy funkcjonał o postaci:

$$S_{N_p} = \sum_{n_p=0}^{N_p} e_n{}^2, \tag{8}$$

gdzie e_n – błąd estymowanego modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR w postaci:

$$e_n = Y_n - y_n. \tag{9}$$

W wyniku minimalizacji funkcjonał S_{N_p} (8) względem wyrazów α otrzymuje się równanie algebraiczne umożliwiające wyznaczenie współczynników α. Stąd macierz poszukiwanych współczynników identyfikacji poszukiwanego rzeczywistego modelu maszyny typu – DAR ma postać:

$$\underline{\alpha} = \left(\underline{\underline{u}}^T \cdot \underline{\underline{u}}\right)^{-1} \cdot \left(\underline{\underline{u}}^T \cdot \underline{Y}\right), \tag{10}$$

gdzie:

$$\underline{\alpha} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_K]^T, \tag{11}$$

dla $2 \le k < N_p$,

k – liczba współczynników identyfikacji modelu bioobiektu (maszyny typu – DAR).

Macierz $\underline{\underline{u}}$ ma postać:

$$\underline{\underline{u}} = \begin{bmatrix} Y_{(k-1)\ 1} & \cdots & Y_{1\ (k-1)} & Y_{0\ k} \\ Y_{k\ 1} & \dots & Y_{2\ (k-1)} & Y_{1\ k} \\ Y_{(k+1)\ 1} & \dots & Y_{3\ (k-1)} & Y_{2\ k} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{N_p\ 1} & \dots & Y_{(N_p-k+2)\ (k-1)} & Y_{(N_p-k+1)\ k} \end{bmatrix}. \tag{12}$$

Macierz $\underline{\underline{u}}$ ma k kolumn oraz $(N_p - k + 2)$ wierszy.

Macierz $\underline{Y}$ ma postać:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_{k-1} \\ Y_k \\ \vdots \\ Y_{N_p} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

W celu przeniesienia ruchu idealnej maszyny typu – DAR na rzeczywistą maszynę należy pobrać 51 próbek wielkości mierzonych (tj. mocy chwilowych) z idealnej maszyny kroczącej, o okresie impulsowania $\Delta T_{opt.} = 0{,}02$ s (przyjmuje się w badaniach nad ruchem idealnej jak i rzeczywistej maszyny typu – DAR liczbę współczynników identyfikacji $k = 3$ a macierze $\underline{\underline{u}}$ i $\underline{Y}$ przyjmują postać:

$$\underline{\underline{u}} = \begin{bmatrix} Y_{2\ 1} & Y_{1\ 2} & Y_{0\ 3} \\ Y_{3\ 1} & Y_{2\ 2} & Y_{1\ 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{N_p\ 1} & Y_{(N_p-1)\ 2} & Y_{(N_p-2)\ 3} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_{N_p} \end{bmatrix}. \tag{15}$$

3. „KROCZENIE" IDEALNEJ MASZYNY TYPU – DAR NA PŁASZCZYŹNIE GAUSSA

Równanie sygnałów wyjściowych $\underline{y}$ z modelu rzeczywistego maszyny typu – DAR dla liczby współczynników identyfikacji rzeczywistej maszyny typu – DAR, $k = 3$ przyjmuje postać:

$$\underline{y} = \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\alpha}\,, \tag{16}$$

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} Y_{2\,1} & Y_{1\,2} & Y_{0\,3} \\ Y_{3\,1} & Y_{2\,2} & Y_{1\,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{N_p\,1} & Y_{(N_p-1)\,2} & Y_{(N_p-2)\,3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix}, \tag{17}$$

gdzie:

- $\underline{y}$ – macierz sygnałów wyjściowych z modelu rzeczywistego maszyny typu – DAR,
- $\underline{\alpha}$ – macierz współczynników równania modelu rzeczywistego maszyny typu – DAR,
- $\underline{Y}$ – macierz prostokątna sygnałów wyjściowych z idealnej maszyny typu – DAR (moce chwilowe),
- N_p – numer ostatniego pomiaru sygnału z idealnej maszyny typu – DAR.

W wyniku identyfikacji modelu kroczenia idealnej maszyny typu – DAR, uzyskano równanie różnicowe III rzędu postaci:

$$y(n) = \alpha_1 \cdot y(n-1) + \alpha_2 \cdot y(n-2) + \alpha_3 \cdot y(n-3), \tag{18}$$

gdzie: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – współczynniki modelu matematycznego kroczącej rzeczywistej maszyny typu – DAR.

Równanie różnicowe (18) poddajemy przekształceniu Z, (dyskretna transformata Laplace'a) [1], a wtedy otrzymujemy:

$$Y(z) = \alpha_1 \cdot z^{-1} \cdot Y(z) + \alpha_2 \cdot z^{-2} \cdot Y(z) + \alpha_3 \cdot z^{-3} \cdot Y(z), \tag{19}$$

gdzie:

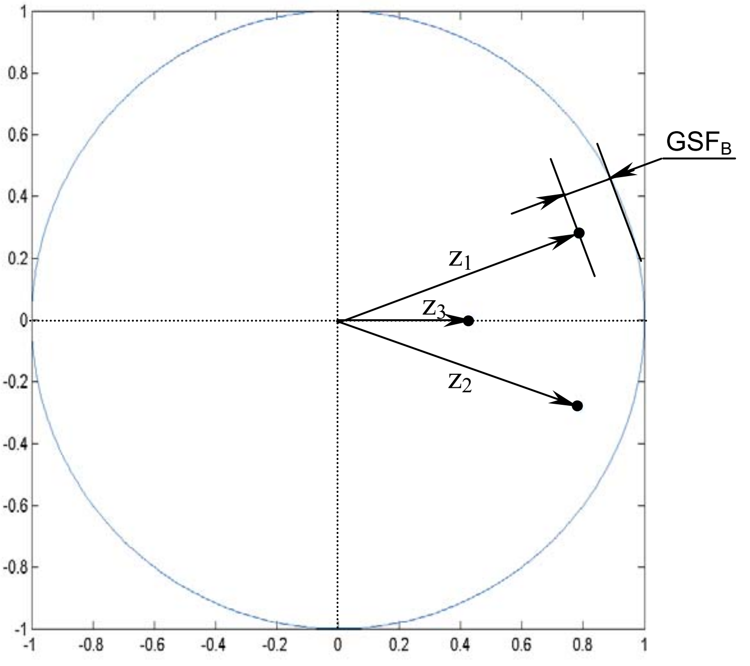
$Y(z)$ – transformata Z sygnału z idealnej maszyny – DAR,

$y(n)$ – sygnał dyskretny uzyskany w n-tej chwili pomiarowej.

Zakładając, że transformata impulsowa $Y(z) \neq 0$, to równanie (19) przyjmuje na płaszczyźnie Gaussa postać

$$z^3 - \alpha_1 \cdot z^2 - \alpha_2 \cdot z - \alpha_3 = 0\,. \tag{20}$$

Z równania (20), dla znanych współczynników równania modelu rzeczywistej maszyny typu – DAR α_1, α_2 i α_3, otrzymujemy zawsze trzy różne pierwiastki z_1, z_2, z_3, których liczba równa jest liczbie współczynników identyfikacji α. Pierwiastki te nanosimy na płaszczyznę Gaussa.



Rys. 2. Położenie pierwiastków na płaszczyźnie Gaussa, na tle okręgu o promieniu jeden, dla pary kinematycznej („tułów", „udo") pełniącej funkcję stawu biodrowego rzeczywistej maszyny typu – DAR, podczas jej kroczenia w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni. Współczynniki identyfikacji to: $\alpha_1 =$ 2,002649, $\alpha_2 =$ -1,371324, $\alpha_3 =$ 0,286331

Położenie pierwiastków dla inny par kinematycznych pełniących funkcje stawu kolanowego i stawu skokowo-goleniowego rzeczywistej maszyny typu – DAR są podobne tzn. (dwa pierwiastki zespolone-sprzężone i jeden rzeczywisty).

4. DEFINICJA WSKAŹNIKA ZAPASU BEZPIECZEŃSTWA PODCZAS KROCZENIA DWUNOŻNEJ RZECZYWISTEJ MASZYNY TYPU – DAR

Definicja wskaźnika zapasu bezpieczeństwa GSF kroczącej rzeczywistej maszyny typu – DAR na płaszczyźnie Gaussa brzmi:

„Jest to najmniejsza odległość modułu pierwiastka rzeczywistego lub modułu jednego z dwóch pierwiastków zespolonych sprzężonych równania zmiennej zespolonej na płaszczyźnie Gaussa:

$$\mathrm{GSF} = (1 - |Z(\alpha_i)|)_{\mathrm{MIN}}, \quad \text{niemianowane,} \tag{21}$$

gdzie: i = 1, 2, 3 – numery współczynników równań identyfikacji, α_i – rzeczywistego modelu maszyny typu – DAR)."

Z tej definicji tych wynika, że kroczenie rzeczywistej maszyny typu – DAR staje się mniej bezpieczne, jeżeli pierwiastki jej równania zmiennej zespolonej (20) zbliżają się do brzegu okręgu o promieniu jeden, na płaszczyźnie Gaussa.

Dla pary kinematycznej pełniącej funkcje stawu biodrowego rzeczywistej maszyny typu – DAR wskaźnik zapasu bezpieczeństwa wg wzoru (21) wynosi GSF= 0,130091.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Do tej pory badacze i konstruktorzy dwunożnych antropomorficznych robotów kroczących nie rozwiązali zagadnienia dotyczącego wyznaczania krytycznej prędkości jej kroczenia V_{kr} (tzn. prędkości maksymalnej) w płaszczyźnie strzałkowej ruchu.

W naszym przypadku, aby było to możliwe należy zidentyfikować model matematyczny mocy chwilowych rozwijanych przez napędy w poszczególnych parach kinematycznych nóg kroczącej rzeczywistej maszyny typu – DAR. Jest to możliwe po wykonaniu przez robota pierwszego kroku (w celu pozyskania niezbędnych danych do identyfikacji)! W pamięci układu robota kroczącego zapisywane są dyskretne wartości rozwijanych mocy chwilowych, w poszczególnych parach kinematycznych nóg robota. Z doświadczenia wiadomo, że wraz ze wzrostem prędkości i częstotliwości chodu człowieka istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń takich jak np. (upadek, potknięcie się, zmiana współczynnika tarcia stopy robota o podłoże, co wywołuje zjawisko poślizgu itp.). Podobne zdarzenia mogą wystąpić podczas kroczenia rzeczywistej maszyny typu–DAR, w warunkach laboratoryjnych i polowych. Wyznaczanie współczynnika bezpieczeństwa GSF może z dużym prawdopodobieństwem uchronić rzeczywistą maszynę typu–DAR przed wymienionymi niekorzystnymi zdarzeniami i umożliwi regulację jej prędkości kroczenia, w warunkach laboratoryjnych a nawet polowych.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] K. Jaworek Metody oceny stanu aparatu ruchu człowieka na przykładzie chodu. Monografia (w przygotowaniu do druku 2009).

[2] Wilks S.: Mathematical Statistics. Ed. by John Wiley and Sons, New York, 1962.

[3] Fisher R.A.: Statistical Method for Research Workers, Olivier and Boyd, Edinburgh, 1925.

[4] Linnik J. W.: Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowywania obserwacji, PWN, Warszawa, 1979.

[5] Manerowski J.: Identyfikacja modeli ruchu sterowanych obiektów latających, Wydawnictw Naukowe ASKON, Warszawa, 1999.

[6] Bubnicki Z.: Identyfikacja obiektów sterowania, PWN, Warszawa, 1974.

[7] Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania, WNT, Warszawa, 1983.

[8] Mańczak K., Nahorski Z.: Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych, PWN, Warszawa, 1983.

[9] K. Jaworek: Metoda wskaźnikowej oceny lokomocji człowieka na przykładzie chodu i biegu. Rozprawa habilitacyjna. Wyd. IBiB-PAN, Zeszyt nr 32, Warszawa, 1992.