

пологий ПАВ-резонаторов любой сложности и наносить топологию ПАВ-резонатора одновременно на обе стороны консоли.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук, шифр МК – 6435.2014.8, договор № 14.Z56.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greer J. A., Montress G. K., Parker T. E. Applications of laser-trimming for all quartz package, surface acoustic wave devices // Ultrasonics Symposium 1989. Raytheon Research Division, 131 Spring Street, Lexington, Massachusetts, 1989. P. 179–184.
2. Parker T. E., Callera J., Montress G. K. A new all quartz package for SAW devices // 39th Annual Frequency Control Symposium. Raytheon Research Division, 131 Spring Street, Lexington, Massachusetts, 1985. P. 519–525.
3. Бер А. Ю., Минскер Ф. Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. для сред. ПТУ. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 279 с.
4. Балышева О. Л. Фильтры на поверхностных акустических волнах: возможности миниатюризации и функциональной интеграции // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 12. С. 1512–1523.
5. Карпеев Д. В., Макаров В. М., Малов В. В. Частотные датчики механических величин на ПАВ-структурах // Сегнето- и пьезоматериалы и их применение: материалы семинара МДНТП. М., 1978. С. 59–62.
6. Шевченко С. Ю. Анализ возможностей снижения термочувствительности микроакселерометра на поверхностных акустических волнах // Материалы VIII конф. молодых ученых “Навигация и управление движением”. СПб.: Навигация и управление движением, 2007. С. 90–97.
7. Лукьянов Д. П. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Ч. 2 // Гироскопия и навигация. 2007. № 3 (58). С. 62–76.
8. МиниМаркер 2 // Лазерный Центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.newlaser.ru/laser/lc/minimarker2.php>.

D. P. Lukyanov, S. Yu. Shevchenko, E. P. Filippova, A. S. Kukaev, D. V. Safronov, A. V. Ivanov  
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## THE USE OF QUARTZ PACKAGING FOR ENCAPSULATION OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

*The use of technology of quartz packaging for improving of characteristics of micromechanical accelerometers (MMA) on surface acoustic waves (SAW) is considered. The possibility of the laser frequency trimming of SAW-resonator in a sealed device and simultaneous application of resonator structures on the opposite side of the console with the help of system of high-precision laser marking is investigated.*

**Quartz packaging, surface acoustic wave (SAW), micromechanical accelerometer (MMA), laser frequency trimming**

УДК 681.51, 531.383

Чан Танг Дык, Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Оптимизация алгоритмов инерциальной навигационной системы надводных объектов

*Рассмотрен алгоритм курсовертикали (КВ) для решения задачи управления движением скоростного судна с глубоко погруженными подводными крыльями. Приведены результаты исследования КВ в среде MATLAB. Исследованы погрешности параметров управления по имитационным данным.*

**Курсовертикаль, управление движением, скоростные суда, волоконно-оптический гироскоп, акселерометр, магнитометр, оптимальный фильтр Калмана, спутниковая навигационная система**

Для решения задачи управления движением объекта с необходимой точностью параметров управления была разработана КВ на волоконно-оптическом гироскопе (ДУС), трех акселерометрах (БА) и трех магнитометрах (БМ) [1]. Исследование влияния инструментальных погрешно-

стей датчиков на точности выработки параметров управления системы КВ имеет важное значение при оценивании эффективности алгоритма ее работы. Таким образом, в данной статье проводится математическое описание для исследования ошибок КВ, вызванных инструментальными погрешностями. В работе [2] было показано, что для обеспечения устойчивости в работе системы управления (СУ) движением судна на подводных крыльях необходимо обеспечить точность определения углов атаки и дифферента  $\pm 0.5$ , а также вариаций по высоте центра масс 0.1 м.

**Алгоритм выработки параметров движения судна.** Введем основные системы координат, используемые для описания принципов построения систем ориентации (рис. 1):

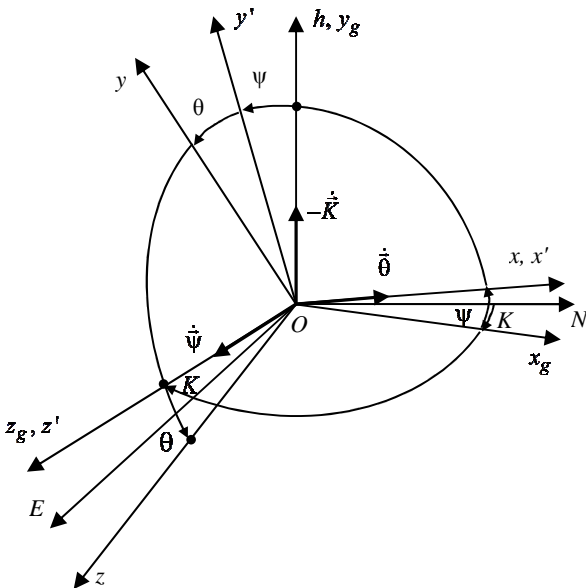


Рис. 1

– географическая система координат  $ONhE$ , пространственно-ориентированная своими осями, соответственно, на север, вертикаль и восток места;

– полусвязанная система координат  $Ox_g y_g z_g$  получена при повороте системы координат  $ONhE$  на угол курса  $K$ ;

– приборная система координат  $Oxuz$ , где ось  $Ox$  совпадает с продольной осью и направлена к носу, ось  $Oz$  совпадает с поперечной осью и направлена в сторону правого борта, ось  $Oy$  перпендикулярна плоскости палубы и направлена вверх.

Взаимное положение  $Oxuz$  относительно  $ONhE$  характеризуется углами курса  $K$ , дифферента  $\psi$  и крена  $\theta$ .

Особенность предложенной в работе [1] системы заключается в том, что в ее составе используется только один гироскоп, чувствительная

ось которого расположена по поперечной оси объекта. Гироскоп контролирует угол килевой качки, точность которого в значительной степени определяет точность выработки углов дифферента и атаки – два из интересующих параметров для задачи управления.

Показания  $z$ -гироскопа  $\omega_z$  и  $z$ -акселерометра  $W_z$  могут быть описаны следующими выражениями [1], [3]:

$$\omega_z = \dot{\psi} \cos \theta + \dot{K} \sin \theta \cos \psi; \quad (1)$$

$$W_z = -g \cos \psi \sin \theta + \dot{v}_z + \dot{K} v_{x_g} \cos \theta,$$

где  $\dot{K} \sin \theta \cos \psi$  – вклад так называемой перекрестной связи в показания гироскопа;  $\dot{v}_z$  – составляющая линейного ускорения по оси  $Oz$ ;  $\dot{K} v_{x_g}$  – центростремительное ускорение, порождаемое угловой скоростью изменения курса на циркуляции  $\dot{K}$  и проекцией линейной скорости  $v_{x_g}$  на продольную ось  $Ox_g$  полусвязной системы координат.

Скорость изменения угла дифферента вычитается из (1):

$$\dot{\psi} = \frac{1}{\cos \theta} \omega_z - \dot{K} \operatorname{tg} \theta \cos \psi, \quad (2)$$

тогда получается  $\psi = \psi(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{\psi} dt$ , где  $\psi(t_0)$  –

угол дифферента, полученный в режиме выставки.

Крен определяется по показаниям  $z$ -акселерометра:

$$\theta = \arcsin \frac{W_z - \dot{K} v_{x_g} \cos \theta}{-g \cos \psi};$$

и угол атаки

$$\alpha = \arcsin \frac{v_y}{v},$$

где  $v$  и  $v_y$  – линейная скорость судна и ее проекция вектора на ось  $Oy$  соответственно.

Проекция вектора кажущегося ускорения на географические оси  $ONhE$  [3], [4]:

$$n_{NhE} = CW_{xyz}, \quad (3)$$

где  $C$  – матрица перехода от связанной системы координат к географической системе (рис. 1).

Составляющие относительного ускорения движения объекта получены вычитанием «вредных» ускорений из кажущегося ускорения, измеряемого акселерометрами:

$$\dot{v}_{Nhe} = n_{Nhe} - a_{Nhe}^k, \quad (4)$$

где составляющие  $a_{Nhe}^k$  определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} a_E^k &= v_h (2\Omega + \dot{\lambda}) \cos \phi - v_N (2\Omega + \dot{\lambda}) \sin \phi; \\ a_N^k &= v_E (2\Omega + \dot{\lambda}) \sin \phi + v_h \dot{\phi}; \\ a_h^k &= g - v_E (2\Omega + \dot{\lambda}) \cos \phi - v_N \dot{\phi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Omega, \lambda, \phi$  – скорость суточного вращения Земли, долгота и широта местоположения судна соответственно.

Перечисленные уравнения описывают навигационный алгоритм, позволяющий определить скорость и координаты местоположения объекта. При реальных работах инерциальных датчиков погрешности определения указанных параметров будут накапливаться со временем. Для устранения этого была применена схема комплексирования данных с применением оптимального фильтра Калмана (ОФК).

Структурная схема комплексирования представлена на рис. 2.

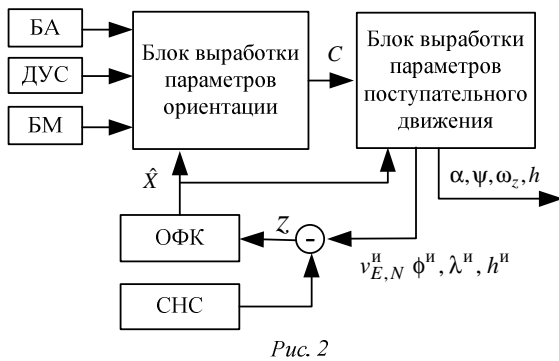


Рис. 2

Расчетная модель ошибок системы имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F(t)X(t) + G(t)w(t); \\ z(t) &= H(t)X(t) + v(t), \end{aligned}$$

где  $F(t), G(t)$  – матрицы состояния и возмущения;

$$X = [\Delta K \quad \Delta \psi \quad \Delta \theta \quad \Delta v_N \quad \Delta v_h \quad \Delta v_E \quad \Delta \phi \quad \Delta h \quad \Delta \lambda \quad \Delta \bar{\omega}_z \quad \Delta \bar{W}_x \quad \Delta \bar{W}_y \quad \Delta \bar{W}_z]^T$$

– вектор состояния;

$$w(t) = [\Delta \omega_z^\Phi \quad \Delta W_x^\Phi \quad \Delta W_y^\Phi \quad \Delta W_z^\Phi \quad \xi_{\omega_z} \quad \xi_{W_x} \quad \xi_{W_y} \quad \xi_{W_z}]^T$$

– вектор возмущения.

Расчетная модель ошибок системы получена варьированием уравнений (2), (4). При этом, опираясь на требование точности выработки пара-

метров, не учитывают составляющие «вредных» ускорений в (3) и (4):

$$\Delta \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \theta} \Delta \omega_z + \sin \psi \operatorname{tg} \theta \dot{K} \Delta \psi - (\cos \psi \dot{K} - \operatorname{tg} \theta \dot{\psi}) \Delta \theta;$$

$\Delta \dot{v}_{Nhe} = \Delta C W_{xyz} + C \Delta W_{xyz}$ , которое может быть представлено следующим образом:

$$\Delta \dot{v}_{Nhe} = B W_{xyz} \Delta K + D W_{xyz} \Delta \psi + E W_{xyz} \Delta \theta + C \Delta W_{xyz};$$

где  $B \Delta K + D \Delta \psi + E \Delta \theta = \Delta C$ ;

$$\Delta \dot{\phi} = \frac{1}{R} \Delta v_N; \quad \Delta \dot{h} = \Delta v_h; \quad \Delta \dot{\lambda} = \frac{1}{R \cos \phi} \Delta v_E.$$

Модели погрешностей гироскопов и акселерометров: смещения нулей гироскопа  $\Delta \bar{\omega}_z$  и акселерометров  $\Delta \bar{W}_i$  и их изменчивость в пуске аппроксимированы соответствующими винеровскими процессами [3]:

$$\begin{aligned} \Delta \omega_z &= \Delta \bar{\omega}_z + \Delta \omega_z^\Phi; \\ \Delta \dot{\bar{\omega}}_z &= \sqrt{Q_{\Delta \bar{\omega}_z}} \cdot \xi_{\Delta \bar{\omega}_z}(t), \quad \Delta \bar{\omega}_z(t_0); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_i &= \Delta \bar{W}_i + \Delta W_i^\Phi, \quad i = x, y, z; \\ \Delta \dot{\bar{W}}_i &= \sqrt{Q_{\Delta \bar{W}_i}} \cdot \xi_{\Delta \bar{W}_i}(t), \quad \Delta \bar{W}_i(t_0). \end{aligned}$$

Ненулевые элементы матрицы состояния  $F(13 \times 13)$ :

$$f_{2,2} = \sin \psi \operatorname{tg} \theta \dot{K}; \quad f_{2,3} = -(\cos \psi \dot{K} - \operatorname{tg} \theta \dot{\psi});$$

$$f_{2,10} = \frac{1}{\cos \theta};$$

$$f_{4,1} = b_{11} W_x + b_{12} W_y + b_{13} W_z;$$

$$f_{4,2} = d_{11} W_x + d_{12} W_y + d_{13} W_z;$$

$$f_{4,3} = e_{11} W_x + e_{12} W_y + e_{13} W_z; \quad f_{4,11} = c_{11};$$

$$f_{4,12} = c_{12}; \quad f_{4,13} = c_{13};$$

$$f_{5,1} = b_{21} W_x + b_{22} W_y + b_{23} W_z;$$

$$f_{5,2} = d_{21} W_x + d_{22} W_y + d_{23} W_z;$$

$$f_{5,3} = e_{21} W_x + e_{22} W_y + e_{23} W_z; \quad f_{5,11} = c_{21};$$

$$f_{5,12} = c_{22}; \quad f_{5,13} = c_{23};$$

$$f_{6,1} = b_{31} W_x + b_{32} W_y + b_{33} W_z;$$

$$f_{6,2} = d_{31} W_x + d_{32} W_y + d_{33} W_z;$$

$$f_{6,3} = e_{31}W_x + e_{32}W_y + e_{33}W_z; f_{6,11} = c_{31};$$

$$f_{6,12} = c_{32}; f_{6,13} = c_{33};$$

$$f_{7,4} = \frac{1}{R}; f_{8,5} = 1; f_{9,6} = \frac{1}{R \cos \phi},$$

где  $b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, e_{ij}$  – элементы матриц  $B, C, D, E$  соответственно.

Ненулевые коэффициенты матрицы возмущения  $G(13 \times 8)$ :

$$G_{1,1} = \frac{1}{\cos \theta}; G_{4,2} = c_{11}; G_{4,3} = c_{12}; G_{4,4} = c_{13};$$

$$G_{5,2} = c_{21}; G_{5,3} = c_{22}; G_{5,4} = c_{23};$$

$$G_{6,2} = c_{31}; G_{6,3} = c_{32}; G_{6,4} = c_{33}; G_{10,5} = \sqrt{Q_{\Delta \dot{\omega}_z}};$$

$$G_{11,6} = \sqrt{Q_{\Delta \dot{W}_x}}; G_{12,7} = \sqrt{Q_{\Delta \dot{W}_y}}; G_{13,8} = \sqrt{Q_{\Delta \dot{W}_z}}.$$

Скоростные измерения по данным СНС:

$$z_{v_N}(t_{k+1}) = v_N^И(t_{k+1}) - v_N^{СНС}(t_{k+1}) =$$

$$= \Delta v_N(t_{k+1}) - v_{v_N}^{СНС}(t_{k+1}),$$

$$z_{v_E}(t_{k+1}) = v_E^И(t_{k+1}) - v_E^{СНС}(t_{k+1}) =$$

$$= \Delta v_E(t_{k+1}) - v_{v_E}^{СНС}(t_{k+1}).$$

Здесь индексы «И» и «СНС» означают параметры, вырабатываемые по данным инерциальной навигационной и спутниковой навигационной систем соответственно.

Позиционные измерения по данным СНС:

$$z_{\phi}(t_{k+1}) = \phi^И(t_{k+1}) - \phi^{СНС}(t_{k+1}) =$$

$$= \Delta \phi(t_{k+1}) + v_{\phi}(t_{k+1}),$$

$$z_h(t_{k+1}) = h^И(t_{k+1}) =$$

$$= \Delta h(t_{k+1}) + v_h(t_{k+1}),$$

$$z_{\lambda}(t_{k+1}) = \lambda^И(t_{k+1}) - \lambda^{СНС}(t_{k+1}) =$$

$$= \Delta \lambda(t_{k+1}) + v_{\lambda}(t_{k+1}).$$

Вектор измерения:

$$z = [z_{v_N} \quad z_{v_E} \quad z_{\phi} \quad z_h \quad z_{\lambda}]^T.$$

Матрица измерения:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Технические характеристики датчиков представлены в таблице.

Датчики	Смещение нуля от запуска к запуску	Изменчивость смещения нуля в пуске	Шумовая составляющая
Гироскоп	30 °/ч	0.2 °/ч√ч	3 °/ч
x- и z-акселерометры	2 · 10 <sup>-3</sup> g	2 · 10 <sup>-5</sup> g/√ч	2 · 10 <sup>-4</sup> g
y-акселерометр	5 · 10 <sup>-4</sup> g	5 · 10 <sup>-6</sup> g/√ч	5 · 10 <sup>-5</sup> g
Скоростные измерения СНС	–	–	0.3 мс <sup>-1</sup>
Позиционные измерения СНС	–	–	50 м

При варьировании (5), с учетом  $v^2 = v_N^2 + v_h^2 + v_E^2$  и  $v_{xyz} = C^{-1}v_{NHE}$ , получено:

$$\Delta \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - (v_y/v)^2}} \Delta(v_y/v) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - (v_y/v)^2}} \frac{v \Delta v_y - v_y \Delta v}{v^2} = \frac{v \Delta v_y - v_y \Delta v}{v \sqrt{v^2 - v_y^2}} =$$

$$= a_1 \Delta K + a_2 \Delta \psi + a_3 \Delta \theta + a_4 \Delta v_N + a_5 \Delta v_h + a_6 \Delta v_E.$$

Тогда максимальная дисперсия угла атаки определяется как сумма максимальных дисперсий:

$$P_{\Delta \alpha} = a_1^2 P_{\Delta K} + a_2^2 P_{\Delta \psi} + a_3^2 P_{\Delta \theta} +$$

$$+ a_4^2 P_{\Delta v_N} + a_5^2 P_{\Delta v_h} + a_6^2 P_{\Delta v_E}.$$

**Результат моделирования.** При имитации движения судна с параметрами, представленными на рис. 3 (продольная скорость, курс), были получены результаты, приведенные на рис. 4–9.

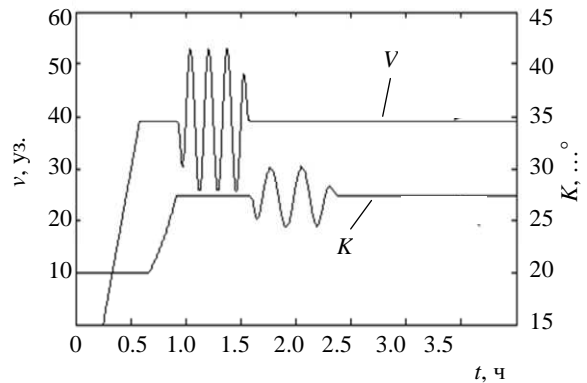


Рис. 3

Оценки систематических составляющих смещений нулей гироскопа и акселерометров приве-

дены на рис. 4–5, а на рис. 6 – отношения текущих дисперсий к их первоначальным значениям.

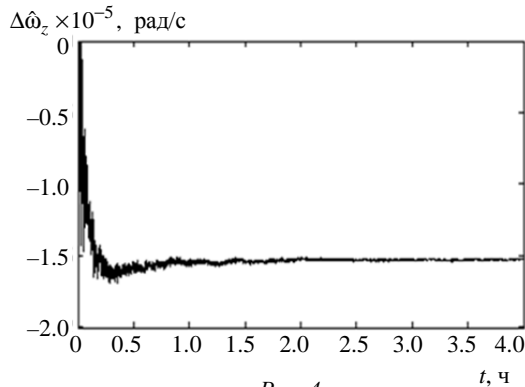


Рис. 4

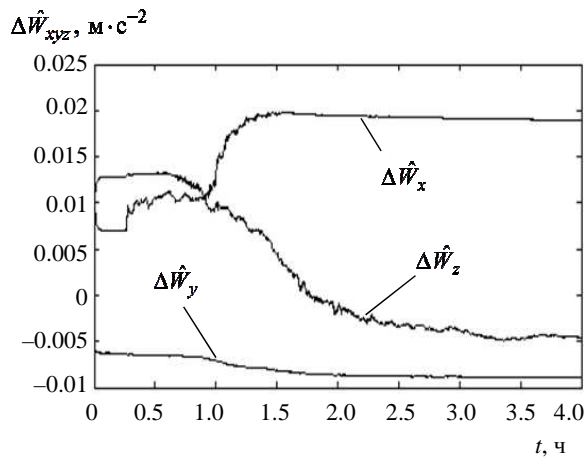


Рис. 5

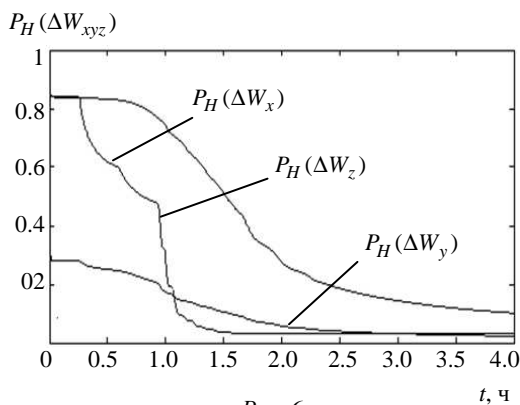


Рис. 6

Из графиков видно, что все систематические составляющие смещений нулей датчиков были наблюдаемые. Наблюдаемость стала лучше при движении с ускорением или с переменным курсом. В дальнейшем необходимо использовать для коррекции датчик линейной скорости судна (ЛАГ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курсоверталь для задач управления движением скоростного судна / А. М. Боронахин, Ю. А. Лукомский, А. Г. Шпекторов и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 4. С. 75–80.

Рис. 7–9 показывают средние квадратичные отклонения оценок угла дифферента, высоты и угла атаки соответственно. При движении объекта со скоростью более  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  требования к точности их определения выполнены.

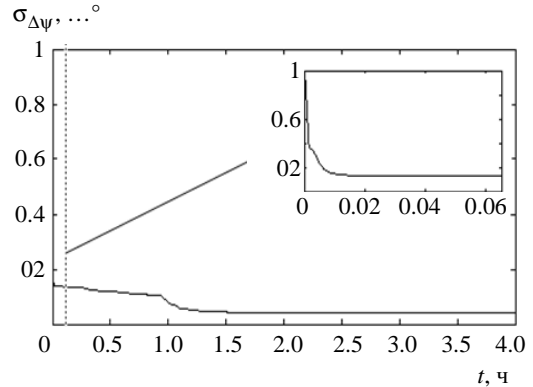


Рис. 7

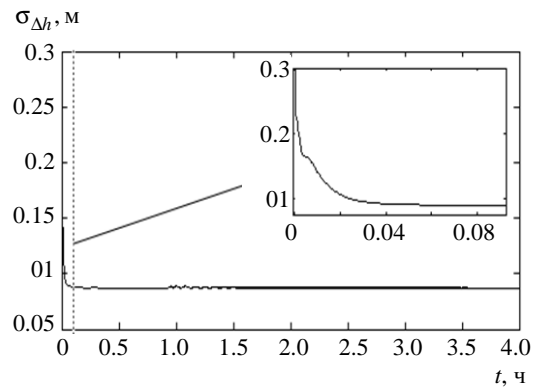


Рис. 8

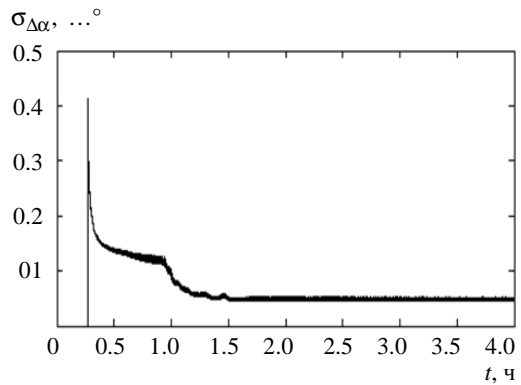


Рис. 9

В процессе изучения работы системы было замечено, что среди требований для задачи управления самым жестким является требование к высоте и также выяснилась необходимость в использовании ЛАГа для обеспечения требуемой точности.

2. Обоснование требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов / А. М. Боронахин, Ю. А. Лукомский, А. Г. Шпекторов и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 2. С. 77–80.

3. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцев, под общ. ред. чл.-кор. РАН В. Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ «ЦНИИ „Электроприбор“», 2003. 309 с.

4. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распапов, под общ. ред. д-ра техн. наук В. Я. Распапова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“», 2009. 280 с.

---

Tran Tang Duc, Dao Van Ba, Le Van Trang  
*Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»*

## OPTIMIZATION OF ALGORITHMS FOR INERTIAL NAVIGATION SYSTEM OF MOVING OBJECTS ON A WATER SURFACE

*Consider the algorithm of attitude and heading reference system (AHRS) for solving the problem of motion control of high-speed hydrofoils. Present the results of AHRS research in MATLAB environment. Investigate the error of control parameters on simulation data.*

**Attitude and heading reference system, motion control, high-speed vessels, fiber-optic gyroscope, accelerometer, magnetometer, the Kalman filter**

---

УДК 004.942:53.082.4

Д. П. Лукьянов, С. Ю. Шевченко, А. С. Кукаев, Е. П. Филиппова

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Оценка возможностей пакета OOFELIE::Multiphysics для моделирования инерциальных датчиков на поверхностных акустических волнах

*Рассматривается потенциальная возможность применения программного пакета OOFELIE::Multiphysics для решения задач компьютерного моделирования в ЛЭТИ. Приводятся результаты, полученные на кафедре ЛИНС за время использования пробной версии данной системы.*

**CAE, поверхностные акустические волны, компьютерное моделирование, микроакселерометр**

Одним из эффективных инструментов инновационных компьютерных технологий являются программные пакеты, реализующие метод конечных элементов для решения задач моделирования различных процессов и механизмов. Они получили название систем автоматизированного конструирования или CAE-систем (от англ. Computer Aided Engineering). В условиях современной промышленности компьютерное моделирование находит применение на основных стадиях производства – от научно-исследовательских разработок до организации техпроцесса изготовления конечного продукта. Ошибка в расчетах на стадии проектирования устройства может привести к серь-

езным потерям времени и денег при его производстве. Поэтому особую ценность приобретает мультифизический анализ, позволяющий учесть одновременное влияние широкого спектра воздействий на исследуемую модель.

В академических вузах методы компьютерного моделирования позволяют решать многофакторные исследовательские задачи. Одним из применений является компьютерная имитация сложных и ресурсоемких исследований, проведение которых в условиях вуза не всегда является возможным. Помимо научного применения системы компьютерного моделирования также должны стать важной частью образовательного процесса,