

**ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄ, ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԵՎ  
ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ**

ՀՏԴ 681.5.09

**Հ.Գ. ԴԱՐԲԻՆՅԱՆ, Լ.Մ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Վ.Ս. ՄԻՆԱՍՅԱՆ**

**ԹԵՎԱՊՏՈՒՏԱԿՆԵՐԻ ՏԵՂԱԿԱՅՄԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ  
ԿԻՆԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՅՈՎ ՀԵՔՍԱԿՈՊՏԵՐԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ  
ՀԱՄԱԿԱՐԳ**

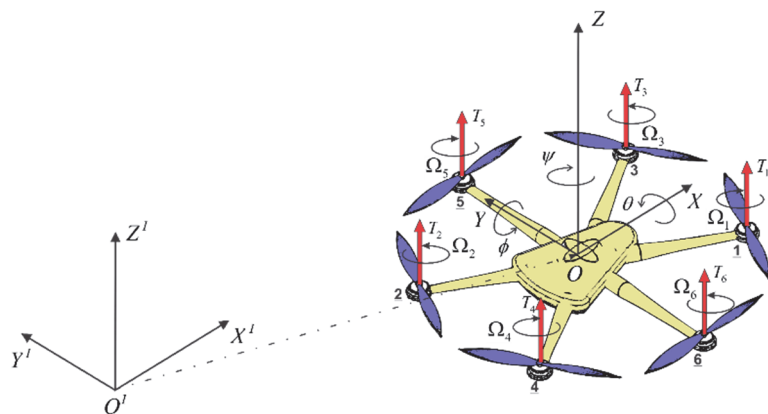
Դիտարկվել է հեքսակոպտերի իրանի վրա շարժիչ-թևապտուտակ զույգերի տեղակայման կինեմատիկ սխեման ընդհանրացված տարբերակով: Ստացվել են հեքսակոպտերի կառավարման համակարգի կոշտ փոխադարձ կապերի մատրիցի վերլուծական արտահայտությունները ընդհանուր տեսքով: Ցույց է տրվել, որ մատրիցային կապազերծող կարգավորիչի ներմուծումը համակշռում է առանձին կապուղիների միջև եղած կոշտ փոխադարձ կապերը, այդպիսով հեքսակոպտերի կառավարման համակարգի նախագծումը հանգում է անկախ կանալների նախագծմանը՝ հիմնվելով կառավարման համակարգերի դասական տեսության վրա:

**Առանցքային բառեր.** հեքսակոպտեր, թևապտուտակների տեղակայման կինեմատիկական սխեմա, կոշտ փոխադարձ կապեր, կապազերծող կարգավորիչ:

**Ներածություն.** Մեր օրերում անօդաչու թռչող սարքերը (ԱԹՍ) մեծ կիրառություն են գտել բազմաթիվ ծրագրերում, այդ թվում՝ հեռահար զննումներ, հսկողություն, նկարահանումներ, գիտական հետազոտություններ և այլն: Բազմաշարժիչ անօդաչու թռչող սարքեր (ԲԱԹՍ)՝ չորսից ավելի ռոտորային պտուտակներով, ինչպիսիք են հեքսակոպտերը և օկտոկոպտերը, ունակ են կրելու ավելի ծանր բեռներ, ավելի կայուն են արտաքին գրգիռների նկատմամբ և քիչ խոցելի են շարժիչների խափանումների դեպքերում, քան սովորական քառապտուտակները: Այնուամենայնիվ, ավելի շատ շարժիչներ ունենալու հիմնական թերությունն այն է, որ այս տեսակի ԱԹՍ-ներն ավելի շատ էներգիա են սպառում, հետևաբար՝ ունեն թռիչքի ավելի կարճ ժամանակ: Փոքր չափերի պատճառով ԱԹՍ-ները սովորաբար գործում են ավելի ցածր տարածություններում, ինչը բնութագրվում է տուրբուլենտության բարձր ինտենսիվությամբ: Հետևաբար, պարտադիր է, որ կառավարման համակարգը լինի հուսալի՝ բացօդյա հաջող թռիչքների համար:

**Հետազոտության արդյունքները.** Հեքսակոպտեր ԲԱԹՍ-ի սխեմատիկական կառուցվածքը ներկայացված է նկ.1-ում, որտեղ  $\{I\}$  -ով նշանակվել է ին-

երցիալ կորորդինատային համակարգը՝  $x_I, y_I, z_I$  առանցքներով, որոնց նկատմամբ ԲԱԹՍ-ի ծանրությունների կենտրոնի շարժումը նկարագրվում է  $\xi = (x, y, z)^T$  վեկտորով, որը պատկանում է  $\{I\}$  իներցիալ կորորդինատային համակարգին: Որպես բազային կորորդինատային համակարգի սկզբնակետ ընտրվել է ԲԱԹՍ-ի ծանրությունների կենտրոնը՝ համապատասխանաբար  $X, Y, Z$  առանցքներով, որոնք ուղղված են իներցիալ կորորդինատային համակարգի առանցքներին զուգահեռ [1]:



Նկ.1. Հեքսակոպտեր ԲԱԹՍ-ի սխեմատիկական տեսքը

$\{I\}$  կորորդինատային համակարգից անցումը  $\{B\}$ -ի բնութագրվում է համապատասխանաբար  $X, Y, Z$  էլիքի  $\psi$  (yaw),  $\phi$  (roll) և  $\theta$  (pitch) պտույտների անկյուններով, ինչը կարելի է ներկայացնել  $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$  վեկտորի տեսքով և նկարագրել (1)-ում ներկայացված  $R$  օրթոգոնալ պտույտների մատրիցի միջոցով [2]՝

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta - \sin \phi \sin \psi \sin \theta & -\cos \phi \sin \psi & \cos \psi \sin \theta + \cos \theta \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi + \cos \psi \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \psi & \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \cos \theta \sin \phi \\ -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} : (1)$$

**Հեքսակոպտերի դինամիկան.** Դինամիկայի հավասարումների ներկայացման համար պետք է հաշվի առնել հետևյալ նշանակումները՝

$m$ - բազմապտուտակի զանգվածը,

$g$  - ազատ անկման արագությունը,

$\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  -  $\{B\}$ -ն բազային կորորդինատային համակարգի պտտման

արագությունների վեկտորը  $\{I\}$ -ի նկատմամբ,

$\Upsilon_R = [0 \ 0 \ J_R]^T - J_R$ -ը՝ յուրաքանչյուր շարժիչի (թևապտուտակով) ռոտորի իներցիայի մոմենտը,

$\Omega - N$ -ն՝ թևապտուտակների գումարային պտտման անկյունային արագությունը, որը նկարագրվում է հետևյալ հավասարմամբ՝

$$\Omega = \sum_{i=1}^N (-1)^{i-1} \Omega_i, \quad (2)$$

որտեղ  $\Omega_i$ -ն  $i$ -րդ թևապտուտակի անկյունային արագությունն է ( $i=1, 2, \dots, N$ ), այս դեպքում՝  $N=6$  :

Հիմնվելով նկ. 1-ում ներկայացված ԲԱԹՍ-ի սխեմատիկական տեսքի և կատարված նշանակումների վրա՝ համակարգի շարժման ստանդարտ, ոչ գծային հավասարումները կարելի է ներկայացնել հետևյալ համակարգի միջոցով՝

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = (\cos \psi \sin \theta + \cos \theta \sin \phi \sin \psi) u_z \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = (\sin \psi \sin \theta - \cos \psi \cos \theta \sin \phi) u_z \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = (\cos \phi \cos \theta) u_z - mg, \\ I_x \frac{d^2 \phi}{dt^2} = u_\phi - (I_y - I_z) \frac{d\theta}{dt} \frac{d\psi}{dt} - J_T \frac{d\theta}{dt} \Omega, \\ I_y \frac{d^2 \theta}{dt^2} = u_\theta + (I_z - I_x) \frac{d\phi}{dt} \frac{d\psi}{dt} - J_T \frac{d\phi}{dt} \Omega, \\ I_z \frac{d^2 \psi}{dt^2} = u_\psi - (I_y - I_x) \frac{d\theta}{dt} \frac{d\phi}{dt}, \end{cases} \quad (3)$$

որտեղ  $u_\theta, u_\phi, u_\psi$  - ն բազմառոտորի իներցիալ առանցքների շուրջը կառավարող մոմենտներն են,  $u_z - O^1 Z^1$  - ը՝ առանցքի երկայնքով վերամբարձ ուժը:

**Հեքսակոպտերի կինեմատիկան.** Նկ. 2-ում ցույց է տրված հեքսակոպտերի շարժիչների տեղակայման ընդհանրացված կինեմատիկական սխեման: Այս դեպքում 1-4-5 շարժիչները պտտվում են մեկ ուղղությամբ, իսկ 2-3-6-ը՝ դրանց հակառակ: Տեղադրված շարժիչների զույգերն ունեն համապատասխանաբար  $L_1, L_2$  և  $L_3$  հավասար հեռավորությունները  $O$  սկզբնակետից և ուղղված են  $OL_1, OL_2$  և  $OL_3$  առանցքների երկայնքով:  $OX$  դրական առանցքի հետ հեքսակոպտերի թևերի կազմած անկյունները նշանակվել են  $\alpha_1, \alpha_2$  և  $\alpha_3$ , ընդ որում՝  $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$ :  $OL_1, OL_2$  և  $OL_3$  առանցքների միավոր վեկտորները նշանակվել են  $\bar{l}_1, \bar{l}_2$  և  $\bar{l}_3$ , որտեղ՝

$$\bar{l}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ \sin(\alpha_1) \end{bmatrix}, \quad \bar{l}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2) \\ \sin(\alpha_2) \end{bmatrix}, \quad \bar{l}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_3) \\ \sin(\alpha_3) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

Հետևաբար՝  $OXY$  կոորդինատային հարթության նկատմամբ հեքսակոպտերի  $R_{BL}$  անցումային մատրիցը կունենա հետևյալ տեսքը՝

$$R_{BL} = [\bar{l}_1 \quad \bar{l}_2 \quad \bar{l}_3] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\alpha_2) & \cos(\alpha_3) \\ \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & \sin(\alpha_3) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$OZ$  առանցքի երկայնքով հեքսակոպտերի կառավարող  $u_z$  վերամբարձ ուժը կլինի՝

$$u_z = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6, \quad (6)$$

իսկ ընթացաշեղման  $u_\psi$  կառավարող մոմենտը կարտահայտվի հետևյալ հավասարմամբ՝

$$u_\psi = -(\tau_1 - \tau_2 + \tau_3 - \tau_4 + \tau_5 - \tau_6) = -k_\psi (T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + T_5 - T_6): \quad (7)$$

Շարժիչների յուրաքանչյուր զույգի ստեղծած  $\bar{M}_1$ ,  $\bar{M}_2$  և  $\bar{M}_3$  մոմենտները գտնվում են  $OXY$  հարթության մեջ և որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով՝

$$\bar{M}_1 = M_1 \bar{m}_1, \quad M_1 = -(T_1 - T_3)L_1 \quad (8)$$

$$\bar{M}_2 = M_2 \bar{m}_2, \quad M_2 = (T_2 - T_4)L_2, \quad (9)$$

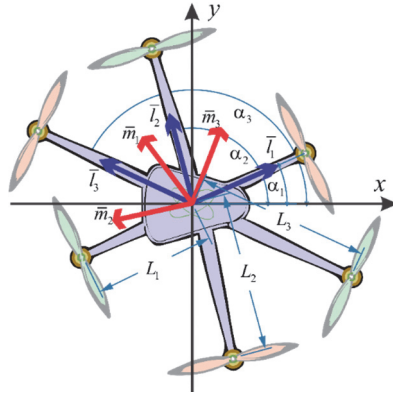
$$\bar{M}_3 = M_3 \bar{m}_3, \quad M_3 = (T_5 - T_6)L_3, \quad (10)$$

որտեղ  $\bar{m}_1$ ,  $\bar{m}_2$  և  $\bar{m}_3$  վեկտորները ունեն հետևյալ տեսքերը՝

$$\bar{m}_1 = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_1) \\ \cos(\alpha_1) \end{bmatrix}, \quad \bar{m}_2 = \begin{bmatrix} \sin(\alpha_2) \\ -\cos(\alpha_2) \end{bmatrix}, \quad \bar{m}_3 = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_3) \\ -\cos(\alpha_3) \end{bmatrix}; \quad (11)$$

Հեքսակոպտերի դեպքում,  $OXY$  կոորդինատային հարթության մեջ,  $u_\phi$  և  $u_\theta$  կառավարող մոմենտների գումարային վեկտորն ունի հետևյալ տեսքը (նկ. 2)՝

$$\bar{M}_{XY} = \begin{bmatrix} u_\phi \\ u_\theta \end{bmatrix} = \bar{M}_1 + \bar{M}_2 + \bar{M}_3 = -(T_1 - T_3)L_1 \bar{m}_1 + (T_2 - T_4)L_2 \bar{m}_2 + (T_5 - T_6)L_3 \bar{m}_3: \quad (12)$$



Նկ. 2. Հեքսակոպտերի ընդհանրացված կինեմատիկական սխեման

Որոշելով  $\bar{M}_{XY}$  վեկտորի  $u_\phi$  և  $u_\theta$  բաղադրիչները՝ կստանանք հետևյալ հավասարումները՝

$$u_\phi = (T_1 - T_3)L_1 \sin(\alpha_1) + (T_2 - T_4)L_2 \sin(\alpha_2) + (T_5 - T_6)L_3 \sin(\alpha_3), \quad (13)$$

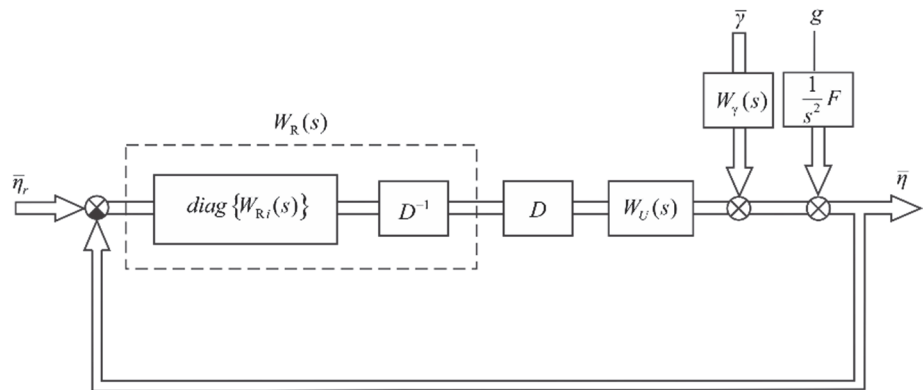
$$u_\theta = -(T_1 - T_3)L_1 \cos(\alpha_1) - (T_2 - T_4)L_2 \cos(\alpha_2) - (T_5 - T_6)L_3 \cos(\alpha_3): \quad (14)$$

Այսպիսով, ստացվել են  $u_z$  վերամբարձ ուժի (6) և ընթացաշեղման, կողաթեքման ու երկայնաճոճման առանցքներով  $u_\psi$  (7),  $u_\phi$  (13) և  $u_\theta$  (14) կառավարող մոմենտների վերլուծական հավասարումները՝ արտահայտված  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  քարշիչ ուժերով: Հաշվի առնելով նկ. 2-ում պատկերված հեքսակոպտերի իրանի վրա շարժիչների տեղակայման ընդհանրացված սխեմայի կինեմատիկ ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, L_1, L_2, L_3$ ) բնութագրերը,  $\bar{U} = [u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi]$  կառավարող ազդեցությունների և  $\bar{T} = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6]^T$  քարշիչ ուժերի վեկտորների միջև կապը արտահայտող (15) հավասարման մեջ  $D$  մատրիցը կունենա հետևյալ տեսքը [1]՝

$$\bar{U} = D\bar{T}, \quad (15)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ L_1 \sin(\alpha_1) & L_2 \sin(\alpha_2) & L_3 \sin(\alpha_3) & -L_1 \sin(\alpha_1) & -L_2 \sin(\alpha_2) & -L_3 \sin(\alpha_3) \\ -L_1 \cos(\alpha_1) & -L_2 \cos(\alpha_2) & -L_3 \cos(\alpha_3) & L_1 \cos(\alpha_1) & L_2 \cos(\alpha_2) & L_3 \cos(\alpha_3) \\ -k_\psi & k_\psi & -k_\psi & k_\psi & -k_\psi & k_\psi \end{bmatrix} : (16)$$

Ինչպես ցույց է տրվել քառապտուտակի դեպքում [2], հեքսակոպտեր ԲԱԹՍ-ի դեպքում ևս կարելի է հաշվարկել համապատասխան մատրիցային կապագերծող կարգավորիչը և այն ներմուծելով հեքսակոպտերի կառավարման համակարգի մեջ՝ համակշռել առանձին կապուղիների միջև առկա կոշտ փոխադարձ կապերը: Հեքսակոպտերի փակ կառավարման համակարգի կառուցվածքային սխեման բերված է նկ. 3-ում:



Նկ. 3. Հեքսակոպտերի կառավարման համակարգի մատրիցային կառուցվածքային սխեման

Նկ. 3-ում  $W_{Reg}(s)$ -ը կապագերծող կարգավորիչն է, որի  $K$  մատրիցը որոշվում է գտնելով  $D$  կինեմատիկական կապերը բնութագրող մատրիցի կեղծ հակադարձ մատրիցը (17) հավասարմամբ.

$$K = D^* (DD^*)^{-1} : \quad (17)$$

**Թվային օրինակ.** Այն դեպքում, երբ հեքսակոպտերը ունի համաչափ կառուցվածք՝  $\alpha_1 = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$ ,  $\alpha_3 = 150^\circ$  և  $L_1 = L_2 = L_3 = L$  երկրաչափական բնութագրերով,  $D$  և  $K$  մատրիցները կընդունեն հետևյալ տեսքերը՝

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ L/2 & L & L/2 & -L/2 & -L & -L/2 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}L & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}L & \frac{\sqrt{3}}{2}L & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}L \\ -k_\psi & k_\psi & -k_\psi & k_\psi & -k_\psi & k_\psi \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 1/6 & 1/6L & -\sqrt{3}/6L & -1/6k_\psi \\ 1/6 & 1/3L & 0 & 1/6k_\psi \\ 1/6 & 1/6L & \sqrt{3}/6L & -1/6k_\psi \\ 1/6 & -1/6L & \sqrt{3}/6L & 1/6k_\psi \\ 1/6 & -1/3L & 0 & -1/6k_\psi \\ 1/6 & -1/6L & -\sqrt{3}/6L & 1/6k_\psi \end{bmatrix} : \quad (17)$$

**Եզրակացություն.** Ցույց է տրվել, որ հեքսակոպտերի կառավարման համակարգի մեջ մատրիցային, կապագերծող կարգավորիչի ներմուծումը թույլ է տալիս ազդագերծել երկայնաճոճման, կողաթեքման, ընթացաշեղման անկյունների և թռիչքի բարձրության կապուղիների միջև եղած կոշտ փոխադարձ կապերը՝ այդպիսով կառավարման համակարգի նախագծումը հանգեցնելով առանձին կապուղիների նախագծմանը և դրանց համար միաչափ կառավարման համակարգերի դասական տեսության մոտեցումների և ընդհանուր մեթոդների կիրառմանը:

### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Poksawat P., Wang L.** Automatic Tuning of Hexacopter Attitude Control Systems with Experimental Validation // International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). - DOI: 10.1109/ICSTCC:2017.8107127.-2017.- N 21. - P. 753-758.
2. **Дарбинян А.Г.** Система управления квадрокоптером с обобщенной кинематической схемой установки пропеллеров // Известия НАН РА и НПУА.-Сер.ТН-2019.- Т.72, №4.-С.525-538.
3. **Гаспарян О.Н., Егниазарян Г.Г., Дарбинян А.Г., Егниазарян Д.У.** Разработка системы управления квадрокоптером с развязывающим регулятором с учетом динамики электродвигателей // Вестник РАУ. -Ереван, 2017.- N 2.- С. 59-80.

**Ա.Գ. ԴԱՐԲԻՆՅԱՆ, Լ.Մ. ԲՈՒՆԻԱՅԱՆ, Վ.Ս. ՄԻՆԱՏՅԱՆ**

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕКСОКОПТЕРОМ С ОБОБЩЕННОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ УСТАНОВКИ ПРОПЕЛЛЕРОВ**

Рассмотрена обобщенная кинематическая схема установки пропеллеров на гексокоптере, которая охватывает как частные случаи большинство известных схем. Получены аналитические выражения для матрицы взаимных связей системы управления. Показано, что введение развязывающего регулятора компенсирует взаимные связи между отдельными каналами, что позволяет свести проектирование системы управления гексокоптером к проектированию независимых каналов на основе классической теории регулирования.

**Ключевые слова:** гексокоптер, кинематическая схема установки пропеллеров, жесткие взаимные связи, развязывающий регулятор.

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: