

H.G. DARBINYAN, L.M. BUNIATYAN, V.S. MINASYAN

**A CONTROL SYSTEM OF A HEXACOPTER WITH A GENERALIZED KINEMATIC SCHEME OF THE PROPELLER ARRANGEMENT**

A generalized kinematic scheme of the propeller arrangement on the hexacopter is considered, which embraces, as special cases, most of the known schemes. Analytical expressions for the matrices of cross-connections of the control system are derived. It is shown, that the introduction of a decoupling regulator compensates the cross-connections between separate channels. This allows to reduce the development of the hexacopter control system to the development of its independent channels on the basis of the classical control theory.

**Keywords:** hexacopter, kinematic scheme of the propeller arrangement, rigid cross-connections, decoupling regulator.

ՀՏԴ 681.5

**Ա.Թ. ՈՒԼԻԿՅԱՆ, Ա.Լ. ՄԻՆԻԱՏՅԱՆ, Ջ.Գ. ԽԱՆԱՄԻՐՅԱՆ**

**ԷԿՉՈԿՄԱԽՔԻ ՈՏՔԻ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՊԼԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ**

Դիտարկվել է էկզոկմախքի ոտքի ոչ գծային կառավարման համակարգ: Գործակիցների պլանավորման (Gain Scheduling) մեթոդի կիրառմամբ մշակվել է գծային համեմատող ինտեգրող դեֆերենցող (ՀԻԴ) կարգավորիչների խումբ, որն ապահովում է համակարգի կայունությունը աշխատանքային տարբեր կետերում:

**Առանցքային բառեր.** ոչ գծային համակարգեր, գործակցի պլանավորում, ՀԻԴ կարգավորիչ, էկզոկմախք, համակարգի մոդելավորում:

**Ներածություն.** էկզոկմախքը նախատեսված է մարդու գործառնությունները ընդլայնելու՝ մասնավորապես, հաշմանդամություն ունեցող անձանց կյանքի որակը բարելավելու համար:

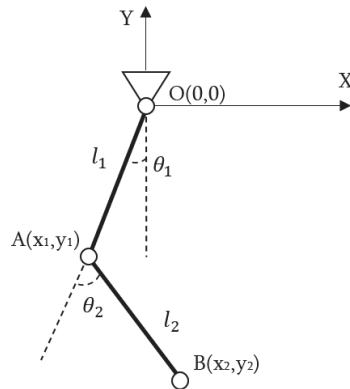
Ռազմական նշանակության էկզոկմախքները նախատեսված են զինվորի հողերի և ողնաշարի պաշտպանության համար: Դրանք նպաստում են զինվորի շարժունակության բարձրացմանը, ինչպես նաև, նվազեցնում են հենաշարժիչ ապարատի բեռնվածությունը՝ երկարաժամկետ ծանր բեռ տեղափոխելու ժամանակ:

Նման մեխանիզմների նախագծումն ու արտադրությունը կապված են օպտիմալ պարամետրերի սինթեզման խնդրի լուծման, կառավարման համակարգերի, մարդուն շարժումը փոխանցելու մեխանիզմների և սարքի շարժման օրենքների ծրագրային ապահովման արդյունավետ ընտրության հետ:

Նախագծման հիմնական փուլերն են կառավարման համակարգի մշակումը, հետազոտումը և որակի ապահովումը:

Առաջնահերթություն հանդիսացող խնդիրներից մեկն է ոտքի ազդրի և ծնկի շարժման առանձնահատկությունների ուսումնասիրումը, որի իրականացման համար անհրաժեշտ է նախագծել կարգավորիչներ ապահովելով համապատասխան շարժումների իրականացումը:

**Հետազոտության արդյունքները.** Էկզոկմախքի ոտքի մոդելի նախագծման համար հաշվի է առնվել մարդու ուղղահայաց դիրքը, ինչը հնարավորություն է տալիս անցնել հարթ նախագծման սխեմային (նկ. 1):



Նկ. 1. Ոտքի կինեմատիկական սխեման

Օգտվելով նկ. 1-ում բերված կինեմատիկական սխեմայից, կարելի է ստանալ  $A(x_1, y_1)$  և  $B(x_2, y_2)$  կետի կոորդինատները՝

$$x_1 = l_1 \sin \theta_1, y_1 = -l_1 \cos \theta_1,$$

$$x_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2, y_2 = -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2,$$

որտեղ  $x_1, y_1$  և  $x_2, y_2$  -ը համապատասխանաբար ծնկի և նախաթաթի կոորդինատներն են,  $\theta_1$  և  $\theta_2$ -ն՝ ոտքի հանգույցների կազմած անկյունները ուղղահայաց առանցքի հետ, իսկ  $l_1$  և  $l_2$ -ը՝ ոտքի հանգույցների երկարությունները:

Գծային արագությունների պրոյեկցիաները  $x$  և  $y$  առանցքների վրա ստանալու համար օգտվում ենք Էյլեր-Լագրանժի հավասարումից [1]՝

$$x_1 = f_1(q_1), y_1 = g_1(q_1),$$

$$x_2 = f_2(q_2), y_2 = g_2(q_2),$$

$$q_1 = \theta_1, q_2 = \theta_2,$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{\partial f_1}{\partial q_1} \cdot \dot{q}_1 = \frac{\partial(l_1 \sin \theta_1)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1), \\ \dot{y}_1 &= \frac{\partial g_1}{\partial q_1} \cdot \dot{q}_1 = \frac{\partial(-l_1 \cos \theta_1)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1), \\ \dot{x}_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial q_2} \cdot \dot{q}_2 = \frac{\partial(l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta_2}{dt} = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2), \\ \dot{y}_2 &= \frac{\partial g_2}{\partial q_2} \cdot \dot{q}_2 = \frac{\partial(-l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta_2}{dt} = l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2), \\ \dot{\theta}_1 &= \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1, \dot{\theta}_2 = \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2:\end{aligned}$$

որտեղ  $\omega_1$ -ն և  $\omega_2$ -ն անկյունային արագություններն են:

Այսպիսով, յուրաքանչյուր հանգույցի գծային արագությունները ստացվում են արագությունների պրոյեկցիաների քառակուսային գումարով՝

$$V_1 = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2} = \sqrt{(l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1))^2 + (l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1))^2} = \sqrt{(l_1 \dot{\theta}_1)^2} = l_1 \dot{\theta}_1,$$

$$V_2 = \sqrt{\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2} =$$

$$\begin{aligned}&= \sqrt{(l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2))^2 + (l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2))^2} = \\ &= \sqrt{(l_1 \dot{\theta}_1)^2 + (l_2 \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}:\end{aligned}$$

Լագրանժյան ֆունկցիան ստացվում է կինետիկ և պոտենցիալ էներգիաների տարբերությամբ՝

$$L = T - V,$$

որտեղ  $T$ -ն կինետիկ էներգիան է, իսկ  $V$ -ն՝ պոտենցիալ:

Կինետիկ էներգիան որոշվում է հետևյալ կերպ՝

$$\begin{aligned}T &= \frac{1}{2} \cdot \sum (mV^2) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left( m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 \left( (l_1 \dot{\theta}_1)^2 + (l_2 \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \right) \right):\end{aligned}$$

Պոտենցիալ էներգիան՝

$$V = \sum mgh = m_1gy_1 + m_2gy_2 = -(m_1 + m_2)gh_1 \cos(\theta_1) - m_2gh_2 \cos(\theta_2):$$

Այստեղից Լագրանժյան ֆունկցիայի համար կստանանք հետևյալ բանաձևը՝

$$L = T - V = \frac{1}{2} \cdot \left( m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 \left( (l_1 \dot{\theta}_1)^2 + (l_2 \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \right) \right) + (m_1 + m_2)gh_1 \cos(\theta_1) + m_2gh_2 \cos(\theta_2):$$

Շարժման հավասարումները կունենան հետևյալ տեսքը՝

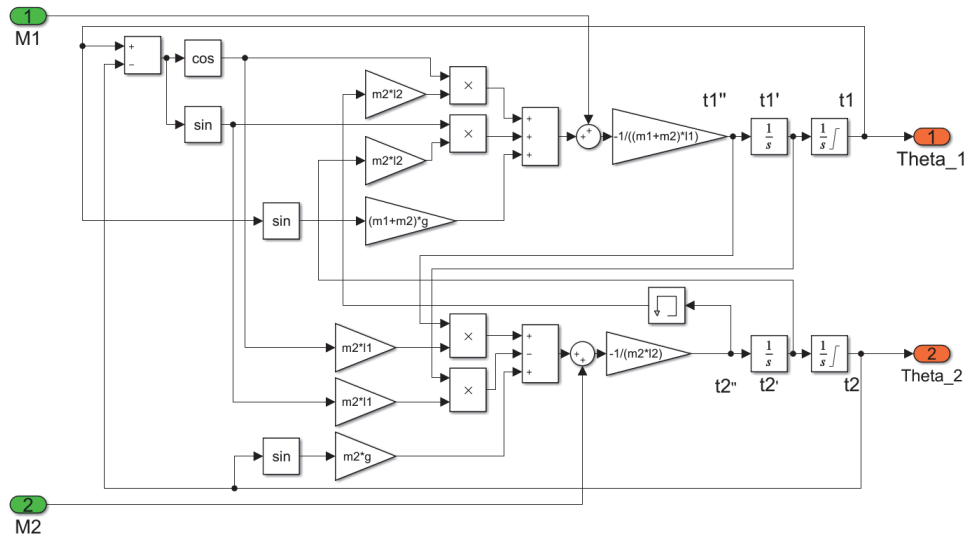
$$\begin{cases} M_1 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1}, \\ M_2 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_1 = (m_1 + m_2)l_1 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + (m_1 + m_2)g \sin(\theta_1), \\ M_2 = m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g \sin(\theta_2): \end{cases}$$

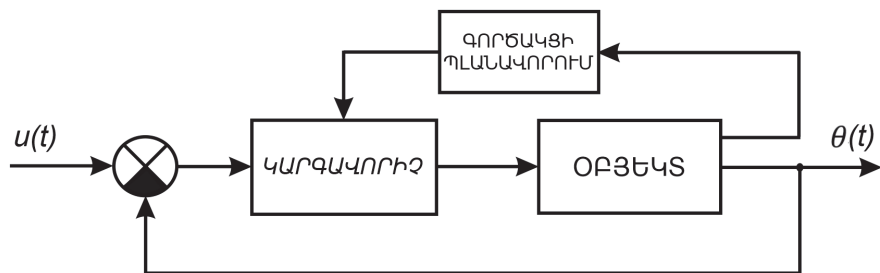
որտեղ  $M_1$ -ը և  $M_2$ -ը հանգույցների մոմենտներն են:

Ստացված դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգի հիման վրա MATLAB-ի Simulink միջավայրում կատարվել է ոչ գծային համակարգի մոդելավորում, որը բերված է նկ. 2-ում:

Նմանատիպ ոչ գծային փոխադարձ կապերով բազմաչափ ավտոմատ կառավարման համակարգերի (ԲԱԿ) նախագծման համար կիրառում են գործակիցների պլանավորման մեթոդը (Gain Scheduling) [3,4], որը հնարավորություն է տալիս աշխատանքային տարբեր կետերում նախագծել կարգավորիչներ, որոնցից յուրաքանչյուրն ապահովում է համակարգի կայունությունը (նկ. 3):



Նկ.2. Համակարգի մոդելը Simulink միջավայրում

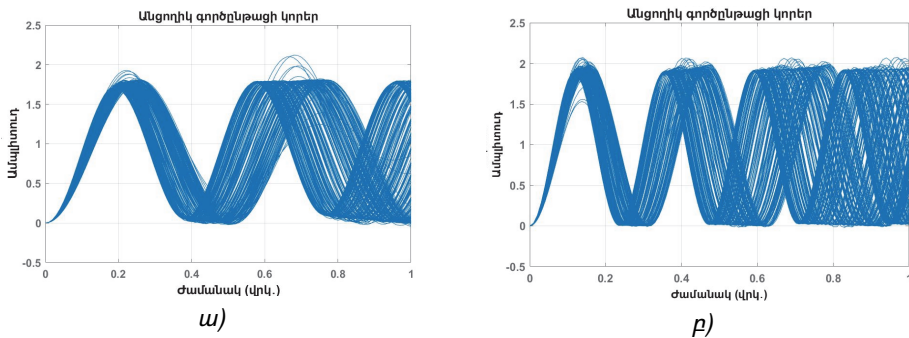


Նկ.3. Գործակցի պլանավորման ֆունկցիոնալ սխեման

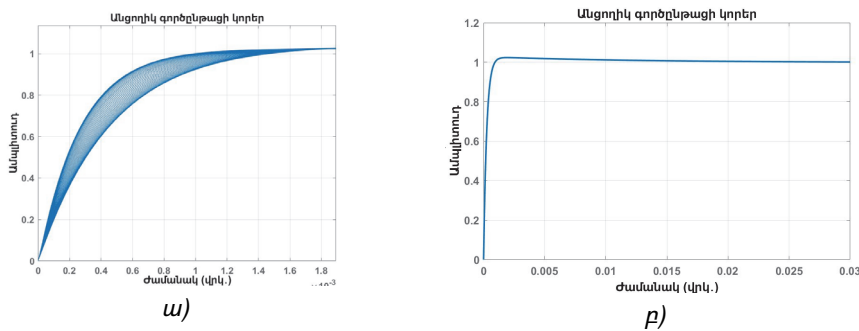
Գործակիցների պլանավորման մեթոդի կիրառման համար անհրաժեշտ է բերված ոչ գծային համակարգը գծայնացնել աշխատանքային միջակայքերում՝ հաշվի առնելով մարդու քայլքի ժամանակ ուղքի առավելագույն շարժումները, որից հետո ուսումնասիրել ստացված գծային համակարգերը: Յուրաքանչյուրի համար նախագծել ՀԻԴ կարգավորիչ, ստանալ  $K_z$ ,  $K_h$ ,  $K_v$  պարամետրերի կախվածությունը համակարգի դիտարկման պարամետրերից, ապա դրանք ինտեգրել ոչ գծային ԲԱԿ-ում:

Կատարվել է ոչ գծային համակարգի գծայնացում 441 աշխատանքային կետերում և ստացված գծային համակարգերի ուսումնասիրություն: Որպես դիտարկման պարամետրեր ընտրվել են ուղքի հանգույցների կազմած անկյունները ուղղահայաց առանցքի հետ  $\theta_1$  և  $\theta_2$ -ը: Դիտարկվել են փակ համակարգերի անցողիկ գործընթացի կորերը բերված նկ. 4-ում, որոնցից երևում է, որ անհրա-

Ժեշտ է նախագծել կարգավորիչներ համակարգի կայունացման համար: Նախագծվել է ՀԻԴ կարգավորիչ մեկ կետի նկատմամբ, որը օգտագործվել է 441 աշխատանքային կետերում և դուրս է բերվել դրանց անցողիկ գործընթացի կորերը (նկ. 5ա): Ստացված կորերից երևում է, որ համակարգը տարբեր աշխատանքային կետերում ցուցաբերում է տարբեր կայունացման պարամետրեր, որը անհրաժեշտ է շտկել՝ նախագծելով յուրաքանչյուր աշխատանքային կետի համար առանձին ՀԻԴ կարգավորիչներ: Արդյունքում նախագծվել է յուրաքանչյուրի համար ՀԻԴ կարգավորիչ՝ միևնույն կայունության պարամետրերով ( $\delta = 2.34\%$ ,  $t_{աճ} = 0.0005$ վրկ.,  $t_{կ} = 0.004$ վրկ.), որոնց անցողիկ գործընթացի կորերը բերված են նկ. 5բ-ում:

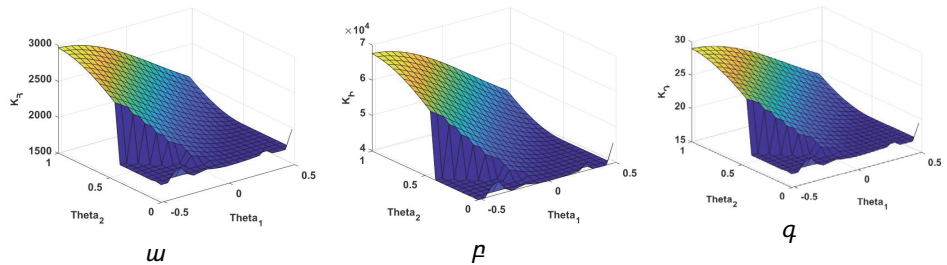


Նկ. 4. Փակ համակարգի անցողիկ գործընթացի կորեր: ա)  $\theta_1$ , բ)  $\theta_2$



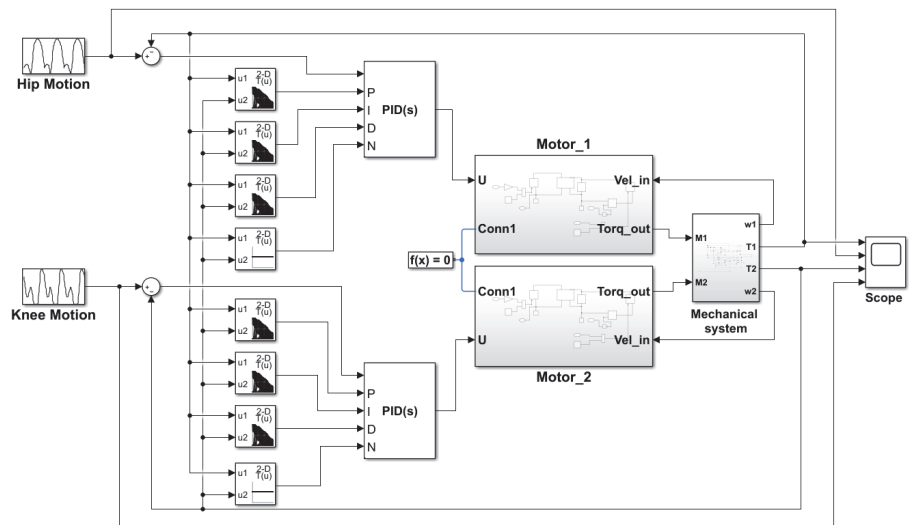
Նկ. 5. Գծայնացված համակարգի անցողիկ գործընթացի կորեր (ա - բոլոր աշխատանքային կետերի համար միևնույն ՀԻԴ կարգավորիչ, բ -յուրաքանչյուր աշխատանքային կետի համար նախագծված առանձին ՀԻԴ կարգավորիչներ՝ միևնույն կայունության պարամետրերով ( $\delta$ ,  $t_{աճ}$ ,  $t_{կ}$ ))

Գործակիցների պլանավորման մեթոդի կիրառմամբ ՀԻԴ կարգավորիչի նախագծման համար դուրս է բերվել  $K_z$ ,  $K_r$ ,  $K_T$  պարամետրերի կախվածությունը համակարգի դիտարկման անկյուններից՝  $\theta_1$  և  $\theta_2$ -ից (նկ. 6):



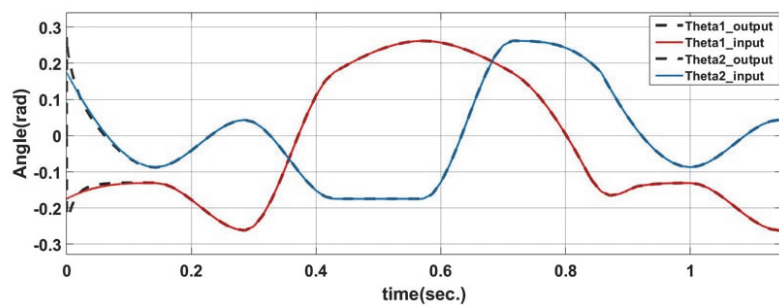
Նկ. 6. ՀԻԴ կարգավորիչների պարամետրերի կախվածությունը  $\theta_1$  և  $\theta_2$  անկյուններից

Նախագծվել են գործակիցների պլանավորմամբ ՀԻԴ կարգավորիչներ ոչ գծային ԲԱԿ-ի համար, որտեղ ՀԻԴ կարգավորիչների պարամետրերը փոխվում են՝ կախված համակարգի  $\theta_1$  և  $\theta_2$  անկյուններից, որոնք տվյալ դեպքում հանդիսանում են նաև համակարգի ելքային պարամետրերը: MATLAB/Simulink միջավայրում գործակիցների պլանավորմամբ ոչ գծային համակարգի մոդելը բերված է նկ. 7-ում:



Նկ. 7. Գործակիցների պլանավորմամբ ԲԱԿ Simulink մոդելը

Նախագծված է կոդկնախքի համար կիրառված մարդու քայլի ալգորիթմի արդյունքում ակնհայտ է դառնում մուտքային և ելքային ազդանշանների համընկնումը (նկ. 8):



Նկ. 8. Գործակիցի պլանավորման մեթոդով ոչ գծային համակարգի մուտք-ելքի բնութագրերը

**Եզրակացություն.** Ստացված արդյունքների հիման վրա կարելի է եզրակացնել, որ գործակիցների պլանավորման մեթոդի կիրառմամբ նախագծված ոչ գծային բազմաչափ ավտոմատ կառավարման համակարգը լավագույնս լուծում է էկզոկնմախքի ոտքի կառավարման խնդիրը:

*Հեղագրությունն իրականացվել է ՀՀ գիտության կոմիտեի ֆինանսական աջակցությամբ՝ 21DP-2B003 ծածկագրով գիտական թեմայի շրջանակներում:*

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Morin D.** Introduction to classical mechanics. -Cambridge University, UK. -2008. -710p.
2. **Nise Norman S.** Control Systems Engineering: -Book. Wiley, 6 edition 2010. -944p.
3. **Chen Li-jie** Research on the nonlinear dynamical behavior of double pendulum// International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC). -Jilin, China, 2011. -P. 1637-1640.
4. **Rotondo D.** Advances in Gain-Scheduling and Fault Tolerant Control Techniques. - 2018. -255p.

**Ա.Տ. ԱՆԿԻՅԱՆ, Ա.Լ. ՄԽԻՏԱՐՅԱՆ, Յ.Գ. ԽԱՆԱՄԻՐՅԱՆ**

#### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ НОГОЙ ЭКЗОСКЕЛЕТА МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА**

Изучена система нелинейного управления ногой экзоскелета. С применением метода планирования коэффициентов (Gain Scheduling) разработана группа линейных ПИД-регуляторов, обеспечивающая стабильность системы в различных рабочих точках.

**Ключевые слова:** нелинейные системы, планирование коэффициента, пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор, экзоскелет, моделирование системы.

**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: