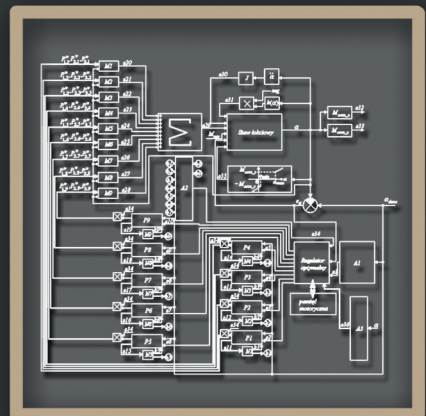
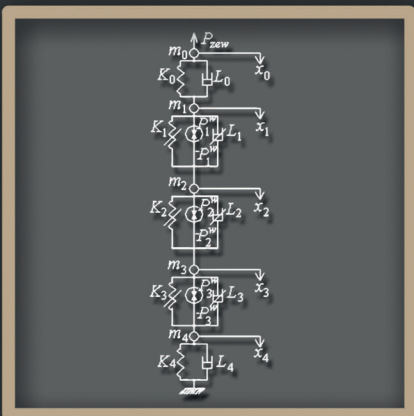
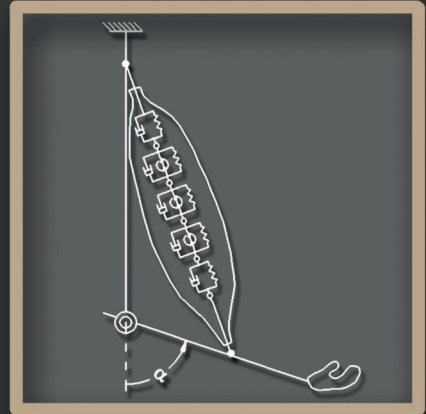


Wiktoria Wojnicz
Edmund Wittbrodt

MODELE DYSKRETNE W ANALIZIE DYNAMIKI MIĘŚNI SZKIELETOWYCH UKŁADU RAMIĘ-PRZEDRAMIĘ



PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Romuald Szymkiewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Janusz T. Cieśliński

RECENZENCI

Jan Awrejcewicz

Stanisław Wojciech

PROJEKT OKŁADKI

Krzysztof Krzempek

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.gda.pl/wydawnictwo/oferta>

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2012

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-424-5

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 13,9, ark. druku 13,25, 118/701

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

SPIS TREŚCI

WYKAZ PODSTAWOWYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ.....	5
1. WSTĘP.....	11
2. WPROWADZENIE.....	13
2.1. Opis układów mięśniowo-szkieletowych.....	13
2.1.1. Mięsień szkieletowy poprzecznie prążkowany.....	13
2.1.1.1. Budowa mięśnia.....	13
2.1.1.2. Pobudzenie i kurczenie się mięśnia.....	17
2.1.1.3. Zaburzenia funkcjonowania mięśnia.....	20
2.1.1.4. Narządy pomocnicze mięśni.....	20
2.1.2. Zespół mięśni szkieletowych w układzie ramię-przedramię.....	21
2.1.2.1. Mięśnie ramienia i przedramienia.....	21
2.1.2.2. Budowa stawu łokciowego.....	29
2.1.3. Koordynacja ruchu zespołu mięśni.....	32
2.1.4. Metody badania czynności mięśni.....	35
2.2. Opis stosowanych modeli.....	37
2.2.1. Charakterystyki mechaniczne mięśnia.....	37
2.2.2. Modelowanie zachowania mięśnia.....	39
2.2.2.1. Modele jednowymiarowe.....	40
2.2.2.2. Modele dwuwymiarowe i trójwymiarowe.....	46
2.2.3. Modelowanie zachowania zespołu mięśni.....	48
2.2.3.1. Metody oparte na pomiarze sygnałów EMG mięśni.....	49
2.2.3.2. Metody oparte na technikach optymalizacyjnych.....	53
2.2.4. Uwagi końcowe.....	61
2.3. Zakres monografii.....	62
3. KONCEPCJE NOWYCH MODELI ZACHOWANIA MIĘŚNIA I ZESPOŁU MIĘŚNI.....	66
3.1. Model mięśnia.....	66
3.1.1. Ogólne zasady modelowania.....	66
3.1.1.1. Fizjologiczna podstawa modelowania.....	66
3.1.1.2. Sposób modelowania.....	67
3.1.1.3. Modelowanie właściwości lepkosprężystych.....	70
3.1.2. Model reologiczny.....	72
3.1.3. Model matematyczny.....	75
3.1.4. Weryfikacja doświadczalna modeli.....	77
3.1.5. Wyznaczanie parametrów modelu.....	79
3.1.5.1. Parametry elementów masowych, sprężystych i lepkich.....	79
3.1.5.2. Identyfikacja właściwości lepkosprężystych.....	83
3.1.5.3. Siły wewnętrzne w elementach siłowych.....	85
3.1.5.4. Identyfikacja sił wewnętrznych.....	87
3.1.6. Ograniczenia w modelu.....	91
3.1.7. Modelowanie wybranych czynności mięśnia.....	93
3.1.7.1. Skurcz koncentryczny i ekscentryczny.....	94
3.1.7.2. Skurcz izotoniczny.....	94
3.1.7.3. Skurcz izometryczny.....	95
3.1.7.4. Skurcz auksotoniczny.....	99
3.1.7.5. Skurcz, jako zadana funkcja czasu przemieszczenia przyczepu mięśnia.....	99
3.1.8. Bilans energetyczny pracy modelu mięśnia.....	101
3.2. Model zespołu mięśni układu ramię-przedramię.....	102

3.2.1. Ogólna charakterystyka modelu	102
3.2.2. Model 2D	103
3.2.2.1. Dynamiczne równanie obrotu przedramienia	105
3.2.2.2. Zachowanie przedramienia w granicznych położeniach ruchu	107
3.2.3. Model 3D	108
3.2.3.1. Dynamiczne równanie obrotu przedramienia	108
3.2.3.2. Zachowanie przedramienia w granicznych położeniach ruchu	111
3.2.4. Unikanie efektu „ściskania” mięśnia	111
3.2.5. Obliczenie reakcji dynamicznych w stawie łokciowym	112
3.2.6. Modelowanie obrotu przedramienia	115
3.2.7. Metoda szacowania sił mięśni rzeczywistego zespołu mięśniowego	115
3.3. Ogólne koncepcje sterowania	117
3.3.1. Sterowanie zachowaniem modelu mięśnia	117
3.3.2. Sterowanie zachowaniem modelu zespołu mięśni	121
4. SYMULACJE NUMERYCZNE ORAZ WERYFIKACJA MODELU	129
4.1. Mięsień pojedynczy	129
4.1.1. Skurcz koncentryczny i ekscentryczny	130
4.1.2. Skurcz izotoniczny	134
4.1.3. Skurcz izometryczny	139
4.1.4. Skurcz izotoniczno-izometryczny	142
4.1.5. Skurcz przy zadanym przemieszczeniu przyczepu modelu mięśnia	144
4.1.6. Identyfikacja właściwości lepkosprężystych modelu	153
4.1.7. Identyfikacja sił wewnętrznych modelu	155
4.1.8. Bilans energetyczny pracy modelu mięśnia	156
4.1.9. Weryfikacja modelu mięśnia	158
4.2. Zespół mięśni układu ramię-przedramię	162
4.2.1. Dane wejściowe	162
4.2.2. Symulacja obrotu przedramienia	167
4.2.2.1. Model 2D mięśni hipotetycznych	168
4.2.2.2. Model 3D mięśni rzeczywistych	174
4.2.2.3. Model 3D mięśni hipotetycznych	180
4.2.3. Przykład obliczeniowy zastosowania metody oszacowania sił mięśni rzeczywistego zespołu mięśniowego	185
4.2.4. Uwagi końcowe	186
5. PODSUMOWANIE I UWAGI KOŃCOWE	188
5.1. Uwagi końcowe	189
6. DODATEK	191
6.1. Metoda rozwiązywania sztywnego układu równań różniczkowych	191
6.2. Przekształcenie układu równań różniczkowych drugiego rzędu do jednego równania różniczkowo-całkowego	192
6.3. Metoda rozwiązywania równania różniczkowo-całkowego	194
6.4. Metoda rozwiązywania odwrotnego zadania dynamiki	195
BIBLIOGRAFIA	198
Streszczenie w j. polskim	207
Streszczenie w j. angielskim	208
SKOROWIDZ	209

WYKAZ PODSTAWOWYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ

$\dot{()}$	$\equiv \frac{d()}{dt}$	– pierwsza pochodna funkcji $()$ względem czasu
$\ddot{()}$	$\equiv \frac{d^2()}{dt^2}$	– druga pochodna funkcji $()$ względem czasu
$\dddot{()}$	$\equiv \frac{d^3()}{dt^3}$	– trzecia pochodna funkcji $()$ względem czasu
$()^{(iv)}$	$\equiv \frac{d^4()}{dt^4}$	– czwarta pochodna funkcji $()$ względem czasu
$\text{Im}(\dots)$		– część urojona
$\text{Re}(\dots)$		– część rzeczywista
α		– kąt obrotu przedramienia [rad]
α_g		– graniczna wartość kąta obrotu przedramienia [rad]
α_{dane}		– zadany kąt obrotu przedramienia [rad]
α_{max}		– maksymalny kąt obrotu przedramienia [rad]
α_{min}		– minimalny kąt obrotu przedramienia [rad]
κ		– współczynnik proporcjonalności [s]
θ_i		– i -ty kąt [rad]
ρ_m		– gęstość tkanki mięśniowej [kg/m^3]
ρ_s		– gęstość tkanki ścięgnistej [kg/m^3]
τ		– zmienna czasu stosowana w funkcji podcałkowej [s]
ξ_i		– współczynnik zdrowotności i -tego fragmentu brzośca mięśnia [-]
$\xi_{i,j}$		– współczynnik zdrowotności i -tego fragmentu brzośca j -tego mięśnia [-]
$\delta_{m,max}$		– maksymalne naprężenie tkanki mięśniowej [Pa]
$\delta_{sc,max}$		– maksymalne naprężenie tkanki ścięgnistej [Pa]
$\gamma_{x_i}, \gamma_{y_i}, \gamma_{z_i}$		– kąty zawarte pomiędzy linią działania siły kurczącej i -tego mięśnia P_{kurcz_i} a osiami X, Y, Z [rad]
A_{HV}^i		– j -ta amplituda siły funkcji Heavyside'a [N]
a_{is}		– maksymalne dodatnie i -te przemieszczenie [m]
a_{iw}		– maksymalne ujemne i -te przemieszczenie [m]
b_{HV}		– okres utrzymania niezmiennej amplitudy A_{HV}^j [s]
b_{is}		– maksymalna dodatnia i -ta prędkość [m/s]
b_{iw}		– maksymalna ujemna i -ta prędkość [m/s]
b_{izok}		– stała prędkość skurczu izokinetycznego [m/s]
B_{k_i} i \bar{B}_{k_i}		– k -ty współczynnik i -tego mięśnia i współczynnik sprzężony do współczynnika \bar{B}_{k_i} [-]
c_{ins}		– maksymalna siła powstająca w połączeniu brzośca ze ścięgnem przyczepu mięśnia [N]
c_{ins_i}		– maksymalna siła powstająca w połączeniu brzośca ze ścięgnem przyczepu i -tego mięśnia [N]
C_k^i		– k -ty stały współczynnik wyznaczony w i -tym kroku całkowania t_i [-]
c_{or}		– maksymalna siła powstająca w połączeniu brzośca ze ścięgnem początku mięśnia [N]

c_{or_i}	– maksymalna siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem początku i -tego mięśnia [N]
$\Delta\alpha_i$	– i -ta różnica kątów [rad]
Δl	– zmiana długości mięśnia [m]
$\Delta M(t)$	– uchyb zależny od zmiennej czasu t [N·m]
Δx_{ij}	– przyrost ij -tej współrzędnej x [m]
D_i	– i -ta średnica [m]
D_{sc}	– średnica ścięgna [m]
e	– mała liczba [–]
e_α	– różnica sygnałów [rad]
F_i^{\max}	– maksymalna siła i -tego mięśnia [N]
$F_i^{\max_izo}$	– maksymalna siła izometryczna i -tego mięśnia [N]
F_{ins}	– siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem przyczepu mięśnia [N]
F_{ins_i}	– siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem przyczepu i -tego mięśnia [N]
$F_{ins_i}^h$	– hipotetyczna siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem przyczepu i -tego mięśnia [N]
$F_{ins_i}^r$	– rzeczywista siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem przyczepu i -tego mięśnia [N]
F_{izo}	– siła w skurczu izometrycznym [N]
F_{k_i}	– k -ta funkcja pomocnicza w i -tym modelu mięśnia
F_{or}	– siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem początku mięśnia [N]
F_{or_i}	– siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem początku i -tego mięśnia [N]
$F_{or_i}^r$	– rzeczywista siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem początku i -tego mięśnia [N]
$F_{or_i}^h$	– hipotetyczna siła powstająca w połączeniu brzuśca ze ścięgnem początku i -tego mięśnia [N]
g_i	– sygnał wyjściowy i -tego nieliniowego elementu zamkniętego układu sterowania zachowaniem modelu mięśnia
g_{w_i}	– i -ty współczynnik wzmocnienia [–]
G_m	– siła ciężkości struktury przedramię-ręka [N]
$G(s)$	– transmitancja operatorowa obiektu
$H_w, H_{w1}, H_{w2}, H_{w3}$	– macierze lokalizacji sił wewnętrznych
H_z	– macierz lokalizacji sił zewnętrznych
h_i	– długość i -tego mięśnia mierzona wzdłuż jego osi długiej [m]
$h(\alpha)$	– ramię siły zależne od kąta α [m]
$h_i(\alpha)$	– ramię siły i -tego modelu mięśnia [m]
J_y	– masowy moment bezwładności struktury przedramię-ręka względem osi Y [kg·m ²]
$\mathbf{K}, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$	– macierze sztywności modelu mięśnia [N/m]
K_{ij}	– współczynnik sztywności ij -tego elementu sprężystego [N/m]
K_{k_i}	– współczynnik sztywności k -tego elementu sprężystego i -tego mięśnia [N/m]
K_k^p	– k -ty współczynnik sztywności elementu sprężystego dla p -tego rodzaju pracy mięśnia [N/m]
$k_M(\alpha)$	– współczynnik sztywności nieliniowej sprężyny skrętnej [N·m/rad]
$l(l_i)$	– długość mięśnia (i -tego mięśnia) [m]
\mathbf{L}	– współczynnik tłumienia elementu lepkiego [N·s/m]
$\mathbf{L}, \mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$	– macierze tłumienia modelu mięśnia [N·s/m]
l_0	– długość spoczynkowa mięśnia [m]
L_0^m	– optymalna długość brzuśca mięśnia [m]
λ	– współczynnik potęgowy [–]
l_b	– długość brzuśca mięśnia [m]

L_{ij}	– współczynnik tłumienia ij -tego elementu lepkiego [N·s/m]
L_{k_i}	– współczynnik tłumienia k -tego elementu lepkiego i -tego mięśnia [N·s/m]
L_k^p	– k -ty współczynnik tłumienia elementu lepkiego dla p -tego rodzaju pracy mięśnia [N·s/m]
m	– masa mięśnia [kg]
$\mathbf{M}, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$	– macierze mas modelu mięśnia [kg]
M_{com}	– moment kompensacyjny [N·m]
$M_{com_i}^{pr}$	– składowa momentu kompensacyjnego M_{com_r} i -tego modelu mięśnia prostownika w modelu 2D zespołu mięśni układu ramię-przedramię [N·m]
$M_{com_i}^{zg}$	– składowa momentu kompensacyjnego M_{com_r} i -tego modelu mięśnia zginacza w modelu 2D zespołu mięśni układu ramię-przedramię [N·m]
M_{com_r}	– moment kompensacyjny nieliniowej sprężyny skrętnej [N·m]
$M_{com_x}, M_{com_y}, M_{com_z}$	– składowe momentu kompensacyjnego względem osi X, Y, Z [N·m]
M_i	– moment siły i -tego mięśnia [N·m]
m_{ij}	– współczynnik masowy ij -tego elementu masowego [kg]
$M_i^{pr}(\alpha)$	– moment siły i -tego prostownika w modelu 2D [N·m]
$M_i^{zg}(\alpha)$	– moment siły i -tego zginacza w modelu 2D [N·m]
m_{k_i}	– współczynnik masowy k -tego elementu masowego i -tego mięśnia [kg]
$M(R_{x_i}), M(R_{y_i}), M(R_{z_i})$	– składowe momentów sumy sił reakcji i/lub sił więzadeł i -tego mięśnia względem osi X, Y, Z [N·m]
M_{zew}	– moment sił zewnętrznych względem osi stawu [N·m]
$M_{zew_x}, M_{zew_y}, M_{zew_z}$	– składowe momentu zewnętrznego względem osi X, Y, Z [N·m]
P	– siła [N]
$\mathbf{P}_w, \mathbf{P}_{w1}, \mathbf{P}_{w2}$	– wektory sił wewnętrznych modelu mięśnia [N]
P_a	– składowa czynna siły kurczącej [N]
P_{a_i}	– składowa czynna siły kurczącej i -tego mięśnia [N]
$P_{a_i}^{pr}$	– składowa aktywna siły kurczącej generowanej przez i -ty model mięśnia prostownika w modelu 2D [N]
$P_{a_i}^{zg}$	– składowa aktywna siły kurczącej generowanej przez i -ty model mięśnia zginacza w modelu 2D [N]
P_b	– składowa bierna siły kurczącej [N]
P_{b_i}	– składowa bierna siły kurczącej i -tego mięśnia [N]
$P_{b_i}^{pr}(\alpha)$	– składowa pasywna siły kurczącej generowanej przez i -ty model mięśnia prostownika w modelu 2D [N]
$P_{b_i}^{zg}(\alpha)$	– składowa pasywna siły kurczącej generowanej przez i -ty model mięśnia zginacza w modelu 2D [N]
$PCSA (PCSA_i)$	– powierzchnia poprzecznego przekroju fizjologicznego mięśnia (i -tego mięśnia) [m ²]
$PCSA_{ins}$	– powierzchnia poprzecznego przekroju fizjologicznego ścięgna przyczepu [m ²]
$PCSA_{or}$	– powierzchnia poprzecznego przekroju fizjologicznego ścięgna początku [m ²]
p_i	– i -ty splot funkcji
P_{ij}^w	– siła wewnętrzna generowana przez ij -ty element kurczliwy [N]
P_{iz}	– siła przyczepu mięśnia w czasie skurczu izotoniczno-izometrycznego [N]
$P_{k_i}^w$	– siła wewnętrzna generowana przez k -ty element kurczliwy i -tego mięśnia [N]
P_{komp}	– siła kompensacyjna [N]

P_{komp}^k	– siła kompensacyjna w k -tym kroku całkowania t_k [N]
P_{kurcz}	– siła kurcząca [N]
P_{kurcz_i}	– siła kurcząca i -tego mięśnia [N]
$P_{kurcz_i}^r$	– rzeczywista siła kurcząca i -tego mięśnia [N]
$P_{kurcz_i}^{zg}(\alpha)$	– siła kurcząca i -tego zginacza w modelu 2D [N]
$P_{kurcz_i}^{pr}(\alpha)$	– siła kurcząca i -tego prostownika w modelu 2D [N]
$P_{max_j}^w$	– maksymalna siła wewnętrzna generowana przez j -ty fragment brzuśca [N]
$P_x(\alpha_1), P_z(\alpha_1)$	– składowa siły bezwładności względem osi X i Z zależna od funkcji α_1
P_{zew}	– siła zewnętrzna [N]
$P_{zew_rrc_i}$	– i -ta siła zewnętrzna obliczona z równania różniczkowo-całkowego [N]
$P_{zew_urr_i}$	– i -ta siła zewnętrzna obliczona z układu równań różniczkowych [N]
P_{zew_i}	– zewnętrzna siła działająca na i -ty mięsień [N]
R, R_x, R_y, R_z	– siła reakcji i jej składowe względem osi X, Y, Z [N]
r_i	– ramię działania siły i -tego mięśnia [m]
$R_{x,i}, R_{y,i}, R_{z,i}$	– składowe sumy sił reakcji i/lub sił więzadeł i -tego mięśnia względem osi X, Y, Z [N]
r_x^R, r_y^R, r_z^R	– współrzędne punktu przyłożenia wypadkowej siły reakcji R [m]
σ_{max}	– maksymalne naprężenie mięśnia [Pa]
s	– operator transformaty Laplace'a
s_i	– i -ta wartość własna [s^{-1}]
S_{ins}	– siła odrywania w punkcie przyczepu mięśnia [N]
s_{k_i}	– k -ta wartość własna i -tego mięśnia [s^{-1}]
\bar{s}_k	– sprzężona wartość własna do wartości własnej s_k [s^{-1}]
S_{or}	– siła odrywania w punkcie początku mięśnia [N]
t	– czas (zmienna czasu lub krok sterowania) [s]
Δt	– długość kroku całkowania, [s]
t_0	– chwila początkowa [s]
t_i	– i -ta chwila całkowania [s]
t_k	– chwila końcowa [s]
t_m	– m -ta chwila całkowania [s]
V_b	– objętość brzuśca mięśnia [m^3]
V_i	– objętość i -tego mięśnia [m^3]
W_E	– praca sił sprężystych układu [J]
W_L	– praca sił lepkich układu [J]
W_M	– energia kinetyczna układu [J]
W_{wew}	– praca sił wewnętrznych układu [J]
W_{zew}	– praca siły zewnętrznej układu [J]
w	– współczynnik wagowy [–]
x	– współrzędna lub przemieszczenie [m]
\mathbf{x}, \mathbf{x}_1	– wektory przebiegów przemieszczeń wyznaczonych punktów modelu mięśnia [m]
x_{dane}	– zadane przemieszczenie przyczepu modelu mięśnia [m]
x_{i_obl}	– obliczone i -te przemieszczenie [m]
x_i^h	– i -te przemieszczenie hipotetyczne [m]
x_{ij}	– j -ta współrzędna i -tego mięśnia [m]
x_i^k	– i -ta współrzędna w k -tej chwili czasu t_k [m]
$x_{in_i}, y_{in_i}, z_{in_i}$	– współrzędne przyczepu i -tego mięśnia w układzie prostokątnym XYZ [m]
x_i^r	– i -te przemieszczenie rzeczywiste [m]
$x_{j_i}^h$	– j -te przemieszczenie hipotetyczne i -tego modelu mięśnia [m]
$x_{j_i}^h\text{dane}$	– zadane j -te przemieszczenie hipotetyczne i -tego modelu mięśnia [m]

x'_{j_i}	– j -te przemieszczenie rzeczywiste i -tego modelu mięśnia [m]
x_{k_i}	– k -ta współrzędna i -tego mięśnia [m]
$x_{or_i}, y_{or_i}, z_{or_i}$	– współrzędne początku i -tego mięśnia w układzie prostokątnym XYZ [m]
x_u	– granica przemieszczeń dozwolonych [m]
$x_{Wxz}, y_{Wxz}, z_{Wxz}$	– współrzędne początkowe środka ciężkości struktury ramię-przedramię [m]
x_{zi}	– zadane i -te przemieszczenie [m]
y	– współrzędna [m]
y_i	– i -ta współrzędna pomocnicza [m]
Ω	– funkcja celu

1. WSTĘP

Obecny poziom wiedzy umożliwia analizę zjawisk zachodzących w układach złożonych oraz symulowanie ich zachowania przy użyciu modelowania matematycznego. Do układów złożonych należą między innymi układy biologiczne, nazywane układami biomechanicznymi w przypadku opisanego ich funkcjonowania za pomocą zasad mechaniki.

Modelowanie zachowania złożonego układu biologicznego polega na opisanu i powiązaniu szeregu przyczynowo-skutkowych zjawisk zachodzących w tym układzie. Rodzaj uwzględnianych zjawisk i sposób modelowania ich zachowania zależy od doświadczenia i umiejętności badacza-modelarza. Uwzględnienie wszystkich zaobserwowanych zjawisk jest niemożliwe i w większości przypadków prowadzi do nadmiernej komplikacji modelu oraz braku możliwości uzyskania jego rozwiązania.

Model matematyczny układu biomechanicznego jest zbiorem równań i (lub) nierówności, które można rozwiązać metodami analitycznymi, numerycznymi lub analityczno-numerycznymi. Za pomocą metod analitycznych można uzyskać dokładne rozwiązania w postaci funkcji ciągłych, ale ich stosowanie jest ograniczone do układów mniej złożonych. Metody numeryczne umożliwiają uzyskanie rozwiązań przybliżonych, których dokładność zależy od stosowanych algorytmów i technik obliczeniowych, ale umożliwiają one analizę układów bardziej złożonych.

Opracowanie modelu rzeczywistego układu biologicznego wciąż napotyka na szereg trudności, które wynikają z braku metody pozwalającej uzyskać aktualne dane o składowych badanego układu żywego. Funkcjonowanie organów (narządów) znajdujących się w organizmie żywym znacznie się różni od wyodrębnionych z organizmu nieżywego i przechowywanych w środowisku konserwującym. W celu rozwiązania tego problemu podejmowane są próby tworzenia układów zastępczych o innej naturze, np. w postaci układów elektrycznych lub pneumatycznych, które odzwierciedlają funkcjonowanie badanego układu biologicznego. Jednak układy te nie uwzględniają wszystkich istotnych zjawisk zachodzących w rzeczywistym układzie biologicznym. Innym rozwiązaniem jest stosowanie modelowania matematycznego. Wymaga ono wstępnego sformułowania modelu matematycznego opisującego zaobserwowany wcześniej przebieg zjawisk przyczynowo-skutkowych w układzie biologicznym. Następnie model ten jest poddawany procedurze weryfikacji ilościowej i jakościowej, której wyniki są podstawą do wnioskowania o adekwatności modelu lub o potrzebie jego ulepszenia (korekcji). Należy zaznaczyć, iż w praktyce układ rzeczywisty można badać w bardzo wąskim zakresie, natomiast badania numeryczne nad jego modelem matematycznym pozwalają znacznie poszerzyć ten zakres i zaobserwować zjawiska niewidoczne w trakcie badań doświadczalnych.

Monografia jest poświęcona modelowaniu zachowania zespołu mięśni szkieletowych poprzecznie prążkowanych, które należą do aparatu ruchowego człowieka i pozwalają na wykonywanie: ruchów określanych przez świadomość lub ruchów wyuczonych (zautomatyzowanych), a także odruchów nieświadomych. Przedstawiono w niej dwa nowe modele: model zachowania mięśnia oraz model zachowania zespołu mięśni układu ramię-przedramię. Modele te mogą być używane zarówno do badania stanów dynamicznych, jak i statycznych.

Monografia bazuje na rozprawie doktorskiej W. Wojnicz „Modelowanie i symulacja zachowania zespołu mięśni szkieletowych układu ramię-przedramię” [168], której

promotorem jest prof. E. Wittbrodt. Rozprawa została wykonana w Katedrze Mechaniki i Mechatroniki Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, a obroniona na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej.

Monografia składa się z siedmiu rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi niniejszy wstęp. Drugi zawiera wprowadzenie do problematyki, w tym opis fizjologiczny badanych układów, analizę obecnie stosowanych w biomechanice modeli zachowania pojedynczego mięśnia oraz zespołu mięśni. W trzecim omówiono koncepcje nowych modeli zachowania mięśnia i zespołu mięśni w układzie ramię-przedramię, a także koncepcje sterowania nimi. W czwartym przedstawiono wyniki symulacji numerycznych zaproponowanych modeli, a także omówiono wyniki weryfikacji jakościowej. Piąty rozdział zawiera podsumowanie pracy. W szóstym rozdziale opisano algorytmy obliczeniowe i przekształcenia matematyczne. Siódmy rozdział zawiera wykaz literatury.

Autorzy monografii pragną podziękować prof. Dagmarze Tejszerskiej oraz prof. Janowi Awrejcewiczowi za cenne uwagi, które zostały uwzględnione przy opracowywaniu monografii.

Obliczenia numeryczne wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Monografia sfinansowana została ze środków projektu badawczego nr 3156/B/T02/2010/39, sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.