

Tuning for the Schuler Period of Primary Flight and Inertial Navigation Devices

Karimli T.I.

Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

For correspondence:

Karimli Togrul / e-mail: tkarimli@mail.ru

Abstract

The article gives a review of operation of devices for measuring the spatial position of static and dynamic objects. Mechanical pendulums for determining the spatial position of an acceleratedly moving object with a disturbed action and a classical solution for eliminating the perturbing inertial disturbance are considered. Variants of an universal-purpose pendulum undisturbed under the disturbance of inertia force are presented, in which there is no need to adjust for the Schuler period.

Keywords: aircraft, attitude, pendulum, Schuler period, accelerometer, gyroscope, correction.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_02_07_14

Received 15.02. 2023

Revised 16.06.2023

Accepted 21.06.2023

For citation:

Karimli T.I.

[Tuning for the Schuler period of primary flight and inertial navigation devices]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 7-14 (in Azerbaijani)

Pilotaj və inersial naviqasiya qurğularında Şuler perioduna sazlanma

Kərimli T.İ.

Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Kərimli Toğrul / e-mail: tkarimli@mail.ru

Xülasə

Məqalədə müxtəlif təyinatlı statik və dinamik obyektlərin fəza vəziyyətini ölçən qurğular təhlil edilmiş, onların iş prinsipləri araşdırılmışdır. Təcilli hərəkətə malik obyektlərin fəza vəziyyətini müəyyən edən mexaniki rəqqasın həyəcanlanma halına baxılmış və həyəcanlanmanın təsirinin aradan götürülməsinin klassik həlli göstərilmişdir. Universal təyinata malik mexaniki rəqqasın təcilə görə həyəcanlanmayan variantları təqdim edilmişdir. İnersial Naviqasiya Sistemlərində pyezoelektrik özüsazlanan giroskopun əsasında Şuler perioduna sazlanma aparılmadan bucaq parametrlərin təyin edilməsinin mümkünlüyü göstərilmişdir.

Açar sözlər: hava gəmisi, fəza vəziyyəti, rəqqas, Şuler periodu, akselerometr, giroskop, korreksiya.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_02_07_14

УДК 629.7.05

Настройка на период Шулера пилотажных и инерциальных навигационных устройств

Каримли Т.И.

Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

Для переписки:

Каримли Тогул / e-mail: tkarimli@mail.ru

Аннотация

В статье проводится обзор и принципы работы устройств измерения пространственного положения статических и динамических объектов. Рассмотрены механические маятники определения пространственного положения ускоренно подвижных объектов с возмущенным воздействием и классическое решение устранения возмущающего инерционного влияния. Представлены варианты невозмущаемых под воздействием силы инерции маятников универсального назначения, для которых нет необходимости в настройке на период Шулера.

Ключевые слова: воздушное судно, пространственное положение, маятник, период Шулера, акселерометр, гироскоп, коррекция.

Giriş

Uçuş aparatlarının (UA) hərəkətinin idarə edilməsi üçün onun üfüqə nəzərən fəza vəziyyətini, yəni kren və tanqaj bucaqlarını müəyyən etmək lazımdır. Bu məqsədlə, UA-da ərazinin cari şaquli vəziyyətini təyin edən qurğunun olması zəruridir. Məlum olduğu kimi, hərəkətli obyektlərdə fiziki rəqqas təcilli hərəkətlərə həssas olduğundan, şaquli göstərici kimi istifadə edilə bilməz.

Üç sərbəstlik dərəcəsinə malik olan astatik giroskop isə təcillə hərəkət edən obyektlərdə həyəcanlanmayan olduğundan, o, inersial fəzaya nəzərən baş fırlanma oxunu sabit saxlayır. Lakin, Yerə nəzərən hərəkət və Yer in öz oxu ətrafında fırlanması nəticəsində giroskopun baş fırlanma oxu əvvəl şaquli vəziyyətlə üst-üstə düşsə də, zaman keçdikcə fərqli qiymətlərə malik olur.

Beləliklə, sərbəst giroskop şaquli vəziyyət göstəricisi kimi istifadə edilə bilməz. Bu məqsədlə UA-da giroskopik rəqqasdan, girovertikaldan, girohorizontdan və girovertikantdan istifadə edilir [1, 2].

İşin məqsədi

Qarşıya qoyulmuş məsələnin həlli üçün UA-nın pilotaj və naviqasiya məsələlərinin həlli zamanı uçuşların təhlükəsizliyinin səviyyəsini artırmaq məqsədilə fəza vəziyyətinin ölçülməsinin dəqiqliyini və etibarlılığını artırmağa imkan verən, tərkibində daha az korreksiya mexanizmləri olan qurğuların inkişaf etdirilməsi təklif edilmişdir.

Məsələnin aktuallığı

HG-nin fəza vəziyyətini və avtonom olaraq naviqasiya parametrlərini ölçmək məqsədilə elektromexaniki aviahorizont, əsasını inersial ölçmə metodu təşkil edən İnersial İstinad Sistemi (İİS) - (İRS - Inertial Reference

System), Fəza Vəziyyəti və Yön İstinad Sistemi (FVYÖ) – (AHRS – Attitude and Heading Reference System), İnteqrasiyalı Ehtiyat Uçuş Displeyi (İEUD) – (İSFD - Integrated Standby Flight Display) tətbiq edilir. Bucaq parametrlərinin ölçülməsi üçün sistemə daxil olan əsas qurğu kimi rotorlu, lazer, optik-lifli və miromexaniki giroskoplar tətbiq edilir. Giroskopların başlanğıc bucaqları akselerometrlər və ya peyk naviqasiya sistemi vasitəsi ilə daxil edilir və sonrakı iş prosesində fasiləsiz olaraq korreksiyaya məruz qalır. Təcilli hərəkət nəticəsində korreksiya prosesində platformanın faktiki şaquli vəziyyəti həqiqi şaquli vəziyyətdən fərqli olur.

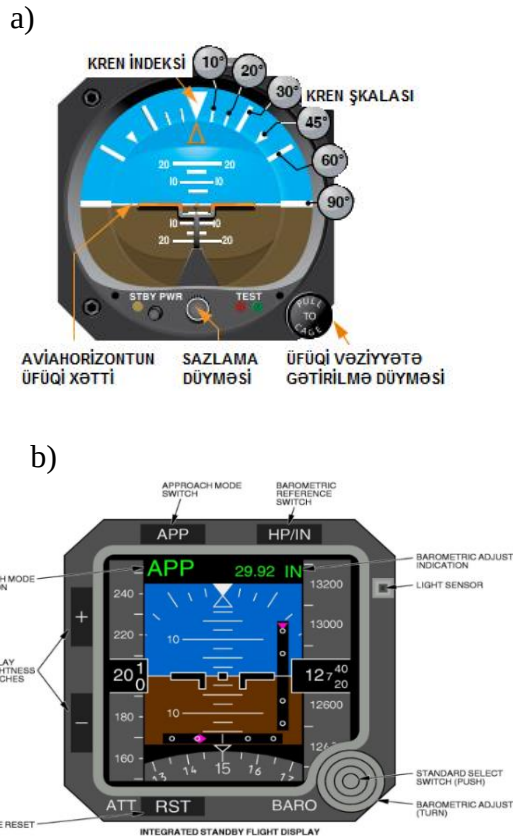
Statistik məlumatlara əsasən bütün aviasiya qəzalarının 20%-ə qədər olan hissəsi HG-nin kren və tanqaj bucaqlarının itirilməsi nəticəsində baş verir [1, 2]. Ona görə də fəza vəziyyəti ilə əlaqədar olan ölçmələrin fasiləsizliyini və etibarlılığını təmin etmək son dərəcə əhəmiyyətə malik aktual məsələlərdən hesab edilir.

HG-nin kren və tanqaj bucaqları olaraq fəza vəziyyətini ölçən elektromexaniki və inteqrasiyalı ehtiyat elektron aviahorizont şəkil 1-də verilmişdir.

HG-də elektromexaniki aviahorizontda quraşdırılan üç sərbəstlik dərəcəli astatik giroskopun xarici çərçivəsi təyyarənin eninə oxu üzrə, baş fırlanma oxu isə şaquli ox üzrə yerləşən vəziyyəti nəzərdən keçirək (şəkil 2).

HG ekvator boyunca üfüqi istiqamətdə hərəkət edərsə, şaquli vəziyyətin yerdəyişməsi $U + V/R$ sürəti ilə müəyyən edilir. Giroskopun xarici çərçivəyə nəzərən yayınma sürəti aşağıdakı düstur ilə təyin edilir.

$$\dot{\alpha} = (U + V/R) \quad (1)$$

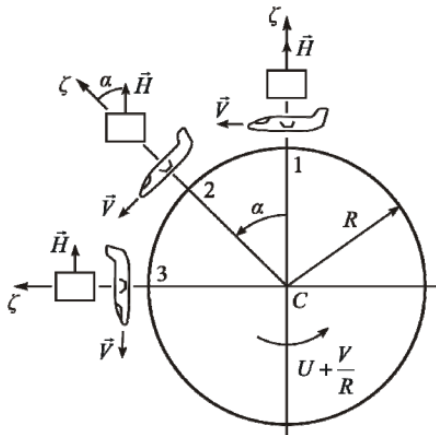


Şəkil 1 – Aviahorizont:

a) Elektromexaniki; b) İnteqrasiyalı elektron

Figure 1 – Artificial horizon:

a) Electromechanical; b) Standby Flight Display



Şəkil 2 – Astatik giroskopun ərazinin şaquli vəziyyətinə nəzərən mövqeyi

Figure 2 – The position of the astatic gyroscope relative to the terrain vertical position

Burada $U = 7.2921 \cdot 10^{-5} \text{ rad/san}$ Yer in öz oxu ətrafında fırlanmasının bucaq sürəti, R - Yer in radiusu, V - HG-nin yol sürəti, H - giroskopun rotorunun kinetik momentinin istiqamətidir. Şəkildən göründüyü kimi HG 3 mövqeyində olduqda cari şaquli istiqamət və giroskopun baş fırlanma oxu arasında α fərq bucağı 90° təşkil edir [3].

Məsələnin həlli

Göründüyü kimi, üçsərbətlik dərəcəsinə malik olan astatik giroskop cari ərazinin faktiki şaquli vəziyyətini müəyyən edə bilmir. Bu məqsədlə iki üsuldən istifadə edilir: 1) Rəq-qaslı həssas elementlərin siqnailləri əsasında giroskopun baş fırlanma oxunu şaquli vəziyyətə gətirmək (sazlamaq) üçün korreksiya sistemlərindən istifadə; 2) Baş fırlanma oxu boyunca asqıya nəzərən giroskopun kütlə mərkəzinin yerdəyişməsi.

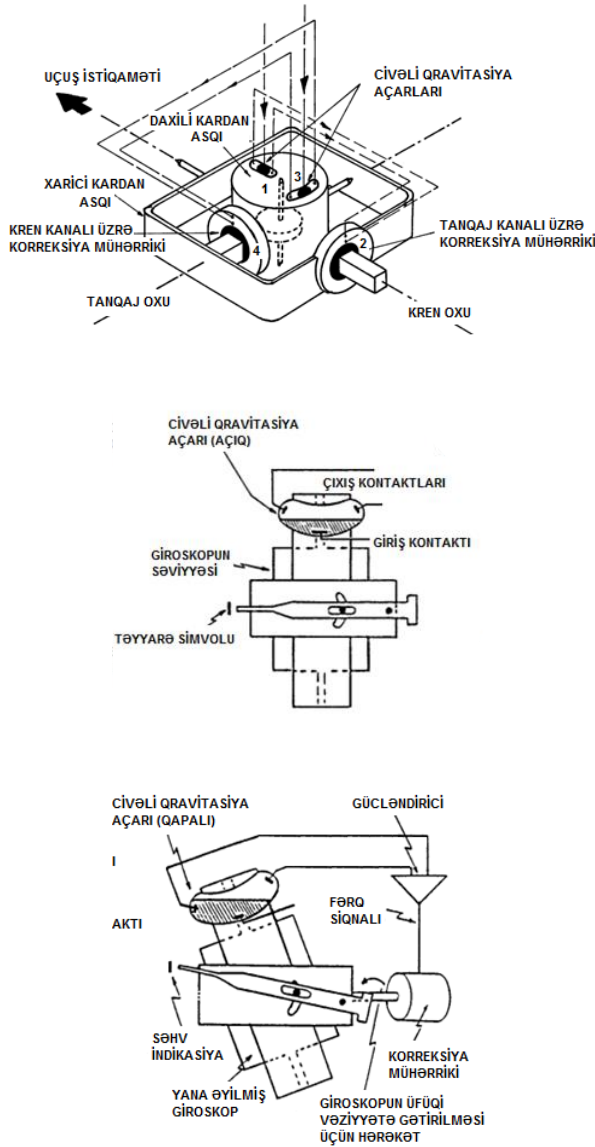
Birinci üsuldən platformalı və platformasız girokopik qurğularında istifadə edilir. Bu üsul əsasında yaradılmış qurğular aviahorizont, girovertikal, girohorizont, girovertikant adlanır. Girohorizont və girovertikant kosmik uçuş aparatlarında və raket sistemlərində tətbiq edilir [2, 3].

İkinci üsuldən platformalı girokopik qurğularda istifadə edilir. Bu üsul əsasında yaradılmış qurğular girokopik rəqqaslar adlanır.

Elektromexaniki aviahorizontda tətbiq edilən giroskopun baş fırlanma oxunu müntəzəm olaraq cari şaquli vəziyyətə gətirmək (korreksiya) üçün şəkil 3-də təqdim edilən sxemdən istifadə edilir [4].

Korreksiya qurğusu cari şaquli vəziyyəti təyin edən və elektrik korreksiya siqnalını formalaşdıran civəli qravitasiya açarlarından və onun kontaktlarından, gücləndiricidən, daxili və xarici kardan asqıları ilə giroskopun rotorunun baş fırlanma oxunu şaquli vəziyyətə gəti-

rən kren və tanqaj kanalları üzrə elektrik korreksiya mühərriklərindən və təcilli hərəkətlərdə yanlış korreksiya signalını korreksiya mühərrikinin elektrik şəbəkəsindən açan korreksiya ayırıcısından (şəkildə göstərilməyib) ibarətdir.

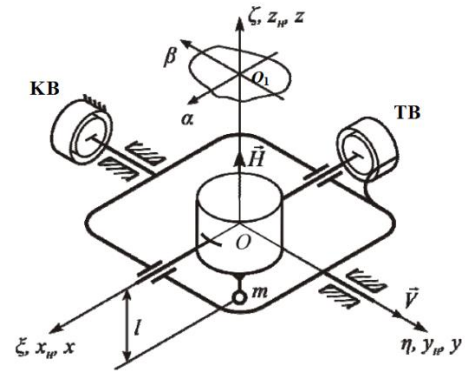


Şəkil 3 – Korreksiya edilən aviahorizon
Figure 3 – Correctable artificial horizon

Belə ki, təcilli hərəkətlərdə fiziki rəqqas olan civəli qravitasiya açarının daxilindəki civə təcilin yaratdığı qüvvə ilə hərəkət edərək müvafiq kontaktlarda yanlış (səhv) elektrik signalı formalaşdırır. Bunun qarşısını almaq üçün korreksiya ayırıcısı belə halda (təcilli hə-

rəkətdə) korreksiya mühərriklərini şəbəkədən ayırır. Ona görə, vizual cihazlarda viraj zamanı xətanın qiyməti artır.

Şəkil 4-də ölçmə ilə yanaşı təcilsiz hərəkətdə korreksiya məsələsini həll edən giroskopik rəqqas verilmişdir. Giroskopun ağırlıq mərkəzi asqıya nəzərən l məsafəsi qədər aşağı istiqamətə sürüşdürülmüşdür. Daxili və xarici Kardan asqılarında (çərçivələrdə) dönmə bucaqlarını elektrik signalına çevirən kren bucağı (KB) və tanqaj bucağı (TB) bucaq vericiləri quraşdırılmışdır.



Şəkil 4 – Giroskopik rəqqasın kinematik sxemi
Figure 4 – Kinematic scheme of a gyroscopic pendulum

Daxili və xarici çərçivələrin oxlarına nəzərən girovəqqas k tezliyinə malik sönməyən rəqslərə malik olur.

$$k = \frac{mgl}{H} \quad (2)$$

Bu rəqslərin periodu isə (3) düsturu ilə müəyyən edilir.

$$T_{GR} = 2\pi \frac{H}{mgl} \quad (3)$$

Məlum olduğu kimi L uzunluğuna malik riyazi rəqqasın rəqs periodu

$$T_R = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (4)$$

düsturu ilə təyin edilir.

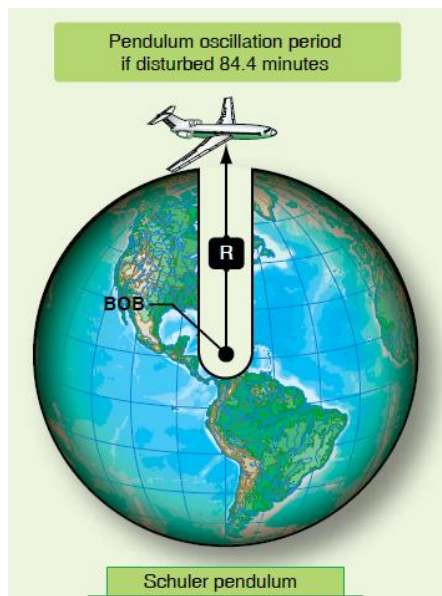
$$T_{GR} = T_R \text{ şərtindən } 2\pi \frac{H}{mgl} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

riyazi rəqqasın uzunluğu aşağıdakı kimi təyin edilir:

$$L = \frac{H^2}{g(ml)^2} \quad (5)$$

Böyük H kinetik momentə və kiçik mgL statik momentə malik giroskopu seçməklə böyük rəqs perioduna malik girorəqqas əldə edilə bilər. Bununla, girorəqqasdan istifadə etməklə, hərəkətli obyektlərdə cari ərazinin şaquli vericisini yaratmaq imkanı əldə edilir [3].

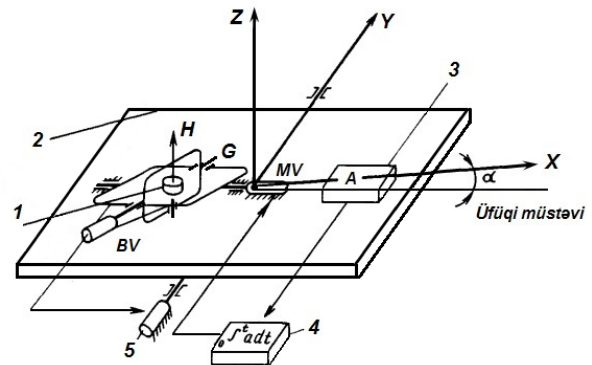
1923-cü ildə alman alimi Maks Şuler nəzəri olaraq sübut etmişdir ki, uzunluğu Yer radiusuna bərabər olan və rəqs periodu $T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} = 84.4$ dəq. düsturuna əsasən 84.4 dəqiqəyə bərabər rəqqas (rəqqasın kütləsi Yer mərkəzində olarsa) təcilin heç bir qiymətinə məruz qalmayaraq Yer faktiki şaquli vəziyyətindən kənara meyl etmir. Beləliklə, rəqqas həyəcanlanmayan xüsusiyyətə malik olar (şəkil 5). Belə bir rəqqası hazırlamaq mümkün olmasa da, onun hərəkətini modelləşdirmək mümkündür.



Şəkil 5 – Həyəcanlanmayan rəqqasın nəzəri modeli
Figure 5 – Undisturbed pendulum model

Müxtəlif təyinatlı sualtı və suüstü nəqliyyat vasitələri, uçuş aparatları və onların müəyyən səthlərini üfüqi və ya şaquli vəziyyətdə stabiləşdirmək və idarə etmək məqsədi ilə inersial ölçmə metoduna əsaslanan platformalı və platformasız inersial naviqasiya sistemlərində Şuler periodu üzrə sazlanma yerinə yetirilir.

Şəkil 6-da, misal olaraq, platformalı inersial naviqasiya sistemində Şuler periodu üzrə sazlanma sxemi verilmişdir.



Şəkil 6 – Platformalı inersial naviqasiya sistemində Şuler periodu üzrə sazlanma sxemi

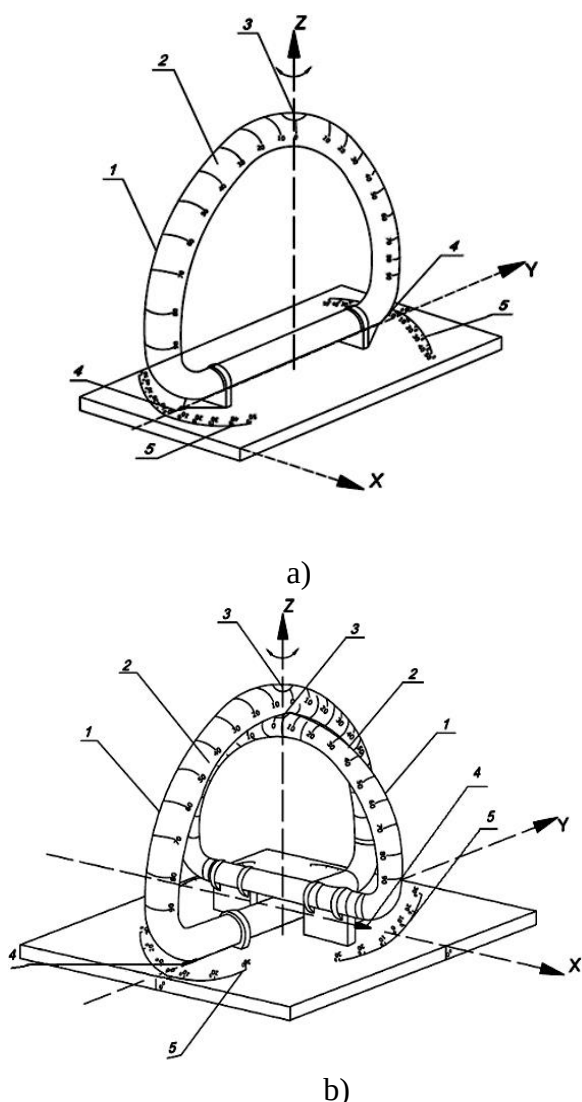
Figure 6 – Tuning scheme for the Schuler period in a platform inertial navigation system

1 giroskopu və 2 platformanın üzərində quraşdırılan 3 akselerometri X oxu boyunca platformanın təcilini ölçür. Akselerometrədən mənimsənilən 1 signal 4 integratorunda inteqrallanaraq giroskopun (G) oxu üzərində yerləşən moment vericisinə (MV) daxil olur və giroskopu presessiyaya məruz qoyur. Giroskopun mexaniki yerdəyişməsi bucaq verici (BV) ilə ölçülərək elektrik signalı şəklində platformanı Y oxu üzrə hərəkət etdirən 5 mühərrikinə daxil olur. Platforma Y oxu üzrə $T=84.4$ dəq. rəqs periodu ilə harmonik rəqsi hərəkət edir [5]. Oxşar qayda ilə, platformanı X oxu ətrafında hərəkət etdirən idarəetmə sxemi də tətbiq edilir (şəkildə göstərilməyib).

Platformasız İnersial Naviqasiya Sistemlərində Şuler perioduna sazlanma proqram təminatı əsasında icra olunur. Burada giroskop-

lar və akselerometrlər sərt olaraq inersial blokun gövdəsinə bərkidilir.

Şəkil 7-də heç bir başlanğıc və cari korreksiya əməliyyatı, həmçinin Şuler perioduna sazlanma tələb etməyən dinamik obyektlərin, o cümlədən hava gəmilərinin fəza vəziyyətini ölçən Universal Mayeli Bucaqölçənlərin (UMB) iki variantı verilmişdir.



Şəkil 7 – Universal Mayeli Bucaqölçənlərin yeni variantları
Figure 7 – New versions of the Universal Liquid Angle Indicators

Şəkil 7a-da təsvir edilən qurğu X və Z, şəkil 7b-də isə təsvir edilən qurğu eyni zamanda X, Y və Z üzrə obyektlərin mailik bucaqla-

rını (kren, tanqaj və yön) ölçməyə imkan verir [6, 7]. UMB əvvəlki variantlarından fərqli olaraq, əlavə Z oxu ilə HG-nin yönünü ölçmək üçün qurğuda quraşdırılan maqnitometrdən (yön vericisindən) alınmış elektrik siqnal əsasında elektron rəqəmlərin indikasiya olunması təklif edilir. Lakin bu qurğular vizual cihaz qismində istifadə edilə bilər.

Nəzərə almaq lazımdır ki, uçuş hündürlüyündən, coğrafi koordinatlardan asılı olaraq, Şuler periodunun ədədi qiyməti dəyişir. Dəqiq inersial naviqasiya məsələlərin həllində bu amil mütləq nəzərə alınmalıdır. Sürətli manevr edən taktiki və strateji raketlərdə peyk naviqasiyadan istifadə edilmədikdə (avtonom idarəetmədə) mövcud məsələnin həlli xüsusi əhəmiyyətə malikdir.

UA-nın manevri zamanı cari fəza vəziyyətlərini istənilən məkan və zaman çərçivəsində yüksək dəqiqliklə ölçmək məqsədilə, xüsusilə təcilli hərəkətlərdə, akselerometrin ətalətli kütləsində parazit təcildən yaranan qüvvə və yerdəyişməni qarşılıqlı şəkildə sxematik kompensasiya etməyə imkan verən, Şuler perioduna sazlanma aparılmadan yeni elektron və MEMS (Mikroelektromexaniki sistemlər) əsaslı vericilərin işlənməsi naviqasiyada vacib məsələlərdən hesab edilir.

Pilotsuz Uçuş Aparatlarında (PUA) özünə-sazlanan girooskop-akselerometrin (ÖGA) mərkəzini yüksək dəqiqliklə PUA-nın kütlə mərkəzində yerləşdirməklə Şuler perioduna sazlanmaya ehtiyac olmaya da bilər.

Bunun üçün ÖGA-nın uc nöqtələrinin qarşılıqlı şəkildə diferensial birləşməsi nəticəsində PUA-nın manevri səbəbindən yaranan təcillərin elektrik siqnallarını ölçüb elektron korreksiya blokunda qarşılıqlı kompensasiya edilərək girooskop-akselerometrin bucaq ölçmə rejimində Şuler perioduna sazlanma zərurəti qalmır [8].

Nəticə

Mülki HG-də pilotaj parametrlərdən olan kren və tanqajı, naviqasiya parametri olan yönü (vurnuxma) ölçmək məqsədilə yüksək etibarlılığa və avtonomluğa malik UMB əvvəlki variantlarından fərqli olaraq, vahid konstruksiyada maqnit kompasının ölçdüüyü əlavə naviqasiya parametri kimi HG-nin yönünü təyin etməyə imkan verən qurğunun istifadə edilməsi təklif edilir.

Yüksək dinamikliyə malik UA-da pilotaj-naviqasiya parametrlərini təyin etmək məqsədilə pyezoelektrik ÖGA əsasında təcilli hərəkətlərdə ÖGA-nın uc tərəflərində diferensial təcillərin qiymətləri əsasında, proqram təmina-

tı ilə Şuler perioduna sazlanma aparılmadan da cari şaquli vəziyyət müəyyən edilməklə PUA-nın faktiki bucaqlarını müəyyən etmək mümkündür. Böyük ölçülü UA üçün ÖGA uc nöqtələrini UA-nın kütlə mərkəzinin əks tərəflərində (sol-sağ və aşağı-yuxarı) simmetrik yerləşdirməklə Şuler perioduna sazlanma aparılmadan UA-nın fəza vəziyyətini və naviqasiya parametrlərini təyin etməyə şərait yaradan qurğunun işlənməsi təklif edilir.

Maraqlar münaqişəsi

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

REFERENCES

1. **Kərimli T.İ.** Uçuş aparatlarının fəza vəziyyətini müəyyən edən həyəcənlanmayan universal rəqəşli qurğu. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, 2018. Cild 10, №1. s.7-15 (*in Azerbaijani*).
2. **Kargu L.I.** Izmeritelnyye ustroystva letatelnykh apparatov. Moskva: *Mashinostroyeniye*, 1988. 256 p. (*in Russian*).
3. **Vinichenko N.T., Katsay D.A., Lysova A.A.** Teoriya giroskopicheskikh priborov. Chelyabinsk. YuUrGU, 2010. 141 p. (*in Russian*).
4. Instrumentation. JAA ATPL. Theoretical knowledge manual. Oxford Aviation, Frankfurt, Germany, 2001. 662 p. (*in English*).
5. **Vorobyev V.Q., Qlukhov V.V., Kadyshch I.K.** Aviasionnyye pribory, informatsionno izmeritelnyye sistemy i komplekсы. Moskva: *Transport*, 1992. 399 p. (*in Russian*).
6. **Həzərخانov Ə.T., Kərimli T.İ., Abdullabəyli A.A.** Mayeli bucaqölçən (variantlar). Patent-ixtira İ20170043, 12.09.2017, 10 s. (*in Azerbaijani*).
7. **Hazarkhanov A.T., Karimli T.I., Abdullabayli A.A.** Universal liquid angle indicator. United States Patent. US 10190878B2, 2019, 11 p. (*in English*).
8. **Qurbanov T.B., Kərimli T.İ., Kərimli V.İ.** Pyezoelektrik özüsazlanan giroskop-akselerometr. Patent-ixtira İ20190047, Azərbaycan Respublikası, 2019, 15 s. (*in Azerbaijani*).