# Mathematical Modeling and Simulation of Robotic Dynamic Systems

### K.A. Mammadova

Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlıg ave. 20, Baku, AZ1010, Azerbaijan)

#### For correspondence:

Mammadova Kifayat / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

#### Abstract

The mathematical model of the robot generally consists of a nonlinear multi-link system, so various simplifications are used in the analysis of its properties. In particular, linear models of robots and control systems are commonly used to study the controllability and robustness of robots. In this case, linear models are built on the edges of the actions of the robot or system, the properties of which must be studied. Therefore, in order to build linear models of a robot and its control system, it is first necessary to find the fixed equations of a particular robot, as well as its control system as a whole. In this work, the procedure for developing a mathematical description of the robot is given. A three-dimensional model is developed, its main characteristics are determined. A description of SolidWorks is provided to develop a three-dimensional model. The model is developed in the form of a system of differential and algebraic equations. Aerodynamic research of the model, analysis of stability and handling are carried out.

**Keywords**: mathematical model of robot, study of robot stability, linear models of robots, system of algebraic differential equations, aerodynamic model.

#### **DOI** 10.52171/2076-0515\_2022\_14\_04\_93\_106

Received	17.02.2022
Revised	06.12.2022
Accepted	12.12.2022

#### For citation:

Mammadova K.A.

[Determining the level of risk for food safety in a fuzzy environment with the help of Z number] *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol.14, no 4, pp. 93-106 (*in Azerbaijani*)

## Robotik dinamik sistemlərin riyazi modelləşdirilməsi və simulyasiyası K.A. Məmmədova

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

#### Yazışma üçün:

Məmmədova Kifayət / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

#### Xülasə

Robotun riyazi modeli ümumi halda qeyri-xətti çoxəlaqəli sistemdən ibarətdir, buna görə onun xassələrinin analizində müxtəlif sadələşmələrdən istifadə edilir. O cümlədən, robotun idarə olunması və dayanaqlığının tədqiq edilməsi üçün, adətən robotların xətti modelləri və idarəetmə sistemləri tətbiq edilir. Bu zaman xətti modellər robotun və ya sistemin xassələrinin tədqiq edilməli olan hərəkətlərinin kənarlarında qurulur. Buna görə robotun və onun idarəetmə sisteminin xətti modellərinin qurulması üçün, hər şeydən əvvəl məxsusi robotun, eləcə də bütövlükdə onun idarəetmə sisteminin qərarlaşmış tənliklərini tapmaq lazımdır. Bu işdə robotun riyazi təsvirinin işlənilmə proseduru verilir. Üçölçülü model işlənilir, onun əsas xarakteristikaları təyin edilir. Üçölçülü modeli işlənilməsi üçün SolidWorks proqramından istifadə edilir. Differensial və cəbri tənliklər sistemi şəklində model işlənilir. Modelin aerodinamik tədqiqatı, dayanaqlığı və idarəçiliyin analizi həyata keçirilir. Dirijablın mövqetrayektoriyalı qapalı idarəetmə sisteminin modelləşdirilməsi üçün Matlab paketindən istifadə edilmişdir.

**Açar sözlər**: robotun riyazi modeli, robotun dayanıqlığının tədqiqi, robotların xətti modelləri, cəbri differensial tənliklər sistemi, aerodinamik model

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2022\_14\_04\_93\_106

УДК 681.51:623(063)

# Математическое моделирование и имитационное моделирование динамических систем роботов

#### К.А. Маммадова

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 20, Баку, AZ1010, Азербайджан)

#### <u>Для переписки:</u>

Маммадова Кифаят /e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

#### Аннотация

Математическая модель робота в общем случае представляет собой нелинейную многозвенную систему, поэтому при анализе ее свойств используются различные упрощения. В частности, линейные модели роботов и систем управления обычно используются для изучения управляемости и устойчивости роботов. В этом случае линейные модели строятся на границах действий робота или системы, свойства которых необходимо изучить. Поэтому для построения линейных моделей робота и его системы управления необходимо сначала найти фиксированные уравнения конкретного робота, а также его системы управления в целом. В данной работе приведена процедура разработки математического описания робота. Разработана трехмерная модель, определены ее основные характеристики. Приведено описание SolidWorks для разработки трехмерной модели. Модель разработана в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений. Проведены аэродинамические исследования модели, анализ устойчивости и управляемости.

Ключевые слова: математическая модель робота, исследование устойчивости робота, линейные модели роботов, система алгебро-дифференциальных уравнений, аэродинамическая модель.

#### Giriş

Bu işdə riyazi üsul və nəzəriyyələrdən istifadə edərək Robotik Dinamik Sistemlərin Riyazi Modelləşdirilməsi və Simulyasiyası üçün kompüter programı hazırlanmışdır. Kompüter programı süni intellekt üsullarını riyazi metodlarla birləşdirir. Bu sahə olduqca mürəkkəbdir, çünki robot sistemləri qeyri-xətti dinamik sistemlər kimi nəzərdən keçirmək olar. Kompüter programı Robotik Dinamik Sistemlərin (RDS) riyazi modellərini necə layiləndirrməyi öyrətmək prosesində mütəxəssislərin mülahizələrini simulyasiya edir. Robotik Sistemlərin Riyazi Modelləşdirilməsi və Simulyasiyası çox vacibdir, çünki o, real sistemin idarə edilməsində və ya simulyasiyaların nəticələrindən istifadə edərək yeni sistemin dizaynına kömək edə bilər [1].

Bu işdə robot modelinin düzxətli trayektoriyası üzrə qeyri-xətti çoxəlaqəli model üçün Matlab paketindən və müxtəlif proqram nümunələrindən istifadə edilmişdir. Məqsəd, robotun mövqe-trayektoriyalı sintezini və düzxətli hərəkətini təşkili etməkdir.

#### Məsələnin qoyuluşu

Robotun qərarlaşmış hərəkətini təmin edən idarəetmələrin təyinedilmə proseduruna dirijablın (uçan aparat) misalında baxaq. Fərz edək ki, dirijablın arzuolunan hərəkəti obyektin koordinatlarının müəyyən vektor funksiyası şəklində verilir:

 $f^{0}(Y^{0}, X^{0}, \delta^{0}) = 0 \tag{1}$ 

burada, Y – xarici koordinatların vektoru; X – sürət vektoru;  $\delta$  – icra mexanizmlərinin vəziyyət vektoru; 0 – müvafiq ölçülüyün sıfır vektorudur [1-3].

Dirijablın arzuolunan hərəkətinin, yəni dirijablın Y,X vektorlarının arzuolunan dəyişikliklərini təmin edən, mühərriklərlə yaradılan idarəedici təsirlərin təyin edilməsi üçün obyektin kinematikasını təsvir edən tənliklərindən istifadə edək.

Misal üçün bütün xarici koordinatların sabit olduğu halda dirijablın bir mövqedə qalmasını təmin edən idarəetmənin təyin edilmə qaydasına baxaq, yəni,

$$Y^0 = 0 \tag{2}$$

Bu halda vektorun zaman üzrə törəməsi sıfra bərabərdir:

$$Y^0 = 0 \text{ va } A = Const, \ A_\omega = Const,$$
  
buna göra,  
 $\dot{Y} = RX$  (3)

tənliyindən (haradaki,  $[r_0^T \Theta^T]$ ;

$$X = \begin{bmatrix} V^T & \omega^T \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} A^T & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix}; \quad r_0 \Theta \quad - \text{Yer}$$

koordinat sistemində dirijablın xətti və bucaq koordinatları; V, ω – bağlı koordinat sistemində xətti və bucaq sürətləridir)

$$X^0 = 0 \tag{4}$$

Onda obyektin tənliklərinə görə

$$R_{a} = 0, N_{a} = 0 \quad \forall a$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \omega \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix}$$
(4\*)

tənliyi iki vertorlu qeyri-xətti cəbri tənliklər sisteminə keçir. Burada, F, N, – dirijabla təsir edən nəticəvi qüvvə və moment vektorlarıdır.

$$F_T + F_a + F_u = 0 \tag{5}$$

$$N_T + N_u = 0. (6)$$

(5), (6) tənliklər sisteminin həlli idarəedici təsirlər  $\delta$  vektorunu, yəni dirijablın  $Y^0 = 0$ nöqtəsində saxlanmasını və onun fırlanma hərəkətlərinin qarşısının alınmasını təmin edən, mühərriklərin yaratdığı dartı qüvvələrinin istiqamətini və qiymətini verir. Qeyd edək ki, (5), (6) tənliklər sistemi böyük sayda qeyri-məlum parametrlərlə qeyri-xətti sistemdir, buna görə onun təxmini həlli kompüter vasitəsilə mümkündür. Xətti model tənliklərinin dirijablın  $Y^0, X^0, \delta^0$ dəyişənlərilə təyin edilən, ümumi halda zaman funksiyaları kimi təyin edilən müəyyən arzuolunan hərəkət kənarlarında çıxarış qaydasına baxaq [5].

#### Dirijablın qərarlaşmış hərəkətlərini təmin edən idarəetmələrin təyin edilməsi

Dirijablın kinematika tənliklərinin xəttiləşdirilməsi məqsədilə meyletmə vektorlarını  $x_1 = Y - Y^0, x_2 = X - X^0$ daxil edək. Onda (3) sisteminə uyğun olan xətti tənliklər aşağıdakı şəklə malik olacaq [6,7].

$$\dot{x}_{1} = \frac{\partial R(Y^{0}X^{0})}{\partial Y^{0}} x_{1} + R(Y^{0}) x_{2}$$
(7)  
burada 
$$\frac{\partial R(Y^{0}X^{0})}{\partial Y^{0}} = \frac{\partial R(YX)}{\partial Y} \Big|_{\substack{Y = Y^{0} \\ X = X^{0}}}$$

Dirijablın dinamika tənliklərinin xəttiləşdirilməsi aşağıdakı tənliyə gətirib çıxarır:

 $\dot{x}_2 = M_0^{-1}[A_D x_2 + B_D \delta + H_D x_1 + F_B]$ (8) burada,  $M_0^{-1} M^{-1}$  (4\*) ifadəsinə uyğun olaraq hesablanan  $X = X^0$ ;  $F_B$ -dirijablın sürət, yönəltmə bucaqları və hündürlüyü dəyişdikdə qüvvə və momentlərin dəyişməsilə əlaqədar olan xarici həyəcanlar.

(8) xətti tənlikdən matrissalar xəttiləşdirmə nöqtələrindən aşağıdakı kimi təyin edilir:

$$A_D = \frac{\partial \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix}}{\partial X} \bigg|_0, B_D = \frac{\partial \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix}}{\partial \delta} \bigg|_0, H_D = \frac{\partial \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix}}{\partial Y} \bigg|_0$$
(9)

Qüvvə və ağırlıq momenti vektorları  $F_T$ , və  $N_T$ aşağıdakı ifadələrlə xəttiləşdirilir [6]:

$$F_T = mg \begin{bmatrix} \sin \vartheta \\ \cos \vartheta \cos \gamma \\ \cos \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}$$
(10)

$$N_T = mg \begin{bmatrix} (y_T \sin \gamma + z_T \cos \gamma) \cos \beta \\ -z_T \sin + x_T \cos \beta \sin \gamma \\ -x_T \cos \beta \cos \gamma + y_T \sin \gamma \end{bmatrix}$$
(11)

(10), (11) vektorlarının törəmələri aşağıdakı ifadələrlə təyin edilir:

$$\frac{\partial F_T}{\partial Y} = mg \begin{bmatrix} 0 & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \vartheta \sin \gamma \\ 0 & -\sin \vartheta \sin \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix}$$
(12)

$$\frac{\partial F_T}{\partial mg} = \begin{bmatrix} \sin \vartheta \\ -\cos \vartheta \cos \gamma \\ \cos \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}$$
$$\frac{\partial N_T}{\partial mg} = \begin{bmatrix} (y_T \sin \gamma + z_T \cos \gamma) \cos \vartheta \\ -z_T \sin + x_T \cos \vartheta \sin \gamma \\ -x_T \cos \vartheta \cos \gamma + y_T \sin \gamma \end{bmatrix}$$
(13)

$$\frac{\partial N_T}{\partial r_T} = mg \begin{bmatrix} 0 & -\cos \vartheta \sin \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma \\ -\cos \vartheta \sin \gamma & 0 & \sin \vartheta \\ \cos \vartheta \cos \gamma & -\sin \vartheta & 0 \end{bmatrix}$$
(14)

Arximed qüvvəsi vektoru:

$$F_{a}^{x} = \rho g U \cos \gamma,$$
  

$$F_{a}^{y} = \rho g U \cos \vartheta \cos \gamma,$$
  

$$F_{a}^{z} = -\rho g U \cos \vartheta \sin \gamma$$
(15)

ifadəsilə təyin edilir, o, matrisa şəklində aşağıdakı şəklə malik olur.

$$F_a = \rho g U \begin{bmatrix} \sin \vartheta \\ \cos \vartheta \cos \gamma \\ -\cos \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}$$
(16)

onda

$$\frac{\partial F_a}{\partial Y} = \rho g U \begin{bmatrix} 0 & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & -\sin \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ 0 & \sin \vartheta \sin \gamma & -\cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix}$$
(17)
$$\frac{\partial F_a}{\partial F_a} \begin{bmatrix} \sin \vartheta \\ 0 \end{bmatrix}$$
(17)

$$\frac{\partial F_a}{\partial \rho g U} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \gamma \\ \cos \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}$$
(18)

Aerodinamik qüvvələrin vektoru üçün xəttiləşmiş ifadənin çıxarılması məqsədilə  $c = c(V, \alpha, \beta)$  asılılığını nəzərə almaqla aşağıdakı ifadəni xəttiləşdirək

$$R_a(\rho, V, c) = -\frac{\rho V^2 S_{\text{xap}}}{2} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix}$$
(19)

Bu məqsədlə, (19) ifadəsinin bütün arqumentləri üzrə xüsusi törəmələrini tapaq

$$\frac{\partial R_{a}}{\partial \rho} = -\frac{V^{2}S_{xap}}{2} \begin{bmatrix} C_{x} \\ C_{y} \\ C_{z} \end{bmatrix}, \frac{\partial R_{a}}{\partial V} =$$

$$= -\rho S_{xap} \left( V \begin{bmatrix} C_{x} \\ C_{y} \\ C_{z} \end{bmatrix} + \frac{V^{2}}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial c_{x}}{\partial V} \\ \frac{\partial c_{y}}{\partial V} \\ \frac{\partial c_{z}}{\partial V} \end{bmatrix} \right)$$
(20)
$$\frac{\partial R_{a}}{\partial \alpha} = -\rho \frac{V^{2}S_{xap}}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial c_{x}}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial c_{y}}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial c_{z}}{\partial \alpha} \end{bmatrix}, \frac{\partial R_{a}}{\partial \beta} =$$

$$= -\rho \frac{V^2 S_{\text{xap}}}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial C_x}{\partial \beta} \\ \frac{\partial C_y}{\partial \beta} \\ \frac{\partial C_z}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$
(21)

Analoji şəkildə  $m = m(V, \alpha, \beta)$  asılılığını nəzərə almaqla aerodinamik momentlər vektorunu tapaq:

$$N_a(\rho, V, \overline{m}) = -\rho \frac{V^2 S_{xap} L}{2} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$$
(22)

(22)-dən xüsusi törəmələr bu halda aşağıdakı ifadələrlə təyin edilir:

$$\frac{\partial N_{a}}{\partial \rho} = -\frac{V^{2}S_{xap}L}{2} \begin{bmatrix} m_{x} \\ m_{y} \\ m_{z} \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial N_{a}}{\partial v} = \rho S_{xap}L \left( V \begin{bmatrix} m_{x} \\ m_{y} \\ m_{z} \end{bmatrix} + \frac{V^{2}}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial m_{x}/\partial V}{\partial m_{y}/\partial V} \\ \frac{\partial m_{z}}{\partial V} \end{bmatrix} \right)$$
(23)
$$\frac{\partial N_{a}}{\partial \alpha} = -\rho \frac{V^{2}S_{xap}L}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial m_{x}/\partial \alpha}{\partial m_{z}/\partial \alpha} \\ \frac{\partial m_{z}}{\partial \alpha} \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial N_{a}}{\partial m_{z}} = -\rho \frac{V^{2}S_{xap}L}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial m_{x}/\partial \beta}{\partial m_{y}/\partial \beta} \\ \frac{\partial m_{y}}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$
(24)

 $\frac{\partial m_a}{\partial \beta} = -\rho \frac{\partial m_z}{2} \begin{bmatrix} \partial m_y / \partial \beta \\ \partial m_z / \partial \beta \end{bmatrix}$ (24)

Çox vaxt dirijablın qərarlaşmış hərəkəti sürətlərin verilməsiylə təyin edilir:  $X = X^0$  (25)

Bu halda yalnız dinamik tənliklər xəttiləşdirilir, kinematik tənlikləri isə ədədi inteqrallanır.

#### Robotun modelinin tədqiq edilməsi

Yuxarıda baxılan dirijablın (onun vəziyyətini  $h^0$ =4000m hündürlükdə stabilləşdirmək lazımdır) misalında yer koordinat sistemində dəyişənlərin aşağıdakı qiymətləri ilə təyin edilən nöqtədə, robot tənliklərinin xəttiləşdirilməsi üçün (1)-(24) nisbətlərinin tətbiqinə baxaq.

 $\left( x^0, y^0, z^0, \Psi^0, \mathcal{G}^0, \gamma^0 \right) = (0,4000,0,0,0,0) \quad (26)$ 

Bu dəyişənləri zaman üzrə differensiallayaraq (3) tənliyinə yazıb bağlı koordinat sistemində sürətlərin qiymətlərini alırıq:

$$\begin{bmatrix} V_x^0, V_y^0, V_z^0, \omega_x^0, \omega_y^0, \omega_z^0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \end{bmatrix}^T \quad (27)$$

Sonra dirijablı (26), (27) nöqtəsində saxlayan idarəedici təsirlərin qiymətlərini tapaq. Bu məqsədlə (26), (27) vektorlarını (28) tənliyinə yazaq və Matlab paketinin köməyilə həll edək. Nəticədə axtarılan parametrlərin aşağıdakı qiymətlərini alarıq:

$$P_1 = 475 H; P_2 = 475 H; P_3 =$$
  
212,5 H;  $P_4 = 212,5 H$  (28)

 $\begin{aligned} \alpha_{P1} &= 1,57 \ rad; \ \alpha_{P2} &= 1,57 \ rad; \\ \alpha_{P3} &= 1,57 \ rad; \ \alpha_{P4} &= 1,57 \ rad; \\ \beta_{P1} &= 0; \ \beta_{P2} &= 0; \ \beta_{P3} &= 0; \ \beta_{P4} &= 0 \end{aligned} \tag{29}$ 

Dəyişənlərin tapılmış qiymətlərini (7) tənliyinə qoyaraq kinematikanın xətti tənliklərini alarıq, bu da dirijablın kinematikasının sadələşmiş tənliklərini aşağıdakı şəkildə yazmağa imkan verir:

$$\dot{x}_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(31)

Bu sistemdə x1 vektorunun komponentləri vəziyyətin dəyişənləridir, x2 vektoru isə faktiki olaraq "idarəetmə" rolunu oynayır. Buna görə dirijablın kinematikası dayanaqlıq sərhədində və ya Lyapunov mənasında dayanaqlı sistemdir [5]. Onun xarakteristik tənliyinin bütün altı kökləri sıfra bərabərdir. Bu sistemin idarəediciliyinə aid demək olar ki, onun Kalman üzrə idaəedicilik matrisi girişlərin matrisi ilə üst-üstə düşür, hansına ki, x2 vurulur. Asanlıqla görmək olar ki, bu matrisin ranqı altıya bərabərdir, yəni (31) sistemi baxılan halda tamamilə idarəolunandır. Dirijablın kinematikası həmişə (9=90°halından başqa) tamamilə idarəolunandır. Bu halda idarəedici təsirlər kimi mühərriklərin dartqı qüvvələrinin qiymətlərini və onların istiqamətlərini hesab edək. Buna görə idarəetmə vektoru 10-a bərabər olan ölçülüyə malikdir. dəyişənlərinin qiymətlərini (26)-(30)(8)tənliyinə qoysaq, dinamika tənliklərindən bütün matrislərin əmsallarının ədədi qiymətlərini alarıq:

Lo o o o o o l Verilən ifadələrdən görünür ki, dirijablın xətti tənlikləri yüksək dərəcəyə və böyük sayda idarəeidici və həyəcanlandırıcı təsirlərə malikdir. Bu halda kinematika və dinamika tənliklərinin sistem matrisaları sıfra bərabərdir. Bu təbiidir, belə ki, dirijabl hərəkətsizdir və onun bütün istiqamət sürətləri və bucaqları sıfra bərabərdir [8].

Dirijablın  $y^0 = 4000$  m hündürlükdə 22,22 m/s sürətlə yer koordinat sisteminin OX oxuna mənfi 30<sup>0</sup> bucaq altında düzxətli hərəkətinin sadələşmiş modelinə baxaq. Bu hala uyğun olan dirijablın hərəkətinin trayektoriyası şək.1-də yer koordinat sistemində göstərilmişdir. Dirijablın bu koordinat sistemində arzuolunan qərarlaşmış hərəkəti aşağıdakı ifadələrlə təsvir edilir:

$$x_0^0 = 22,22t \cos(-30^\circ) = 19,24 t,$$
  

$$z_0^0 = -20 t \sin(-30^\circ) = 11,11 t \qquad (37)$$
  

$$y_0^0 = 4000, \Psi^0 = -30^\circ = 0,5236,$$
  

$$\mathcal{S}^0 = Const, \gamma^0 = 0 \qquad (38)$$

(3) sisteminə  $\begin{bmatrix} \dot{x}_0^0 & \dot{y}_0^0 & \dot{z}_0^0 & \dot{\psi}_0^0, \dot{\varphi}_0^0, \dot{\gamma}_0^0 \end{bmatrix} =$ [19,24 0 11,11 0 0 0] qoyaraq bağlı koordinat sistemində sürətlərin uyğun qiymətlərini tapaq: (39) vektorundan zaman üzrə törəmələrin qiymətləri, əvvəlki halda olduğu kimi, sıfra bərabərdir. Lakin bu halda təsirlənmə qüvvələri və momentləri sıfra bərabər olmayacaq, belə ki,  $V_x$ ,  $V_z$  sürətləri sıfra bərabər deyil.

Dirijablın hərəkətinin bu rejimində idarəedici təsirlər kimi mühərriklərin yaratdığı qüvvələri və momentləri hesab edəcəyik. Buna görə (4\*) sistemində idarəetmə vektorunun ölçülüyü altıya bərabərdir, *B*<sub>D</sub> matrisi isə - 6x6 ölçülü vahiddir [8,9].



**Şəkil 1** – Dirijablın düz xətt üzrə hərəkəti **Figure 1** – The movement of the airship in a straight line

Axtarılan idarəedici təsirlərin ədədi qiymətləri  $F_{ux}$ ,  $F_{uy}$ ,  $F_{uz}$ ,  $N_{ux}$ ,  $N_{uy}$ ,  $N_{uz}$  uyğun qüvvə və momentlərin göstərilən proqramla verilən, əks işarələrlə götürülən ədədi qiymətlərinə bərabərdir. Məsələn,  $y^0 = 4000$  m hündürlükdə 22,22 m/s kreyser sürətilə yer koordinat sisteminin  $OX_0$  oxuna mənfi  $30^0$  bucaq altında verilən düzxətli hərəkət halında idarəedici qüvvə və momentlər aşağıdakılara bərabərdir [10].

 $F_x = 2460 N, F_y = 3000N, F_z = 0 N$ (40)  $N_x = 0 N \cdot m, N_y = -2200 N \cdot m,$ 

$$N_z = 2570 \, N \cdot m \tag{41}$$

$$A_{D} = \begin{bmatrix} -0,0000 & 0,0133 & 0,0000 \\ 0 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0036 & -0,0708 & -0,0016 \\ 0,0048 & -0,0945 & 0,0022 \\ 0,0433 & -0,0048 & -0,0200 \\ 0,0000 & 0,0125 & -0,0000 \\ \end{bmatrix}$$

$$B_{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_{D} = \begin{bmatrix} 0,0337 & 0 & -0,0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(43)$$

0,0062

0

0

0

0

-0.0355

0

0

Yuxarıda göstərilən kimi, dirijablın kinematikasının modeli həmişə (9=90 halından başqa) idarəolunandır. Buna görə dirijablın dinamikası modelinin idarəediciliyinin tədqiq edilməsilə məhdudlaşaq. Düzxətli hərəkətdə dirijablın dinamiksı modelinin idarəediciliyini tədqiq etmək üçün (8) tənliyindən istifadə edək, burada  $A_D$  və  $B_D$  matrisaləri (42) – (44) ifadələrilə təyin edilir.  $A_D$  matrisi 6x6 ölçülüyünə,  $B_D$  matrisası isə 6x10 ölçülüyünə malik olduğundan dirijablın dinamikası modelinin idarəediciliyinin matrisi:

$$U = [B_D A_D B_D (A_D)^2 B_D (A_D)^3 B_D (A_D)^4 B_D (A_D)^5 B_D]$$
(45)

6x60 ölçülüyünə malik olur. Buna görə onu göstərmirik.

Dirijablın sadələşmiş kinematika tənlikləri düzxətli hərəkətdə (31) asılma rejimində olan şəklə malik olur. Dirijablşn dinamikasının sadələşmiş tənlikləri asılma halına analoji olaraq alınır. Nəticədə (8) ifadəsinə daxil olan matrisaların aşağıdakılara bərabər olduğunu tapırıq:

$$\begin{bmatrix} 0 & -15,7875 & 0 \\ 5,8635 & 0 & -7,1570 \\ 0 & 13,4915 & 0 \\ 0 & -0,0899 & 0 \\ 0 & -0,0045 & 0 \\ 0 & 0,0211 & 0 \end{bmatrix}$$
(42)

 $A_D$  və  $B_D$  matrislərin əmsallarının ədədi qiymətlərini qoyaraq və məsələn MATLAB vasitəsilə onun ranqını təyin edərək onun 6-ya bərabər olduğunu tapaq. Buradan R. Kalmanın idarəedicilik kriteriyasına uyğun olaraq, görünür ki, dirijablın dinamikası modeli idarəetmə obyekti kimi, tarazlıq vəziyyətində tamamilə idarə olunandır. Dirijablın idarəediciliyi üçün onun müxtəlif uçuş rejimlərində idarəediciliyin matrisa ranqının təkcə qiymətləri deyil, həm də dirijablın hərəkətetdiriciləri ilə yaradılmalı olan idarəedici qüvvə və momentlərin ədədi qiymətləri vacibdir. Bununla əlaqədar olaraq cədvəl 1. verilib, burada dirijablın müxtəlif sürətlərində və müxtəlif uçuş hündürlüklərində idarəedici qüvvələrin  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ və momentlərin  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  qiymətləri vardır.

Dirijablın qərarlaşmış hərəkətlərinin dayanaqlığının tədqiq edilməsi üçün (dəyişənlərin qərarlaşmış qiymətlərdən kiçik meyletmələrində) *A.M. Lyapunovun* birinci metodundan və yuxarıda göstərilən dirijablın müxtəlif rejimlərini təsvir edən onun xətti tənliklərindən istifadə edək [5, 11].

Dirijablın düzxətli hərəkətinin dayanaqlığı AD matrisasının məxsusi ədədləri ilə təyin edilir. Bu matrisa 4000 m hündürlükdə 22,22m/s uçuş sürəti üçün (42) şəklinə malikdir. O, digər hündürlük və uçuş sürətlərinin qiymətlərində də analoji şəklə malikdir. Dayanaqlıq üçün  $A_D$  matrisanın özü deyil, onun dirijablın müəyyən hündürlüyündə və uçuş sürətində hərəkətinə uyğun olan məxsusi ədədləridir. Həm də hesablamaların göstərdiyi kimi, bu kəmiyyətlər hündürlük və uçuş sürəti dəyişdikdə əhəmiyyətli dərəcədə dəyişirlər.

**Cədvəl 1** - 4000 m hündürlükdə müxtəlif sürətlərdə idarəedici qüvvə və momentlərin qiymətləri **Table 1** – Prices of high-speed driving forces and moments at an altitude of 400 m

Qüvvələr və	V = 10	V = 15	V = 22,22	V = 33,33
momentlər	m/s	m/s	m/s	m/s
F <sub>x</sub>	564	1040	2460	5470
Fy	2054	2980	3000	6410
Fz	0	0	0	0
N <sub>x</sub>	0	0	0	0
Ny	-43	-88	-200	-465
Nz	68	76	6	-1

Əyanilik üçün cədvəl 2-də dirijablın 4000m uçuş hündürlüyünə və müxtəlif uçuş sürətlərinə uyğun olan  $A_D$  matrisasının məxsusi ədədlərinin qiymətləri verilmişdir.

**Cədvəl 2** –  $A_D$  matrisasının məxsusi ədədləri (4000 m hündürlükdə)

**Table 2** – Special numbers of  $A_D$  matrix (at an altitude of 4000 m)

V = 10 m/s	V=15 m/s
-0,0039 + 0,4415i	-0,0059 + 0,6622i
-0,0039 - 0,4415i	-0,0059 - 0,6622i
0,0026 + 0,3587i	0,0038 + 0,5381i
0,0026 - 0,3587i	0,0038 - 0,5381i
V=22,22 m/s	V=33,33 m/s
-0,0088 + 0,9809i	-0,0132 + 1,4714i
-0,0088 - 0,9809i	0,0132 - 1,4714i
0,0057 + 0,7971i	0,0085 + 1,1957i
0,0057 - 0,7971i	0,0085 – 1,1957i

Cədvəl 1 və 2-də verilənlərdən görünür ki, dirijablın hərəkətləri Lyapunovun birinci metodunun üçüncü teoreminə (birinci yaxınlaşma üzrə dayanaqsızlıq barədə) uyğun olaraq bütün uçuş sürətlərində dayanaqsızdır. Bu cədvəl 2-də bütün uçuş sürətləri qiymətlərində köklərin müsbət həqiqi hissə ilə olması ilə əlaqədardır [4-7].

# Layihə tapşırığı "Robotun modelinin tədqiq edilməsi"

Robotun əvvəl alınmış modelinə uyğun olaraq aşağıdakı işləri yerinə yetirmək lazımdır:

- robotun düzxətli hərəkətində kreyser sürəti ilə modelini xəttiləşdirmək;
- robotun xəttiləşdirilmiş modeli üzrə onun idarəediciliyi və dayanaqlığının analizini aparmaq;
- robotun verilən hərəkət trayektoriyasında saxlanılması üçün lazım olan idarəedici qüvvə və momentlərin qiymətlərini təyin etmək.

### Matlab paketindən istifadə etməklə xətti-kvadratik tənzimləyicinin sintezi

Xətti-kvadratik tənzimləyicinin sintezini dirijabl misalında kinematikanın xəttiləşdirilmiş tənlikləri üzrə həyata keçirəcəyik. Sintezin nəticəsində idarəedici qüvvə və momentlərin dirijablın sürətlərindən asılılığı alınacaqdır. (8) şəklində riyazi modelə baxılır. Xətti-kvadratik tənzimləyicinin sintezində nəzərdə tutulur ki, xarici qüvvələrlə əlaqədar olan təsirlər sıfra bərabərdir,  $F_B = 0$ . Yalnız dinamika tənliyinə baxıldığından, $x_1 = 0$  vektoru, həmçinin sıfra bərabər olan xarici təsirdir [1,3].

Onda (8) tənliyi aşağıdakı şəkildə olur:

$$\dot{x}_2 = M_0^{-1} A_D x_2 M_0^{-1} B_D F_u \tag{46}$$

Dirijablın idarə olunan dəyişənləri bu halda bütün xətti və bucaq sürətləri olur, buna görə çıxış tənliyi aşağıdakı kimi olur:

$$y = Cx_2 + DF_u$$
(47)  
burada, C – 6x6 ölçülüklə vahid matrisa; D –  
6x6 ölçülüklə sıfır matrisi.

İdarəetmənin məqsədi şək.1-də göstərilən düzxətli trayektoriya üzrə hərəkətdir. Onda, sürətlərə tələblər (39) ifadəsilə,  $A_D, B_D$ matrisləri isə (42), (43) tənliklərilə təyin edilir.

Dirijablın əsas parametrləri: tam kütləsi m=5000 kq; ağırlıq mərkəzinin vəziyyəti  $r_T = \begin{bmatrix} 0 & -1,5 & 0 \end{bmatrix}$  m; ətalət momentləri  $J_x =$ 235,700,  $J_y =$  579800,  $J_z =$  453200 kq·  $m^2$ ;

birləşmiş kütlələr

 $\lambda_{11} = 0,12m, \ \lambda_{22} = 1,45m, \ \lambda_{33} = 0,45m, \ \lambda_{44} = 0,3J_x, \ \lambda_{55} = 0,19J_y, \ \lambda_{66} = 0,87J_z m;$ 

Onda  $M_0$  matrisası aşağıdakı ifadə ilə təyin edilir:

	5936_	0	0	0	0	7950	
	0	12985	0	0	0	0	
м —	0	0	7685	-7950	0	0	(48)
$m_0 =$	0	0	-7950	306410	0	0	(40)
	0	0	0	0	689962	0	
	L 7950	0	0	0	0	847484	

Xətti-kvadratik tənzimləyici (45), (46) xəttiləşdirilmiş model üzrə sintez olunur və aşağıdakı keyfiyyət funksionalını minimallaşdırılır:

 $J = \int (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt$ (49) burada, Q, R, N – çəki əmsallarının matrisləridir.

Tənzimləyicinin sintezi üçün Matlab paketindən və aşağıda göstərilən proqramdan istifadə edək.

Göstərilən listinqdə (şək. 2) vəziyyət dəyişənlərinə tənliklər şəklində dirijablın xətti modelinin təsvirini yaratmaq üçün ss operatoru istifadə edilmişdir, hansı ki, (45), (46) şəklində obyekt yaradır. Obyekt yaradılarkən operator ss-in giriş parametrləri ardıcıl şəkildə vergüllə verilən dörd matrisdir. Çəki əmsallarının matrisaları kimi iki vahidlik matrisa və bir sıfır matrisası seçilmişdir. Qeyd edək ki, adətən R matrisası vahidlik verilir, Q matrisası əmsalları isə qapalı sistemin tələb olunan xassələrinin verilməsi üçün tədqiqatlar gedişində dəyişilirlər.

clear all; % bütün dəyişənlərin təmizlənməsi clc; % ekranı təmizləmə % obyektin matrislərinin verilməsi Ad=[0-0.0133 0 0-15.7875 0; 0 0 0 5.8635 0-7.157; 0.0036 -0.0708 -0.0016 0 13.4915 0; 0.0048 -0.0945 -0.0022 0 -0.0899 0; 0.0433 -0.0048 -0.02 0 -0.0045 0; 0 0.0125 0 0 0.0211 0]; Bd=eye(6,6); Cd=eye(6,6); Dd=zeros(6,6); M0=[5936 0 0 0 0 7950; 0 12985 0 0 0; 0 0 7685 -7950 0 0; 0 0 0 -7950 306410 0; 0 0 0 0 689962 0; 7950 0 0 0 0 847484]; % vəziyyət dəyişənlərinə tənliklər şəklində dirijablın modelinin yaradılması sys\_dir=ss(M0^(-1)\*Ad,M0^(-1)\*Bd,Cd,Dd); % keyfiyyət funksionalının çəki matrisalarının verilməsi Şəkil 2 – Xətti-kvadratik tənzimləyicinin sintez proqramının listingi Figure 2 – Listing of the linear-square regulator

**Figure 2** – Listing of the linear-square regulator synthesis program

Operator lqr K1 tənzimləyicinin güclənmə əmsalları vektorunun tapılmasını həyata keçirir, həmçinin Pikkati S1 tənliyinin həllini və qapalı sistemin məxsusi ədədlərini verir. Verilmiş keyfiyyət kriteriyası üzrə optimal idarəetmə aşağıdakı şəklə malikdir:

 $u = -K_1 x$  (50) Qapalı sistemin tədqiq edilməsi üçün proqramda dirijablın qapalı idarəetmə sisteminin modeli yaradılır, onun üçün ltiview operatoru vasitəsilə hər bir girişə hər çıxışın reaksiyası kimi keçid xarakteristikaları qurulur. Məsələn, şəkil 3-də birinci girişdə vahid sıçrayışa birinci çıxışın reaksiyası (Vx sürəti) göstərilmişdir. Qeyd etmək olar ki, keçid prosesinin müddəti çox böyük (60000s qədər) alınır. Bu Q çəki matrisası əmsallarının kiçik Onun cari qiymətində dirijablın qapalı idarəetmə sistemi-

nin məxsusi ədədlər vektoru aşağıdakına bəra-	-0.0001684
bərdir [2,10]	-0.0001299
E1 = -0.0002125 + 0.0001326i	-0.0000283
-0.0002125	-0.0000018
- 0.0001326i	qiymətlərilə izah edilir.



Şəkil 3 – Birinci giriş üzrə keçid prosesiFigure 3 - The process of transition to the first entrance

Məxsusi ədədlərin kiçik qiymətlərindən başqa qeyd etmək olar ki, iki axırıncı ədəd bir dərəcə və iki dərəcə yerdə qalan məxsusi ədədlərdən kiçikdir.

Bununla əlaqədar olaraq, Q matrisinin əmsallarını aşağıdakı kimi artıraq:

Г	10	0	0	0	0	ך 0	
	0	10	0	0	0	0	
	0	0	10	0	0	0	
	0	0	0	10	0	0	
	0	0	0	0	1000	0	
L	0	0	0	0	0	1000	
		$ \left[\begin{array}{c} 10\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{array}\right] $	$\left[\begin{array}{ccc} 10 & 0 \\ 0 & 10 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array}\right]$	$\left[\begin{array}{ccccc} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array}\right]$	$\left[\begin{array}{cccccc} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right]$	$\left[\begin{array}{cccccccccccc} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right]$	$\left[\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

Onda, qapalı sistemin məxsusi ədədləri aşağıdakı şəklə malik olur: E1 = -0.0039 -0.0030 -0.0014 + 0.0002i -0.0014 - 0.0002i -0.0003 -0.0004 Görürük ki, məxsusi ədədlər modul üzrə təxminən 3 dəfə artmışdır, həm də keçid proseslərinin müddətini təyin edən həqiqi hissənin minimal qiyməti 30 dəfə artmışdır.

Lazım olduqda keçid proseslərinin tələb olunan müddətini almaq üçün Q matrisası əmsallarını sonra dəyişmək olar. Məsələn,

Г	300	0	0	0	0	ן 0	
	0	300	0	0	0	0	
$\rho -  $	0	0	300	0	0	0	
v -	0	0	0	300	0	0	
	0	0	0	0	90000	0	
L	0	0	0	0	0	90000	

matrisində qapalı sistemin spektri aşağıdakına bərabər olur

```
\begin{split} E1 &= -0.0039 \\ -0.0030 \\ -0.0014 + 0.0002i \\ -0.0014 - 0.0002i \\ -0.0003 \\ -0.0004 \end{split}
```

Birinci çıxış üzrə keçid proseslərinin müddəti şəkil 4-də göstərilən kimi 1500s

qədərdir.



Şəkil 4 – Q matrisanın artmış əmsallarında keçid prosesi Figure 4 - The transition process in the increased coefficients of the matrix Q

#### Layihə tapşırığı "Xətti-kvadratik tənzimləyicinin sintezi"

Robotun düzxətli trayektoriyası üzrə xəttiləşdirilmiş modeli üçün Matlab paketindən istifadə edərək xətti-kvadratik tənzimləyicinin sintezini aparmaq.

Q funksionalının çəki əmsallarının matrisasını (48) dəyişərək tənzimləyicini elə tənzimləmək ki, bütün kanallar üzrə keçid proseslərinin müddəti təxminən eyni olsun və konkret robotun tələblərinə uyğun olsun.

#### Mövge-trayektoriyalı tənzimləyicinin sintezi

Hərəkət edən obyektlərin mövqe-trayektoriyalı idarəetmə metodu [10] robototexnika sisteminin qeyri-xətti çoxəlaqəli modeli bazasında (3), (4\*) onun idarəetmə alqoritmlərini sintez etməyə imkan verir.

Fərz edək ki, mühərriklərin zaman sabiti dirijablın zaman sabitindən əhəmiyyətli dərəcədə kiçikdir. Bu mühərriklərin tənliklərini hərəkətin əsas idarəetmə konturuna daxil etməməyə imkan verir və idarəetmə sistemi (3), (4\*) tənlikləri üzrə sintez edilir. Dirijablın hərəkətinin idarəetmə alqoritmi aşağıdakı şəklə malikdir [5, 9].

$$F_u = -M_u^{-1} \left( M_d \left( F + \widehat{F_B} \right) + \psi_{\Sigma} \right), \tag{50}$$

$$\psi_{\Sigma} = \begin{bmatrix} A_4^{-1}T_3\psi_V \\ (A_2A_{\omega})^{-1}(A_2\dot{A_{\omega}})\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + T_2\psi_{TP} + T_1\dot{\psi}_{TP} \end{bmatrix}$$

$$M_{u} = \begin{bmatrix} M^{-1}(1,1) & M^{-1}(1,2) & M^{-1}(1,4) & M^{-1}(1,5) & M^{-1}(1,6) \\ M^{-1}(2,1) & M^{-1}(2,2) & M^{-1}(2,4) & M^{-1}(2,5) & M^{-1}(2,6) \\ M^{-1}(4,1) & M^{-1}(4,2) & M^{-1}(4,4) & M^{-1}(4,5) & M^{-1}(4,6) \\ M^{-1}(5,1) & M^{-1}(5,2) & M^{-1}(5,4) & M^{-1}(5,5) & M^{-1}(5,6) \\ M^{-1}(6,1) & M^{-1}(6,2) & M^{-1}(6,4) & M^{-1}(6,5) & M^{-1}(6,6) \end{bmatrix}$$

$$M_{d} = \begin{bmatrix} M^{-1}(1,1) & M^{-1}(1,2) & M^{-1}(1,3) & M^{-1}(1,4) & M^{-1}(1,5) & M^{-1}(1,6) \\ M^{-1}(2,1) & M^{-1}(2,2) & M^{-1}(2,3) & M^{-1}(2,4) & M^{-1}(2,5) & M^{-1}(2,6) \\ M^{-1}(4,1) & M^{-1}(4,2) & M^{-1}(4,3) & M^{-1}(4,4) & M^{-1}(4,5) & M^{-1}(4,6) \\ M^{-1}(5,1) & M^{-1}(5,2) & M^{-1}(5,3) & M^{-1}(5,4) & M^{-1}(5,5) & M^{-1}(5,6) \\ M^{-1}(6,1) & M^{-1}(6,2) & M^{-1}(6,3) & M^{-1}(6,4) & M^{-1}(6,5) & M^{-1}(6,6) \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{\rm TP} = \begin{bmatrix} \Psi - \arctan(A_2Y + A_3) - \arctan(V_z, V_z) \\ \upsilon - k_1(y_0 - y^*) - \alpha^* \end{bmatrix}, \quad (51)$$

$$\Psi_{\rm V} = \begin{bmatrix} V_x - V^* \\ -V\sin(\alpha^*)\cos(\beta) \end{bmatrix}$$
(52)

Burada  $A_2, A_3$ - matris və vektordur, onların əmsalları dirijablın hərəkət trayektoriyasını təyin edir;  $\Psi_{TP}$  – trayektoriya səhvləri vektoru;  $T_1T_2, T_3$  – sabit əmsalların matrisləri;  $\Psi_V$ -idarəetmə sisteminin sürət səhvi;  $\psi_{\Sigma}$ -idarəetmə sisteminin ümumiləşdirilmiş səhvi; F – dirijabla təsir edən dinamik və xarici qüvvə və momentlərin vektoru;  $\dot{A_{\omega}} - A_{\omega}$  matris elementlərindən zaman üzrə törəmələrin matrisası;  $\hat{F_B}$  - həyəcanlandırıcı təsirlərin qiymətləndirmə vektoru;  $y^*$  – verilmiş uçuş hündürlüyü;  $\alpha^*$  - dirijablın minimal tanqaj momentini tə-

İdarəetmə alqoritmi (50)-(54) tanqajın maksimal və minimal bucaqlarını məhdudlaşdıran bərabərsizliklərlə tamamlanır. Bundan başqa, idarəetmə alqoritmi avtomatik şəkildə mühitə nəzərən dirijablın sürətini və bucaq sürətlərini məhdudlaşdırır. Əgər dirijabl bucaqların maksimal yolverilən qiymətlərindən çox olan vəziyyətə düşərsə, idarəetmə sistemi məqsəd tapşırığının yerinə yetirilməsini saxlayır və aparatı külək axını üzrə dreyf rejimində stabil-

min edən optimal hücum bucağı;  $k_1$ .- sazlanma əmsalı;  $V^*$ - dirijablın verilmiş hərəkət sürətidir.

Robast (cüzi) təsirlərin müşahidəsinin tənliyi aşağıdakı şəklə malikdir [3].

$$-\hat{z} = -L\hat{z} - (G_1 + L)C^{-1} \begin{bmatrix} F + F_{con} \\ N + N_{con} \end{bmatrix} - -L^2 M \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix},$$
(53)

$$\hat{F}_B = \hat{z} + LM \begin{bmatrix} V\\ \omega \end{bmatrix},\tag{54}$$

ləşdirir. Bundan sonra tapşırığın yerinə yetirilməsinin bərpası həyata keçirilir [5, 6, 7].

Alınmış idarəetmə vektoru beşə bərabər olan ölçülüyə malikdir. Bu baxılan dirijablın icra mexanizmlərinin bağlı koordinat sisteminin OZ oxu üzrə əhəmiyyətli dərəcədə idarəedici qüvvənin yaranmasına imkan verməməsi faktı ilə əlaqədardır.

Baxılan dirijabl 10 idarəedici təsirə malikdir [6-8]:

 hər biri 3000 N qədər iki P1 və P2 marş mühərriklərinin iki dartqısı;

hər biri 200 N qədər P3 və P4 quyruq mühərriklərinin iki dartqısı;

- hər bir marş mühərriki şaquli müstəvidə  $\pm 180^{\circ}$  hədlərində  $\alpha_1, \alpha_2$  bucaq qədər dönür- daha 2 idarəetmə kanalı;

- hər bir quyruq mühərriki şaquli müstəvidə  $\pm 90^{\circ}$  hədlərində  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  bucağı qədər dönür- daha 2 idarəetmə kanalı;

– hər bir quyruq mühərriki üfüqi müstəvidə  $\pm 90^{\circ}$  hədlərində $\beta_3$ ,  $\beta_4$  bucaq qədər dönür – daha 2 idarəetmə kanalı.

İdarəedici qüvvə və momentlərin paylanmasında aşağıdakı qaydalar qəbul edilib:

- quyruq mühərriklərinin gücünün az olması ilə əlaqədar olaraq quyruq mühərriklərinin üfüqi müstəvidə dönmə bucaqları sıfır qəbul edilir.  $\beta_3, \beta_4 = 0$ ; quyruq mühərrikləri sinxron işləyir, yəni  $\alpha_3 = \alpha_4$  və  $P_3 = P_4 = 200$ 

Bu halda 5 müstəqil idarəetmə kanalı qalır: marş mühərriklərinin iki dartqı və 2 dönmə bucaqları və quyruq mühərriklərinin dönmə bucaqları. Onda idarəedici qüvvə və momentlərin paylanma alqoritmi aşağıdakı ifadələrlə təsvir olunur:

$$P_3 = P_4 = 200 \quad \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$P_{3y} = \begin{cases} \frac{N_{uz}}{2x_{34}}, & \text{əgər abs}(P_{3y}) \le 200\\ 200 \ sign(P_{3y}), & \text{əgər abs}(P_{3y}) > 200 \end{cases}$$

$$P_{3x} = \sqrt{200^2 - P_{3y}^2}$$

$$P_{2x} = (F_{ux} - 2P_{3x} - N_{uy}/z_1)/2,$$

$$P_{1x} = N_{uy}/z_1 + P_{2x},$$

$$P_{2y} = (F_{uy} - 2P_{3y} - N_{ux}/z_1)/2,$$

$$P_{1x} = N_{ux}/z_1 + P_{2y}, P_1 =$$

$$= \left\{ \sqrt{P_{1x}^2 + P_{1y}^2}, & \text{əgər } \sqrt{P_{1x}^2 + P_{1y}^2} \le 3000, \right\}$$

əks halda 3000

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= a \tan^2(P_{1y}, P_{1x}), \\ P_2 &== \begin{cases} \sqrt{P_{2x}^2 + P_{2y}^2}, \text{ agar } \sqrt{P_{2x}^2 + P_{2y}^2} \leq 3000, \end{cases} \end{aligned}$$

əks halda 3000

 $\begin{aligned} \alpha_2 &= a \tan 2 \big( P_{2y}, P_{2x} \big), \\ \alpha_3 &= a \tan 2 \big( P_{3y}, P_{3x} \big), \alpha_4 = \alpha_3 \end{aligned}$ 

burada,  $a \tan 2 - \pm \pi$  sahəsində təyin edilən arktangens funksiyasıdır.

Dirijablın mövqe-trayektoriyalı qapalı idarəetmə sisteminin modelləşdirilməsi üçün Matlab paketini istifadə edək [9].

Modelləşdirmə proqramı iki əsas fayldan ibarətdir – main\_dir.m ssenarisindən və fun\_dir.m ode-funksiyasından. Bir neçə funksiya əlavə istifadə olunur, onlarda dirijablın və mühitin aerodinamik əmsalları və digər parametrləri təsvir olunub.

Funksiyada əvvəlcə rahatlıq üçün idarəetmə sistemində istifadə edilən dəyişənlərin şərti işarələri daxil edilir. Sonra bir sıra köməkçi vektorlar formalaşdırılır. Ardıcıl olaraq, mövqe-trayektoriyalı tənzimləyicinin, icra mexanizmlərinin və müşahidəçinin tənlikləri formalaşdırırlır.

Bu halda birləşmiş kütlələrin, kütlələrin, aerodinamik əmsalların və ətalət momentləri-

nin hesablanması üçün ayrıca funksiyalar istifadə edilir.

#### Nəticə

Robot modelinin düzxətli trayektoriyası üzrə qeyri-xətti çoxəlaqəli model üçün Matlab paketindən və yuxarıda göstərilən proqram nümunələrindən istifadə edərək mövqe-trayektoriyalı tənzimləyicinin sintezini aparmaq, həm də, tənzimləyicini elə sazlamaq lazımdır ki, robot düzxətli hərəkəti həyata keçirsin.

Bu işdə "Robotların və robototexnika sistemlərinin riyazi modellərinin qurulması" üzrə nəzəri və praktiki təkliflər verilmişdir. Robototexnika sisteminin layihələndirmə ardıcıllığına baxılmışdır, layihələndirmənin əsas metod və vasitələri göstərilmişdir. Robotların idarəetmə və naviqasiya sistemlərinin elmitədqiqat, eskiz və texniki layihələndirmə məsələlərinə, etibarlıq və sınaqların hesablanmasına ayrıca baxılmışdır. Hər bir modul layihə məsələləri, misallar və idarəetmə ilə təchiz edilmişdir.

#### Maraqlar münaqişəsi

Müəllif bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edir.

#### REFERENCES

- 1. Nasirova E.A. Architecture of modeling process of flexible manufacture systems actions. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. Baku, 2022. Vol. 14, № 1. Pp. 106-116 (*in Azerbaijani*)
- Jatsun S. F., et al. (2020) Investigation of Oscillations of a Quadcopter Convertiplane in Transient Mode in the Vertical Longitudinal Plane. In: Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings", Springer, Singapore. Pp. 345–358 (in Russian)
- 3. Jatsun S. F., Emelyanova O. V., Martinez Leon A. S. (2020) IOP Conf. Ser.: MSE, 714(1):012009 (*in English*)
- 4. Pshikhopov V. et al. "Mathematical model of robot on base of airship," 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2013, pp. 959-964, doi: 10.1109/CDC.2013.6760006. (in English)
- 5. Zulu A., John S. (2014) Open Journal of Applied Sciences, 4:547–556 (*in English*)
- 6. Mellinger D., Kumar V. (2010) Control and Planning for Vehicles with Uncertainty in Dynamics. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 960–965 (*in English*)
- 7. Tang S., Wüest V., Kumar V. (2018) IEEE Robotics and Automation Letters, 3(2):1152–1159 (*in English*)
- **8.** Jatsun S., et al. Control flight of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller. In: XIII International cientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". 2017, pp. 1–5 (*in English*)
- **9.** Mustapa Z., et al. Altitude controller design for multi-copter UAV. In: 2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT). Pp. 382–387 (*in English*)
- **10.** Mammadova K.A., Amrah A.B. Development of a method for planning the trajectory of movement of a mobile autonomous robot in a three-dimensional environment based on a fuzzy logic apparatus. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference Science and Practice: implementation to modern Society Manchester, Great Britain 4-5.06.2021. Pp.664-672. https://interconf.top/documents/2021.06.04-05.pdf (*in English*)
- **11. Mammadova K.A., Melikova X.Y.** Solid-works cad translyator funksiyasından istifadə edərək simmechanics/matlab mühitində dinamik bir kvadrokopter modelinin tətbiqi. Gənc tədqiqatçı mühəndislərin "mühəndislik elmlərində innovativ texnologiyalar" mövzusunda I elmi-texniki konfransının materialları. Bakı, 2021, s. 39-41 (*in Azerbaijani*)