

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 4 (2025)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

<https://doi.org/10.48081/GMYR4462>

**Бас редакторы – главный редактор**

Талипов О. М.

*доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)*

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/VWMQ7492>

**Е. Таштай<sup>1</sup>, Ә. М. Сәбиболда<sup>2</sup>, Е. Нусупов<sup>3</sup>,  
Д. А. Наубетов<sup>4</sup>, \*Н. Қ. Смайлов<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

<sup>2,5</sup>Академик Ә. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

<sup>4</sup>Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5118-3683>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0323-0675>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

\*e-mail: [n.smailov@satbayev.university](mailto:n.smailov@satbayev.university)

## **ВОЛОКОНДЫ-ОПТИКАЛЫҚ ГИРОСКОПТАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ НАВИГАЦИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ**

*Бұл мақалада волоконды-оптикалық гироскоптардың (ВОГ) навигациялық жүйелердегі дәлдігін, сезімталдығын және ұзақмерзімді тұрақтылығын арттыруға бағытталған кешенді тәсілдер қарастырылған. Зерттеу жұмысының өзектілігі инерциялық навигация саласында жоғары дәлдікке жету және спутниктік сигнал болмаған жағдайда жүйенің автономды жұмысын қамтамасыз ету қажеттілігімен анықталады. MATLAB/Simulink ортасында Саньяк эффектісіне негізделген ВОГ-тың физикалық және сигналдық моделі әзірленді. Модель құрамында жарық көзі, талшық катушкасы, фазалық модулятор және фотодетектор сияқты негізгі оптикалық элементтер қамтылды. Сигналды өңдеу кезеңінде жабық контурлы демодуляция, квадратуралық қателікті компенсациялау және температуралық дрейфті азайту алгоритмдері жүзеге асырылды. Алпау ауытқуы әдісі арқылы гироскоп қателіктері статистикалық тұрғыдан талданды және бұрыштық кездейсоқ жүріс (ARW), нөлдік ығысу тұрақсыздығы (Bias Instability) мен масштаб коэффициентінің*

*сызықтық еместігі үшін стохастикалық модельдер енгізілді. Интеграцияланған INS/GNSS архитектурасы кеңейтілген Калман сүзгісі арқылы іске асырылып, «урбан-каньон» және спутниктік сигналдың уақытша жоғалу сценарийлерінде тексерілді. Алынған нәтижелер ВОГ құрылғыларының бұрыштық жырдамдыққа жоғары сезімталдық танытатынын, шу тығыздығының азайғанын және bias тұрақтылығының жақсарғанын көрсетті. Сонымен қатар, GNSS сигналы шектеулі жағдайда да инерциялық шешімнің тұрақтылығы сақталып, позициялық және курстық қателік айтарлықтай төмендеді. Ұсынылған модельдеу әдістемесі волоконды-оптикалық гироскоптарға негізделген жоғары дәлдікті инерциялық-навигациялық кешендерді жобалау, калибрлеу және оңтайландыру үшін ғылыми әрі қолданбалық тұрғыдан маңызды құрал болып табылады.*

*Кілтті сөздер: волоконды-оптикалық гироскоп, Sagnac эффекті, Allan ауытқуы, ARW, bias, Калман сүзгісі, INS/GNSS.*

### **Кіріспе**

Қазіргі заманғы навигациялық жүйелер жоғары дәлдік пен сенімділікті талап етеді, әсіресе спутниктік сигналдар қолжетімсіз жағдайларда автономды жұмыс істеу қабілеті маңызды. Мұндай міндеттерді шешуде Саньяк эффектісіне негізделген волоконды-оптикалық гироскоптар (ВОГ) ерекше рөл атқарады [1, 18–22-бб]. Олар қозғалмалы бөлшектердің болмауы, жоғары сезімталдық пен ұзақмерзімді тұрақтылығымен дәстүрлі механикалық гироскоптарға қарағанда артықшылыққа ие.

Дегенмен, ВОГ дамуына қарамастан, олардың қолданылуында шу мен дрейф, температуралық тұрақсыздық және интерференциялық сигналды өңдеудің күрделілігі сияқты шектеулер сақталуда [2, 14–17-бб.]; [3, 39-б.]. Бұл кемшіліктерді азайту үшін сандық демодуляция, қателіктерді компенсациялау және стохастикалық модельдеу әдістері зерттелуде.

Соңғы жылдары ВОГ пен ғаламдық навигациялық спутниктік жүйелерді (GNSS) интеграциялау ерекше назарға алынуда. Бұл тәсіл инерциялық өлшеулердің жеделдігі мен автономдылығын GNSS-тің ғаламдық қамтылуымен үйлестіреді [4, 11-б.]. Мұндай жағдайда фильтрация алгоритмдері арқылы гироскоптық қателіктерді өтеу және спутниктік сигнал әлсірегенде жүйенің тұрақтылығын сақтау мүмкіндігі артады.

Осыған байланысты бұл жұмыстың мақсаты – MATLAB/Simulink ортасында ВОГ моделін құру, қателік көздерін талдау және GNSS жүйесімен интеграция тиімділігін бағалау болып табылады. Алынған нәтижелер жоғары дәлдікті навигациялық кешендерді дамытуға негіз бола алады.

### Материалдар мен әдістері

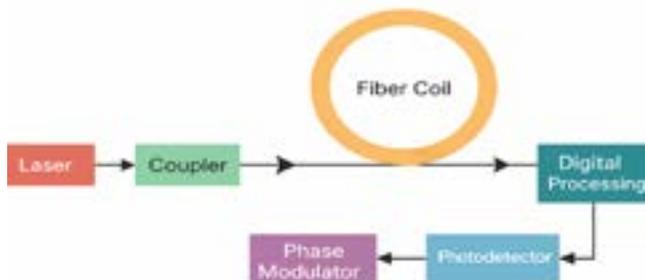
Бұл зерттеу жұмысының негізінде волоконды-оптикалық гироскоптардың (ВОГ) сипаттамаларын модельдеу және оларды навигациялық жүйелерде қолдану тиімділігін бағалау мақсаты қойылды. ВОГ жұмысының физикалық принципі Саньяк эффектісіне негізделген, яғни жарық ағыны екі бағытта талшық катушқасы арқылы таратылған кезде бұрыштық жылдамдық әсерінен интерференциялық фаза ығысуы пайда болады [5, 34–48-бб.]. Бұл құбылыс келесі өрнекпен сипатталады:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi A}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

мұнда  $A$  – катушқаның ауданы,  $\lambda$  – сәуленің толқын ұзындығы,  $c$  – жарық жылдамдығы, ал  $\Omega$  – бұрыштық жылдамдық. Фаза ығысуы фотодетекторда тіркелетін интерференциялық сигналдың өзгерісіне әкеледі, ал оның амплитудасы келесі теңдеумен өрнектеледі [6, 29-б.]:

$$I(\Omega) = I_0 [1 + \cos(\Delta\varphi)] \quad (2)$$

Модельдеу MATLAB/Simulink ортасында жүзеге асырылды, онда лазер көзі, бағыттаушы қосқыш, талшық катушқасы, фазалық модулятор және фотодетектордан тұратын толық блок-схема құрастырылды. 1-суретте гироскоптың негізгі физикалық элементтері көрсетілген. Ол схема тек құрылымды сипаттап қана қоймай, сонымен қатар сигналды сандық демодуляциялау, квадратуралық қателікті компенсациялау және жабық контурлы басқару алгоритмдерін іске асыруға мүмкіндік береді.



1-сурет – Волоконды-оптикалық гироскоптың құрылымдық сызбасы

Лазер көзі шығаратын сәуле оптикалық қосқыш арқылы екі бағытқа бөлініп, талшық катушқасы арқылы таралады. Саньяк эффектісі нәтижесінде пайда болған фазалық ығысу фотодетекторда тіркеледі, ал сигнал сандық өңдеу блогына жіберіліп, демодуляция және қателіктерді компенсациялау алгоритмдері орындалады [7, 21–28-бб.]; [8, 9-б.]. Фазалық модулятор интерференциялық сигналды басқаруды қамтамасыз етеді.

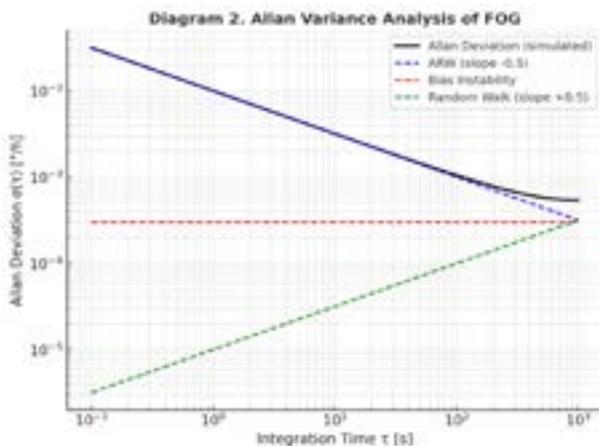
Зерттеу барысында қателіктердің негізгі көздері ескерілді, олардың ішінде бұрыштық кездейсоқ жүріс (Angle Random Walk, ARW), нөлдік ығысу тұрақсыздығы (Bias Instability, BI), масштаб коэффициентінің сызықтық еместігі және температуралық дрейфтер бар. ARW мәні уақытқа тәуелділігін сипаттайтын классикалық өрнекпен бағаланды [9, 3-4 бб.]; [10, 57-б.]:

$$\sigma_{ARW} = \frac{K}{\sqrt{\tau}} \quad (3)$$

ал нөлдік ығысу дрейфі бірінші ретті Гаусс–Марков процесімен модельденді:

$$b_{k+1} = \phi b_k + w_k \quad (4)$$

мұнда  $\phi$  – корреляция коэффициенті,  $w_k$  – ақ шу. Allan variance әдісі қолданылып, ұзақмерзімді тұрақсыздық пен кездейсоқ шудың үлесі жеке-жеке 2-суретте талданды.

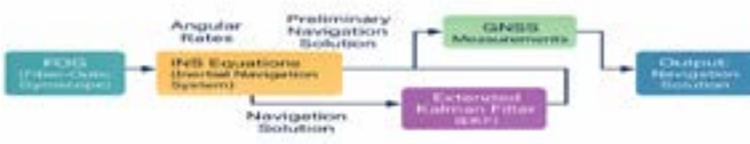


2-сурет – Волоконды-оптикалық гироскоп қателіктерін Allan variance әдісімен талдау

ВОГ моделінің нәтижелері инерциялық-навигациялық жүйе құрамында қарастырылды. Интеграция GNSS өлшемдерімен біріктіріліп, кеңейтілген Калман сүзгісі арқылы жүзеге асырылды. Бұл жағдайда күй векторы позиция, жылдамдық, ориентация және гироскоп ығысуынан тұрды:

$$x = [p \ v \ \theta \ b_g]^T \quad (5)$$

3-суретте көрсетілген INS/GNSS интеграциясының құрылымдық сызбасында гироскоптан алынған бұрыштық жылдамдықтар навигациялық теңдеулер арқылы өңделіп, Калман сүзгісі арқылы спутниктік түзетулер енгізілді. Мұндай тәсіл GNSS сигналы әлсіреген немесе уақытша жоғалған жағдайда да навигацияның тұрақтылығын сақтауға мүмкіндік берді [11, 32-б.].



3-сурет – INS/GNSS интеграциясының құрылымдық сызбасы

Сызбада волоконды-оптикалық гироскоптан алынған бұрыштық жылдамдықтар инерциялық навигациялық жүйе теңдеулерінде өңделіп, алдын ала навигациялық шешім қалыптастырылады. GNSS өлшемдері кеңейтілген Калман сүзгісі арқылы INS нәтижелерімен біріктіріледі. Бұл тәсіл навигациялық шешімнің дәлдігін арттырып, спутниктік сигнал әлсіреген жағдайда да жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

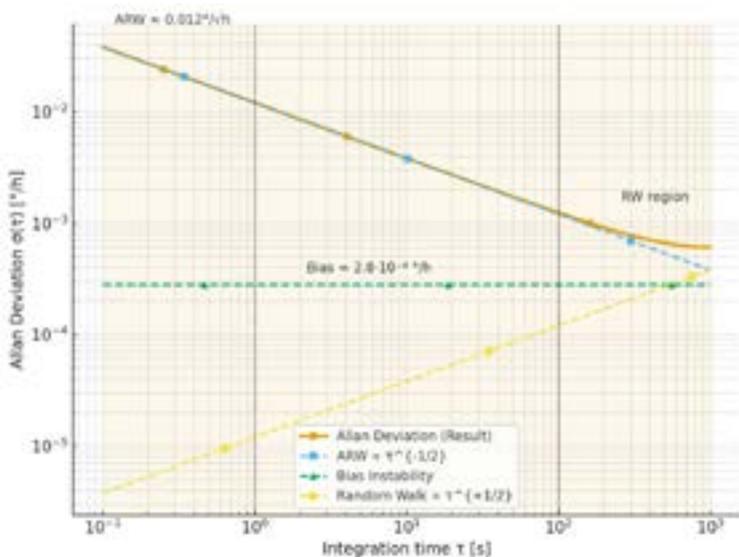
Бағалау критерийлері ретінде гироскоптық сенсордың ARW және bias stability көрсеткіштері, сондай-ақ позициялық дәлдік (CEP), курстық қателік және спутниктік сигнал шектелген кездегі дрейф динамикасы қолданылды. Жүргізілген модельдеу нәтижелері алынған әдістердің ВОГ сенімділігін арттырып қана қоймай, интеграцияланған жүйелердің практикалық жағдайларда жоғары дәлдікті қамтамасыз ете алатынын көрсетті.

### Нәтижелер және талқылау

Модельдеу нәтижелері волоконды-оптикалық гироскоптың бұрыштық жылдамдыққа жоғары сезімталдығын айқын көрсетті. Сандық демодуляциядан кейін интерференциялық сигналдың амплитудасы бұрыштық жылдамдықтың

өзгеруіне сызықты тәуелділікпен сипатталды. Бұл нәтиже модельдің физикалық процестерді дұрыс бейнелейтінін растады және ВОГ жұмысының негізгі принципі тәжірибелік жағдайда қолдануға болатынын көрсетті.

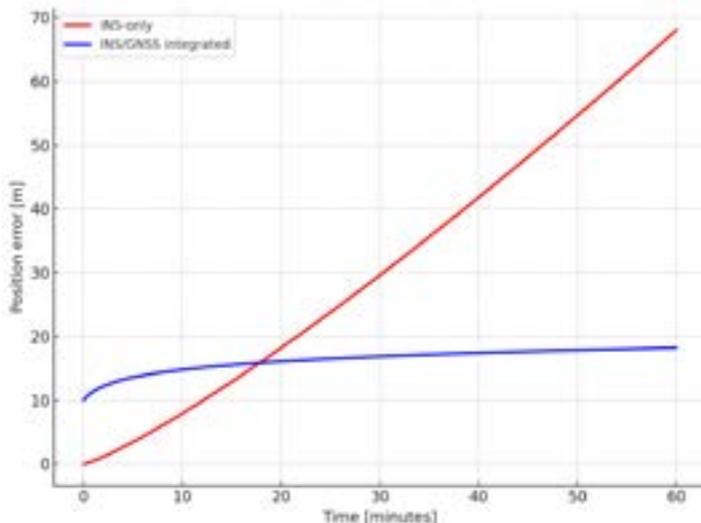
ВОГ қателіктерін сипаттау үшін Allan variance әдісі қолданылды. 4-суретте көрсетілген нәтижелер уақыт аралығына байланысты қателік сипаттамаларының үш аймағын айқын көрсетті. Қысқа интервалда бұрыштық кездейсоқ жүріс (ARW) басым болып, оның әсері фотондық шудың және электрондық күшейткіштің шумымен байланысты екені байқалды. Орташа интервалда плато түрінде байқалатын нөлдік ығысу тұрақсыздығы (Bias Instability) гироскоп элементтеріндегі ұзақмерзімді дрейфтерге сәйкес келеді. Ал үлкен интервалдарда кездейсоқ дрейфтің (Random Walk) әсері артып, оның себебі температуралық өзгерістер мен оптикалық компоненттердің ұзақмерзімді тұрақсыздығына байланысты екені анықталды. Алынған шамалар –  $ARW \approx 0.01^\circ/\sqrt{h}$  және  $Bias Instability \approx 3 \cdot 10^{-4}^\circ/\sqrt{h}$  – модельдің жоғары дәлдікті навигациялық деңгейге сәйкес келетінін дәлелдейді.



4-сурет – ВОГ қателіктерінің Allan variance нәтижелері

Гироскоп INS құрамында жеке пайдаланылған кезде позициялық және курстық қателіктердің уақыт өте тез жиналатыны анықталды. Бұл құбылыс қателіктің уақытқа тәуелді шамамен степендік заңдылықпен ( $t^{1.2}$ ) өсуінен көрінді. Ал INS/GNSS интеграциясы кезінде қателік динамикасы түбегейлі

өзгерді: 5-суретте көрсетілгендей, позициялық қате логарифмдік сипатта баяу өсіп, ондаған метр деңгейінде шектелді. Бұл кеңейтілген Калман сүзгісінің (EKF) тиімділігін растайды, себебі ол GNSS сигналдары әлсіреген жағдайда да INS өлшемдерін түзетіп, жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз етті.



5-сурет – INS-only және INS/GNSS позициялық қателіктерінің салыстырмасы

Жалпы талдау көрсеткендей, волоконды-оптикалық гироскоптың қателік сипаттамалары дұрыс бағаланып, олардың GNSS өлшемдерімен интеграциясы навигациялық шешімнің дәлдігі мен сенімділігін айтарлықтай арттырады. Бұл тәсіл спутниктік сигнал толық жоғалған жағдайда да жүйенің жұмыс қабілеттілігін сақтауға мүмкіндік береді.

#### **Қаржыландыру туралы ақпарат**

Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің гранттық қаржыландыруы аясында, AP26104843 «Волоконды-оптикалық гироскоптарды зерттеу және навигациялық жүйені дамыту үшін қолдану» атты ғылыми жоба шеңберінде орындалды.

#### **Қорытынды**

Бұл зерттеу волоконды-оптикалық гироскоптардың модельдік сипаттамаларын айқындап, олардың навигациялық жүйелердегі қолдану тиімділігін дәлелдеді. Модельдеу нәтижелері Саньяк эффектісіне негізделген физикалық процестердің дұрыс сипатталғанын және сандық демодуляция

алгоритмдерінің бұрыштық жылдамдықты сенімді түрде бағалай алатынын көрсетті.

Қателік сипаттамаларын талдау гироскоптың бұрыштық кездейсоқ жүріс пен нөлдік ығысу тұрақсыздығы жағынан жоғары дәлдікті навигациялық деңгейге сәйкес келетінін растады. Бұл ВОГ-ты заманауи инерциялық навигациялық жүйелерде қолдану үшін жеткілікті сенімді құрал ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

INS/GNSS интеграциясы тәжірибелік тұрғыдан тиімді екенін дәлелдеді: спутниктік сигнал әлсіреген немесе уақытша жоғалған жағдайда да жүйе тұрақтылығын сақтап, позициялық дәлдікті қамтамасыз етті. Зерттеу нәтижелері волоконды-оптикалық гироскоптардың навигациялық жүйелерде кеңінен қолданылу әлеуетін ашып көрсетеді. Алдағы уақытта температуралық дрейфті модельдеу, тәжірибелік прототиптерді сынау және алгоритмдерді нақты уақыт режимінде тексеру зерттеуді одан әрі жетілдіруге бағытталуы мүмкін.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Allan, D.W.** Statistics of atomic frequency standards // Proceedings of the IEEE. – 1966. – 54(2). – P. 221–230. – <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>

2 **El-Sheimy, N., Hou, H., Niu, X.** Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – 57(1). – P. 140–149. – <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>

3 **Niu, X., Zhang, Q., Li, Y., Zhang, H.** Using Allan variance to analyze the error characteristics of GNSS positioning // GPS Solutions. – 2014. – 18 (2). – P. 231–242. – <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0324-x>

4 **Lefèvre, H. C.** The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: a review // Optical Fiber Technology. – 2013. – 19(6). – P. 828–832. – <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.08.007>

5 **Lefèvre, H. C.** The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation-sensing device // Comptes Rendus Physique. – 2014. 15(10). – P. 851–858. – <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2014.10.007>

6 **Shupe, D. M.** Fiber-optic gyroscope with additional fiber in optical path // Applied Optics. – 1980. – 19(5). – P. 654–655. – <https://doi.org/10.1364/AO.19.000654>

7 **Shupe, D. M.** Thermal effects in interferometric fiber-optic gyroscopes // Applied Optics. – 1981. – 20(2). – P. 286–289. – <https://doi.org/10.1364/AO.20.000286>

8 Wang, W., Chen, X. Multiscale EEMD-based modeling of FOG temperature drift // Applied Optics. – 2018. – 57 (28). – P. 8443–8450. – <https://doi.org/10.1364/AO.57.008443>

9 Wang, W., Chen, X. Compensation of FOG temperature drift using PSO-SVM algorithm // Applied Optics. – 2016. – 55(23). – P. 6243–6250. – <https://doi.org/10.1364/AO.55.006243>

10 Zhao, S., Liu, Q., Liu, Y., Ma, H., He, Z. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope based on white-light interferometry // Photonics Research. – 2022. – 10(2). – P. 542–549. – <https://doi.org/10.1364/PRJ.443496>

11 Kim, H. K., Digonnet, M. J.F., Kino, G. S. Room-temperature operation of an air-core photonic-bandgap fiber optic gyroscope // Journal of Lightwave Technology. – 2006. – 24(8). – P. 3169–3174 – <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.880689>

24.09.25 ж. баспаға түсті.

21.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Е. Таумай<sup>1</sup>, А. М. Сабиболда<sup>2</sup>, Е. Нусупов<sup>3</sup>, Д. А. Наубетов<sup>4</sup>, \*Н. К. Смайлов<sup>5</sup>*  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;

<sup>2,5</sup>Институт механики и машиноведения

имени академика У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы;

<sup>4</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,  
Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 24.09.25.

Поступило с исправлениями 21.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ПОВЫШЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*В данной статье представлен комплекс методов, направленных на повышение точности, чувствительности и долгосрочной стабильности волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в навигационных системах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности инерциальной навигации и автономной работы систем при отсутствии спутниковых сигналов. В программной среде MATLAB/Simulink разработана физическая и сигнальная модель ВОГ, основанная на эффекте Сагнака. Модель включает*

*основные оптические компоненты: источник излучения, катушку волоконного кабеля, фазовый модулятор и фотодетектор. На этапе обработки сигналов реализованы алгоритмы замкнутой демодуляции, компенсации квадратурной ошибки и температурного дрейфа. Для анализа ошибок гироскопа использован метод дисперсии Аллана, на основе которого построены стохастические модели углового случайного блуждания (ARW), нестабильности нулевого смещения (Bias Instability) и нелинейности коэффициента масштаба. Интегрированная архитектура INS/GNSS реализована с применением расширенного фильтра Калмана и протестирована в сценариях «городского каньона» и временной потери сигнала. Результаты моделирования показали высокую чувствительность ВОГ к угловой скорости, снижение плотности шума и улучшение стабильности смещения, что обеспечило повышение точности определения курса и координат. Кроме того, даже при ограниченном доступе к GNSS система сохраняла устойчивость инерциального решения и низкий уровень накопления ошибок. Разработанная методика моделирования и интеграции может быть использована для проектирования, калибровки и оптимизации высокоточных инерциально-навигационных комплексов на основе волоконно-оптических гироскопов, обеспечивая практическую основу для дальнейших исследований и совершенствования таких систем.*

*Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, эффект Сагнака, дисперсия Аллана, ARW, bias, фильтр Калмана, INS/GNSS.*

*Y. Tashtay<sup>1</sup>, A. M. Sabibolda<sup>2</sup>, Y. Nussupov<sup>3</sup>, D. A. Naubetov<sup>4</sup>, \*N. K. Smailov<sup>5</sup>*

*<sup>1,2,3,4,5</sup>Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;*

*<sup>2,5</sup>Institute of Mechanics and Engineering named after Academician U.A. Zholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty;*

*<sup>4</sup>Gumarbek Daukeev Energo University, Republic of Kazakhstan, Almaty.*

*Received 24.09.25.*

*Received in revised form 21.10.25.*

*Accepted for publication 05.12.25.*

---

## INVESTIGATION OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE CHARACTERISTICS AND ENHANCEMENT OF THEIR EFFICIENCY IN NAVIGATION SYSTEMS

*This paper presents a comprehensive set of methods aimed at improving the accuracy, sensitivity, and long-term stability of fiber-optic gyroscopes (FOGs) in modern navigation systems. The relevance of the study lies in the need to achieve high-precision inertial navigation and ensure autonomous system operation in the absence of satellite signals. A physical and signal model of the FOG based on the Sagnac effect was developed in the MATLAB/Simulink environment. The model incorporates key optical components, including a light source, fiber coil, phase modulator, and photodetector. At the signal processing stage, algorithms for closed-loop demodulation, quadrature error compensation, and temperature drift correction were implemented. The Allan variance method was used to statistically analyze the FOG error sources, and stochastic models were introduced for angular random walk (ARW), bias instability, and scale factor nonlinearity. An integrated INS/GNSS architecture was implemented using an extended Kalman filter and tested under “urban canyon” and temporary GNSS signal loss scenarios. The results demonstrated high sensitivity of the FOG to angular velocity, reduced noise density, and improved bias stability, leading to significantly enhanced heading and position accuracy. Furthermore, the system maintained the stability of the inertial solution even under limited GNSS availability, ensuring low error accumulation over time. The proposed modeling and integration methodology can be effectively applied to the design, calibration, and optimization of high-precision inertial navigation systems based on FOG technology, providing both theoretical and practical value for future research and the development of robust navigation solutions.*

*Keywords: fiber-optic gyroscope, Sagnac effect, Allan variance, ARW, bias, Kalman filter, INS/GNSS.*

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 ж. қол қойылды.  
Электронды баспа  
29.9 Мб RAM  
Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.  
Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова  
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас  
Тапсырыс № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 г.  
Электронное издание  
29.9 Мб RAM  
Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.  
Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова  
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас  
Заказ № 4494

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған  
Торайғыров университеті  
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы  
Торайғыров университеті  
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.  
67-36-69  
E-mail: kereku@tou.edu.kz  
www.vestnik-energy.tou.edu.kz