

## ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ

©2018

- Л. В. Водичева** старший научный сотрудник;  
НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)
- Л. Н. Бельский** кандидат технических наук, заместитель генерального директора – первый заместитель генерального конструктора по ракетно-космической технике;  
НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)
- Ю. В. Парышева** кандидат физико-математических наук, начальник группы;  
НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)
- А. А. Лыццов** инженер-конструктор 1 категории;  
НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)

Рассматривается бесплатформенный инерциальный измерительный блок (БИИБ) со структурной избыточностью, предназначенный для повышения отказоустойчивости и точности БИНС для изделий ракетно-космической техники. БИИБ включает шесть датчиков угловой скорости и шесть акселерометров, что позволяет для датчиков каждого типа с высокой вероятностью диагностировать и парировать одну неисправность и с более низкой вероятностью – две неисправности. Приведены известные теоретические и практические технические решения в этой области. Рассматривается задача оптимизации ориентации измерительных осей; критерием оптимизации является точность оценки проекций измеряемого вектора в ортогональной приборной системе координат. Приводится решение задачи в условиях отсутствия неисправностей, одной неисправности и двух неисправностей. Анализируются алгоритмы контроля, диагностики и парирования неисправностей (КДПН). Рассматриваются результаты тестирования базовых алгоритмов КДПН, проведённого с помощью математического моделирования. Приводится сравнение полученных оптимальных конфигураций измерительных осей с точки зрения эффективности диагностики. Показано, что ни один из методов не даёт 100-процентной правильной диагностики не только для двух, но и для одной неисправности. Анализируются возможные причины неправильной диагностики.

*Бесплатформенный инерциальный измерительный блок; структурная избыточность; контроль; диагностика и парирование неисправностей.*

---

*Цитирование:* Водичева Л.В., Бельский Л.Н., Парышева Ю.В., Лыццов А.А. Инерциальные измерительные блоки перспективных изделий ракетно-космической техники: обеспечение отказоустойчивости // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 28-44.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-28-44

### Введение

Одним из основных требований к системам управления изделий ракетно-космической техники является повышение надёжности и обеспечение работоспособности при наличии одной либо двух возможных неисправностей. Классическим способом повышения надёжности и обеспечения отказоустойчивости является использование избыточности.

В части инерциальных измерительных блоков это означает введение в их структуру избыточных измерителей, находящихся в «горячем» резерве. Выделяют три основных способа резервирования [1]:

- 1) резервирование на уровне одноосных измерителей;

2) резервирование на уровне избыточной инерциальной измерительной системы (неизбыточного бесплатформенного инерциального измерительного блока, включающего три датчика угловой скорости (ДУС) и три акселерометра, либо гиросtabilизированной платформы с установленными на ней акселерометрами);

3) резервирование на основе структурной избыточности, при которой оси чувствительности датчиков, установленные в общем случае неортогонально друг к другу, образуют единый измеритель вектора.

Наиболее эффективной с точки зрения габаритно-массовых характеристик и стоимости является структурная избыточность. В частности, для обеспечения работоспособности при одной возможной неисправности (ОВН) в первых двух случаях требуется девять датчиков одного типа, тогда как при структурной избыточности достаточно пяти [2].

Общей тенденцией развития инерциальных навигационных систем (ИНС) является переход к бесплатформенным ИНС (БИНС), которые имеют преимущества в надёжности, технологичности, прочности, стоимости, габаритах, массе, меньшей чувствительности к перегрузкам. Дополнительным преимуществом БИНС является возможность обеспечения отказоустойчивости за счёт структурной избыточности.

Обеспечение отказоустойчивости при ОВН рассматриваются в работе применительно к бесплатформенному инерциальному измерительному блоку (БИИБ) на базе шести ДУС и шести акселерометров. Выбор БИИБ с шестью осями обусловлен тем, что по сравнению с пятиосным БИИБ введение дополнительной измерительной оси существенно влияет на габаритно-массовые характеристики и стоимость, позволяя при этом гарантированно диагностировать один неисправный датчик и с относительно большой вероятностью – два неисправных датчика.

Создание избыточных отказоустойчивых БИИБ требует решения ряда задач. В работе рассмотрены две из них: первая – определение ориентаций осей чувствительности измерителей, оптимальных с точки зрения точности и эффективности диагностики, и вторая – построение эффективных алгоритмов контроля, диагностики и парирования неисправностей (КДПН).

Использование структурной избыточности при измерении векторов угловой скорости и линейного ускорения для обеспечения отказоустойчивости и повышения надёжности системы стало самостоятельной задачей разработки БИНС, начиная с 60-х годов прошлого века. Работы [3-8], опубликованные в 70-х годах, опирались на более ранние работы 60-х годов. Они были посвящены конкретным системам с заданным числом и типом датчиков и с заданной конфигурацией их измерительных осей. Рассматривались, в основном, системы с шестью измерительными осями, что позволяло идентифицировать одновременно две возможные неисправности и обнаружить наличие трёх и более неисправностей.

Параллельно вопросы использования избыточности рассматривались в более общей постановке. Одним из направлений таких исследований была функциональная диагностика и поиск дефектов в различных технических системах [9]. В [1] вопросы оптимального использования избыточности рассматриваются применительно к системам управления летательных аппаратов.

Фундаментальный подход к проблеме оптимизации ориентации измерительных осей применяется в работе [10]. Использование методов теории планирования эксперимента позволило найти условия оптимальности и построить множества оптимальных конфигураций при произвольном количестве измерительных осей. Позже другим путём были получены те же условия оптимальности для произвольного числа измерительных осей и найдены их оптимальные конфигурации [11].

В настоящее время исследования в этой области продолжают, например [12-15]. Продолжается и практическое внедрение избыточных инерциальных систем, например [16]. Вопросы создания избыточных БИНС для перспективных систем управления прорабатывались в Московском институте электромеханики и автоматики для авиационных применений [17], в РКК «Энергия» – для космических аппаратов [18]. Проводились и теоретические исследования, например [10;11;19]. На XIII Международном авиационно-космическом салоне МАКС-2017 ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина» продемонстрировало два образца избыточных БИИБ на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) разработки компании Оптилинк [20]. БИИБ разработки НПП «Антарес» (г. Саратов) на базе четырёх ВОГ и четырёх маятниковых кварцевых акселерометров прошёл все виды наземной отработки, включая комплексные испытания в составе космических аппаратов «Персона» №1 и «Лотос» №1 [21]. В НПО автоматики проводится разработка высокоточной БИНС на базе шести ДУС и шести акселерометров для перспективных средств выведения – в рамках Федеральной космической программы на 2016-2025 годы.

Таким образом, в теории и практике создания избыточных отказоустойчивых бесплатформенных инерциальных измерительных блоков накоплен значительный и разнообразный опыт, который был учтён авторами при решении задач проектирования избыточного бесплатформенного инерциального измерительного блока.

### **Формализация рассматриваемых задач**

Введём ряд условий и ограничений, которые, не нарушая общности, позволят формализовать решаемые задачи. Будем считать, что инерциальные датчики, входящие в БИИБ, являются одноосными и имеют независимые погрешности измерения, представляющие собой случайные величины с одинаковыми дисперсиями соответствующих составляющих погрешностей. При выборе оптимальных конфигураций ограничимся аддитивной составляющей погрешности.

Под неисправностью будем понимать только отказы, то есть случаи внезапной деградации точности. Случаи постепенной деградации точностных характеристик датчиков, вызванной, в частности, старением, целесообразно рассматривать как отдельную задачу совместно с задачей калибровки с помощью избыточных измерений [4]. Задачу предварительной фильтрации измерений с целью снижения влияния шума датчика на эффективность алгоритмов диагностики также имеет смысл рассматривать как отдельную задачу, поскольку алгоритмы фильтрации в значительной мере определяются моделью погрешностей датчиков [3;4;7].

При принятых ограничениях уравнение измерения, связывающее оцениваемые проекции измеряемого трёхмерного вектора  $\vec{x}$  на оси ортогональной приборной системы координат (ПСК) и показания  $N$  датчиков, имеет вид [22]:

$$Z = H X + E + F, \quad (1)$$

где  $Z$  – матрица-столбец  $N \times 1$  показаний датчиков (проекций угловой скорости, либо кажущегося ускорения на их оси чувствительности);  $H$  – матрица  $N \times 3$  направляющих косинусов осей чувствительности (ОЧ) датчиков в ПСК;  $X$  – матрица-столбец  $3 \times 1$  оцениваемых проекций измеряемого вектора  $\vec{x}$  в ПСК;  $E$  – матрица-столбец  $N \times 1$  погрешностей исправных датчиков;  $F$  – матрица-столбец  $N \times 1$  неисправностей (задаваемых как аддитивные добавки, представляющие собой разность между показаниями неисправных датчиков и соответствующими измеряемыми величинами).

При структурной избыточности любые три строки матрицы  $H$  линейно независимы и любая тройка датчиков может быть использована как избыточный измеритель вектора для полного решения задач ориентации и навигации.

Для того чтобы выявить наличие неисправностей, необходимо оценить уровень погрешностей датчиков. Избыточность позволяет строить функции показаний датчиков, инвариантные к измеряемому вектору, то есть представляющие собой функции только погрешностей. Анализ этих функций позволяет при определённых условиях не только выявить наличие неисправностей, но и определить неисправные датчики. Построение этих функций и методов их анализа и лежит в основе алгоритмов контроля и диагностики.

Поскольку уравнение (1) линейно, оценка проекций измеряемого вектора в ПСК также будет линейной:

$$\hat{X} = G Z, \quad (2)$$

где  $G$  – матрица  $3 \times N$ , определяемая алгоритмом оценки.

При построении матрицы  $G$  учитываются результаты диагностики (решается задача парирования неисправностей) – как правило, показания неисправных датчиков исключаются из последующей обработки. Полученные с помощью соотношения (2) проекции измеряемых векторов угловой скорости и линейного ускорения в ортогональной приборной системе координат поступают на вход стандартных алгоритмов БИНС.

Для оценки составляющих измеряемого вектора в приборной системе координат целесообразно использовать метод наименьших квадратов (МНК). В предположении, что погрешности датчиков являются независимыми аддитивными случайными величинами, на классе всех несмещённых оценок МНК даёт минимальную дисперсию погрешности оценки по каждому компоненту оцениваемого вектора [22]. Для МНК матрица  $G$  и ковариационная матрица  $D[\delta X]$  погрешностей оценки проекций измеряемого вектора в ПСК (при равноточных измерителях с дисперсией погрешности измерения, равной  $\sigma^2$ ) имеют вид:

$$G = (H^T H)^{-1} H^T; \quad D[\delta X] = \sigma^2 (H^T H)^{-1}. \quad (3)$$

Выбор ориентаций осей чувствительности, оптимальных с точки зрения точности, может быть сведён к нахождению матрицы  $H$ , минимизирующей заданную функцию элементов матрицы  $D[\delta X]$ .

### Оптимизация ориентации осей чувствительности датчиков

Задачу оптимизации ориентации измерительных осей будем решать в предположении, что все датчики исправны. В работе [11] эта задача решена применительно к произвольному числу датчиков, в качестве критерия оптимальности рассматривался минимум суммы дисперсий погрешностей оценки измеряемого вектора в ортогональной ПСК, равной следу ковариационной матрицы (3). Там же показано, что два других критерия – минимум определителя ковариационной матрицы и минимум её числа обусловленности (отношения максимального собственного числа к минимальному) дают то же самое решение.

Все три критерия инвариантны к выбору ПСК. Действительно, при переходе к произвольной ортогональной системе координат с помощью ортогональной матрицы  $V$

матрица направляющих косинусов осей датчиков будет иметь вид  $HV^T$ , а ковариационная матрица погрешностей оценки примет вид  $\sigma^2 V (H^T H)^{-1} V^T$ , то есть будет подобна ковариационной матрице (3). Известно, что следы, определители и собственные числа подобных матриц равны [23].

Рассмотренные критерии могут быть интерпретированы как параметры эллипсоида рассеивания: 1) след матрицы – сумма квадратов полуосей; 2) корень из определителя матрицы – объём; 3) число обусловленности – отношение квадрата наибольшей главной оси к квадрату наименьшей. Третий критерий характеризует чувствительность погрешности оценки вектора в ПСК к погрешностям датчиков.

При оптимальной ориентации осей  $N$ -мерные векторы-столбцы  $H^{(1)}, H^{(2)}, H^{(3)}$  матрицы  $H$  ортогональны между собой и имеют одинаковую норму, равную  $\sqrt{\frac{N}{3}}$ ; ко-

вариационная матрица  $D[\delta X]$  диагональна, её элементы равны  $\frac{3\sigma^2}{N}$ . При отсутствии неисправностей избыточность позволяет увеличить точность оценки измеряемого вектора в  $\sqrt{\frac{N}{3}}$ . Эллипсоид рассеивания является сферой, и точность оценки проекций вектора в ПСК не зависит от выбора ориентаций осей ПСК относительно измерительных осей, а зависит только от конфигурации осей чувствительности измерителей.

Для произвольного числа измерителей были найдены две оптимальные конфигурации [11]: 1) «Конус» – равномерное расположение осей по образующим кругового конуса с половиной угла при вершине осевого сечения, равной  $\arccos \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 54.7^\circ$ ; 2) «Конус с осью» (для чётного числа датчиков) – равномерное расположение осей  $N-1$  датчика по образующим кругового конуса с половиной угла при вершине осевого сечения, равной  $\arccos \sqrt{\frac{N-3}{3(N-1)}}$ , и одной оси – по оси конуса.

Полученные для произвольного числа датчиков оптимальные конфигурации «Конус» и «Конус с осью» для шести осей имеют свои особенности. При конфигурации «Конус» измерительные оси представляют собой две ортогональные триады, что может быть использовано при практической реализации БИИБ. Для конфигурации «Конус с осью» оси чувствительности датчиков ортогональны непараллельным граням правильного многогранника – додекаэдра, поэтому далее будем называть эту конфигурацию «Додекаэдр». Для «Додекаэдра» угол между любыми двумя осями один и тот же и равен  $\arccos \frac{1}{\sqrt{5}} \approx 63.4349^\circ$ , то есть оси ориентированы в трёхмерном пространстве максимально равномерно. Эти две конфигурации и рассматриваются в большинстве работ, посвящённых избыточным БИИБ на шести осях.

Проведённые авторами исследования (с использованием результатов работы [10]) показали, что кроме «Конуса» и «Конуса с осью» для шести измерительных осей существует ещё два бесконечных множества конфигураций, удовлетворяющих всем трём критериям оптимальности. Первое – множество двух вложенных друг в друга конусов («Два конуса»). Второе – две ортогональные триады («Две триады»).

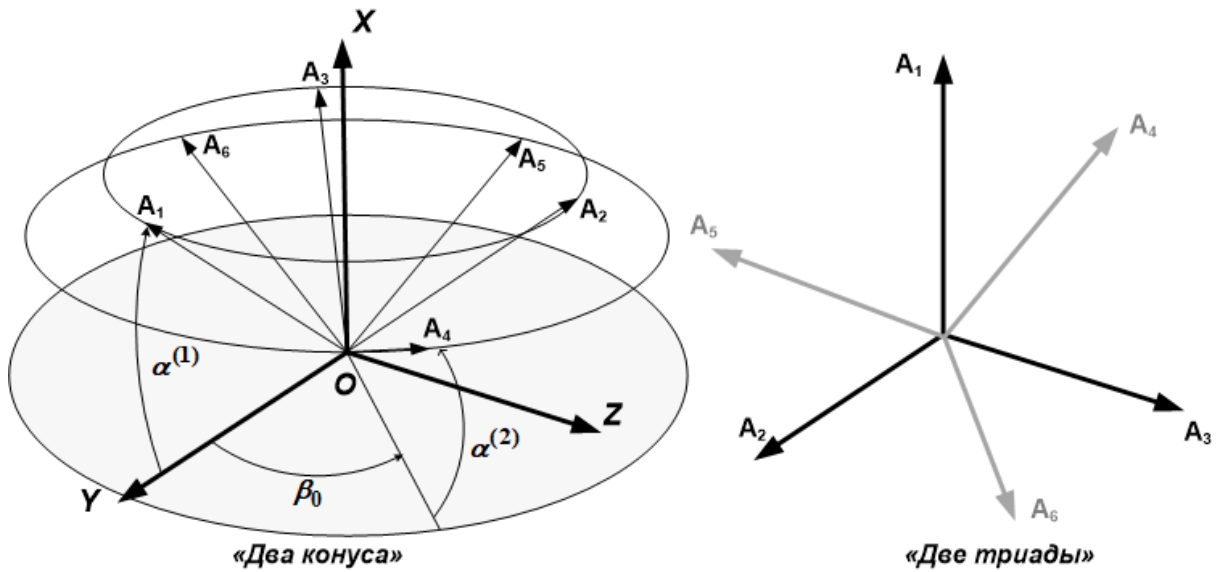


Рис. 1. Оптимальные конфигурации шести измерительных осей

Для конфигурации «Два конуса» оси датчиков располагаются равномерно по образующим двух конусов с общей осью; угол между плоскостью, ортогональной оси конусов, и осью первого конуса ( $A_1, A_2, A_3$ ) равен  $\alpha^{(1)}$ , второго ( $A_4, A_5, A_6$ ) –  $\alpha^{(2)}$ ; угол поворота проекций осей второго конуса относительно проекций осей первого конуса равен  $\beta_0$  (рис. 1). Таким образом, множество «Два конуса» задаётся с помощью трёх параметров: углов  $\alpha^{(1)}$ ,  $\alpha^{(2)}$ ,  $\beta_0$ ; при этом для оптимальной конфигурации должно выполняться соотношение:  $3(\sin^2 \alpha^{(1)} + \sin^2 \alpha^{(2)}) = \frac{3}{2}(\cos^2 \alpha^{(1)} + \cos^2 \alpha^{(2)}) = 2$ . «Две триады» при любом их взаимном расположении при отсутствии неисправностей дают оптимальное решение.

При отсутствии неисправностей для всех оптимальных конфигураций нормированная ковариационная матрица  $(H^T H)^{-1}$  диагональна, её собственные числа равны  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,5$ , число обусловленности равно единице, след равен 1,5 и эллипсоид рассеивания представляет собой сферу радиуса  $\sqrt{0,5}$  и объёма  $\sqrt{0,125} \approx 0,3535$ . Суммарная погрешность оценки (корень из суммы дисперсий) в  $\sqrt{2} \approx 1,414$  раз меньше, чем для избыточного трёхосного измерителя вектора.

При одной неисправности, если показания неисправного датчика исключаются из последующей обработки (соответствующая строка матрицы  $H$  обнуляется), для всех оптимальных конфигураций получаем следующие значения критериев оптимальности.

Собственные числа матрицы  $(H^T H)^{-1}$  равны  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0,5$ ; число обусловленности равно двум; след равен 2. Эллипсоид рассеивания представляет собой вытянутый эллипсоид вращения объёма 0,5 с наибольшей главной осью, ориентированной вдоль оси чувствительности неисправного датчика, и двумя другими, лежащими в ортогональной плоскости. Суммарная погрешность оценки в  $\sqrt{1,5} \approx 1,225$  раз меньше, чем для избыточного измерителя.

Очевидно, что среди множества оптимальных конфигураций существуют конфигурации, для которых углы между осями измерителей могут быть близкими к нулю.

Это приводит к тому, что при двух неисправностях погрешности оценки измеряемого вектора могут обращаться в бесконечность. Для того чтобы избежать этого, наложим дополнительное условие: минимальный угол между осями измерителей должен быть максимальным.

Для «Двух конусов» задача формализуется следующим образом (рис. 1): найти

$$\max_{\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}, \beta_0} \left( \min_{i, j=1 \dots 6, i \neq j} \left| \left( \hat{A}_i, \hat{A}_j \right) \right| \right). \text{ Решением этой задачи являются значения } \beta_0 = \frac{\pi}{3};$$

$$\alpha^{(1)} = \arcsin \sqrt{\frac{\sqrt{5}+2}{3\sqrt{5}}} \approx 52,62^\circ; \quad \alpha^{(2)} = \arcsin \sqrt{\frac{\sqrt{5}-2}{3\sqrt{5}}} \approx 10,81^\circ, \text{ при которых любые две}$$

измерительные оси образуют между собой один и тот же угол, равный  $\arccos \frac{1}{\sqrt{5}}$ , то

есть полученная конфигурация является «Додекаэдром». Отметим, что «Додекаэдр» является решением задачи оптимизации конфигурации шести осей при единственном критерии – максимуме минимального угла между измерительными осями.

Для формализации задачи оптимизации для «Двух триад» свяжем с осями одной из триад оси ПСК. Ориентацию второй триады в ПСК зададим через параметры Эйлера: ось и угол поворота первой триады до смещения со второй. Пусть  $\alpha, \beta$  – углы, задающие направление оси поворота;  $\gamma$  – угол поворота. Оптимальное решение получается при  $\alpha = \arccos \sqrt{\frac{1}{3}}, \beta = \frac{\pi}{4}, \gamma = \frac{\pi}{6}$  и представляет собой «Конус».

Для конфигурации «Додекаэдр» при ориентации осей ПСК вдоль ортогональных осей симметрии (рис. 2) матрица направляющих косинусов ОЧ датчиков при отсутствии погрешностей углов привязки имеет вид:

$$H = \begin{bmatrix} c & c & 0 & 0 & s & -s \\ s & -s & c & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & -s & c & c \end{bmatrix}^T, \text{ где } c = \sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{10}} = \cos \varphi, s = \sqrt{\frac{5-\sqrt{5}}{10}} = \sin \varphi.$$

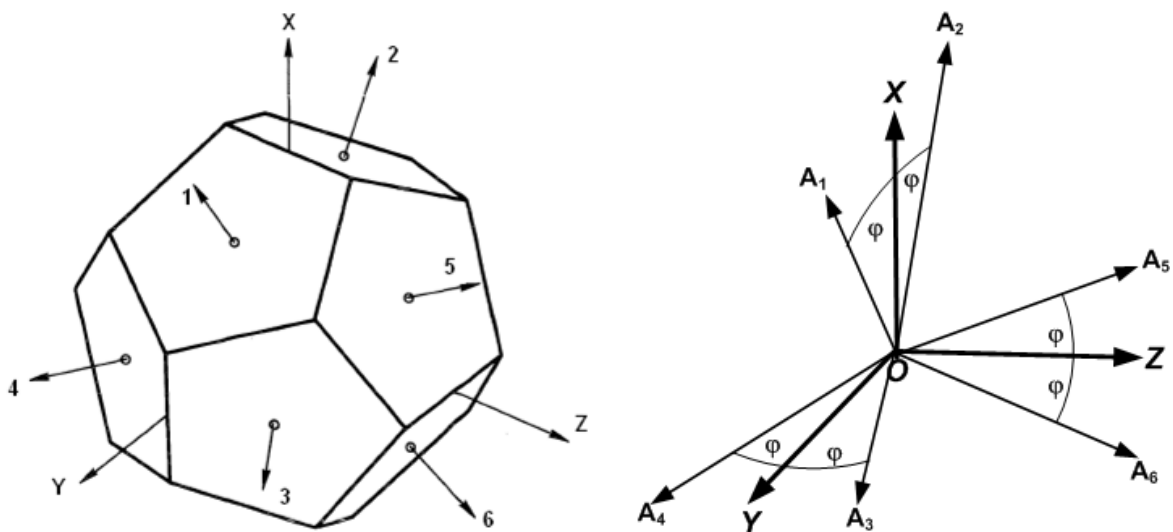


Рис. 2. Конфигурация «Додекаэдр» с ориентацией осей ПСК вдоль ортогональных осей симметрии

При любых двух неисправностях собственные числа матрицы  $(H^T H)^{-1}$  имеют одни и те же значения:  $\lambda_1 = \frac{5 + \sqrt{5}}{4} \approx 1,809$ ,  $\lambda_2 = \frac{5 - \sqrt{5}}{4} \approx 0,691$ ,  $\lambda_3 = \frac{1}{2}$ , то есть эллипсоид рассеивания имеет одну и ту же форму. Наибольшая полуось эллипсоида рассеивания направлена по биссектрисе острого угла, образованного осями отказавших датчиков; средняя полуось – по биссектрисе тупого угла; наименьшая полуось ортогональна плоскости, образованной осями отказавших датчиков. При отказавших первом и втором датчиках главные оси эллипсоида рассеивания будут совпадать с соответствующими осями ПСК –  $OX, OY, OZ$ . Суммарная погрешность оценки проекций вектора равна суммарной погрешности неизбыточного измерителя.

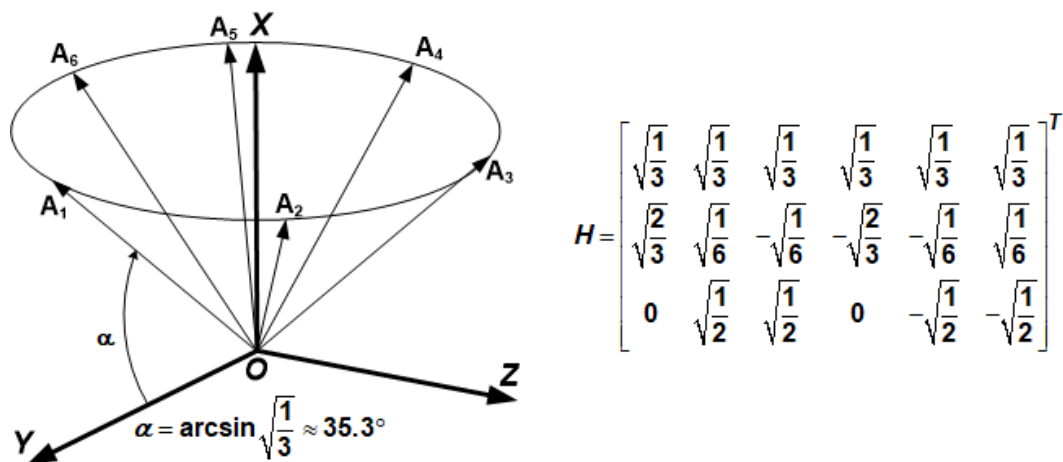


Рис. 3. Конфигурация «Конус» с ориентацией одной из осей ПСК вдоль оси конуса

Для «Конуса» (рис. 3) собственные числа ковариационной матрицы и соответственно параметры эллипсоида рассеивания зависят от номеров отказавших датчиков. Для всех случаев двух отказов наименьшая ось эллипсоида рассеивания направлена ортогонально плоскости, образованной осями отказавших датчиков. Наихудшая ситуация возникает, когда отказывают два рядом стоящие датчика, это 6 случаев из 15. В этой ситуации собственные числа матрицы  $(H^T H)^{-1}$  равны  $\lambda_1 = 3$ ,  $\lambda_2 = \frac{3}{5}$ ,  $\lambda_3 = \frac{1}{2}$  и значения всех рассматриваемых критериев хуже, чем для додекаэдра. Наибольшая ось эллипсоида рассеивания направлена по биссектрисе угла между осями отказавших датчиков. Суммарная погрешность в наихудшей ситуации в 1,17 раза больше, чем для неизбыточного измерителя.

Наилучшая ситуация имеет место, когда отказывают два датчика, стоящие через один, то есть одна ортогональная триада датчиков остаётся исправной; это также 6 случаев из 15. В этой ситуации собственные числа нормированной ковариационной матрицы равны  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ ,  $\lambda_3 = \frac{1}{2}$  и значения всех критериев лучше, чем для «Додекаэдра». Эллипсоид рассеивания представляет собой сплюснутый эллипсоид вращения. Суммарная погрешность в 1,1 раза меньше, чем для неизбыточного измерителя.

Для третьего случая двух отказов, когда отказавшие датчики расположены через два (3 случая из 15), значения критериев также лучше, чем для «Додекаэдра», и суммарная погрешность несколько меньше (в 1,04 раза), чем для неизбыточного измерите-



ля. Собственные числа матрицы равны  $\lambda_1 = \frac{3}{2}$ ,  $\lambda_2 = \frac{3}{4}$ ,  $\lambda_3 = \frac{1}{2}$ ; наибольшая ось эллипсоида рассеивания лежит в плоскости, образованной осями отказавших датчиков, ортогонально оси конуса.

Значения параметров эллипсоида рассеивания при двух неисправностях для «Додекаэдра» и для «Конуса» приведены в таблице.

Таблица. Значения параметров эллипсоида рассеивания при двух неисправностях

Номера неисправных датчиков	Сумма квадратов полуосей		Объем		Отношение квадрата наибольшей полуоси к наименьшей	
	«Конус»	«Додекаэдр»	«Конус»	«Додекаэдр»	«Конус»	«Додекаэдр»
1,2; 2,3; 3,4; 4,5; 5,6; 6,1	4,1	3	$\sqrt{\frac{9}{10}} \approx 0,949$	$\frac{\sqrt{10}}{4}$	6	$\frac{5 + \sqrt{5}}{2}$
1,3; 1,5; 3,5; 2,4; 2,6; 4,6	2,5		$\sqrt{\frac{1}{2}} \approx 0,707$		2	
1,4; 2,5; 3,6	2,75		0,75		3	
<i>среднее</i>	<i>3,19</i>	<i>3</i>	<i><math>\approx 0,802</math></i>	<i><math>\approx 0,791</math></i>	<i>3,8</i>	<i><math>\approx 3,618</math></i>

Как видно из таблицы, средние значения точностных характеристик для «Конуса» несколько хуже, чем для «Додекаэдра».

### Алгоритмы контроля, диагностики и парирования неисправностей

Работа алгоритмов КДПН состоит из трёх последовательных этапов: 1) контроль на наличие отказов; 2) диагностика отказавших датчиков; 3) оценка проекций измеряемых векторов в ортогональной приборной системе координат с исключением влияния отказавших датчиков на точность измерения (парирование отказов). Методы контроля и диагностики можно разделить на пороговые и беспороговые [10]. На этапе выявления неисправностей все методы являются пороговыми: решение о наличии неисправностей принимается на основе сравнения функции погрешностей датчиков с порогом (уравнения сравнения или паритета). На этапе диагностики неисправных датчиков для пороговых методов решение принимается на основе анализа уравнений сравнения, а для беспороговых – на основе оптимизации некоторых функций, характеризующих погрешности каждого датчика. Классификация и анализ методов диагностики приведены в работе [24].

Для анализа и сравнения рассмотрим три базовых метода: метод голосования, метод инвариантов и метод сравнения со средним. Метод сравнения со средним является беспороговым методом, остальные относятся к пороговым. В работе [25] приводится подробное описание алгоритмов этих методов применительно к шести измерительным осям. Наиболее наглядную физическую интерпретацию имеет метод «голосования». Суть его заключается в следующем: из показаний всех возможных троек датчиков строятся оценки измеряемого вектора, таких троек будет  $C_6^3 = 20$ . Затем строятся разности оценок измеряемых векторов (уравнения сравнения), полученные с помощью показаний различных троек, таких уравнений будет  $C_{20}^2 = 190$ . В зависимости от уравнений, прошедших контроль на допуск, принимается решение о том, какие датчики являются неисправными; далее показания неисправных датчиков при обработке информации не используются. Метод «голосования» наиболее громоздкий из пороговых мето-

дов с точки зрения реализации в бортовом компьютере: один шаг алгоритма требует построения и анализа 190 уравнений сравнения – в нём явно заложена избыточность.

Наиболее компактным из пороговых методов является метод инвариантов: в нём число уравнений сравнения минимально. Уравнения сравнения строятся как линейные комбинации показаний всевозможных четвёрок датчиков, инвариантные измеряемому вектору и содержащие только погрешности и неисправности датчиков. Таких уравнений будет  $C_6^4 = 15$ . Как и в методе голосования, решение о наличии неисправностей принимается на основе анализа уравнений сравнения: при одной неисправности контроль на допуск пройдёт  $C_5^4 = 5$  уравнений, при двух неисправностях  $C_4^4 = 1$  уравнение. Если неисправностей больше двух, то ни одно из уравнений не пройдёт контроль на допуск. Во всех остальных случаях результатом работы алгоритма будет отказ диагностики. Идентификация неисправного датчика проводится путём анализа уравнений сравнения, прошедших контроль на допуск.

Беспороговые методы являются математически эквивалентными [24]; наиболее наглядную физическую интерпретацию из них имеет метод сравнения со средним. В этом методе уравнение сравнения строится как сумма квадратов разностей между измерениями и их оценками. Оценки измерения рассчитываются с помощью соотношения (1), в котором в качестве  $X$  используется оценка измеряемого вектора  $\hat{X}$ , полученная в соответствии с соотношением (2). Если уравнение сравнения не проходит контроль на допуск, неисправным считается датчик, для которого нормированная разность между измерением вектора и его оценкой максимальна. Для диагностики и идентификации второй неисправности проводится вторая итерация в том же цикле обработки.

Сравнение эффективности диагностики для рассмотренных выше базовых методов проводилось методом математического моделирования. Моделирование работ алгоритмов проводилось для двух оптимальных конфигураций – «Конус» и «Додекаэдр» – при отсутствии неисправностей, при одной неисправности и двух неисправностях при всевозможных сочетаниях исправных и неисправных датчиков. Результаты оценивались процентным соотношением между четырьмя возможными результатами работы алгоритма: 1) правильная диагностика; 2) ложное выявление неисправностей при отсутствии невыявленных неисправностей; 3) невыявление неисправностей; 4) отказ диагностики, означающий невозможность принятия решения о том, какие датчики неисправны, на основе анализа уравнений сравнения.

Как показали результаты моделирования, для всех рассмотренных методов эффективность диагностики для конфигурации «Додекаэдр» выше, чем для конфигурации «Конус». При отсутствии неисправностей наиболее эффективным оказался метод голосования: он даёт 100-процентную правильную диагностику для обеих оптимальных конфигураций. При использовании метода инвариантов возникают отказы диагностики (для «Додекаэдра» в 2,1 % случаев, для «Конуса» – в 2,2 % случаев). Для метода сравнения со средним имеют место случаи ложного выявления отказов (для «Додекаэдра» в 2,5 % случаев, для «Конуса» в 2,7 % случаев).

На рис. 4, 5 приведены результаты моделирования работ алгоритмов КДПН при одной и двух неисправностях при отсутствии погрешностей исправных датчиков. При одной неисправности частота ложного выявления отказов равно нулю для всех методов. Частота правильной диагностики наиболее высока для метода сравнения со средним (рис. 4); при этом, в отличие от пороговых методов, он не имеет случаев отказов диагностики.

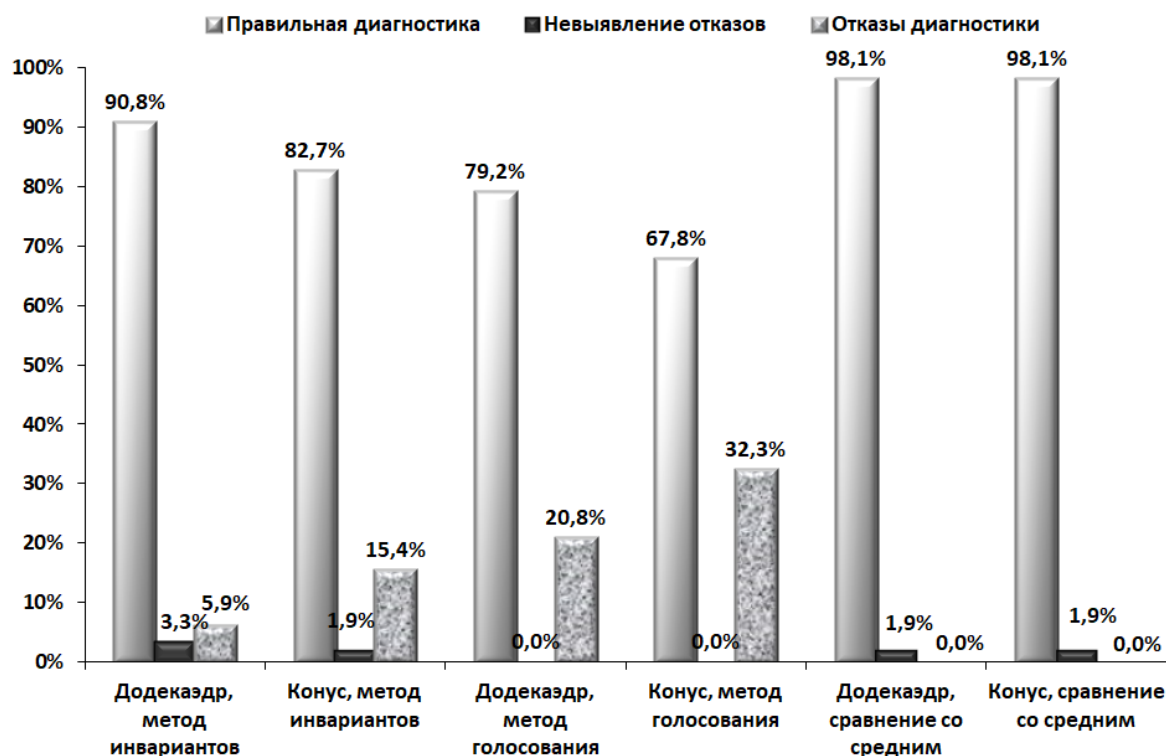


Рис. 4. Результаты моделирования при одной неисправности

Метод сравнения со средним имеет наиболее высокую вероятность правильной диагностики и при двух неисправностях (рис. 5). Однако, в отличие от пороговых методов, он имеет достаточно высокую частоту ложного выявления отказов (6,4 %) и неприемлемо высокую для рассматриваемых применений частоту невыявления отказов (15,2 %). И для метода голосования, и для метода инвариантов решающие правила для идентификации исправных и неисправных датчиков основаны на достаточно жёстких условиях: число уравнений сравнения, прошедших и не прошедших контроль на допуск, должно быть строго определённым. Это приводит к высокой частоте отказов диагностики (36,5 % для метода инвариантов, 65,8 % для метода голосования). И тот, и другой методы могут быть модифицированы путём ослабления условий принятия решений о неисправных датчиках [2; 25; 26]. Было разработано и промоделировано несколько модифицированных методов голосования и методов инвариантов. Наиболее эффективный из них основан на методе инвариантов и позволяет повысить вероятность правильной диагностики с 58,4 до 67,0 %. Задача выбора алгоритма диагностики требует дальнейшей проработки.

Общепринято, что при шести измерительных осях возможны диагностика и парирование одной и двух возможных неисправностей. Однако как видно из результатов моделирования, даже при отсутствии погрешностей исправных датчиков ни один из методов не даёт 100-процентную вероятность правильной диагностики не только для двух, но и для одной неисправности.

Это обусловлено тем, что при определённых характеристиках погрешностей датчиков результаты диагностики становятся недостоверными, при этом при наличии погрешностей исправных датчиков эффективность диагностики снижается [2;25]. Причины возникновения отказов диагностики, ложного выявления неисправных датчиков и невыявления неисправных датчиков можно разделить на две группы.



Рис. 5. Результаты моделирования при двух неисправностях

Первая из них связана с взаимной компенсацией неисправностей. В этом случае могут отказать два или более датчиков со сколь угодно большими значениями неисправностей, но уравнения сравнения, в которые входят показания неисправных датчиков, проходят контроль на допуск. В работе [24] показано, что такой случай, причём для всех методов диагностики, возникает, в частности, когда вектор неисправностей представляет собой линейную комбинацию столбцов матрицы  $H$ . Для этого случая достоверность диагностики может быть повышена путём увеличения количества датчиков, находящихся в «горячем» резерве. Для обеспечения отказоустойчивой работы при  $k$  одновременных неисправностях датчиков одного типа необходимо  $2k + 3$  измерительных осей [5], то есть для диагностики двух неисправностей осей должно быть семь.

Вторая группа условий связана с близостью к допусковым константам либо погрешностей исправных датчиков, либо неисправностей. Если величина неисправности отказавшего датчика близка к допусковой константе, то она может компенсироваться погрешностями исправных датчиков. С другой стороны, возможны случаи, когда большие по значению погрешности исправных датчиков могут приводить к отказам диагностики и ложному выявлению неисправностей. Возможным решением этой проблемы может быть реализация алгоритмов контроля и диагностики с двумя уровнями допусков, что требует дополнительной проработки с учётом моделей шумов измерения и неисправностей реальных датчиков.

### **Заключение**

Использование шести ДУС и шести акселерометров для построения БИИБ со структурной избыточностью позволяет гарантированно диагностировать один неисправный датчик и с относительно большой вероятностью – два неисправных датчика одного типа.

Сравнение двух оптимальных конфигураций при двух возможных отказах показало, что с точки зрения точности измерения вектора «Додекаэдр» предпочтительней, чем «Конус».

С точки зрения эффективности диагностики конфигурация «Додекаэдр» также предпочтительней: для неё вероятность правильной диагностики выше, а вероятность невыявления неисправностей ниже, чем для «Конуса». Однако окончательное решение о выборе конфигурации измерительных осей целесообразно принимать с учётом технических и эксплуатационных характеристик БИИБ совместно с разработчиком измерительного блока.

Из результатов исследований следует, что ни один из методов не даёт 100-процентную вероятность правильной диагностики не только для двух, но и для одной неисправности. Этот вопрос требует дальнейших исследований с учётом моделей шумов измерения и неисправностей реальных датчиков.

### **Библиографический список**

1. Епифанов А.Д. Избыточные системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
2. Водичева Л.В., Лысцов А.А., Парышева Ю.В. Обеспечение отказоустойчивости инерциального измерительного блока для перспективных средств выведения // *Ракетно-космическая техника*. 2017. Т. 1, № 2 (10). С. 49-61.
3. Gilmore J.P., Mckern R.A. A Redundant Strapdown Inertial Reference Unit // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1972. V. 9, Iss. 1. P. 39-47. DOI: 10.2514/3.61628
4. Wilcox J.C. Maximum Likelihood Failure Detection for Redundant Inertial Instruments // *AIAA Guidance and Control Conference*. Stanford, Calif., Aug. 1972. AIAA Paper no. 72-864.
5. Potter J.E., Deckert J.C. Minimax Failure Detection and Identification in Redundant Gyro and Accelerometer Systems // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1973. V. 10, Iss. 4. P. 236-243. DOI: 10.2514/3.27753
6. Pejsa A.J. Optimum Skewed Redundant Inertial Navigators // *Guidance and Control Conference*. 1973. DOI: 10.2514/6.1973-850
7. Ebner R.E., Mark J.G. Redundant Integrated Flight-Control/Navigation Inertial Sensor Complex // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1978. V. 1, Iss. 2. P. 143-149. DOI: 10.2514/3.55757
8. Daly K.C., Gai E., Harrison J.V. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1979. V. 2, Iss. 1. P. 9-17. DOI: 10.2514/3.55825
9. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // *Автоматика и телемеханика*. 1980. № 8. С. 96-121.
10. Белов Е.А. Разработка алгоритмов и методов надёжного и точного определения параметров движения в системах со структурной избыточностью. Дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1981. 162 с.

11. Водичева Л.В. Повышение надёжности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерений // Гироскопия и навигация. 1997. № 1 (16). С. 55-67.
12. Yang C-K., Shim D-S. Accommodation rule based on navigation accuracy for double faults in redundant inertial sensor systems // International Journal of Control, Automation, and Systems. 2007. V. 5, Iss. 3. P. 329-336.
13. Yang C-K., Shim D-S. Best Sensor Configuration and Accommodation Rule Based on Navigation Performance for INS with Seven Inertial Sensors // Sensors. 2009. V. 9, Iss. 11. P. 8456-8472. DOI: 10.3390/s91108456
14. Dai X., Zhao L., Shi Z. Fault tolerant control in redundant inertial navigation system // Mathematical Problems in Engineering. 2013. V. 2013. DOI: 10.1155/2013/782617
15. Lee W., Park C.G. Double Fault Detection of Cone-Shaped Redundant IMUs Using Wavelet Transformation and EPSA // Sensors. 2014. V. 14, Iss. 2. P. 3428-3444. DOI: 10.3390/s140203428
16. Негри С., Лабарр Э., Линьон К., Брунштейн Э., Салаён Э. Новое поколение инерциальных навигационных систем на основе ВТГ для аппаратов, обеспечивающих запуск спутников // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 49-59. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059
17. Izmailov E.A., Tchesnokov G.I., Troizkij V.A., Gordasevich A.A. Cheap Small Size Inertial Navigation System with Increased Reliability // The 2nd Saint-Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation. 1995. Part I. P. 139-149.
18. Бранец В.Н., Дибров Д.Н., Рыжков В.С. Диагностика и вычисление параметров ориентации избыточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) // Механика и навигация: сб. материалов научной сессии, посвящённой 85-летию академика РАН А.Ю. Ишлинского. СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 1999. С. 22-35.
19. Алёшкин М.В. Совершенствование схем и алгоритмов предварительной обработки информации избыточных блоков инерциальных датчиков. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2009. 141 с.
20. Новости компании Оптилинк. 24.07.2017. МАКС-2017. [http://optolink.ru/ru/novosti/2017\\_maks](http://optolink.ru/ru/novosti/2017_maks)
21. НПП «Антарес». Высоконадежные отказоустойчивые приборы. <http://npp-antares.ru/equipment.html>
22. Браммер К., Зифлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
23. Мальцев А.И. Основы линейной алгебры. М.: Наука, 1970. 402 с.
24. Vodicheva L. Fault-tolerant Strapdown Inertial Measurement Unit: Failure Detection and Isolation Technique // Proceedings 6th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 1999. P. 9-10.
25. Лысцов А.А., Парышева Ю.В., Водичева Л.В. Алгоритмы выявления и диагностики неисправностей шестиосного избыточного бесплатформенного инерциального измерительного блока // Сб. трудов XVIII Санкт-Петербургской конференции молодых учёных «Навигация и управление движением». СПб: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2016. С. 499-505.
26. Vodicheva L., Lystsov A., Parysheva Yu. Redundant Strapdown Inertial Measurement Unit: Fault-tolerance Improvement // Proceedings 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016. 2016. P. 135-138.

## INERTIAL MEASURING UNITS FOR FUTURE-GENERATION AEROSPACE PRODUCTS: FAULT-TOLERANCE

©2018

- L. V. Vodicheva** Senior Researcher;  
Scientific and Production Association of automatics  
named after academician N.A. Semikhatov, Yekaterinburg;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)
- L. N. Bel'skiy** Candidate of Science (engineering), Deputy General Director – First Deputy  
of General Designer;  
Scientific and Production Association of automatics  
named after academician N.A. Semikhatov, Yekaterinburg;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)
- Yu. V. Parysheva** Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of Group;  
Scientific and Production Association of automatics  
named after academician N.A. Semikhatov, Yekaterinburg;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)
- A. A. Lystsov** Design Engineer;  
Scientific and Production Association of automatics  
named after academician N.A. Semikhatov, Yekaterinburg;  
[avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru)

A Strapdown Inertial Measurement Unit (SIMU) with structural redundancy intended for improving fault-tolerance and accuracy of inertial navigation systems for space applications is considered. The SIMU includes six angular rate sensors and six accelerometers, which allows for identification and correction of one fault with high probability and two faults with lower probability for each type of sensor. Known theoretical and practical techniques developed and used in this area are briefly described. The problem of optimization of measurement axes orientation is considered. The accuracy of estimation of the measured vector projections in the orthogonal instrument coordinate system serves as the criterion of optimization. A solution of this problem for no faults, one fault, and two faults is proposed. Algorithms of failure detection, identification and correction (FDIC) are analyzed. The results of testing FDIC basic algorithms with the help of mathematical simulation are considered. Optimal measurement axes configurations are compared with each other from the FDIC efficiency point of view. It is shown that neither of the methods yields 100-percent correct diagnostics not only for two faults but for one fault as well. Possible sources of incorrect diagnostics are analyzed.

*Strapdown Inertial measurement Unit; structural redundancy; failure detection, identification and correction.*

---

*Citation:* Vodicheva L.V., Bel'skiy L.N., Parysheva Yu.V., Lystsov A.A. Inertial measuring units for future-generation aerospace products: fault-tolerance. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 28-44. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-28-44

### References

1. Epifanov A.D. *Izbytochnye sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami* [Redundant control systems for flying vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 144 p.
2. Vodicheva L.V., Lystsov A.A., Parysheva Yu.V. Fault tolerance of strapdown inertial measuring units of advanced launch vehicles. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika*. 2017. V. 1, no. 2 (10). P. 49-61. (In Russ.)
3. Gilmore J.P., Mckern R.A. A Redundant Strapdown Inertial Reference Unit. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1972. V. 9, Iss. 1. P. 39-47. DOI: 10.2514/3.61628
4. Wilcox J.C. Maximum Likelihood Failure Detection for Redundant Inertial Instruments. *AIAA Guidance and Control Conference*. Stanford, Calif., Aug. 1972. AIAA Paper no. 72-864.

5. Potter J.E., Deckert J.C. Minimax Failure Detection and Identification in Redundant Gyro and Accelerometer Systems. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1973. V. 10, Iss. 4. P. 236-243. DOI: 10.2514/3.27753
6. Pejsa A.J. Optimum Skewed Redundant Inertial Navigators. *Guidance and Control Conference*. 1973. DOI: 10.2514/6.1973-850
7. Ebner R.E., Mark J.G. Redundant Integrated Flight-Control/Navigation Inertial Sensor Complex. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1978. V. 1, Iss. 2. P. 143-149. DOI: 10.2514/3.55757
8. Daly K.C., Gai E., Harrison J.V. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1979. V. 2, Iss. 1. P. 9-17. DOI: 10.2514/3.55825
9. Mironovsky L.A. Functional diagnosis of dynamic systems (Survey). *Avtomatika i Telemekhanika*. 1980. No. 8. P. 96-121. (In Russ.)
10. Belov E.A. *Razrabotka algoritmov i metodov nadezhnogo i tochnogo opredeleniya parametrov dvizheniya v sistemakh so strukturnoy izbytochnost'yu*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of algorithms and methods for precise determination of motion parameters in systems with structural redundancy. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Science]. Leningrad, 1981. 162 p.
11. Vodicheva L.V. Increasing reliability and accuracy of strapdown inertial measuring unit with redundant measurement quantity. *Gyroscopy and Navigation*. 1997. No. 1 (16). P. 55-67. (In Russ.)
12. Yang C-K., Shim D-S. Accommodation rule based on navigation accuracy for double faults in redundant inertial sensor systems. *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 2007. V. 5, Iss. 3. P. 329-336.
13. Yang C-K., Shim D-S. Best Sensor Configuration and Accommodation Rule Based on Navigation Performance for INS with Seven Inertial Sensors. *Sensors*. 2009. V. 9, Iss. 11. P. 8456-8472. DOI: 10.3390/s91108456
14. Dai X., Zhao L., Shi Z. Fault tolerant control in redundant inertial navigation system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. V. 2013. DOI: 10.1155/2013/782617
15. Lee W., Park C.G. Double Fault Detection of Cone-Shaped Redundant IMUs Using Wavelet Transformation and EPSA. *Sensors*. 2014. V. 14, Iss. 2. P. 3428-3444. DOI: 10.3390/s140203428.
16. Negri C., Labarre E., Lignon C., Brunstein E., Salaün E. A new generation of IRS with innovative architecture based on HRG for satellite launch vehicles. *Gyroscopy and Navigation*. 2016. V. 7, Iss. 3. P. 223-230. DOI: 10.1134/S2075108716030135
17. Izmailov E.A., Tchesnokov G.I., Troizkij V.A., Gordasevich A.A. Cheap Small Size Inertial Navigation System with Increased Reliability. *Proceedings 2nd Saint-Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation*. 1995. Part I. P. 139-149.
18. Branets V.N., Dibrov D.N., Ryzhkov V.S. Diagnostika i vychislenie parametrov orientatsii izbytochnykh besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem (BINS). *Mekhanika i navigatsiya: sb. materialov nauchnoy sessii, posvyashchenoy 85-letiyu akademika RAN A.Yu. Ishlinskogo*. Saint-Petersburg: Central Scientific and Research Institute «Electropribor» Publ., 1999. P. 22-35. (In Russ.)
19. Aleshkin M.V. *Sovershenstvovanie skhem i algoritmov predvaritel'noy obrabotki informatsii izbytochnykh blokov inertial'nykh datchikov*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of schemes and algorithms of preliminary data processing in Redundant Inertial Measurement Units]. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Science. Saratov, 2009. 141 p.
20. Novosti kompanii Optolink. 24.07.2017. MAKS-2017 [Optolink Company News. 24.07.2017. MAKS-2017]. Available at: [http://optolink.ru/en/news/2017\\_maks](http://optolink.ru/en/news/2017_maks)



21. NPP «Antares». *Vysokonadezhnye otkazoustoychivye pribory* [Antares Research and Production Enterprise. High-reliability fault tolerant instruments]. Available at: <http://npp-antares.ru/equipment.html>

22. Brammer K., Siffing G. *Kalman-Bucy-Filter*. München: R. Oldenbourg Verlag, 1975. 232 p.

23. Mal'tsev A.I. *Osnovy lineynoy algebry* [Fundamentals of linear algebra]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 402 p.

24. Vodicheva L. Fault-tolerant Strapdown Inertial Measurement Unit: Failure Detection and Isolation Technique. *Proceedings 6th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 1999. P. 9-10.

25. Lystsov A.A., Parysheva Yu.V., Vodicheva L.V. Algoritmy vyyavleniya i diagnostiki neispravnostey shestiosnogo izbytochnogo besplatformennogo inertsiyal'nogo izmeritel'nogo bloka. *Sb. trudov XVIII Sankt-Peterburgskoy konferentsii molodykh uchenykh «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem»*. St. Petersburg: Central Scientific and Research Institute «Electropribor» Publ., 2016. P. 499-505. (In Russ.)

26. Vodicheva L., Lystsov A., Parysheva Yu. Redundant Strapdown Inertial Measurement Unit: Fault-tolerance Improvement. *Proceedings 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 2016. P. 135-138.