



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ТҰҢҒЫШ ПРЕЗИДЕНТІ - ЕЛБАСЫНЫҢ ҚОРЫ

**«ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ БІЛІМ – 2017»**

студенттер мен жас ғалымдардың  
XII Халықаралық ғылыми конференциясының  
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
XII Международной научной конференции  
студентов и молодых ученых  
**«НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ – 2017»**

PROCEEDINGS  
of the XII International Scientific Conference  
for students and young scholars  
**«SCIENCE AND EDUCATION - 2017»**



14<sup>th</sup> April 2017, Astana



**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ**

**«Ғылым және білім - 2017»  
студенттер мен жас ғалымдардың  
XII Халықаралық ғылыми конференциясының  
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
XII Международной научной конференции  
студентов и молодых ученых  
«Наука и образование - 2017»**

**PROCEEDINGS  
of the XII International Scientific Conference  
for students and young scholars  
«Science and education - 2017»**

**2017 жыл 14 сәуір**

**Астана**

**УДК 378**

**ББК 74.58**

**Ғ 96**

Ғ 96

«Ғылым және білім – 2017» студенттер мен жас ғалымдардың XII Халықаралық ғылыми конференциясы = The XII International Scientific Conference for students and young scholars «Science and education - 2017» = XII Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование - 2017». – Астана: <http://www.enu.kz/ru/nauka/nauka-i-obrazovanie/>, 2017. – 7466 стр. (қазақша, орысша, ағылшынша).

ISBN 978-9965-31-827-6

Жинаққа студенттердің, магистранттардың, докторанттардың және жас ғалымдардың жаратылыстану-техникалық және гуманитарлық ғылымдардың өзекті мәселелері бойынша баяндамалары енгізілген.

The proceedings are the papers of students, undergraduates, doctoral students and young researchers on topical issues of natural and technical sciences and humanities.

В сборник вошли доклады студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых по актуальным вопросам естественно-технических и гуманитарных наук.

УДК 378

ББК 74.58

ISBN 978-9965-31-827-6

©Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия  
ұлттық университеті, 2017

## КВАДРОКОПТЕРДІҢ ТРАЕКТОРИЯЛЫҚ ҚОЗҒАЛЫСЫНЫ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ҮШІН ТҰРАҚТАНДЫРУ АЛГОРИТМДЕРІ

**Шымыр Манап Ермаханұлы**

Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ физика-техникалық факультетінің 2 курс студенті  
Ғылыми жетекші - Әбдірашев Ө.К.

Квадрокоптер күш жасаушы төрт прополлерлі двигалемен қамтылған ұшқышсыз ұшатын аппарат. Прополлердің осьтері және қалақшалардың бұрышы айқындалған және тек айналу жылдамдығы реттеліп отырғандықтан, құрылысы едәуір ықшамдалған. Вертикаль орын ауыстыруы барлық винттердің айналу жылдамдықтарын синхронды өзгертумен ал горизонталь орын ауыстыру үшін кводрокоптерді қисайту қажет, қисайтуға қажетті моменттерге сәйкес винттердің жылдамдықтарын өзгерту арқылы қол жеткізуге болады. Қос винттердің қарсы бағытта айналуы кедергінің моменттерінің компенсациясын қамтамасыз етеді. Қазіргі таңда квадрокоптерлер кеңінен және түрлі мақсаттарда қолданылады, алайда бұлар режимдермен шектелген.

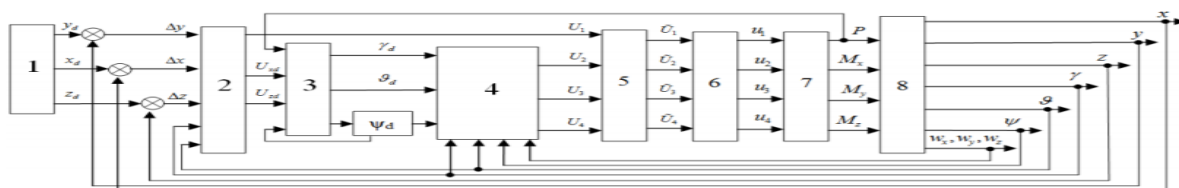
Осы жұмыста квадрокоптердің дәстүрлі қағидаларға негізделіп жасалынған, соның ішінде – ПИД-реттеуіштерді қолданумен және «бэкстеппинг» деген атаумен белгілі Ляпунов функциясына негізделген әдістерімен тапсырылған бағыт бойынша тұрақтандырудың қарапайым аллгоритмдерін жүзеге асырудың мүмкіндіктері қарастырылған [1-3].

### Тұрақтандыру және белгіленген траекторияны қадағалау алгоритмі

Квадрокоптер ұшуының траекториялық басқару міндетіне келесі тапсырылған бағытқа ұшудың реттілікпен жүзеге асуы немесе типтік траектория бойынша қозғалысы жатады(мысалы – ортада тіке немесе қиғаш қозғалуы).

Бұл жағдайда автоматтық басқару жүйесі белгіленген маршрутты қадағалауды жүзеге асыратын кері байаныс жүйесі ретінде құрылуы мүмкін. Бұл ретте биіктікті басқару каналымен және горизонталь жазықтығындағы қозғалысын басқару каналын бөліп алуға болады. Вертикаль бағытындағы тұрақтандыру және басқару жалпы күштің шамасын өзгертумен жүзеге асады. Аппараттың горизонталь жылжуы вертикальдан ауытқыған горизонталь проекциядағы жалпы күштердің әсер етуімен іске асады. Қарастырылып отырған нұсқада вектор күшінің ауытқуы тангаж және жорту бұрышының анықталған жағдайындағы қисаю бұрыштарын өзгерту арқылы жүзеге асады. Күш және момент беретін орналасу бұрышын өзгерту винттердің айналу жылдамдығын дифференциалды басқару арқылы жүзеге асады. Винт күшін өзгерту арқылы биіктіктің және бұрыштық параметрлердің қажетті мәндерін қамтамасыз ететін жүйе бөлігін ориентациялау және тұрақтандыру жүйесі, ал берілген траекторияны қадағалауды жүзеге асыратын жүйе бөлігін – траекториялық басқару жүйесі деп атауға болады. Қарастырылып отырған нұсқа аса тиімді емес, бірақ бұл нұсқада басқаруды каналдарға бөлу арқылы жүзеге асатынын айта кету керек.

Басқару жүйесінің құрылысы 2 суретте көрсетілген. 1 – берілген траектория; 2 – траекториялық басқарудың ішкі жүйесін түзететін құрылғы; 3 – координат түрлендіргіш; 4 – тұрақтандыру және ориентациялау ішкі жүйесін реттеуіш; 5 - сигналдарды үлестіруші; 6 – кернеуді шектеуші; 7 – винтмоторлы топтың үлгісі; 8 - квадрокоптердың үлгісі.



Сурет 1. Басқару жүйесінің құрылысы

Тұрақтандыру және траекториялық басқарудың ішкі жүйелерінің жұмыс алгоритмі белгілі әдістердің бірі ретінде қарау ұсынылады, алайда салыстырмалы түрде қарапайым

әдісті таңдау ұсынылады. Сол себепті әр ішкі жүйеге ПИД-реттеуіштер түрінде және «бэкстеппинг» әдісі арқылы түзетуші құрылғыларға есептеу жүргізілді, есептеуден кейін нәтижелерді салыстыру арқылы әр ішкі жүйеге сәйкес келетін реттеуіштер таңдалады.

Есептеуде қайталауды болдырмау үшін реттеуіштерді әр ішкі жүйеге есептеу әдістердің бірі арқылы көрсетілген: «бэкстеппинг» - бұрыштық орналасуды тұрақтандыру алгоритмі үшін, ПИД-реттеуіштер – траекторияны қадағалайтын алгоритм үшін.

### Орналасу бұрышын тұрақтандыру алгоритмі

Белгіленген  $\gamma_d$ ,  $\psi_d$ ,  $\upsilon_d$  траекториялық басқару жүйе бөлігінің сигналдары ориентациялау және орналасу бұрышын тұрақтандыру жүйе бөлігінің кіруі, ал заттың қозғалу бұрыш параметрлері шығуы болып табылады. Бұл жүйенің басқару алгоритмі (4 блок, 9-сур.)винттердің жалпы күші вертикаль қозғалысқа қажетті шамаға сәйкес келетін жағдайда, қажетті моменттермен  $M_{Rx}$ ,  $M_{Ry}$ ,  $M_{Rz}$  қамтамасыз ететін, басқару сигналдарын  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  құрастыру қажет. Егер аппаратың көтермейтін бөлшектерін динамика және двигателді шектеулермен, гироскопиялық және аэродинамикалық моменттермен елемесек, онда  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  сигналдары  $M_{Rx}$ ,  $M_{Ry}$ ,  $M_{Rz}$  моментінің дәлдік коэффициентіне тең болу керек. Сол себепті  $M_{Rx} = U_2$ ,  $M_{Ry} = U_3$ ,  $M_{Rz} = U_4$  теңдігі орындалғанда тұрақтандыру алгоритміне (1) және (2) теңдеулері заттың моделі болып табылады.

$$\begin{cases} w_x = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} w_y w_z + \frac{M_{Rx}}{I_x} \\ w_y = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} w_z w_x + \frac{M_{Ry}}{I_y} \\ w_z = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} w_y w_x + \frac{M_{Rz}}{I_z} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{Rx} = M_{qx} + M_{mx} + M_{px} \\ M_{Ry} = M_{qy} \\ M_{Rz} = M_{qz} + M_{mz} + M_{pz} \end{cases} \quad (2)$$

«Бэкстеппинг» әдісінің мәні күрделі жүйенің тізбек ретінде ішкі жүйеге қосылған түрін ұсынады, әр тізбекте қосалқы басқару сигналдары құралады және осы сигналдарға тәуелді Ляпунов функциясы қалыптасады. Бұл сигналдарды әр жүйеге таңдау кезіндегі Ляпунов функциясымен тұрақтылық критерилерінің орындалуы жалпы жүйедегі тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Бұл процедура интеграторларды кері байланыспен қадамдық айналып өту сипатына ие, осыдан «integrator backstepping» немесе қысқаша бэкстеппинг (ағл. backstepping).

Процедура белгіленген кейбір жағдайларда жүйелі және қарапайым түрде болады. Ұшқыш аппараттарының бұрыштық қозғалысы үшін мұндай жағдай тангаж және жорту бұрышының аз шамасында ғана мүмкін. Сол кезде бұрыштық қозғалыс теңдеуін(1,2) шамамен үш ішкі жүйемен көрсетуге болады:

$$\begin{cases} S_1 = \begin{cases} \dot{\gamma} = w_x \\ \dot{w}_x = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} w_y w_z + \frac{M_{Rx}}{I_x} \end{cases} \\ S_2 = \begin{cases} \dot{\psi} = w_y \\ \dot{w}_y = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} w_z w_x + \frac{M_{Ry}}{I_y} \end{cases} \\ S_3 = \begin{cases} \dot{\upsilon} = w_z \\ \dot{w}_z = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} w_y w_x + \frac{M_{Rz}}{I_z} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Берілген алгоритмге сүйене отырып,  $S_1$  ішкі жүйесіне қосалқы басқарушы сигналды енгіземіз  $z_1 = \gamma_d - \gamma$  және сәйкес Ляпунов функциясын  $V_1(z_1) = z_1^2 / 2$ , көбейтіндісі  $\dot{V}_1(z_1) = z_1 \dot{z}_1 = z_1(\dot{\gamma}_d - w_x)$ .

Екінші қосалқы басқарушы сигналды Ляпунов функциясына сәйкес  $V_2(z_1, z_2) = (z_1^2 + z_2^2) / 2$  келесі түрде енгіземіз  $z_2 = w_x - \dot{\gamma}_d - k_1 z_1$ , көбейтіндісі  $\dot{V}_2(z_1, z_2) = z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 = z_1(\dot{\gamma}_d - w_x) + z_2(\dot{w}_x - \ddot{\gamma}_d - k_1 \dot{z}_1)$ .

Тұрақтандыру жүйесі үшін  $\dot{\gamma}_d = 0$ ,  $\ddot{\gamma}_d = 0$ , демек

$$\dot{V}_2(z_1, z_2) = z_2 \dot{w}_x + (k_1^2 - 1) z_1 z_2 - k_1 z_1^2 + k_1 z_2^2.$$

Ішкі жүйе тұрақты болу үшін, яғни  $\dot{V}_2(z_1, z_2) \leq 0$  шарты үшін  $\dot{V}_2(z_1, z_2) = 0$  тек  $z_1 = 0, z_2 = 0$ :

$$\dot{V}_2(z_1, z_2) = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2, k_1 > 0, k_2 > 0$$

Басқару сигналы мына түрге келеді

$$U_2 = -I_x \left[ \frac{(I_y - I_x)}{I_x} w_y w_z - \dot{w}_x \right] = -I_x \left[ \frac{(I_y - I_x)}{I_x} w_y w_z + (k_1^2 - 1) z_1 + (k_1 + k_2) z_2 \right] = -I_x \left[ \frac{(I_y - I_x)}{I_x} w_y w_z + (k_1 * k_2 - 1) * \gamma_d + (k_1 * k_2 + 1) * \gamma + (k_1 + k_2) * w_x \right] \quad (4)$$

Ляпунов функциясы  $V_3(z_1) = V_2(z_1, z_2) = [z_1^2 + (w_x - \gamma_d - k_1 z_1)^2] / 2 \geq 0$ , ал оның көбейтіндісі  $\dot{V}_3(z_1) = \dot{V}_2(z_1, z_2) = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 = -k_1 z_1^2 - k_2 (w_x - \gamma_d - k_1 z_1)^2 \leq 0$  яғни тұйық ішкі жүйе – тұрақты.

Осыған сәйкес басқа басқару сигналдарыны алуға болады:

$$U_3 = -I_y \left[ \frac{(I_x - I_y)}{I_x} w_y w_z + (k_3 * k_4 - 1) * \psi_d + (k_3 * k_4 + 1) * \psi + (k_3 + k_4) * w_x \right] \quad (5)$$

$$U_4 = -I_z \left[ \frac{(I_y - I_x)}{I_x} w_y w_z + (k_5 * k_6 - 1) * \vartheta_d + (k_5 * k_6 + 1) * \vartheta + (k_5 + k_6) * w_z \right] \quad (6)$$

мұндағы  $k_3 > 0, k_4 > 0, k_5 > 0, k_6 > 0$ .

$k_1 - k_6$  коэффициенттерінің мәнін таңдаумен сапалы өтпелі процесстерге қол жеткізуге болады. 1-кестеде осы коэффициенттердің шамасы берілген:

**Кесте 1**

«Бэкстеппинг» реттеуіштерінің коэффициенттері

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
20	3	21	2.5	35	25

2-кестеде Циглер – Николс[4] әдісімен ПИД-реттеуіштерінің осы ішкі жүйеге таңдалған коэффициенттері:

**Кесте 2**

ПИД-реттеуіштерінің коэффициенттері

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
$\gamma$	2,5	5,2	10
$\psi$	5,1	10	10
$\vartheta$	5,1	0,12	20

### Траекториялық басқарудың алгоритмі

Нормаль жер жүйесіндегі координатпен массалық центрінің динамикалық қозғалысының теңдеуі:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{[P(-\cos\gamma\cos\psi\cos\vartheta + \sin\gamma\sin\psi) - f_x]}{m} \\ \ddot{y} = \frac{[P(\cos\gamma\cos\vartheta) - f_y - mg]}{m} \\ \ddot{z} = \frac{[P\cos\gamma\sin\psi\sin\vartheta + \sin\gamma\cos\psi - f_z]}{m} \end{cases} \quad (7)$$

Горизонталь күштің ұшқыш аппаратының кедергісінің есебінсіз (7) динамикалық қозғалыс теңдеуі келесі түрге ие болады:

$$U_x = [P(-\cos\gamma\cos\psi\cos\vartheta + \sin\gamma\sin\psi)]; U_z = P(\cos\gamma\sin\psi\sin\vartheta + \sin\gamma\cos\psi) \quad (8)$$

формуласымен  $P$  жалпы тарту күшінің белгілі әсер еткенде пайда болатын тангаж және жорту бұрыштарының бұрышын анықтауға болады:

$$\gamma_d = \arcsin \frac{U_{zd}\cos\psi_d + U_{xd}\sin\psi_d}{P}; \vartheta_d = \arccos \frac{U_{zd}\sin\psi_d - U_{xd}\cos\psi_d}{P} \quad (9)$$

Алайда траекториялық басқаруға мұндай тәсіл тезәрекеттіктің өте жоғары талаптарын және тұрақтандыру мен ориентация ішкі жүйелерінің нақтылығын талап етеді, сондықтан бұл әдіс осы мақаланың зерттеу шеңберінен шығатын терең және ауқымды зерттеулерді қажет етеді.

$U_{zd}, U_{xd}$  әсер етуші басқарушыларды, сонымен қоса  $U_{yd} = U_1$  биіктікті басқаруға арналған каналға әсер етуші басқарушыларды, траекториялық басқару ішкі жүйесін, массалық центрдің қажетті координаттарын бақылайтын, реттеуші жүйе арқылы анықтауға болады:

$$\begin{aligned}
 U_{xd} &= K_{px}(x_d - x) + K_{ix} \int (x_d - x) dt + K_{dx}(\dot{x}_d - \dot{x}) \\
 U_{yd} &= \frac{m}{\cos\gamma \cos\vartheta} K_{py}(y_d - y) + K_{iy} \int (y_d - y) dt + K_{dy}(\dot{y}_d - \dot{y}) + mg \\
 U_{zd} &= K_{pz}(z_d - z) + K_{iz} \int (z_d - z) dt + K_{dz}(\dot{z}_d - \dot{z})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

3-кестеде Циглер – Николстың [5] әдісімен айнымалыларға сәйкес реттеуіштерге таңдалған коэффициенттері берілген:

**Кесте 3**

ПИД-реттеуіштерінің коэффициенттері

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
$\gamma$	8,2	0,015	7,8
$\psi$	25	10	30
$\vartheta$	5,1	0,012	4,95

4-кестеде осы ішкі жүйеге «бэкстеппинг» есептеу әдісімен алынған коэффициенттер берілген:

**Кесте 4**

«Бэкстеппинг» реттеуіштерінің коэффициенттері

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
20	3	21	2.5	35	25

Модельдеу нәтижелері квадрокоптерлердің массалық центрінің координатасын өзгерту екі реттеуіш үшін бірдей екенін көрсетті, алайда ПИД-реттеуіштер қарапайым құрылысымен және кері байланыс үшін сигналдың аздығымен ерекшеленеді. Сондықтан квадрокоптердің траекториялық басқару үшін ПИД-реттеуіштер таңдалады. Сонымен қоса бэкстеппинг реттеуіштерінің бұрыштық өзгеруі ПИД-реттеуіштердің өзгеру диапазонынан аз болғандықтан, квадрокоптердің ұшуын бұрыштық басқару үшін осы «бэкстеппинг» реттеуіштері таңдалған.

**Қорытынды.** Бұл мақалада квадрокоптердің ұшу координаттарын және белгіленген траекториясын бақылайтын, сонымен қатар квадрокоптердің бұрыштық орнын, биіктігін тұрақтандыратын басқару алгоритмі ұсынылған.

#### Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Nonlinear and adaptive control design. New York: John Wiley & Sons, 1995. 563 p.
2. Bouabdallah S, Siegwart R. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor // IEEE Publ., 2005. P. 2247-2252. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570447
3. Голубев А.Е. Отслеживание программного изменения угла атаки для продольной динамики ракеты класса «воздух-воздух» с помощью метода обхода интегратора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. С. 401- 414.
4. Курс теоретической механики / под ред. К.С. Колесникова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 736 с.
5. Шляйхер М. Техника автоматического регулирования для практиков. М.: JUMO GmbH, 2006. 124 с.