

На правах рукописи
УДК 629.7.072.1



Хоанг Мань Тыонг

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ И УГОЛОВОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО
ПОДХОДА**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Лобусов Евгений Сергеевич,**
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Официальные оппоненты: **Бабиченко Андрей Викторович,**
доктор технических наук, профессор,
директор учебно-научного центра АО «РПКБ»

Егорова Валентина Петровна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник ФГУП ГОС НИИ
авиационных систем

Ведущая организация: ФГУП «Научно производственный центр
автоматики и приборостроения имени академика
Н.А. Пилюгина»

Защита состоится «04» октября 2016 года в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан «_____» 2016г.

Отзывы, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им Н.Э. Баумана, ученому
секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Муратов И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Измерение угловых параметров крупноразмерных и/или взаимного углового расположения объектов играет огромную роль в машиностроении и станкостроении. Результаты измерения можно использовать для проверки качества и выравнивания пространственного углового положения изделий в промышленности.

В технике возникают проблемы, связанные с точностью определения геометрических параметров объекта или технологического процесса. Недостаточная точность приводит, например, к возникновению дефекта обмотки, формированию морщин и складок полотна бумаги в бумажно-целлюлозных заводах вследствие непараллельности валов, возникновению износа и разрушения подшипников из-за непараллельности элементов привода и. др.

Для измерения угловых параметров и углового расположения изделий в настоящее время используются разнообразные средства, как например, оптический прибор, лазерный сканер, координатно-измерительная машина (КИМ), механические средства и др.

Однако применение указанных средств имеет следующие недостатки:

- при применении оптического прибора возникает необходимость в визуальном визировании, и трудоёмкость при установке, появляется потребность в многократных переустановках прибора, происходит существенное снижение точности измерения при неблагоприятных условиях наблюдения, а также большая трудоемкость и относительно высокая времененная длительность;
- при использовании лазерного сканера необходимо использовать дополнительный геодезический прибор для определения координат контрольных точек сканера. Кроме того, при применении лазерного сканера также возникает необходимость визуального визирования, точность измерения зависит от характеристик поверхности тела;
- применение КИМ характеризуется медленным перемещением измерительной руки с установленным зондом, а диапазон измерения не превышает 2-х метров, т.е. является ограниченным;
- при использовании механических средств качество отображения результатов измерений существенно хуже, ошибки измерений увеличиваются при наличии вибрации, отсутствует возможность проведения измерений больших по размерам изделий и появляется большая трудоемкость проведения процесса измерения совместно с большой временной продолжительностью и ограниченностью диапазона измерения.

Кроме того, общим недостатком существующих средств, указанных выше, являются необходимость переустановки измерительного устройства вследствие неоднородности окружающей среды, возникновения препятствий (переустановка измерительного устройства из одного положения в другое положение является причиной возникновения потери точности), ограниченность диапазона измерений. По этим причинам во многих случаях,

указанные средства не обеспечивают требуемую точность, особенно при больших линейных расстояниях.

В настоящее время, для повышения точности выравнивания параллельности цилиндрических валов на бумажно-целлюлозных фабриках немецкая компания разработала устройство Paralign, построенное на основе трех прецизионных лазерных гироскопов, однако, математическое описание и алгоритмы обработки данных не приводятся.

Таким образом, возникает потребность в создании и исследовании алгоритмического обеспечения устройства, с помощью которого обеспечивается определение геометрических параметров и углового расположения объектов с высокой точностью, обеспечивая при этом повышение качественных и количественных характеристик соответствующих технологических процессов; другими словами, потребность к разработке устройства, которое позволит существенно расширить круг задач и повысить качество функционирования различного рода производственных процессов и сложных изделий и объектов.

Объект исследования. В качестве объекта исследования в диссертации рассматривается переносной измерительный прибор (платформа, переносимая оператором), основным измерительным блоком которого являются датчики угловой скорости.

Предметом исследования служат математические модели, алгоритмы и численные процедуры, используемые в процессе анализа и разработки устройства, которое обеспечивает определение угловых параметров и углового расположения с высокой степенью точности.

Целью работы является разработка научно-обоснованных подходов и соответствующих алгоритмов для устройства, которое обеспечивает получение высокой степени точности измерения угловых параметров и углового расположения объекта инерциальными средствами.

Для достижения указанной цели потребовалось решить следующие научно-технические задачи:

- обосновать кинематический подход, служащий основной алгоритмического обеспечения переносной платформы с основным измерителем – датчиком угловой скорости;
- разработать базовый алгоритм определения геометрических параметров (угла при вершине и вектор направления центральной оси прямого кругового конуса), используя переносную измерительную платформу;
- разработать модификации базового алгоритма, расширяющие области применения предлагаемого устройства (для определения прогиба и построения центральной оси цилиндрического вала, контроля бомбированного вала, измерения овальности трубы, и т.д.);
- провести проверку предлагаемых алгоритмов, используя методы математического моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предлагается адаптация кинематического подхода, т.е. подхода, основанного на процедурах интегрирования кинематических уравнений

углового движения, к определению геометрических параметров и взаимного расположения различного рода технологических объектов;

2. Разработано алгоритмическое обеспечение кинематического подхода для переносного устройства, которое может решать широкий круг задач, связанных с контролем и настройкой технологических процессов с повышенной точностью;

3. Предложен способ и алгоритм генерации случайных сигналов, спектральная плотность которых содержит "пики" на различных частотах (такой вид спектральной плотности характерен для деятельности оператора переносного устройства) который используется на этапе отладки алгоритмического обеспечения переносной платформы.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенные в работе подход и соответствующие алгоритмы могут быть положены в основу разработки переносного устройства определения геометрических параметров и взаимного углового расположения объектов, обеспечивая широкое применение в промышленности.

Внедрение результатов работы

Предлагаемые алгоритмы планируются для создания устройства, которое обеспечивает определение и калибровку углового расположения валов для повышения эффективности производства на фирме “Бумага-Упаковка-Технология печати Тханг Лонг“ (Вьетнам).

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций:

1. XIX Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ–2013 (Нижний Новгород, 2013г);

2. XXXIX академических чтений по космонавтике (Москва, 2015г);

3. XL академических чтений по космонавтике (Москва, 2016г).

Публикации

Наиболее существенные положения и результаты диссертационного исследования нашли отражение в двух статьях в журналах перечня изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Объемом 2,26 п.л./1,13 п.л.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы и приложения. Общий объем 134 страниц, в том числе 66 рисунок и 2 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование кинематического подхода, т.е. подхода, основанного на интегрировании кинематических уравнений углового движения, для определения геометрических параметров и взаимного расположения различных рода технологических объектов и процессов обработки; Основным измерительным средством при реализации кинематического подхода являются датчики угловой скорости, которые широко используются на подвижных объектах различного класса для определения их ориентации в пространстве;

2. Алгоритмическое обеспечение для переносного устройства, разработанное на основе кинематического подхода и которое может решать широкий круг задач, связанных с контролем и настройкой технологических процессов с повышенной точностью;

3. Способ и алгоритм генерации случайных сигналов, спектральная плотность которых содержит "пики" на различных частотах, что характерно для деятельности оператора переносного устройства;

4. Программные имитаторы для моделирования основных этапов функционирования переносного устройства при проведении измерений и оценки эффективности предлагаемых алгоритмов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и основные задачи диссертации, определены научная новизна и практическая ценность работы, приведены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание содержания глав диссертации.

В первой главе дается особенности и функционирования некоторых важных и распространенных технологических процессов, для которых требуется повысить точность определения геометрических параметров.

Рассматриваются самые распространенные и важные технологические процессы, для которых требуется повысить точность определения геометрических параметров, как например, выравнивание параллельности цилиндрических валов на писчебумажных фабриках, контроль конусности изделия, определение овальности трубы и др.

Существование пространственных препятствий, ограниченность диапазона измерения используемых в настоящее время измерительных средств, большие размеры объектов являются причиной возникновения необходимости переустановок используемых измерительных средств из одного положения в другое положение в процессе проведения измерений. Кроме того, при применении имеющихся средств возникает явления потери точности измерений.

Для решения указанных проблем предлагается использовать кинематический подход, реализация которого осуществляется с помощью перемещаемой измерительной платформы. Предположительно, на основании данного подхода Немецкая компания разработала прибор Paralign с лазерными измерителями угловой скорости, позволяющий определять пространственное угловое положение валов на бумажно-целлюлозных фабриках. Однако математическое описание и алгоритмы обработки данных не приводятся (являются коммерческой тайной).

В целом, можно обоснованно считать, что использование данного подхода является перспективным вариантом для решения разнообразных задач в измерительной технике. В следующих главах приводятся математическое описание и алгоритмы обработки данных для некоторых самых распространенных задач в промышленности.

Во второй главе приводится математическое описание основных этапов функционирования работы и процесса обработки данных для определения угла при вершине и единичного вектора центральной оси на основании предлагаемого подхода. Материалы данной главы составляют базу для их последующей адаптации.

Процесс измерения можно разделить на три следующие этапы:

- *Первый этап:* Этап определения угловой скорости Земли. Интерес представляет только относительное угловое движение, так что следует на последующих этапах функционирования платформы компенсировать вектор угловой скорости вращения Земли.

На этом этапе платформа жестко фиксируется на опорном столе. С опорным столом связана опорная система координат СК₀ (x_0, y_0, z_0) (базис S), а с платформой – система координат платформы СКП (x, y, z) (базис В). При нахождении платформы на опорном столе оси системы координат платформы СКП (x, y, z) и опорного стола СК₀ (x_0, y_0, z_0) совпадают. В этом положении в течение определенного промежутка времени осуществляется обработка показаний векторного измерителя угловой скорости (ВИУС) для нахождения оценки вектора угловой скорости Земли. Данные такой обработки далее используются для устранения влияния вращения Земли.

Проекции вектора угловой скорости Земли ω_{\oplus}^S в осях системы координат платформы СКП (x, y, z) зависят от углов широты, азимута стола и определяются следующими соотношениями

$$\omega_x = U \cos \varepsilon \sin \varphi; \quad \omega_y = U \cos \varepsilon \cos \varphi; \quad \omega_z = U \sin \varphi \quad (1)$$

где U – модуль вектора угловой скорости Земли ($U=7,2921152 \cdot 10^{-5}$ рад/с), φ, ε – углы: широта и азимут опорной системы координат СК₀ (x_0, y_0, z_0).

- *Второй этап* – этап переноса платформы. Целью второго этапа является перенос платформы из исходного положения на опорном столе на поверхность технологического объекта. Для определения текущего углового положения платформы относительно опорной системы координат СК₀ (x_0, y_0, z_0) на этом этапе включается и используется процедура интегрирования кинематических уравнений сложного углового движения.

В процессе переноса угловое положение платформы относительно опорной системы координат можно характеризовать углами ψ, ϑ, γ в последовательности поворотов типа $2(\psi) - 3(\vartheta) - 1(\gamma)$, или матрицей направляющих косинусов A_s или компонентами нормированного кватерниона B_s .

Абсолютная угловая скорость платформы состоит из суммы двух составляющих – переносного движения, определяемого переносной угловой скоростью ω_{\oplus}^S , и относительного движения, определяемого угловой скоростью ω_r^A . Угловая скорость Земли рассчитывается на первом этапе.

Кинематическое уравнение углового движения платформы как сложного представляется в виде (см. главу 4)

$$\begin{aligned} 2\dot{\mathbf{B}}_I &= \mathbf{B}_I \circ \boldsymbol{\omega}_{ab}^B, \quad \mathbf{B}_s = (\tilde{\mathbf{S}}_I) \circ \mathbf{B}_I, \\ 2\dot{\mathbf{S}}_I &= \mathbf{S}_I \circ \boldsymbol{\omega}_{as}^S, \end{aligned} \quad (2)$$

символ \circ – знак кватернионного умножения; \sim – символ сопряженного кватерниона, \mathbf{I} – базис инерциальной системы координат (ИСК).

$\boldsymbol{\omega}_{ab}^B$, $\boldsymbol{\omega}_{as}^S$ – векторы абсолютных угловых скоростей вращения базисов связанной системы координат платформы СКП (x , y , z) и опорной системы координат СК₀ (x_0 , y_0 , z_0) соответственно.

\mathbf{B}_I , \mathbf{S}_I – кватернионы, определяющие положение базисов СКП, СК₀ относительно ИСК; \mathbf{B}_s – кватернион положения базиса СКП относительно СК₀.

- *Третий этап:* На этом этапе, так же как и на втором, угловое положение платформы непрерывно определяется относительно опорной системы координат СК₀ (x_0 , y_0 , z_0) процедурой интегрирования кинематических уравнений и оператор манипулирует положением платформы на поверхности тела без потери контакта. С помощью соответствующей обработки данных находятся геометрические параметры и пространственное положение объекта.

Процесс обработки данных для определения угла ϕ при вершине конуса

Рассмотрим задачу, которую можно считать наиболее общей.

Имеется некоторый прямой круговой конус (модель технологического объекта), который характеризуется углом при вершине ϕ ($\phi < \pi/2$) и единичным вектором направления \mathbf{e}_0 центральной оси Рис. 1.

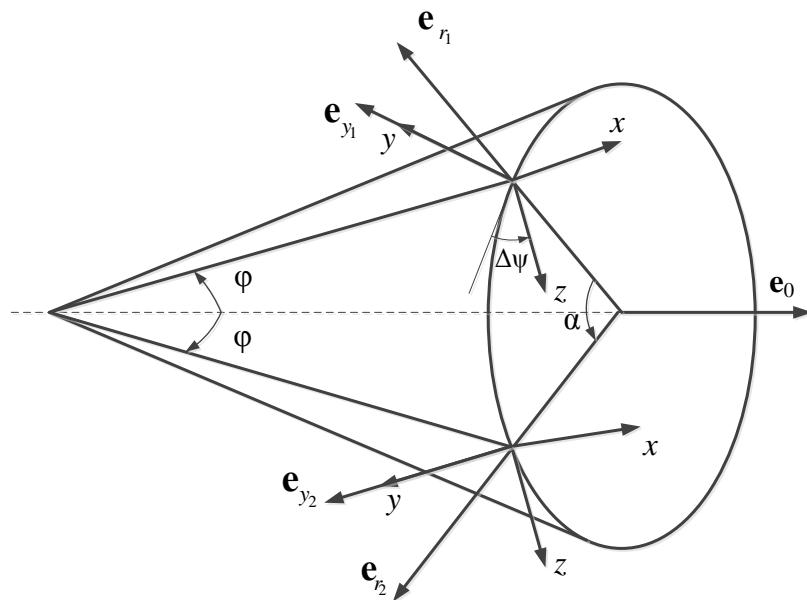


Рис. 1. Геометрические параметры прямого кругового конуса

Процесс обработки данных начинается с момента установки платформы (ее плоскости) на поверхность конуса (начальное положение Π_1). В процессе проведения измерений оператор перемещает платформу по поверхности конуса вокруг его центральной оси. В каждом положении платформы посредством цифровой обработки определяется текущее значение скалярного и векторного

произведений единичного вектора \mathbf{e}_{y_1} (начальное положение Π_1) и текущего вектора \mathbf{e}_{y_2} (текущее положение Π_2).

Для определения угла при вершине используется свойства скалярного и векторного произведения вертикальных векторов платформы в процессе скольжения платформы по поверхности конуса.

Выделим два положения Π_1 (начальное) и Π_2 (текущее) платформы на поверхности прямого кругового конуса. В каждом положении Π_1 и Π_2 платформы, соответствующие оси y_1 и y_2 перпендикулярны образующим конуса, а угловое расстояние между плоскостями, в которых находятся вертикальные оси равно α .

Разложим единичный вектор \mathbf{e}_{y_i} оси y_i на две составляющих – по направлению единичного вектора центральной оси конуса \mathbf{e}_0 и по направлению соответствующего единичного радиус-вектора \mathbf{e}_r .

$$\mathbf{e}_{y_i} = -\mathbf{e}_0 \sin \phi + \mathbf{e}_r \cos \phi, i=1,2$$

где ϕ – угол при вершине конуса.

Значение скалярного произведения S двух векторов \mathbf{e}_{y_1} и \mathbf{e}_{y_2} равно

$$(\mathbf{e}_{y_1}, \mathbf{e}_{y_2}) = S = \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos \alpha$$

Норма (модуль) вектора $[\mathbf{e}_{y_1}, \mathbf{e}_{y_2}]$ равен

$$V = \cos \phi \sqrt{\cos^2 \phi \sin^2 \alpha + 2 \sin^2 \phi (1 - \cos \alpha)}$$

Полученные вектора \mathbf{e}_{y_i} позволяют определить значение (S) скалярного и модуль вектора (V) векторного произведения. С помощью нахождения экстремальных значений скалярного значения (S) и модуля вектора (V) векторного произведения находится угол при вершине конуса.

На Рис. 2 показана зависимость скалярного и модуля векторного произведений от угла α .

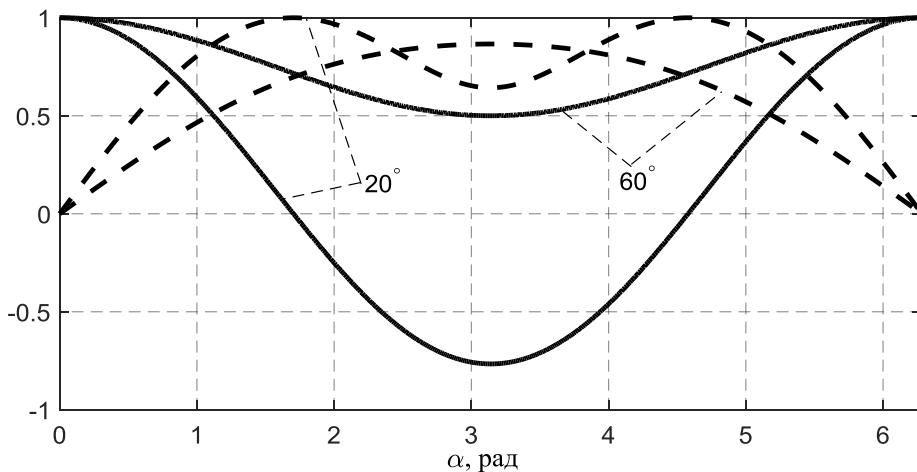


Рис. 2. Зависимость скалярного (сплошная) и модуля векторного произведений (пунктир) от угла α при конусности $\phi = 20^\circ$ и 60°

Таким образом, знание скалярного и векторного произведений позволяет вычислить значение угла ϕ . Именно для этой цели осуществляется

перемещение измерительной платформы по поверхности конуса на угол $\alpha = 180^\circ$, что определяется по экстремальной величине векторного произведения (окрестность значения равного $\sin 2\phi$), фиксируемой в процессе поворота, или скалярного произведения (окрестность значений – $\cos 2\phi$).

Для нахождения экстремума разработан соответствующий алгоритм.

Точность измерения, в общем случае, зависит от самого предполагаемого значения угла при вершине конуса ϕ , поэтому можно выделить предпочтительные диапазоны по измеряемому углу ϕ .

Следует отметить следующий важный факт. Так как для вычисления положения векторов используется процедура интегрирования кинематических соотношений, то следует обращать внимание на точность выбранной процедуры интегрирования, в данном случае, на получение значения нормы равной 1.

Процесс обработки данных для определения направления центральной оси конуса. Полученное значение угла при вершине конуса позволяет определить положение платформы на поверхности конуса, при котором значение угла α равно $0, \pi/2, \pi$ и $3\pi/2$ и соответственно единичные векторы e_{y_1} , e_{y_2} , e_{y_3} и e_{y_4} .

Однако, в общем случае, не обязательно придерживаться ситуации, когда имеются 4 вектора, повернутые друг относительно друга на 90° .

Вполне достаточно иметь две пары векторов, которые сдвинуты друг от друга на угол приблизительно равный 90° , что и отражено на Рис. 3. В этом случае не требуется оценивать угол конусности ϕ !

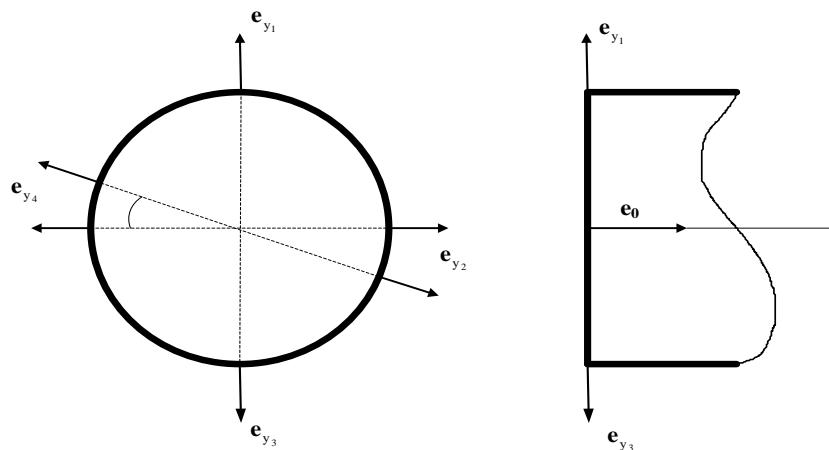


Рис. 3. Определение направления центральной оси конуса

Знание векторов $e_{y_1}, e_{y_2}, e_{y_3}$ и e_{y_4} (Рис. 4) позволяет образовать попарные разности и образовать векторное произведение двух разностных векторов [$e_{y_3} - e_{y_1}, e_{y_4} - e_{y_2}$]. Тем самым, после простейшей обработки определяется единичный вектор центральной оси конуса e_0 .

Изложенный подход по определению параметров прямого кругового конуса имеет важное преимущество. Возникающие вращения $\Delta\phi$ вокруг вертикальной оси платформы y , вызванные деятельностью оператора, не влияют на положение этой оси!.

Этот факт позволяет обеспечить точность проводимых измерений, т.е. существенно ослабить влияние возмущающих действий оператора на конечный результат.

В третьей главе проводится выбор основного измерительного средства и составление математической модели векторного измерителя угловой скорости (ВИУС).

Выходной сигнал ВИУС имеет вид

$$\hat{\omega} = (\mathbf{I} + \mathbf{D}_{k\delta}) \cdot (\mathbf{A}_e \boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega}_{dp}) + \mathbf{w}(t),$$

где \mathbf{I} – единичная матрица, $\boldsymbol{\omega}_{dp}$ – вектор дрейфа ВИУС, $\mathbf{D}_{k\delta}$ – матрица характеризует вариацию передаточного коэффициента, \mathbf{A}_e – матрица характеризует погрешность углового расположения осей чувствительности, $\mathbf{w}(t)$ – случайная составляющая.

Естественно, что указанные собственные погрешности измерителя сказываются на окончательных результатах обработки. По этой причине предварительно *обязательно* производится операция калибровки ВИУС с целью получения оценок погрешностей и их последующей алгоритмической компенсации.

Однако для лазерного гироскопа, который выбран после проведенного обзора в качестве основного измерительного средства платформы, существенным является импульсная работа. Отсюда математическая модель ВИУС, используемая в процессе моделирования, учитывает только импульсный характер функционирования ВИУС, хотя всегда может включить и отмеченные виды погрешностей.

Выходным сигналом ВИУС выступает приращение вектора кажущегося поворота $\nabla \hat{\theta} [\nabla \hat{\theta}_1^* \quad \nabla \hat{\theta}_2^* \quad \nabla \hat{\theta}_3^*]$ равно

$$\nabla \hat{\theta}(i) = \hat{\theta}(t_i) - \hat{\theta}(t_{i-1}),$$

где $\hat{\theta} = \frac{1}{k_0} \text{entier} \left\{ k \int_0^t \hat{\omega} dt \right\}$, $t_i = i \Delta t$, $i=1,2,\dots$ и, k_0 – расчетное значение

коэффициента, k – реально существующее значение коэффициента ($k_0 \approx k$) а оператор entier соответствует операции нахождения целого, Δt – выбранный такт, $\hat{\omega}$ – оценка вектора угловой скорости ($\hat{\omega} \equiv \boldsymbol{\omega}$).

На Рис. 4 показана блок-схема дискретной модели ВИУС, использованная при моделировании.

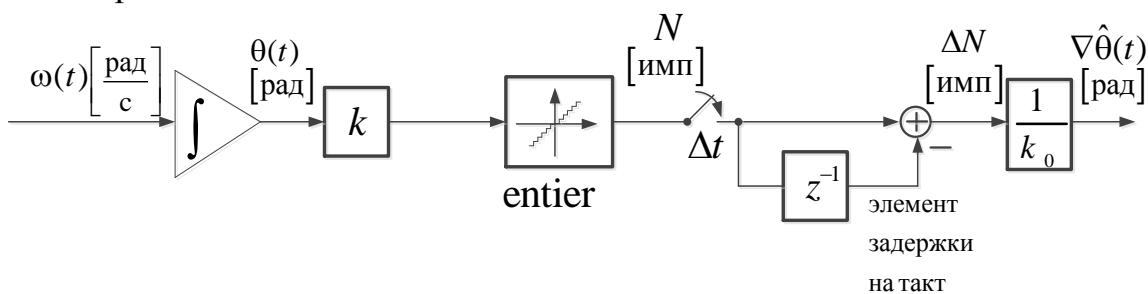


Рис. 4. Блок-схема дискретной модели ВИУС

Отчетливо видно, что приведенная модель может явно учесть погрешность по передаточному коэффициенту; для этого просто следует выполнить условие $k_0 \neq k$. Другие виды погрешности должны быть добавлены отдельно, если их влияние считается существенным.

В четвертой главе рассматриваются различные формы кинематических уравнений углового движения (конкретно две формы), которые используются в диссертационной работе и приводятся алгоритмы интегрирования кинематических уравнений для одной из них, выбранной в качестве основной (см. уравнения (2)).

Форма кинематических уравнений с использованием нормированных кватернионов широко распространена в настоящее время, что объясняется, в первую очередь, минимальной избыточностью задания углового положения. В дальнейшем именно эта форма и будет являться основной.

Кинематические уравнения с использованием нормированных кватернионов

Процедура интегрирования исходных дифференциальных уравнений (2) записывается в виде

$$\begin{cases} \mathbf{B}_I|_m = \mathbf{B}_I|_{m-1} \circ \mathbf{N}_B|_m = \mathbf{B}_I|_0 \circ \mathbf{N}_B|_1 \circ \mathbf{N}_B|_2 \circ \dots \mathbf{N}_B|_m \\ \mathbf{S}_I|_m = \mathbf{S}_I|_{m-1} \circ \mathbf{N}_S|_m = \mathbf{S}_I|_0 \circ \mathbf{N}_S|_1 \circ \mathbf{N}_S|_2 \circ \dots \mathbf{N}_S|_m \end{cases},$$

где $\mathbf{N}_B|_m$, $\mathbf{N}_S|_m$ соответствующие приращения на шаге интегрирования для кватернионов $\mathbf{B}_I|_m$, $\mathbf{S}_I|_m$, определяющие текущее положение СК₀ и СКП в инерциальном пространстве.

Интегрирование уравнения для переносного движения, происходящего с медленнomenяющейся скоростью ω_{as}^s на шаге, выполняется аналитически. В этом случае

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_I|_m &= \mathbf{S}_I|_{m-1} \circ \left\langle \cos \frac{\nabla \chi^s}{2}, \frac{\nabla \chi_1^s}{\nabla \chi^s} \sin \frac{\nabla \chi^s}{2}, \frac{\nabla \chi_2^s}{\nabla \chi^s} \sin \frac{\nabla \chi^s}{2}, \frac{\nabla \chi_3^s}{\nabla \chi^s} \sin \frac{\nabla \chi^s}{2} \right\rangle, \\ \nabla \chi^s &= \|\omega_{as}^s\| (t_m - t_{m-1}), \\ \frac{\nabla \chi^s}{\nabla \chi^s}|_m &= \frac{\omega_{as}^s}{\|\omega_{as}^s\||_m}, \\ \mathbf{N}_S|_m &= \left\langle \cos \frac{\nabla \chi^s}{2}, \frac{\nabla \chi_1^s}{\nabla \chi^s} \sin \frac{\nabla \chi^s}{2}, \frac{\nabla \chi_2^s}{\nabla \chi^s} \sin \frac{\nabla \chi^s}{2}, \frac{\nabla \chi_3^s}{\nabla \chi^s} \sin \frac{\nabla \chi^s}{2} \right\rangle. \end{aligned}$$

Таким образом, при выбранной структуре кинематических уравнений (2) оказывается возможным выбрать различные значения шагов интегрирования для определения положения платформы (кватернион $\mathbf{B}_I|_m$) и положения опорной системы координат (кватернион $\mathbf{S}_I|_m$) в ИСК. Тем самым, экономится время на проведения вычислений.

В качестве основного метода интегрирования выбран неявный метод 1-го порядка. Он не требует больших вычислительных затрат и обеспечивает, как следует из проведенных исследований, достаточно хорошую точность.

Воспользовавшись методом трапеций при вычислении интеграла и при кусочно-постоянной аппроксимации для абсолютной угловой скорости возникает вычислительная процедура следующего вида

$$\hat{\mathbf{N}}_B|_i = (\mathbf{1} + \frac{\nabla\hat{\theta}_i}{4}) \circ (\mathbf{1} - \frac{\nabla\hat{\theta}_i}{4})^{-1}, \quad (3)$$

где $\nabla\hat{\theta}_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \hat{\omega}_{aB}^B(\tau) d\tau$ – угол кажущегося поворота на шаге интегрирования.

Рассчитанный кватернион, что важно отметить, уже является нормированным; это непосредственно следует из выражения (3).

В пятой главе проведена отработка этапов функционирования в процессе определения геометрических параметров и углового расположения прямого кругового конуса.

В соответствии с принятым кинематическим подходом следует иметь имитатор, который создает угловую скорость движения переносимой платформы. Движение платформы, в общем случае, состоит из двух составляющих – детерминированной и случайной.

Детерминированная составляющая движения платформы планируется предварительно и зависит от расположения измеряемого объекта по отношению к опорному столу. Ее аналитическое выражение зависит от выбранной траектории движения (переноса) платформы и получение этого выражения не составляет большой трудности.

Случайная составляющая определяется деятельностью оператора при переносе платформы и перемещении платформы по поверхности объекта и требует более внимательного изучения и последующей алгоритмической реализации.

Предварительное исследование деятельности оператора показало, что к детерминированной составляющей его деятельности добавляется еще случайная компонента. Как следствие, на результирующей спектральной плотности отражается существование, как непрерывной зависимости, так и возникновение "пика" на некоторой частоте.

Из такого рассмотрения возникает потребность в генерации случайного сигнала со спектральной плотностью, содержащей "пиковые" составляющие.

В работе показывается, что произвольная спектральная плотность стационарного процесса может быть аппроксимирована суммой спектральных плотностей, соответствующих базовым функциям вида

$$f(t) = \sum_{i=1}^n (\beta_i(t) \sin(\omega_{cm_i} t + \varphi_i) + \gamma_i(t) \cos(\omega_{cm_i} t + \varphi_i)), \quad (4)$$

где $\gamma_i(t)$ и $\beta_i(t)$ два независимых случайных процесса кусочно-линейного типа, ординаты которых получаются от двух независимых генераторов случайных величин с некоторым временным тактом и имеющими одинаковые

статистические характеристики; ω_{cm_i} – частота смещения i -ой базовой функции, а ϕ_i – случайно выбранная фаза из диапазона $[0, 2\pi]$.

Спектральная плотность базовой функции хорошо соответствует равнобедренному "треугольнику" и по этой причине выражение (4) может быть использовано для аппроксимации спектральной плотности достаточно произвольного вида.

Данный подход имеет то преимущество по сравнению с использованием формирующих фильтров, что отсутствует переходный процесс. Кроме того, в общем случае при использовании формирующих фильтров возникают сложности с его синтезом при наличии многих "пиков" в спектральной плотности, а порядок получаемой модели при этом может быть достаточно большим.

Отработка этапа определения вектора угловой скорости Земли

Для отработки данного этапа используется модель векторного измерителя угловой скорости, в которой учитывается особенности работы лазерных гироскопов. Так как выходной сигнал векторного измерителя угловой скорости (ВИУС) является импульсным, то происходит его усреднение на увеличивающемся интервале времени.

Для моделирования этого этапа следует задать местное положение опорного стола широту ϕ , азимут ϵ и углы ориентация ψ_0 , γ_0 , ϑ_0 эталонной системы координат СК₀ (x_0 , y_0 , z_0). По этим исходным данным рассчитываются эталонные значения угловой скорости Земли.

Погрешность оценки угловой скорости можно определить как корень квадратный из суммы квадратов составляющих погрешностей проекций угловой скорости в осях опорной системы координат СК₀ (x_0 , y_0 , z_0)

$$\delta\omega = \sqrt{(\hat{\omega}_{x0} - \omega_{x0})^2 + (\hat{\omega}_{y0} - \omega_{y0})^2 + (\hat{\omega}_{z0} - \omega_{z0})^2}$$

На Рис. 5. приведены результаты моделирования рассматриваемого этапа при значении углов широта и азимут соответственно равно $\phi = 60^\circ$ и $\epsilon = 30^\circ$, углы ориентация ψ_0 , γ_0 , ϑ_0 равны нулю. Для получения оценки угловой скорости используется алгоритм усреднения на увеличивающемся промежутке времени.

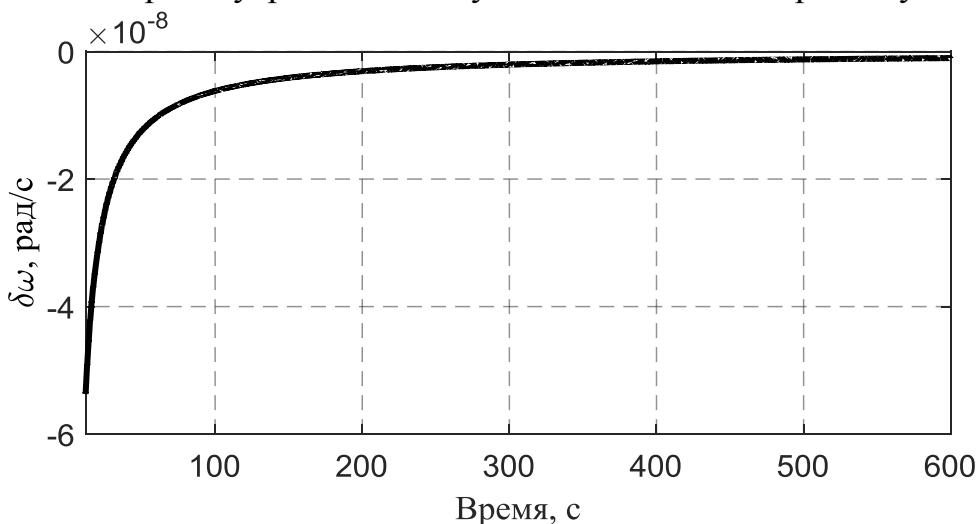


Рис. 5. Погрешность оценки угловой скорости Земли

Результат моделирования показывает, что точность оценки угловой скорости Земли повышается, естественно, при увеличении времени усреднения.

Отработка этапа переноса измерительной платформы

В процессе переноса углы ориентации платформы в последовательности поворотов 2–3–1 вычисляются по формулам

$$\psi(t) = \frac{\pi}{900} t + \psi_{\text{сл}}(t); \quad \vartheta(t) = \vartheta_{\text{сл}}(t); \quad \gamma(t) = \gamma_{\text{сл}}(t),$$

где $\psi_{\text{сл}}(t)$, $\vartheta_{\text{сл}}(t)$, $\gamma_{\text{сл}}(t)$ – случайные составляющие углового движения платформы.

Для определения углового положения измерительной платформы используется процедура интегрирования (2). Точность получаемого решения оценивается в виде кватерниона с помощью следующего соотношения:

$$\delta\lambda = \tilde{\mathbf{B}}_s \circ \hat{\mathbf{B}}_s$$

где \mathbf{B}_s – эталонное решение в виде кватерниона; $\hat{\mathbf{B}}_s$ – решение в виде кватерниона, полученное с использованием оцениваемого алгоритма; \sim – символ сопряжения.

На Рис. 6 показаны результаты моделирования процесса переноса

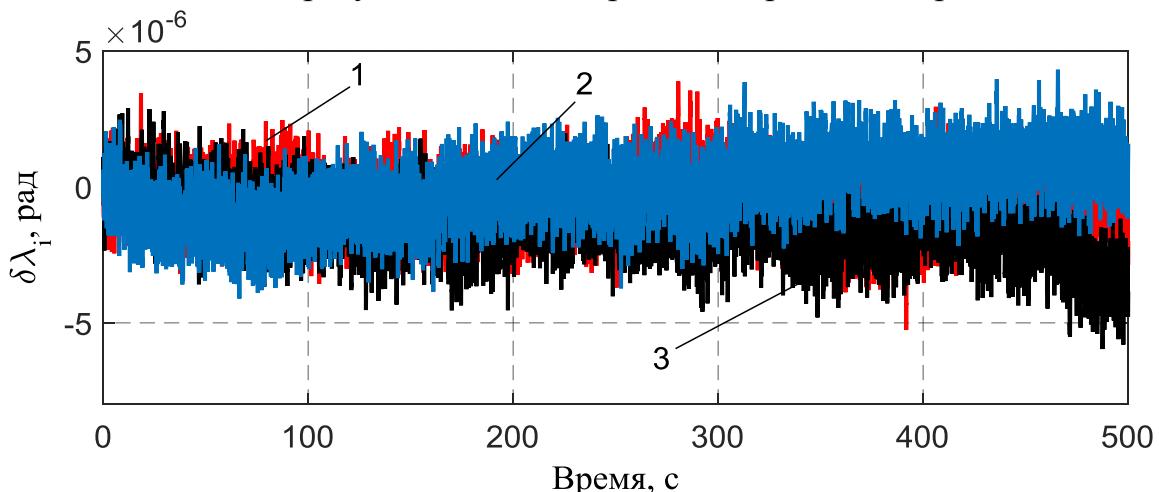


Рис. 6. Изменение угловой погрешности в кватернионом виде
(1 – $\delta\lambda_1$; 2 – $\delta\lambda_2$; 3 – $\delta\lambda_3$)

Полученные результаты моделирования показывают, что точность определения углового положения измерительной платформы в порядке $5 \cdot 10^{-6}$ (рад)

Отработка этапа проведения измерения геометрических параметров конуса

Результаты моделирования при следующих условиях:

МНК между опорной СК₀ и начальноориентированной СКНО системами координат равна $\mathbf{A}_{30} = [0,9998 \quad 0,0175 \quad 0; -0,0175 \quad 0,9998 \quad 0; 0 \quad 0 \quad 1]^T$;

Имитируется случайный характер изменения угла $\Delta\psi$;

Вращение вокруг оси конуса по закону $\alpha = \frac{\pi}{120}t + \alpha_{cl}$, α_{cl} – случайный сигнал;

Угловая установка платформы на конусе: начальный угол $\Delta\psi = 0^\circ$, начальный угол $\alpha = 0^\circ$;

Направление единичного вектора центральной оси конуса

$$\mathbf{e}_0 = [0.987688340595138; -0.156434465040231; 0]^T.$$

Результаты отработки этапа проведения измерения при $\varphi = 0.15707963 (9^0)$:

– Оценка угла при вершине $\hat{\phi} = \frac{\arcsin(\hat{V}_{min})}{2} = 0.15707070 rad$;

– Погрешность оценки угла при вершине $\delta\phi = 8.9 \cdot 10^{-6} rad$;

– Оценка единичного вектора \mathbf{e}_0 оси конуса

$$\hat{\mathbf{e}}_0 = [0.987688321770122; -0.156434583891384; -0.000001284317495]^T;$$

– Погрешность оценки единичного вектора \mathbf{e}_0 оси конуса

$$\delta\mathbf{e}_0 = 1.0e-006 \cdot [-0.019; -0.019; -1.284]^T.$$

В шестой главе показываются возможности применения переносной платформы. Изложенный в предыдущих главах подход к решению конкретной задачи – определение геометрических параметров и ориентации в пространстве прямого кругового конуса с помощью переносной измерительной платформы, снабженной датчиками угловой скорости – оказывается перспективным вариантом и для решения других самых разнообразных практических задач.

а) Определение овальности трубы

Детальное представление положения измерительной платформы на поверхности трубы в точке T показано на Рис. 7.

где a и b – соответственно большая и малая полуоси эллипса трубы, xuz – система координат, связанная с местом расположения измерительного прибора (ось x в идеале направлена по продольной оси трубы). Любое положение измерительной платформы в точке T на трубе характеризуется углами γ и $\Delta\psi$.

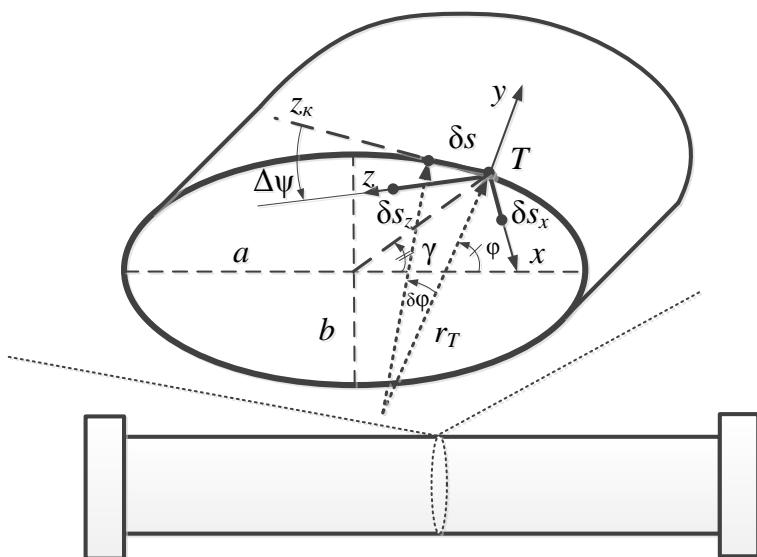


Рис. 7.

В окрестности точки T совершаются малые перемещения устройства. Тогда можно записать следующие соотношения

$$r_T \delta\varphi = \delta s,$$

где δs , $\delta\varphi$ – линейное и угловое перемещение по поверхности трубы в плоскости сечения, r_T – радиус кривизны.

При скольжении платформы по поверхности трубы угловое перемещение $\delta\varphi_i$ в окрестности точки T_i определяется по формуле

$$\delta\varphi_i = \arcsin(\left\| [\mathbf{e}_{y_i}, \mathbf{e}_{y_{i+1}}] \right\|),$$

где \mathbf{e}_{y_i} и $\mathbf{e}_{y_{i+1}}$ – единичные вектора вдоль вертикальной оси платформы в моменты времени t_i и $t_i + \Delta t$ (Δt – шаг дискретизации).

Для определения линейного перемещения δs можно использовать различную аппаратуру, например, оптические сенсоры, датчик угла, мерная лента и.др. Для обеспечения получения высокой точности предлагается использование мерной ленты для определения линейного перемещения. В этом случае, следует обернуть трубу мерной лентой с нанесенными на ней рисками с известной дискретностью по расстоянию Δ . Перемещая платформу по поверхности трубы производится считывание проходящих рисок и текущее интегрирование кинематических соотношений углового движения. Это дает возможность определять в текущем времени $\delta\varphi$ и δs , а, следовательно, и текущий радиус кривизны r_T .

Из полученной совокупности значений радиусов кривизны находятся максимальное и минимальное значения (r_{min} и r_{max}); знание r_{min} и r_{max} теперь позволяет определить значения малой и большой полуосей.

$$b^3 = r_{max} r_{min}^2 \text{ и } a = \frac{b^2}{r_{min}}$$

Полученные значения a и b теперь позволяют определить овальность ε трубы по формуле

$$\varepsilon = 2(a - b)$$

Естественно, что угловое перемещение платформы должно быть таким, чтобы оно захватывало максимальное и минимальное значения радиусов кривизны.

Можно предложить еще много других применений переносной платформы как, например, для определения прогиба и положения оси вала, для юстировки положения панелей антенны радиотелескопа и.др. Некоторые из них изложены в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1) Предложено использование кинематического подхода для определения угловых параметров и взаимного углового расположения пространственных объектов. В основе кинематического подхода лежит процедура интегрирования уравнений углового движения переносной платформы.

2) Разработано алгоритмическое обеспечение и выбраны измерительные средства, реализующие кинематический подход и проведено исследование алгоритмов, которое подтвердило работоспособность предлагаемых алгоритмических решений.

3) Предложен метод генерации стационарных случайных сигналов как суммы элементарных случайных процессов вида $\beta(t).\sin(\omega_{cm}t+\phi) + \gamma(t).\cos(\omega_{cm}t+\phi)$, где $\beta(t)$ и $\gamma(t)$ – кусочно-линейные функции. Такой подход позволяет легко учесть наличие “пиковых” (колебательных) составляющих – свойственных работе оператора, и не имеет переходных процессов, что свойственно использованию формирующих фильтров.

4) Разработаны имитаторы, позволяющие отработать разнообразные алгоритмические варианты реализации и оценить возможность их применения в различных реальных ситуациях.

5) Отчетливо просматривается адаптация предлагаемого кинематического подхода для решения других задач (геометрического типа), связанных с повышением качества существующих и планируемых технологических процессов.

ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- 1. Лобусов Е.С., Фомичев. А.В., Хоанг Мань Тыонг.** Использование инерциальных средств для определения углового пространственного положения цилиндрических тел// XIX Международной научно-технической конференции “ Информационные системы и технологии ” (ИСТ-2013) VI Международного форума информационных технологий “IT FORUM 2020 / ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ”. Нижний Новгород 2013г. С. 305. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).
- 2. Лобусов Е.С., Фомичев. А.В., Хоанг Мань Тыонг.** Расширение области применения инерциальных измерительных средств // Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва 2015. С. 426-427. С. 426-427. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).
- 3. Лобусов Е.С., Хоанг Мань Тыонг.** Выбор схемы интегрирования кинематических уравнений углового сложного движения//Сборник тезисов XL академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва 2016. С 376. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).
- 4. Лобусов Е.С., Хоанг Мань Тыонг.** Использование средств инерциальной навигаций для определения ориентации в пространстве и угла при вершине прямого кругового конуса. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №3. С.211-216. (0,7 п.л./0,35 п.л.).
- 5. Лобусов Е.С., Хоанг Мань Тыонг.** Генерирование случайных воздействий при исследовании устройств и систем управления. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия приборостроение. 2016. №3. С.103-114. (0,96 п.л./0,48 п.л.)