

A.T. ULIKYAN, A. L. MKHITARYAN, Z.G. KHANAMIRYAN
DESIGNING A SYSTEM OF NONLINEAR CONTROL OF THE
EXOSKELETON LEG BY THE GAIN SCHEDULING METHOD

The nonlinear control system of the exoskeleton leg is investigated. A group of linear PID controllers is developed using the gain scheduling method to ensure the stability of the system at various operating points.

Keywords: nonlinear systems, gain scheduling, PID controller, exoskeleton, system modeling.

ՀՏԴ 62-52

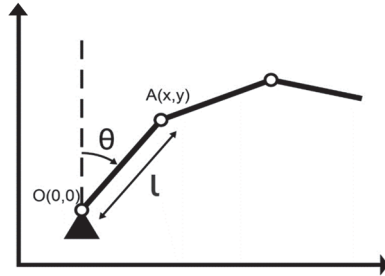
Ա.Լ. ՄԻՒԹԱՐՅԱՆ, Ա.Թ. ՈՒԼԻԿՅԱՆ, Զ.Գ. ԽԱՆԱՄԻՐՅԱՆ
ՎԵՐԻՆ ՎԵՐՋՈՒՅԹԻ ԲԻՈՆԻԿԱԿԱՆ ՊՐՈԹԵԶԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Քննարկվում են նախագծված վերին վերջույթի բիոնիկական պրոթեզի մաթեմատիկական մոդելը և կառավարման համակարգը: Բերվում են Էյլեր-Լագրանժի մեթոդի կիրառմամբ դուրս բերված համակարգի դինամիկ հավասարումները: Ներկայացվում են MATLAB/Simulink միջավայրում նախագծված ծրագրային մոդելով ստացված փորձնական արդյունքները և կատարված վերլուծությունը:

Առանցքային բառեր. վերին վերջույթ, բիոնիկ պրոթեզ, կառավարման համակարգ, մոդելավորում, մաթեմատիկական մոդելավորում, Էյլեր-Լագրանժի հավասարումներ, համեմատող ինտեգրող դիֆերենցող (ՀԻԴ) կարգավորիչ:

Ներածություն. Վերջույթներից որևէ մեկը կորցրած (անդամահատված) մարդիկ առաջին հերթին զրկվում են ինքնասպասարկման հնարավորությունից, որի պատճառով պրոթեզավորման հիմնական նպատակը դառնում է մարդկանց ինքնասպասարկման հնարավորության վերականգնումը: Քանի որ ներկայիս գիտատեխնիկական զարգացածության մակարդակը հնարավորություն չի տալիս՝ ստեղծելու այնպիսի արհեստական պրոթեզներ, որոնք կկարողանան վերականգնել մարդու գործառույթներն ամբողջապես, ուստի պրոթեզավորման հիմնական խնդիրն է դառնում ստեղծել այնպիսի տեխնիկական սարքեր, որոնք առավելագույնս կկարողանան լրացնել մարդու կորցրած գործառույթները, այսինքն նրան հնարավորություն կտան՝ կատարելու առօրյա հիմնական շարժումներ [1]:

Համակարգի մաթեմատիկական մոդելի ուսումնասիրությունը. Նկ. 1-ում բերված է բիոնիկական պրոթեզի մեկ մատի կինեմատիկական սխեման:



Նկ. 1. Մեկ մատի կինեմատիկական սխեման

Հիմք ընդունելով բերված կինեմատիկ սխեման՝ ստացվում են A(x,y) կետի կոորդինատները՝

$$x = l \sin(\theta), y = l \cos(\theta), (1)$$

որտեղ x-ը և y-ը մատի ծայրակետի կոորդինատներն են, l-ը՝ մատի երկարությունը, իսկ θ -ն՝ մատի կազմած անկյունը ուղղահայաց առանցքի հետ:

Գծային արագությունների պրոյեկցիաները x և y առանցքների վրա ստացվում են էյլեր-Լագրանժի հավասարումից՝

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial q_i} \cdot \dot{q}_i = \frac{\partial f}{\partial q_1} \cdot \dot{q}_1 = \frac{\partial(l \sin(\theta))}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = l \cos(\theta) \cdot \dot{\theta}, (2)$$

$$\dot{y} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial q_i} \cdot \dot{q}_i = \frac{\partial g}{\partial q_1} \cdot \dot{q}_1 = \frac{\partial(l \cos(\theta))}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = -l \sin(\theta) \cdot \dot{\theta}: (3)$$

Արդյունքում գծային արագությունը ստացվում է որպես արագությունների պրոյեկցիաների քառակուսային գումար ծանրության կենտրոնի նկատմամբ՝

$$V = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2} = \sqrt{(0.5l \cos(\theta) \dot{\theta})^2 + (-0.5l \sin(\theta) \dot{\theta})^2} = 0.5l \dot{\theta}, (4)$$

իսկ Լագրանժյան ֆունկցիան որոշվում է որպես կինետիկ և պոտենցիալ էներգիաների տարբերություն՝

$$L = E_k - E_p = 0.5l \dot{\theta}^2 \cdot (0.25ml + 1) = -0.5mgl \cos(\theta), (5)$$

որտեղ E_k -ն կինետիկ էներգիան է, իսկ E_p -ն՝ պոտենցիալ էներգիան[2]:

Շարժման հավասարումը ստանում է հետևյալ տեսքը՝

$$M = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0.25m \ddot{\theta} l^2 + \dot{\theta} l - 0.5mgl \sin(\theta): (6)$$

Ըստ Նյուտոնի և Օհմի օրենքների՝ շարժիչի հավասարումները կլինեն.

$$L_{ju} \frac{di_{ju}}{dt} + r_{ju} i_{ju} + c_M \omega = U, J \frac{d\omega}{dt} = M_2 - M_{\eta hu} \quad (7)$$

որտեղ i_{ju} -ն խարսխի հոսանքն է, r_{ju} -ն՝ խարսխի ակտիվ դիմադրությունը, L_{ju} -ն՝ խարսխի փաթույթի ինդուկտիվությունը, c_M -ն՝ շարժիչի հաստատունը, c_e -ն՝ շարժիչի կառուցվածքով որոշվող հաստատուն պարամետրը, k_z -ն՝ ռեդուկտորի ուժեղացման գործակիցը, U -ն՝ շարժիչի խարսխի լարումը, M_2 -ն՝ շարժիչի ուժի մոմենտը, $M_{\eta hu}$ - ն՝ դիմադրության մոմենտը, իսկ J - ն՝ շարժիչի լիսեռին բերված իներցիայի մոմենտը: Հաշվի առնելով, որ՝

$$M_2 = c_M i_{ju}, M_2 = \frac{M}{k_z}, \theta = k_z x, M_{\eta hu} = c_e \omega = c_e \dot{\theta}, L_s \frac{di_s}{dt} \approx 0, \quad (8)$$

ուժի մոմենտը կստացվի՝

$$M = \frac{U c_M k_z}{r_{ju}} - \frac{c_e c_M k_z^2 x}{r_{ju}} \quad (9)$$

Այսպիսով, հավասարեցնելով (6)-րդ և (9)-րդ հավասարումները՝ կստանանք մեկ մատի մաթեմատիկական մոդելը՝

$$\ddot{\theta} = \left(\frac{\frac{1}{2} m g l \sin(\theta) + U T_1 - T_1 c_e k_z l \cos(\theta) \dot{\theta}}{0.25 \cdot m l^2 + l} \right), \text{ որտեղ } T_1 = \frac{c_M k_z}{r_{ju}} \quad (10)$$

MATLAB/Simulink ծրագրային միջավայրում նախագծված բիոնիկական պրոթեզի դինամիկ մոդելի վրա ստացված են համակարգի անցողիկ գործընթացի և մատի ծայրակետի տեղաշարժման կորերը՝ հիմք ընդունելով մեկ մատի համար ստացված հավասարումը [3]:

Կառավարման համակարգի նախագծումը. Բիոնիկական պրոթեզի մաս հանդիսացող մատերի մեխանիզմների փոխանցման ֆունկցիաները ներկայացված են որպես շարժիչի, ռեդուկտորի և մատի կառուցվածքի մեխանիկական մասի ամբողջականություն:

Հիմք ընդունելով աղ. 1-ում բերված շարժիչի պարամետրերը՝ շարժիչի փոխանցման ֆունկցիան նկարագրվում է հետևյալ տեսքով [4]՝

$$W_1(s) = \frac{M(s)}{U(s)} = \frac{1.703 \cdot 10^{-9} s + 0.05421}{1.354 \cdot 10^{-11} s^2 + 0.0004322 s + 32.04} \quad (11)$$

Աղյուսակ 1

N	Տարր	Անվանումը	Արժեքը	Չափման միավորը
1	J	Շարժիչի իներցիայի մոմենտ	$3.87 \cdot 10^{-7}$	կգ*մ ²
2	B	Շփման գործակից	12.32	Ն*վրկ/մ
3	C _M	Շարժիչի հաստատուն	0.0044	վ*վրկ/ռադ
4	C _e	Շարժիչի կառուցվածքով որոշվող հաստատուն	0.0044	Ն*մ/Ա
5	r	Խարսխի փաթույթի դիմադրություն	2.6	Օմ
6	L	Խարսխի փաթույթի ինդուկտիվություն	$3.5 \cdot 10^{-5}$	Հենրի

Ռեդուկտորը ներկայացնում է ուժեղացնող օղակ, որի փոխանցման ֆունկցիան հետևյալն է՝

$$W_2(s) = k_z = 66.7: \quad (12)$$

Հաշվի առնելով, որ փոքր անկյունների դեպքում $\sin(\theta) = \theta$ -ի, ապա (10)-րդ հավասարումից կարելի է արտածել մատի մեխանիզմի փոխանցման ֆունկցիան՝

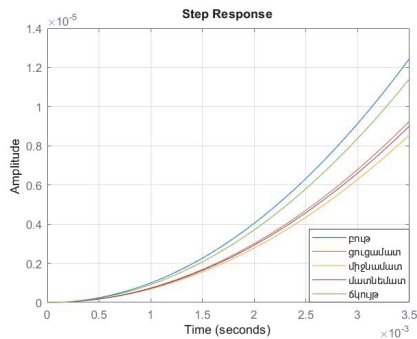
$$W_3(s) = \frac{\theta(s)}{M(s)} = \frac{4}{(m_i l_i^2 + 4I_i) s^2}: \quad (13)$$

Մատի կինեմատիկական պարամետրերը տրված են աղ. 2-ում:

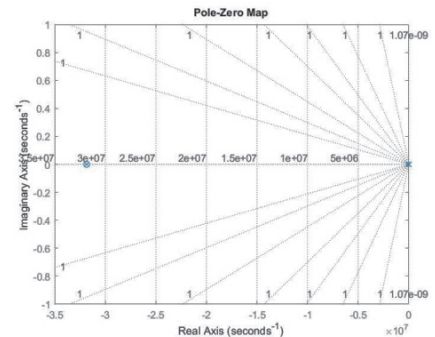
Աղյուսակ 2

i	Մափի անվանումը	m _i -զանգվածը (գրամ)	l _i -երկարությունը (մմ)
1	Բուլթ	42.6	55
2	Ցուցամատ	34.5	74
3	Միջնամատ	36.5	80
4	Մատնեմատ	30.4	76
5	Ճկույթ	22.3	60

Աղ. 2-ում ներկայացված են ձեռքի մատերի շարժման անցողիկ գործընթացի կորերը, իսկ նկ. 3-ում՝ արմատների և զրոների հողոգրաֆները, որոնցից երևում է, որ արմատները և զրոները համընկնում են, իսկ համակարգերն անկայուն են: Պայմաններին բավարարող համակարգ ստանալու համար կատարված է վերին վերջույթի՝ որպես փակ համակարգի ուսումնասիրություն, ինչպես նաև ՀԻԴ կարգավորիչի նախագծում:



Նկ.2. Բաց համակարգերի անցողիկ գործընթացի կորերը

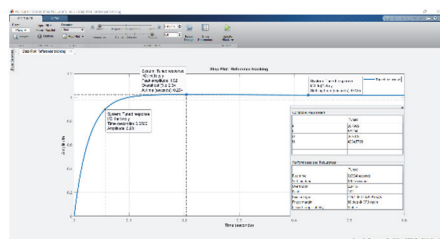


Նկ.3. Բաց համակարգի արմատների և զրոների հոդոգրաֆը

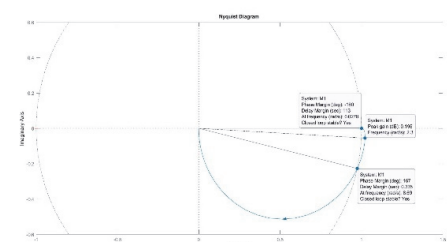
Ստացված արդյունքները. Նախագծված ՀԻԴ կարգավորիչները բիոնիկական պրոթեզի յուրաքանչյուր մատի համար ապահովում են կայունացման նույն պարամետրերը: ՀԻԴ կարգավորիչի և յուրաքանչյուր մատի կայունացման պարամետրերը բերված են աղ. 3-ում, իսկ համակարգի արձագանքը միավոր թռիչքածն ազդանշանին և Նայքվիսթի հոդոգրաֆը՝ նկ. 4-ում և նկ. 5-ում:

Աղյուսակ 3

N	K_P	K_I	K_D	Կայունացման ժամանակը	Աճման ժամանակը	Գերկարգավորումը
1	18.42	4.07	18.49	0.425 վրկ	0.0534 վրկ	2.34 %
2	26.79	5.92	26.91	0.425 վրկ	0.0534 վրկ	2.34 %
3	24.78	5.48	24.88	0.425 վրկ	0.0534 վրկ	2.34 %
4	25.45	5.63	25.55	0.425 վրկ	0.0534 վրկ	2.34 %
5	20.08	4.44	20.17	0.425 վրկ	0.0534 վրկ	2.34 %



Նկ. 4. ՀԻԴ կարգավորիչով փակ համակարգի արձագանքը միավոր թռիչքածն ազդանշանին



Նկ. 5. ՀԻԴ կարգավորիչով փակ համակարգի Նայքվիսթի հոդոգրաֆը

Եզրակացություն. Ուսումնասիրելով ձեռքի բազմագործառնության պրոթեզի ոչ գծային մոդելը՝ պարզ է դառնում, որ այն կիրառելի է ձեռքի բոլոր մատների համար: Պրոթեզի՝ որպես կառավարման համակարգի ուսումնասիրությունը թույլ է տալիս ենթադրել, որ ստացված մոդելը անկայուն է, և անհրաժեշտ է նախագծել ՀԻԴ կարգավորիչ: Նախագծված ՀԻԴ կարգավորիչի կիրառման արդյունքում ստացված փակ համակարգի արձագանքի 0.425վրկ արդյունքը բավարարում է ներկայացվող պայմաններին, քանի որ մարդու մատների արձագանքի արժեքը միջինում կազմում է 0.560վրկ: Արդյունքում կարելի է եզրակացնել, որ նախագծված համակարգը ամբողջությամբ բավարարում է առաջադրված պայմանները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ghazali R., Saad M. Z., Jali M. H. and Hussien S. Y. S.** Intelligent controller design for multifunctional prosthetics hand // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research.-November, 2017. - Vol. 6, No. 6.
2. **Morin D.** Introduction to classical mechanics. - Cambridge University, UK, 2008. - 710 p.
3. **Jali M., Rashid N., Kamarudin M., and Ghazali R.** Linear and nonlinear dynamic modeling of motorized prosthetic hand system // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. - Pakistan, November, 2016. - Vol.93, No.1. - P. 225-232.
4. **Miková L., Virgala I., and Kelemen M.** Speed control of DC motor // American Journal of Mechanical Engineering. - USA, 2016. - Vol. 4, No. 7. - P 380-384.

Ա.Լ. ՄՒՒՏԱՐՅԱՆ, Ա.Տ. ՍՒՒՂՅԱՆ, Յ.Գ. ԽԱՆԱՄԻՐՅԱՆ

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОНИЧЕСКИМ ПРОТЕЗОМ ВЕРХНЕЙ КОНЕЧНОСТИ

Обсуждаются разработанные математическая модель и система управления бионическим протезом верхней конечности. Приведены динамические уравнения системы, полученные с использованием метода Эйлера-Лагранжа. Проведен анализ экспериментальных результатов, полученных на основе модели программного обеспечения, разработанной в среде MATLAB / Simulink.

Ключевые слова: верхняя конечность, бионический протез, система управления, моделирование, математическое моделирование, уравнения Эйлера-Лагранжа, пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор.

A.L. MKHITARYAN, A.T. ULIKYAN, Z.G. KHANAMIRYAN
INVESTIGATING THE CONTROL SYSTEM OF THE UPPER LIMB
BIONIC PROSTHESIS

The mathematical model and control system of the designed upper limb bionic prosthesis are discussed. The dynamic equations of the system derived using the Euler-Lagrange method are presented. The experimental results obtained based on the software model designed in MATLAB / Simulink environment are analyzed.

Keywords: upper limb, bionic prpsthesis, control system, modeling, mathematical model, Euler-Lagrange equation, PID controller.

УДК 62.317

С.О. СИМОНЯН, А.В. МЕЛИКЯН, М.Г. ХАЧАТРЯН
ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
РЕШЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ
ПАЛИНДРОМНЫХ ЗАДАЧ ТИПА $A(t) \cdot X(t) + X(t) \cdot A(t) = 0$

Предложены три численно-аналитических декомпозиционных метода решения отмеченного класса задач, основанных на дифференциальных преобразованиях.

Ключевые слова: однопараметрические матричные палиндромные задачи, дифференциальные преобразования, численно-аналитические декомпозиционные методы решения.

Введение. В работе [1] предложены аналитические декомпозиционные методы решения однопараметрических матричных палиндромных задач с комплексными матрицами

$$A(t)_{m \times m} \cdot X(t)_{m \times m} + X(t)_{m \times m} \cdot A(t)_{m \times m} = 0_{m \times m}, \quad (1)$$

где m - порядок матриц.

С учетом разложений

$$A(t) = A_1(t) + j \cdot A_2(t), \quad (2)$$

$$X(t) = X_1(t) + j \cdot X_2(t) \quad (3)$$

получены следующие однородные гиперматричные уравнения:

$$\begin{bmatrix} A(t) & 0 \\ 0 & A(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} + \begin{bmatrix} X_1(t) & 0 \\ 0 & X_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} A(t) \\ A(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2m \times m}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} A_1(t) & -A_2(t) \\ A_2(t) & A_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} + \begin{bmatrix} X_1(t) & -X_2(t) \\ X_2(t) & X_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} A_1(t) \\ A_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2m \times m}, \quad (5)$$