

УДК 531.383

ББК 22.213

## АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА КАЧАЮЩЕМСЯ ОСНОВАНИИ

Стрельцова И. А.<sup>1</sup>, Эварт Т. Е.<sup>2</sup>

(Арзамасский политехнический институт, Арзамас)

*В данной работе рассматривается процесс автономной начальной выставки системы ориентации, направленный на снижение времени предполетной подготовки инерциальной системы самолета, базирующегося на кораблях различных типов. Разработаны аналитические и вычислительные алгоритмы, необходимые для реализации начальной выставки на качающемся основании. Проведено математическое моделирование и проанализированы результаты работы программного модуля.*

Ключевые слова: инерциальные системы, начальная выставка, бесплатформенная система ориентации.

### 1. Введение

В связи с разработкой различных систем вооружения возникла необходимость выполнять подготовку инерциальной системы на объектах, движущихся относительно Земли [2]. Примерами таких объектов являются летательные аппараты, базирующиеся на борту кораблей.

---

<sup>1</sup>. Ирина Александровна Стрельцова, студентка(irina\_strelcova\_@list.ru).

<sup>2</sup> Татьяна Евгеньевна Эварт, доцент, кандидат физико-математических наук (t.zhilina@bk.ru)

Любой летательный аппарат имеет систему резервных приборов, обеспечивающую пилотирование летательных аппаратов в случае отказа основных пилотажно-навигационных систем.

Особенностью такой системы является наименьшее время процесса начальной выставки. При этом выделяют выставку интегрированной системы резервных приборов, которая относится к резервным системам измерения и индикации, обеспечивающим пилотирование в случае отказа основных пилотажно-навигационных систем.

Понятие «выставка» можно определить как ориентацию осей, связанных с инерциальными измерителями, относительно некоторой базовой системы отсчета, которая выбирается из соображений удобства. Базовой системой отсчета, относительно которой должна быть выставлена система, связанная с инерциальными измерителями, обычно принимается географическая.

Независимо от вида систем координат ошибка выставки всегда представляет собой нежелательное угловое рассогласование между осями, жестко связанными с инерциальными измерителями, и осями базовой системы координат.

Решение задачи выставки сводится к следующим трем основным факторам:

- Анализ систем координат и их преобразование;
- Анализ измерений осуществляемых чувствительными элементами, входящими в конкретную инерциальную систему;
- Анализ информации, поступающей от внешних измерительных систем.

Существуют различные методы решения задачи выставки, большинство из которых основано на использовании измерений, производимых самими инерциальными измерителями — акселерометрами и гироскопами. Эти чувствительные элементы рекомендуется использовать в процессе начальной выставки, поскольку они необходимы и для навигации, и для управления. Акселерометры и гироскопы дают возможность осуществить выставку относительно Земной системы координат, так как они позволяют определить вектор ускорения силы тяжести  $g$  и вектор угловой скорости суточного вращения Земли  $\omega$ . Эти важные входные величины значительно искажаются движением

объекта, несущего инерциальную систему. Задача выставки на подвижном основании возникает тогда, когда искажение, вызываемое движением объекта, становится настолько существенным, что осуществлять выставку методами, разработанными для неподвижного основания, невозможно.

В данной работе проводится анализ основных ошибок выставки инерциальных систем на качающемся основании, которые можно разделить на две группы: ошибки, вызываемые погрешностями измерительных устройств, и ошибки, возникающие вследствие влияния движения основания на измеряемые величины и сам процесс измерений.

Здесь под движением основания подразумевается не только перемещение объекта относительно Земли, но и перемещение, связанное с нежесткостью его конструкции. Рассматривается возможность исследования этих основных ошибок одинаковыми методами независимо от техники измерений, производимых при выставке. Проводится анализ относительного влияния погрешностей чувствительных элементов и движения основания на общую точность начальной подготовки, который помогает определить требования к приборам в зависимости от движения основания, являющегося возмущением.

## **2. Структура, характеристика и погрешности бесплатформенной системы ориентации**

Бесплатформенными называются системы ориентации, чувствительные элементы которых (гироскопы, угловые акселерометры) установлены на корпусе летательного аппарата, а его положение относительно осей опорной системы координат вычисляется аналитически на основе измерений отдельных угловых параметров движения летательного аппарата при последующем интегрировании полученных сигналов или их преобразовании [6].

В большинстве случаев бесплатформенные системы ориентации (БСО) входят в состав бесплатформенных инерциальных навигационных систем и обеспечивают решение задачи ориен-

тации, заменяя собой инерциальную курсоверткаль или гиросtabilизированную платформу [1].

Бесплатформенная система ориентации, см. рис. 1, представляет собой блок чувствительных элементов (БЧЭ), состоящий из трех акселерометров и трех датчиков угловой скорости (ДУС), и вычислитель.

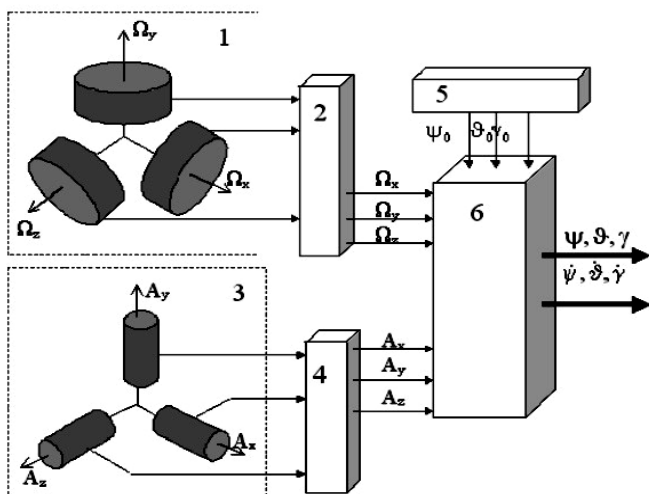


Рис. 1. Структурная схема БСО (1 – блок датчиков угловой скорости (ДУС); 2 – блок предварительной обработки информации ДУСов; 3 – блок линейных акселерометров; 4 – блок предварительной обработки информации акселерометров; 5 – блок внешней информации и начальных данных; 6 – вычислитель)

При построении математической модели датчиков выделяют следующие инструментальные погрешности БСО: систематическое смещение нулевого сигнала; нестабильность нулевого сигнала и нестабильность масштабного коэффициента.

Ускорение по осям акселерометров запишется следующим образом:

$$(1) \begin{vmatrix} a_{k1x} \\ a_{k1y} \\ a_{k1z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 + \Delta K_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \Delta K_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \Delta K_{az} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_{k1x}^n \\ a_{k1y}^n \\ a_{k1z}^n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{0x} \\ a_{0y} \\ a_{0z} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \xi_{\alpha_x} \\ \xi_{\alpha_y} \\ \xi_{\alpha_z} \end{vmatrix}$$

где  $\vec{a}_{k1} = [a_{k1x}, a_{k1y}, a_{k1z}]^T$ ,  $\Delta K_{ax}, \Delta K_{ay}, \Delta K_{az}$  – ошибки масштабных коэффициентов соответствующих акселерометров;  $a_{0x}, a_{0y}, a_{0z}$  – нулевые сигналы соответствующих акселерометров;  $\xi_{\alpha_x}, \xi_{\alpha_y}, \xi_{\alpha_z}$  – случайные уходы соответствующих акселерометров.

Сигналы гироскопов (ДУС) по осям их чувствительности примут вид:

$$(2) \begin{vmatrix} \omega_{1x} \\ \omega_{1y} \\ \omega_{1z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 + \Delta K_{\omega x} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \Delta K_{\omega y} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \Delta K_{\omega z} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{1x}^n \\ \omega_{1y}^n \\ \omega_{1z}^n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \omega_{0x} \\ \omega_{0y} \\ \omega_{0z} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \xi_{\omega_x} \\ \xi_{\omega_y} \\ \xi_{\omega_z} \end{vmatrix}$$

где  $\vec{\omega}_1 = [\omega_{1x}, \omega_{1y}, \omega_{1z}]^T$ ,  $\Delta K_{\omega x}, \Delta K_{\omega y}, \Delta K_{\omega z}$  – погрешность масштабного коэффициента;  $\omega_{0x}, \omega_{0y}, \omega_{0z}$  – нулевые сигналы соответствующих гироскопов;  $\xi_{\omega_x}, \xi_{\omega_y}, \xi_{\omega_z}$  – случайные уходы соответствующих гироскопов.

### 3. Описание и математическая модель качки

Движение судна на взволнованном море – его качка – представляет собой сложный колебательный процесс, совершаемый судном относительно положения равновесия, который можно рассматривать как совокупность колебаний, отвечающих каждой из шести степеней свободы твердого тела [4]. В основном качка возникает под действием гидродинамических сил, обусловленных возмущающим эффектом ветрового волнения.

Основной причиной качки судна является одновременное действие на него волн, сил плавучести и устойчивости.

Различают два вида колебаний судна на качке: свободные, которые происходят по инерции после прекращения сил, вызвавших их, и вынужденные, которые вызываются внешними периодически приложенными силами, например морским волнением.

В зависимости от направления колебаний судна относительно устойчивого положения равновесия различают три вида качки: бортовую, килевую и вертикальную.

Различные типы колебаний редко встречаются отдельно. Обычно судно выполняет на волнении сложные движения, которые заставляют его в большей или меньшей степени изменять положение и угрожают его безопасности. При движении под каким-либо углом к гребням волн судно обычно одновременно подвергается как бортовой, так и килевой качке. Именно такая комбинированная качка и рассматривается в данной работе.

Для построения определенной модели движения корабля на волнении за основу принимаем экспериментально полученные параметры качки авианесущего крейсера. Поскольку авианосец имеет большие габариты и массу, то волнения воды сказывается на нем незначительно, поэтому качку крейсера можно рассматривать как синусоидальный процесс.

Переносные ускорения, обусловленные качкой корабля, возмущают систему начальной выставки БСО. Для синтеза алгоритмов начальной выставки необходимо учитывать самый сложный случай, который наступает при максимальном переносном ускорении. Максимальное переносное ускорение будет при качке корабля на волнении в 6 баллов.

Ускорения по связанным осям корабля, обусловленные качкой, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_x &= \dot{\omega}_y R_z - \dot{\omega}_z R_y + \omega_x \omega_y R_y + \omega_x \omega_z R_z - \omega_y^2 R_y - \omega_z^2 R_x, \\
 (3) \quad U_y &= \dot{\omega}_z R_x - \dot{\omega}_x R_z - \omega_x \omega_y R_x + \omega_y \omega_z R_z - \omega_x^2 R_y - \omega_z^2 R_y, \\
 U_z &= \dot{\omega}_x R_y - \dot{\omega}_y R_x + \omega_x \omega_z R_x + \omega_y \omega_z R_y - \omega_x^2 R_z - \omega_y^2 R_z.
 \end{aligned}$$

где  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – угловые скорости качки корабля;

$$\omega_x = \omega_{x0} \cdot \sin 2\pi f_x \cdot t,$$

$$\omega_y = \omega_{y0} \cdot \sin 2\pi f_y \cdot t,$$

$$\omega_z = \omega_{z0} \cdot \sin 2\pi f_z \cdot t;$$

$\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  – угловые ускорения качки;  $R_x, R_y, R_z$  – координаты местоположения объекта относительно центра масс корабля.

Рассматривая качку как синусоидальный процесс, можно несколько упростить ее моделирование. При этом процесс остается близок к реальным условиям, благодаря этому можно оценить точность и время начальной подготовки инерциальной системы с помощью разрабатываемого алгоритма. Начальная выставка резервных приборов должна осуществляться не более чем за 60 с с точностью 0,5 град.

#### **4. Алгоритм начальной выставки на качающемся основании**

В настоящее время известно большое количество методов начальной выставки инерциальных систем на подвижном основании [3,5].

Опыт проектирования инерциальных систем показывает целесообразность использования в задаче начальной выставки фильтра Калмана, который представляет собой наиболее развитый и универсальный математический аппарат.

Преимуществом фильтра Калмана является то, что он представляет собой легко реализуемый на ЭВМ алгоритм, позволяющий формализовать процедуру решения уравнений оценки и обеспечивающий результаты параметров динамической системы близкие к оптимальным.

При проектировании алгоритма начальной выставки можно использовать прием аппроксимации коэффициентов фильтра Калмана простой функцией. Данный прием позволит избежать решения уравнения Риккати в реальном времени, ограничить число параметров, влияющих на процесс, сделать анализ выставки более простым и доступным.

Применительно к задаче начальной выставки алгоритм, реализующий дискретный фильтр Калмана, описан во многих работах отечественных и зарубежных авторов, но наиболее подробно схема работы фильтра описана в [5].

Для применения фильтра исследуемая система должна быть описана дискретными уравнениями состояния и измерений. Компонентами этих уравнений являются: вектор состояния  $X$ , вектор измерений  $Z$ , переходная матрица состояния  $\Phi$ , матрица измерений  $H$ , вектор возмущения  $W$ , вектор ошибок измерений  $V$ .

$$(4) \quad \begin{aligned} X_{k+1} &= \Phi_{k+1,k} \cdot X_k + W_k, \\ Z_{k+1} &= H_{k+1} \cdot X_{k+1} + V_{k+1}. \end{aligned}$$

Для проведения математического моделирования был разработан программный модуль, позволяющий исследовать характеристики алгоритма начальной выставки в зависимости от внутренних возмущений и характеристик движения объекта, на котором проводится выставка.

Для того, чтобы более наглядно отобразить реализуемый алгоритм, его можно представить в виде следующей структурной схемы, см. рис.2.

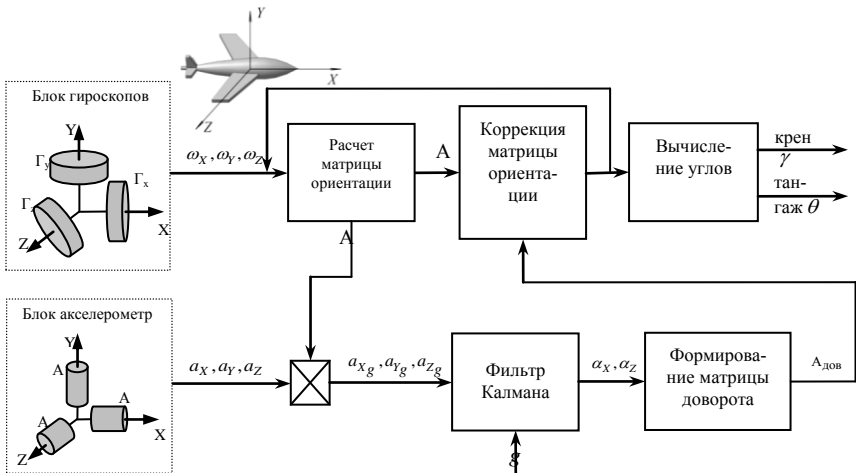


Рис. 2. Структурная схема алгоритма начальной выставки



Входными параметрами для данного программного модуля являются измерения БЧЭ. Показания гироскопов формируют матрицу ориентации корабля.

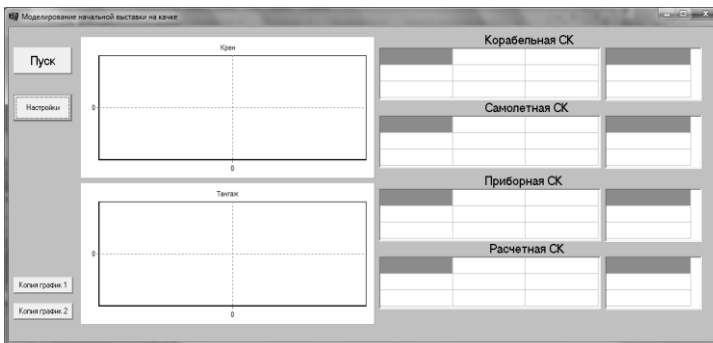
Показания акселерометров перепроектируем в географическую систему координат в соответствии с информацией, вырабатываемой при формировании матрицы ориентации.

Для оценки полученных ускорений в географической системе координат применяется фильтр Калмана, выявляющий ошибки ориентирования горизонтальных каналов путем сравнения указанных ускорений с эталоном, которым в данном случае выступает вектор ускорения силы тяжести  $g$ .

На основе выявленных фильтром помех формируется матрица доворота на величину этих ошибок. Затем получается переходная матрица от базовой системы координат к промежуточной и определяются искомые углы ориентации (крена и тангажа).

На основании разработанного алгоритма в среде программирования Borland C++ Builder была создана программа, включающая функции вычисления углов, формирования и последующей коррекции матриц ориентации и реализации работы фильтра Калмана, а также ее вариации для фильтра Калмана с постоянным коэффициентом.

На начальном этапе работы программы появляется главное окно – «Моделирование начальной выставки на качке», см. рис.3.



*Рис. 3. Главное окно программы*

В левой части окна отображаются поля для вывода графиков. В правой части окна можно наблюдать преобразования матриц ориентации системы координат и углов ориентации в ходе процесса моделирования. При нажатии на кнопку «Настройки», появляется окно настроек, см. рис.4., в котором осуществляется ввод числовых значений исходных данных, значений входных параметров, выбор способа фильтрации.

**Настройки**

**Откл. ЛА от точки вращения**

Rx, м: 30  
 Ry, м: 10  
 Rz, м: 15

**Угловая скор. корабля**

Амплитуда качки X: 1.2537  
 Амплитуда качки Y: 0  
 Амплитуда качки Z: 1.2537  
 Период качки X, с: 8  
 Период качки Y, с: 0  
 Период качки Z, с: 8

**Погрешность АКС**

НС по оси X, mg: 0  
 НС по оси Y, mg: 0  
 НС по оси Z, mg: 0  
 Ошибка МК X, %: 0  
 Ошибка МК Y, %: 0  
 Ошибка МК Z, %: 0

**Погрешность ДУС**

НС по оси X, гр/час: 30  
 НС по оси Y, гр/час: 30  
 НС по оси Z, гр/час: 30  
 Дисперсия шума X: 150  
 Дисперсия шума Y: 150  
 Дисперсия шума Z: 150  
 Ошибка МК X, %: 0  
 Ошибка МК Y, %: 0  
 Ошибка МК Z, %: 0

**Время**

Время моделирования, с: 180

**Фильтр Калмана**

R: 500.05  
 P: 0.0029  
 Q: 1000.000145

**Выбор фильтра**

☒ Фильтр Калмана  
☐ Фильтр Калмана с пост К

**Откл. самолета по курсу**

Ψ: 0

**Угол наклона приб. доски**

α: 0

**Начальный угол**

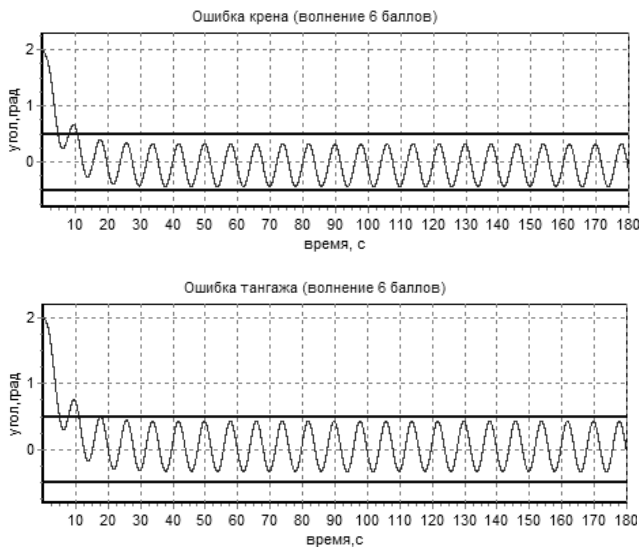
Крен: 2  
 Тангаж: 3  
 Курс: 0

**Сохранить**

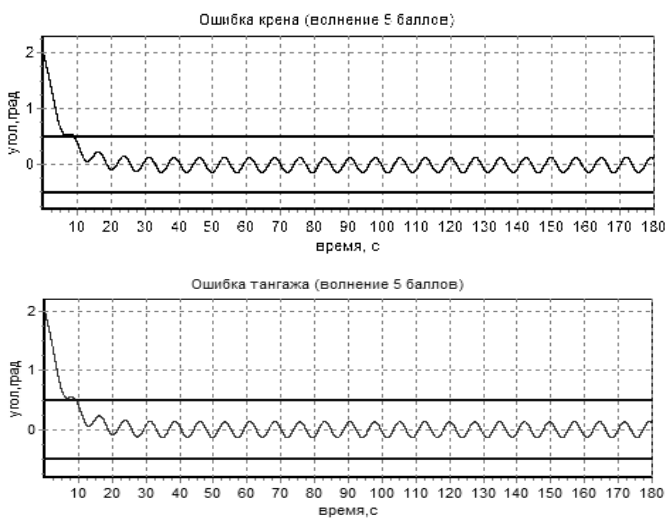
*Рис. 4. Окно настроек*

Исходными данными для процесса моделирования начальной выставки является качка судна, которая в данном случае принята с амплитудой 2 град. и периодом 8 с, что соответствует 6 баллам.

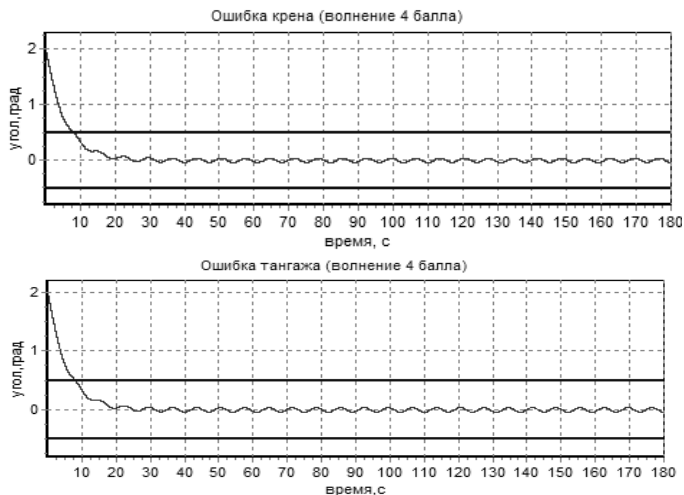
На рисунках 5 – 8 представлены результаты моделирования процессов начальной выставки при наличии качки корабля. При этом на рис.5 качка задана при волнении 6 баллов, на рис.6 – при волнении 5 баллов, на рис.7 – 4 балла, на рис. 8 – при 3 баллах. Горизонтальными линиями на рисунках указаны границы допустимых значений ошибок углов, то есть отклонения углов не должны выходить за пределы заданного интервала.



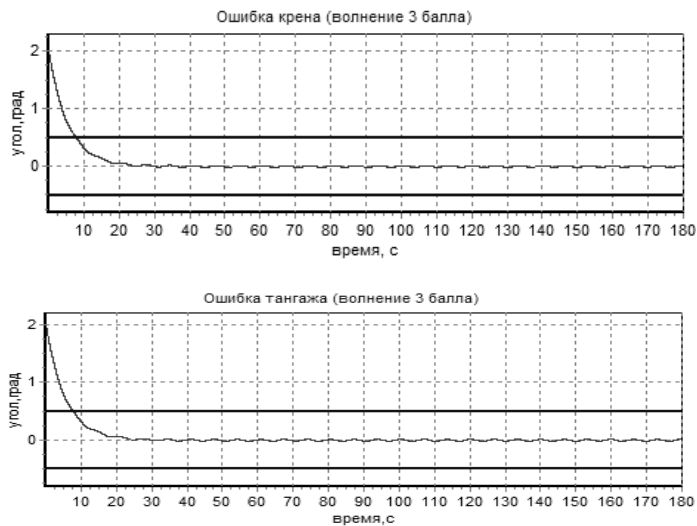
*Рис. 5. Моделирование процесса начальной выставки при волнении 6 баллов*



*Рис. 6. Моделирование процесса начальной выставки при волнении 5 баллов*



*Рис. 7. Моделирование процесса начальной выставки при волнении 4 балла*



*Рис. 8. Моделирование процесса начальной выставки при волнении 3 балла*

Из рисунков видно, что процесс выставки составляет 20 – 30 с. и не меняется в зависимости от волнения моря, амплитуда ошибки падает с 18 угл. мин (0,3 град.) при 6 баллах до 1,2 угл. мин (0,02 град.) при 3 баллах. Во всех случаях начальная выставка системы начинается с 2 град., радиус вектор нахождения объекта на носителе составляет [30; 10; 15]м. Тестирование разработанного программного модуля показало его работоспособность и пригодность для использования в реальных условиях.

### **Литература**

1. БРАНЕЦ В.Н., ШМЫГЛЕВСКИЙ И.П. *Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем* // М.: Наука, – 1992.
2. КУЗОВКОВ Н.Т., САЛЫЧЕВ О.С. *Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация* // М.: Машиностроение – 1982.
3. ЛИПТОН А. *Выставка инерциальных систем на подвижном основании* // М.: Наука, – 1971.
4. Ю.Л. МАКОВ. *Качка судов*. // Учебное пособие. К.:ФГОУ ВПО «КГТУ», – 2007.
5. В.В.МАТВЕЕВ, В.Я.РАСПОПОВ. *Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем* // СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, – 2009.
6. СЕРЕГИН В.В. *Прикладная теория и принципы построения гироскопических систем* // Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, – 2007.

### **ALGORITHM AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE INITIAL ALIGNMENT OF INERTIAL SYSTEM ON A ROCKING BASE**

**Irina Strelcova**, Arzamas Polytechnic Institute of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Arzamas, graduate (irina\_strelcova\_@list.ru).

**Tatyana Evart**, Arzamas Polytechnic Institute of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Arzamas, graduate (t.zhilina@bk.ru).

*Abstract: This paper describes the process of autonomous initial alignment of the orientation system, aimed at reducing the time of the preflight preparation of the aircraft inertial system, based on different types of ships. The analytical and computational algorithms required to implement the initial alignment based on the rocker. Mathematical modeling was carried out and analyzed the results of the software module.*

**Keywords:** inertial systems, initial alignment, strapdown system orientation.