

## Многоуровневое системотехническое обеспечение функциональной работоспособности систем управления движением и навигации малогабаритного космического аппарата

*Представлен один из возможных вариантов решения научно-прикладной задачи обеспечения функциональной работоспособности систем управления движением и навигации малогабаритного космического аппарата.*

**Ключевые слова:** функциональная работоспособность, нештатная ситуация, причина нештатной ситуации, спутниковая система, система управления и навигации, диагностика

**Введение.** Прогресс в освоении космического пространства и расширение возможностей его исследования формируют новые нестандартные требования к обеспечению функциональных возможностей малогабаритных спутников различного назначения на продолжительном интервале времени [1–3]. Различные нештатные ситуации, возникающие при эксплуатации спутников, приводят к ухудшению, а в некоторых случаях и к потере их функциональных свойств, что обуславливает актуальность перспективной научно-технической задачи обеспечения функциональной работоспособности спутниковых систем (СПС) [4–6].

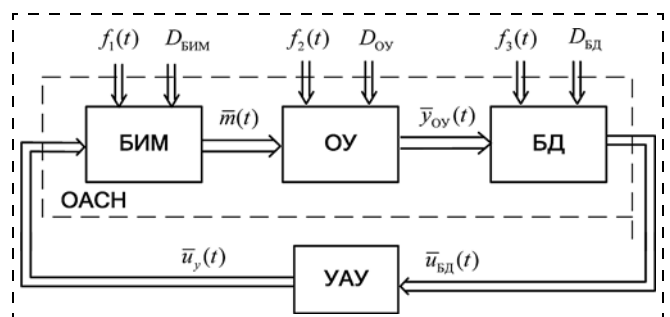
Реализация и использование первых подобных СПС стали возможными в результате частичной, а затем и полной замены громоздких и не гибких аналоговых регуляторов цифровыми системами. Одними из первых СПС, использовавших цифровые элементы, были системы "Целина" и "Океан", а также созданные на их базе серии аппаратов "Космос" и другие космические системы [7–8]. Это событие дало толчок развитию направления, связанного с разработкой перенастраиваемых систем управления аэрокосмическими аппаратами [9–11].

Разработкой таких систем занимаются многие исследователи и разработчики СПС, однако комплексные технические решения, направленные на обеспечение их функциональной работоспособности в условиях действия нештатных ситуаций, на сегодня отсутствуют.

Основная часть технических задач и их решений, связанных с разработкой систем, устойчивых к причинам возникновения нештатных ситуаций, относится к резервированию функциональных элементов СПС [3, 12–13]. Использование традиционных методов резервирования позволяет заложить свойство функциональной работоспособности СПС при ее проектировании, что обеспечивает при появлении нештатной ситуации сохранение полной или частичной работоспособности системы за счет аппаратной или иных видов избыточностей [14, 15]. Однако несмотря на многообразие методов, обеспечивающих резервирование, их анализ показывает, что каждый из них недостаточно эффективен при решении задачи обеспечения функ-

циональной работоспособности СПС, поскольку основным недостатком их использования является необоснованная аппаратная избыточность, приводящая к увеличению массы, габаритных размеров, энергопотребления и ряда других показателей. Сформировалась устойчивая тенденция сведения к минимуму применения избыточностей для обеспечения СПС свойством функциональной работоспособности, позволяющим системе выполнять определенные функции в нештатных ситуациях. Выявленные тенденции инженерной и научной практик свидетельствуют об актуальности и целесообразности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по обеспечению функциональной работоспособности СПС.

**Цель исследования.** Неотъемлемой частью СПС является система управления движением и навигации (СУДН), которая в наибольшей степени подвержена влиянию причин нештатных ситуаций (рис. 1) [14–16]. Основным элементом СУДН является объект автоматической стабилизации и навигации (ОАСН), состоящий из объекта управления (ОУ), блока исполнительных механизмов (БИМ) для выработки управляющих воздействий на ОУ, а также блока датчиков (БД) для определения пара-



**Рис. 1. Функциональная схема СУДН:**

$f_i(t)$ ,  $i = \overline{1, 3}$  — внешние возмущения;  $D_{\text{БИМ}}$ ,  $D_{\text{ОУ}}$ ,  $D_{\text{БД}}$  — множества нештатных ситуаций БИМ, ОУ и БД;  $\bar{u}_y(t)$  — вектор управляющих сигналов;  $\bar{m}(t)$  — вектор управляющих воздействий;  $\bar{y}_{\text{ОУ}}(t)$  — вектор измеряемых параметров движения ОУ;  $\bar{u}_{\text{БД}}(t)$  — вектор выходных сигналов БД

метров движения ОУ. Выходные сигналы с БД поступают на устройство автоматического управления (УАУ), которое с учетом текущего состояния, режима работы и алгоритма ориентации или стабилизации формирует сигналы управления, подаваемые на БИМ.

Пусть функциональная работоспособность СУДН характеризуется вектором параметров  $F = (f_1, f_2, \dots, f_M)$ , значения которых изменяются при наличии причины нештатной ситуации, а  $F_H$  — вектор параметров СУДН, характеризующий ее состояние, отвечающее требованиям нормативно-технической документации. Если в СУДН заложены те или иные избыточности, что в большинстве случаев имеет место, то выполнимо условие  $F_H > F$ , тогда как для не избыточных систем  $F_H = F$ . Если по тем или иным причинам у системы изменяются показатели функциональной работоспособности таким образом, что  $F_H < F$ , то это говорит о том, что система не соответствует нормативно-технической документации, а следовательно, не может выполнять функциональное назначение.

Отметим, что переход системы от состояния  $F_H < F$  в состояние  $F_H > F$  представляет собой неопределенное событие, связанное с причинами появления нештатной ситуации, и может трактоваться как задача управления объектом в условиях неопределенности, решение которой рассматривается в классической или в современной теории автоматического управления. Анализ подобных систем показал ограниченные возможности их использования и неспособность перевода ими СУДН от состояния  $F_H < F$  до  $F_H = F$ , что определяет необходимость разработки подхода, позволяющего обеспечивать указанный перевод СУДН с учетом нештатных ситуаций.

**Концепция многоуровневого системотехнического обеспечения функциональной работоспособности.** Функциональная работоспособность — способность системы выполнять определенные функции при появлении нештатных ситуаций. *Нештатная ситуация* — это такое состояние функционирования СУДН, когда появляется нерасчетное отклонение характеристик от номинального режима, обусловленного техническим заданием. При этом нештатная ситуация рассматривается как неопределенное событие. Для определения характеристик причины нештатной ситуации, таких как время и место ее возникновения, класс и вид, необходимо диагностическое обеспечение, позволяющее определять техническое состояние системы с глубиной до парируемой причины нештатной ситуации, построенное в виде иерархической структуры. На каждом уровне данной структуры располагается конечное множество причин неправильного функционирования объекта, т. е. причин нештатных ситуаций. Они могут быть названы в соответствующих физических терминах, отвечающих определенному уровню физического понимания процессов и их физического представления. Этот рекурсивный процесс поиска прекращается, когда выявленная

причина нештатной ситуации может быть парирована с помощью имеющихся избыточных ресурсов. Итак, *парируемая причина нештатной ситуации* — это причина, которая может быть устранена или нейтрализована с помощью соответствующего управления имеющимися избыточными ресурсами. Таким образом, глубина диагностирования зависит от имеющихся в текущий момент времени ресурсов париования причины нештатной ситуации. Определяется баланс между глубиной диагностирования и ресурсными средствами восстановления работоспособности СУДН. Следовательно, *диагностирование СУДН* — это поиск устранимой причины нештатной ситуации посредством имеющихся избыточных ресурсов.

Решенная задача по определению характеристик нештатной ситуации является основанием для реализации развитой функции париования причин нештатной ситуации. Для этого требуется сформировать множество избыточных ресурсов, обеспечивающих покрытие множества устранимых причин нештатных ситуаций, а также разработать гибкую процедуру использования этих ресурсов для париования причин, вызвавших нештатную ситуацию [4—6].

Современные и перспективные требования к локализации причин нештатных ситуаций в работе спутников обуславливают поиск новых более эффективных и конструктивных подходов, базирующихся на рациональном париовании посредством минимальных избыточных аппаратных средств и с помощью значительных программных средств восстановления работоспособности отказавших компонентов, приборов и гибкого их использования. Многообещающим представляется подход ситуационного париования причин нештатных ситуаций, основанный на гибком управлении значительными унифицированными и универсальными избыточными ресурсами восстановления неработоспособных компонент и всей системы в целом. Эффекты от такого подхода — это существенное снижение массы и габаритных размеров избыточного приборного оборудования, а следовательно, уменьшение бортового энергопотребления и, в конечном счете, повышение эффективности всей спутниковой миссии в целом.

Выполнение сформированных положений париования причин нештатных ситуаций возможно путем *самоорганизации* СУДН, которая осуществляется с помощью принципа трехуровневой иерархии.

*Первый уровень иерархии — блоковый.* На этом уровне обеспечивается функциональная работоспособность единичных или объединенных конструктивно законченных блоков, которые выполняют целевые функциональные преобразования для СУДН. Для измерения углового положения и угловых скоростей спутника относительно центра масс в зависимости от решаемых задач используются различные по принципу действия, конструктивным решениям и функциональным возможностям инерциальные датчики. Оснащение инерци-

альной навигационной системы аппаратно-программными средствами диагностирования и парирования причин нештатных ситуаций позволяет обеспечить функциональную работоспособность блока датчиков (ФРБД) в нештатных ситуациях. Этот блок при наличии причин, приводящих к нарушениям функционирования датчиков и искажению результатов измерений, должен обладать способностью самовосстановления измерений до приемлемых точностей. Обладая такими свойствами блок не будет распространять последствия причины нештатной ситуации, возникшей в нем, на другие компоненты СУДН, изменяя режимы их функционирования и вызывая цепную реакцию причин нештатных ситуаций, возможность диагностирования которых в реальном масштабе времени принципиально ограничена, а следовательно, существенно уменьшаются возможности их парирования.

При проектировании исполнительных органов СУДН формируются такие конструктивно законченные блоки, в которых применяются избыточные исполнительные органы, а также аппаратно-программные средства диагностирования и парирования возможных причин нештатных ситуаций. Такой блок, обладающий новыми свойствами, называется *функционально работоспособным блоком приводов* (ФРБП). Причины нештатных ситуаций, возникающих в таком блоке, диагностируются и парируются в реальном масштабе времени, что не сказывается на формировании необходимых управляющих моментов на спутник и на качество функционирования всей СУДН.

Третьим функционально законченным компонентом функционально работоспособной СУДН является *блок вычислителей* (ФРБВ), который формируется для подавления влияния причин нештатных ситуаций, возникающих при работе спутника и при реализации межблочных связей.

*Второй уровень иерархии самоорганизации — системный.* На этом уровне выполняется диагностирование функционального состояния всей СУДН, в результате чего при появлении причины нештатной ситуации находится место ее возникновения, устанавливается ее класс и конкретный вид, т. е. полностью определяется причина, вызвавшая ухудшение параметров функционирования спутниковой системы. После этого включается процедура парирования нештатной ситуации посредством имеющихся на борту избыточных ресурсов в целях восстановления функциональной работоспособности СУДН.

*Третий уровень самоорганизации — мегасистемный.* На этом уровне осуществляется диагностирование всей космической миссии, т. е. проекта в целом при появлении причины не-

штатной ситуации, которую не удалось диагностировать и парировать на нижних уровнях (блоковом и системном). При этом локализуется та часть миссии, где возникла причина нештатной ситуации, по доступной информации она классифицируется и определяется ее вид. На основании этого диагноза и имеющихся ресурсных возможностей на борту спутника и в ближайшей космической окрестности, а также в центре управления полетом и с учетом многих факторов политического, военного, экономического, стратегического характера принимается решение по парированию этой мегасистемной причины нештатной ситуации.

Проведенные исследования позволяют сформировать новый адаптивный трехуровневый подход к обеспечению функциональной работоспособности СУДН (рис. 2), заключающийся в применении основных принципов и результатов современной теории автоматического управления, а также методов сигнально-параметрического диагностирования систем и ситуационного парирования причин нештатных ситуаций [6, 17–19].

Модели, необходимые для реализации предлагаемой концепции, должны быть более полными, позволяющими моделировать объект как в номинальном, так и в аварийном режимах, а подходы к парированию причин нештатных ситуаций должны базироваться на методах анализа и управления имеющейся избыточностью, а также на возможности формировать критерии определения необходимого уровня избыточности. При использовании методов управления избыточностью синтез алгоритмов осуществим с использованием синтезируемых диагностических моделей, связывающих прямые и косвенные признаки причин нештатных ситуаций.

**Диагностическое обеспечение функционально работоспособных СУДН.** В рамках предлагаемой концепции системотехнического обеспечения функциональной работоспособности СУДН особенность глу-

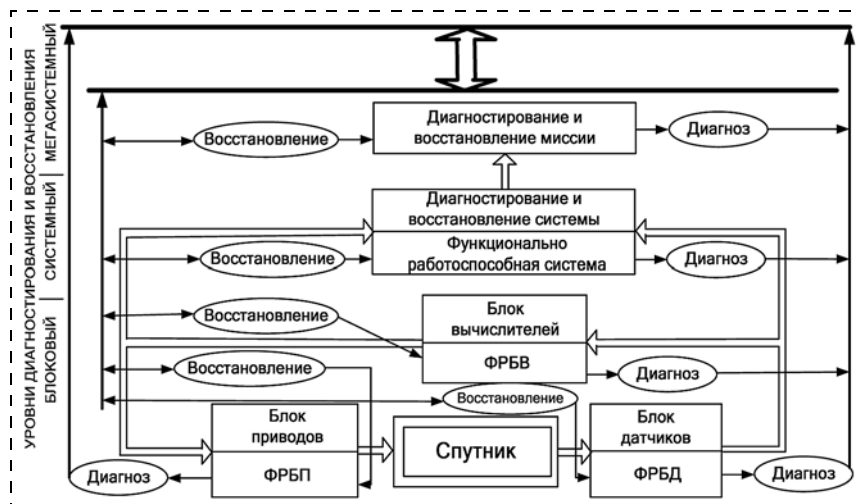


Рис. 2. Функциональная схема иерархического обеспечения функциональной устойчивости СУДН

бокого диагностирования заключается в том, что процесс поиска причины нештатной ситуации декомпозируется на четыре этапа. Первый этап — *системный*. Здесь решается задача определения наличия нештатной ситуации. Второй этап — *компонентный*. На этом этапе решается задача поиска компонента, в котором возникла причина нештатной ситуации — места. Этап третий — *внутрикомпонентный*, на котором устанавливается, к какому классу принадлежит причина нештатной ситуации. Заключительный этап — *причинный*. На этом этапе определяется устранимая в последующем причина нарушения функциональных свойств конкретного элемента.

Реализация этого принципа приводит к многошаговой процедуре поиска парируемых причин нештатных ситуаций. В основе любой многошаговой процедуры поиска находится структурная модель дихотомического типа, называемая также древовидной схемой или дихотомическим деревом (рис. 3).

Структура модели поиска в форме дихотомического дерева представляет собой по сути одну из разновидностей направленного графа. В вершинах такого графа используется условие перехода типа "если — то". Для реализации этого условия в наибольшей степени подходят конструкции в форме двузначных предикатов, позволяющих преобразовывать дискретные функции в значения "нуль" или "единица":

$$s_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_k |\Delta y_i(k)| \geq \delta_{i0}; \\ 0 & \text{при } \sum_k |\Delta y_i(k)| < \delta_{i0}, \quad i = \overline{1, m}, \end{cases}$$

где  $k = \overline{0, T}$  — дискретные значения моментов времени, соответствующих интервалу наблюдения;  $\Delta y_i(k)$  — отклонение  $i$ -го признака от номинального значения,  $i = \overline{1, m}$ ;  $\delta_{i0}$  — пороговое значение допустимого изменения  $i$ -го признака,  $i = \overline{1, m}$ .

Чтобы сформировать предикаты, необходимо располагать математическими конструкциями, связывающими прямые, недоступные измерению, характеристики причины нештатной ситуации с косвенными, доступными измерению. Эти математические конструкции представляют собой особый класс математических моделей — *функциональные диагностические модели* (ФДМ). ФДМ отражают связь между причиной нештатной ситуации и ее следствием. Как правило, причина нештатной ситуации недоступна непосредственно измерению или же ее измерение приводит к усложнению и удорожанию изделия, а также к снижению эффективности его функциони-

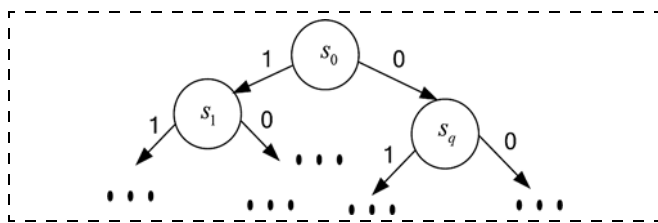


Рис. 3. Иерархическая структура диагностического обеспечения

рования. В этих условиях более рациональным представляется использование штатных измерителей, а именно датчиков, с помощью которых в результате последующей обработки сигналов получается информация о нештатной ситуации в виде признаков, соответствующих решаемой задаче. *Признаки причины нештатной ситуации* — это сигнальные или параметрические характеристики, измеренные в различных шкалах и отражающие отклонения от номинальных свойств объекта диагностирования.

Среди множества подходов к диагностированию технических систем в контексте рассматриваемой концепции наиболее приемлем сигнально-параметрический подход, обеспечивающий глубину диагностирования, адаптированную к имеющимся ресурсам восстановления [20].

В *сигнально-параметрическом подходе* используются характеристики нештатной ситуации как в сигнальной форме, так и в параметрической. Это позволяет конструктивно строить эффективные процедуры глубокого диагностирования с точностью до парируемой причины нештатной ситуации. Основой этого подхода являются создаваемые в зависимости от контекста решаемой задачи специальные ФДМ, которые связывают отклонения от эталонного поведения сигнальных характеристик объекта с отклонениями от номинальных значений соответствующих целевых диагностических признаков. *Диагностический признак* — отклонение текущего значения параметра системы, характеризующего его техническое состояние, от его номинального значения.

При разработке алгоритмических средств глубокого диагностирования применяются диагностические логические модели (ДЛМ), отражающие бинарную качественную связь между прямыми и косвенными диагностическими признаками объекта диагностирования. ДЛМ строятся на основании ФДМ с использованием предикатных уравнений.

Применяемый подход к разработке диагностического обеспечения СУДН в значительной степени формализован, так как базируется на аналитических диагностических моделях. Это позволяет создавать программные средства автоматизации процесса формирования диагностического обеспечения. Такие программные средства:

- во-первых, дополняют существующие комплексы автоматизированного проектирования, что способствует сокращению ресурсов на выполнение проектов;
- во-вторых, дают возможность регламентировать процесс формирования диагностического обеспечения, позволяющего достичь новый уровень в глубине и качестве диагноза;
- в третьих, представляют собой основу для разработки средств автоматизации реабилитационного обеспечения СУДН с учетом нештатных ситуаций.

**Ситуационное парирование причин нештатных ситуаций в функционально работоспособных СУДН.** Ситуационное парирование причин нештатных ситуаций заключается в гибком управлении про-

граммно-аппаратными избыточными средствами в зависимости от возникшей причины нештатной ситуации. Этот подход основывается на:

- полном диагностировании функционального состояния объекта, отражающем время появления причины нештатной ситуации, ее место, класс и вид;
- наличии избыточных ресурсов, покрывающих множество устранимых причин нештатных ситуаций;
- концепции выбора избыточного ресурса, учитывающей предыдущие нештатные ситуации исходя из текущей ситуации и задач миссии;
- методах эффективного парирования нештатной ситуации объекта диагностирования;
- средствах определения технического состояния восстановленного объекта диагностирования.

Реализация ситуационного подхода к парированию причины нештатной ситуации СУДН достигается путем формирования процедур выбора средств восстановления функциональной работоспособности системы на основании полученного диагноза.

На первом этапе разработки процедур выбора средства парирования анализируются рассматриваемые причины нештатных ситуаций с точки зрения возможности их парирования за счет имеющихся в наличии средств.

Предварительный анализ связей между причинами нештатных ситуаций и средствами их парирования типовых СУДН малогабаритных космических аппаратов подтверждает гипотезу о том, что одно и то же средство может быть использовано для парирования нескольких причин нештатных ситуаций, а влияние одной и той же аномалии может быть парировано за счет использования различных средств [4, 5, 15, 16]. Например, нештатная ситуация, приводящая к изменению преобразовательных свойств функционального элемента в одном из исполнительных механизмов, может быть парирована как сигнальной подстройкой управляющего сигнала, так и реконфигурацией аппаратуры. При этом обеспечивается компенсация ошибки формирования управляющего и кинетического моментов дефектного исполнительного механизма за счет структурной избыточности [5, 6].

Наличие перекрестных связей между средствами парирования и нештатными ситуациями обуславливает необходимость применения ситуационного подхода, позволяющего на основании информации о возникших нештатных ситуациях и текущем состоянии СУДН наиболее эффективно выбирать средства парирования.

Концептуально ситуационный подход парирования причины нештатной ситуации СУДН основан на том, что при выборе средств парирования учитывается множественность связей между причинами и имеющимися избыточностями (средствами парирования). С этой целью каждому  $j$ -му средству парирования ставится в соответствие характеристика  $P_j$ , численное значение которой равняется

Связи нештатных ситуаций и средств парирования СУДН

Причины	Средства парирования					
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	...	$W_S$
$d_1$	1	1	0	0	...	1
$d_2$	1	1	1	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...
$d_N$	1	0	0	0	...	1

числу нештатных ситуаций, парируемых за счет  $j$ -го средства.

Для расчета  $P_j$  на этапе выбора средства парирования связи между множествами причин нештатных ситуаций и средствами парирования задаются в виде приводимой таблицы.

Эта таблица формируется таким образом, что в ней число строк равно числу причин нештатных ситуаций  $N$ , а число столбцов — числу средств парирования  $S$ . Значение ячейки таблицы на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца определяется в результате решения предикатного уравнения (1) и равняется "1" в случае, если  $i$ -я причина нештатной ситуации может быть компенсирована  $j$ -м средством восстановления, и "0" — если не может.

Для парирования обнаруженной причины нештатной ситуации  $d_m$  в СУДН выбирается такое средство  $W_S$ , которое содержит "1" в строке с номером  $m$ , и наименьшую сумму  $P_j$  элементов в соответствующем столбце.

В случае, если было определено сразу несколько средств парирования с идентичными значениями  $P_j$ , среди них выбирается то средство, которое обладает наивысшим приоритетом, установленным на этапе синтеза процедур парирования.

Для окончательного построения процедур выбора средства парирования причин нештатной ситуации целесообразно введение дополнительных признаков.

Некоторые причины нештатных ситуаций могут быть парированы реконфигурацией аппаратуры еще до полного окончания процедур диагностирования, следовательно, процесс выбора средства парирования начинается сразу после завершения процедуры поиска места возникновения.

В случае, если для компенсации причины нештатной ситуации может быть использована реконфигурация аппаратуры, то с момента, когда определено место ее возникновения, и до момента определения ее вида осуществляется парирование за счет имеющейся в наличии структурной избыточности. Второй этап выбора средства парирования причины нештатной ситуации начинается с момента завершения процедур диагностирования и получения полного диагноза.

На основании информации о нештатной ситуации, с учетом дополнительных признаков, осуществляется окончательный выбор средства парирования причины нештатной ситуации. В случае, если

ресурса выбранного средства парирования недостаточно, данный ресурс исключается из таблицы, и выбор средства восстановления осуществляется заново. Этот процесс длится до тех пор, пока средство парирования, позволяющее компенсировать влияние обнаруженной причины нештатной ситуации, не будет определено либо не будет выполнен переход на другой уровень обеспечения функциональной работоспособности.

Использование описанного выше метода выбора средства парирования в зависимости от результатов диагностирования повышает оперативность реагирования на появление в СУДН причин нештатных ситуаций, а также позволяет эффективно использовать имеющиеся в наличии избыточные ресурсы.

**Пример реализации многоуровневого системотехнического обеспечения функциональной работоспособности СУДН.** В целях исследования работоспособности синтезированных средств обеспечения функциональной работоспособности разработан специализированный аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий исследовать процессы управления СУДН с избыточным числом двигателей-маховиков и датчиков угловой скорости в ФРБП и ФРБД в номинальном и нештатных режимах ее работы. Внешний вид АПК представлен на рис. 4.

Функциональный состав АПК позволяет подвергать СУДН влиянию широкого спектра разнообразных причин нештатных ситуаций, а также исследовать поведение СУДН в номинальных и аварийных режимах. Таким образом, создаются условия для отладки, доводки и коррекции разработанных моделей и методов обеспечения функциональной работоспособности СУДН.

Созданный АПК позволяет обрабатывать все основные режимы работы СУДН как в номинальном (штатном) режиме работы, так и в аварийных (нештатных) режимах. Проведенные на стенде макетного образца СУДН исследования в нештатных режимах работы показали работоспособность раз-



Рис. 4. Внешний вид АПК для исследования моделей и методов обеспечения функциональной работоспособности СУДН

работанных моделей и методов глубокого диагностирования и ситуационного парирования причин нештатных ситуаций.

**Заключение.** В результате проведенных исследований проведена унификация предложенных моделей и методов диагностирования, а также сформирована схема разработки алгоритмического обеспечения диагностирования функционального состояния СУДН. Предложенный подход упорядочивает процесс разработки и обеспечивает уменьшение затрат и улучшение качества, т. е. повышение эффективности разработки диагностического обеспечения.

Использование разработанных модифицированных ФДМ для восстановления функционального состояния динамического объекта позволяет провести унификацию предложенных моделей и адаптацию известных методов, а также сформировать схему разработки алгоритмического обеспечения ситуационного восстановления функционального состояния СУДН. В предложенной схеме систематизированы полученные в результате проведенных исследований знания, инструментальные средства и конкретный опыт по разработке алгоритмов. Использование такой схемы в реальных проектах позволило повысить качество функционирования модулей восстановления и сокращение сроков и средств их разработки.

#### Список литературы

1. Петухов Р. А., Евстифеев В. В., Палкин М. В. Комбинированная система управления угловым движением малого космического аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С. 62–67.
2. Алешкин В. В., Плотноков П. К., Челноков Ю. Н. Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 60–65.
3. Заведеев А. И., Архипов Р. А. Особенности применения малоизбыточных кратных гиросиловых систем управления ориентацией космических аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 73–78.
4. Фирсов С. Н. Формирование устойчивой к отказам структуры измерителей параметров движения систем ориентации и стабилизации // Гироскопия и навигация. 2013. № 4 (83). С. 72–83.
5. Фирсов С. Н. Формирование устойчивых к отказам блоков двигателей маховиков спутниковых систем стабилизации и ориентации // Теория и системы управления. 2014. № 4 (83). С. 83–104.
6. Фирсов С. Н. Методология обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 208 с.
7. Айзенберг Я. Е. Ракеты, жизнь, судьба. Х.: Инвестор, 2010. 176 с.
8. Котович В. И. Научно-производственное предприятие Хартрон-Аркос. Хроника дат и событий. 1959–2005. Х.: НПП Хартрон-Аркос, 2006. 212 с.
9. Айзенберг Я. Е. Динамическая обработка программного обеспечения бортовых вычислительных машин систем управления объектов ракетно-космической техники // Космічні науки і технології. 1997. Т. 3. С. 4–18.
10. Айзенберг Я. Е. Концепция построения системы управления АКА серии "Спектр" // Космічні науки і технології. 1995. Т. 1. С. 1–14.
11. Айзенберг Я. Е. Высокоточные системы стабилизации ракеты-носителя асимметричной конфигурации с учетом возможности отказа одного двигателя // Космічні науки і технології. 1998. Т. 4. № 1. С. 5–9.
12. Басыров А. Г., Лебедев Д. М., Мاستин А. Б. Планирование параллельной обработки информации в высокопроизводи-

тельных вычислительных системах бортовых комплексов управления космическими аппаратами // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2011. № 1. С. 74–77.

13. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. Бортовые системы управления космическими аппаратами. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.

14. Ахметов Р. В., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования земли в аномальных ситуациях // Механика и машиностроение. 2009. Т. 11. № 3. С. 165–176.

15. Проектирование и экспериментальная обработка систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций: учебник в 3 т. / Под общей ред. Ю. С. Алексеева, Ю. М. Златкина, В. С. Кривонова, А. С. Кулика, В. И. Чумаченко. Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", НПП Хартрон-Аркуос, 2012. 680 с.

16. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения / Под ред. В. С. Харченко. Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", 2011. 641 с.

17. Фирсов С. Н. Обеспечение функциональной устойчивости системы стабилизации и ориентации малогабаритного автономного летающего изделия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5. С. 54–60.

18. Фирсов С. Н., Резникова О. В. Аппаратно-программный комплекс экспериментальной отработки процессов управления, диагностирования и парирования отказов малых космических аппаратов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 6. С. 60–69.

19. Фирсов С. Н. Обеспечение функциональной устойчивости стабилизации и ориентации космического аппарата // ScienceRise. 2014. № 1 (1). Р. 32–41.

20. Кулик А. С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. Х.: Бизнес Информ, 2000. 260 с.

## Multilevel Systems Engineering for the Functional Stability of the Small-Sized Spacecraft Movement and Navigation Control Systems

S. N. Firsov, sn.firsof@gmail.com,

National Aerospace University named after Zhukovsky, KhAI, Kharkov, 61000, Ukraine

Received on November 25, 2014

*Here we present one of the possible solutions to the scientific and applied problem of ensuring the functional stability of the small-sized spacecraft stabilization and orientation systems. Our research resulted in unification of the proposed models and methods of diagnostics, as well as presentation of a scheme for development of the algorithmic support for diagnostics of the functional condition of the movement and navigation control system (MNCS). The proposed approach organizes the development process and ensures a reduction of labor costs and quality improvement, i.e. an increase of the efficiency of the diagnostic software engineering. Application of the modified FDM developed to restore the functional state of a dynamic object provided opportunities to unify the proposed models and to adapt the known methods, as well as to form a scheme for development an algorithmic support for the situational restore of the functional condition of the MNCS. The proposed scheme systematizes knowledge, tools and specific experience in the development of algorithms obtained from the studies. The use of such a scheme in real projects can improve the quality of functioning of the recovery modules and save time and resources for their development.*

**Keywords:** small-sized spacecraft, functional stability, emergency situation, satellite system, control and navigation system

For citation:

Firsov S. N. Multilevel Systems Engineering for the Functional Stability of the Small-Sized Spacecraft Movement and Navigation Control Systems, *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 345–352.

DOI: 10.17587/mau.16.345-352

### References

1. Petuhov P. A., [Evsitfeev V. V.], Palkin M. V. *Kombinirovannaja sistema upravlenija ugloym dvizheniem malogo kosmicheskogo aparata* (The combined control system angular motion of small spacecraft), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2014, no. 4, pp. 62–67 (in Russian).

2. Aleshkin V. V., Plotnikov P. K., Chelnokov Ju. N. *Opreделение konfiguracionii bloka datchikov pri asimptoticheskom ocenivanii parametrov dvizhenija* (Determination of the configuration of the sensor unit in the asymptotic estimation of motion parameters), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 2, pp. 60–65 (in Russian).

3. Zavedeev A. I., Arhipov P. A. *Osobennosti primenenija malo izbytoch-nyh kratnyh grosilovyhs system upravlenija orientaciej kosmicheskikh apparatov* (Features of the application a little redundant multiple power gyroscope systems attitude control of spacecraft), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 2, pp. 73–78 (in Russian).

4. Firsov S. N. *Formirovanie ustojchivoj k otkazam struktury izmeritelej parametrov dvizhenija system orientacii i stabilizacii* (Formation of fault tolerance structure gauges motion parameters of the orientation and stabilization), *Giroskopija i Navigacija*, 2013, no. 4 (83), pp. 72–83 (in Russian).

5. Firsov S. N. *Formirovanie ustojchivyh k otkazam blokov dvigatelej mahovikov sputnikovyh sistemstabilizacii i orientacii* (Formation of fault tolerance engine blocks flywheels satellite systems stabilization and orientation), *Teorija i Sistemy Upravlenija*, 2014, no. 4 (83), pp. 83–104 (in Russian).

6. Firsov S. N. *Metodologija obespechenija funkcional'noj ustojchivosti sputnikovyh system* (Methodology to ensure functional stability of satellite systems), LAT LAMBERT Academic Publishing, 2014, 208 p. (in Russian).

7. Ajzenberg Ja. E. *Rakety, zhizn', sud'ba* (Rockets, life, fate), Khar'kov, Investor, 2010, 176 p. (in Russian).

8. Kotovich V. I. *Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie Hartron-Arkos. Hronikadat i sobytij. 1959–2005* (Research and Production Enterprise Hartron Arcos. Chronicle of dates and events. 1959–2005), Khar'kov, NPP Hartron-Arkos, 2006, 212 p. (in Russian).

9. Ajzenberg Ja. E. *Dinamicheskaja obrabotka programmnoho obespechenija bortovyh vychislitel'nyh mashin system upravlenija ob'ektov raketno-kosmicheskoi tehniki* (Dynamic processing software onboard computers systems management facilities rocket and space technology), *Kosmichni Naukii Tehnologii*, 1997, vol. 3, pp. 4–18 (in Ukrainian).

10. Ajzenberg Ja. E. *Koncepcija postroenija sistemy upravlenija AKA serii "Spektr"* (The concept of building management systems RSC series "Spectrum"), *Kosmichni Naukii Tehnologii*, 1995, vol. 1, pp. 1–14 (in Ukrainian).

11. Ajzenberg Ja. E. *Vysokotochnye sistemy stabilizacii rakety-nositeja assimetrichnoj konfiguracii s uchetom vozmozhnosti otkaza odnogo dvigatelja* (Precision stabilization system booster asymmetric configuration with the possibility of failure of one engine), *Kosmichni Nauki i Tehnologii*, 1998, vol. 4, no. 1, pp. 5–9 (in Ukrainian).

12. **Basyrov A. G., Lebedev D. M., Mastin A. B.** *Planirovanie parallel'noj obrabotki informacii v vysokoproizvoditel'nyh vychislitel'nyh sis-temah bortovyh komp'nykh upravlenija kosmicheskimi apparatami* (Planning for parallel processing of information in high-performance computing systems onboard spacecraft control systems), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2011, no. 1, pp. 74–77 (in Russian).

13. **Brovkin A. G., Burdygov B. G., Gordijko S. V.** *Bortovye sistemy upravlenija kosmicheskimi apparatami* (The onboard systems of spacecraft control), Moscow, MAI-PRINT, 2010, 304 p. (in Russian).

14. **Ahmetov R. V., Makarov V. P., Sollogub A. V.** *Koncepcija avtonomnogo upravlenija zhivuchest'ju avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov distancionnogo zondirovanija zemli v anomal'nyh situacijah* (The concept of autonomous control of unmanned spacecraft survivability of remote sensing in abnormal situations), *Mehanika i Mashinostroenie*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 165–176 (in Russian).

15. **Alekseeva Ju. S., Zlatkina Ju. M., Krivcova V. S., Kulika A. S., Chumachenko V. I.** *Proektirovanie i jeksperimental'naja otrabotka sistem upravlenija ob'ektov raketno-kosmicheskoi tehniki* (Design and experimental development of control systems Ob-projects rocket and space technology. T. 2. Design of Control Systems Outer vehicles and orbital station modules: a textbook in 3 volumes.), Khar'kov, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", NPP Hartron-Aeros, 2012, 680 p. (in Russian).

16. **Harchenko V. S.** *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur: matematicheskie i inzhenernye metody analiza i obespechenija* (Security of critical infrastructures: mathematical and engi-stock-analysis methods

and software), Khar'kov, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", 2011, 641 p. (in Russian).

17. **Firsov S. N.** *Obespechenie funkcional'noj ustojchivosti sistemy stabilizacii i orientacii malogabaritnogo avtonomnogo letajushhego izdelija* (Ensuring the functional stability of the system stabilization and targeting small-sized autonomous letayushhego products), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2014, no. 5, pp. 54–60 (in Russian).

18. **Firsov S. N., Reznikova O. V.** *Apparatno-programmnyj kompleks jeksperimental'noj otrabotki processov upravlenija, diagnostirovanija i parirovanija otkazov malyh kosmicheskikh apparatov* (Hardware-software complex experimental development management processes, diagnosis and parry bounce small spacecraft), *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2014, no. 6, pp. 60–69 (in Russian).

19. **Firsov S. N.** *Obespechenie funkcional'noj ustojchivosti stabilizacii i orientacii kosmicheskogo apparata* (Ensuring functional stability and stabilization of the orientation of the spacecraft), *Science Rise*, 2014, no. 1 (1), pp. 32–41.

20. **Kulik A. S.** *Signal'no-parametricheskoe diagnostirovanie sistem upravlenija* (The signal-parametric diagnostics of control systems), Khar'kov, Biznes Inform, 2000, 260 p. (in Russian).

*Corresponding author:*

**Firsov Sergey N.**, Ph. D, Associate Professor, National Aerospace University named after Zhukovskiy, KhAI, Kharkov, 61000, Ukraine, e-mail: sn.firsov@gmail.com

УДК 531.383

**М. А. Барулина**, канд. техн. наук, науч. сотр., marina@barulina.ru,  
Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

## Построение матрицы масс трехмерного конечного элемента для моделирования динамики микромеханических датчиков инерциальной информации и их узлов

*Построена матрица масс трехмерного конечного элемента, полностью учитывающая теорию Тимошенко — жесткость сечения балки на изгиб и сдвиг сечения при деформации. Полученная матрица масс обобщает построенные ранее матрицы масс для подобных элементов. Показана возможность использования конечного элемента с предлагаемой матрицей масс для численного моделирования динамических процессов и нагрузок в микромеханических датчиках инерциальной информации и их узлах.*

**Ключевые слова:** микромеханический гироскоп, микромеханический акселерометр, конечно-элементное моделирование, теория Тимошенко, вибрации, динамическое воздействие, матрица масс

### Введение

Одним из главных недостатков, препятствующих более широкому использованию микромеханических датчиков, к которым относятся и микромеханические гироскопы (ММГ) и акселерометры (ММА), остается их относительно невысокая точность [1–5]. Так, современные ММГ демонстрируют стабильность систематического дрейфа на уровне единиц и десятков градусов в час (гироскоп ММГ-ЭПТРОН фирмы ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, Россия; QRS11 фирмы Systron Donner, США) [2, 3]. При этом требование к точности современных систем навигации и управления неуклонно растут. Требования по дрейфу ("уходу") для современных прецизионных датчиков инерциальной информации находятся на уровне сотых, тысячных и менее угловых градусов в час [1, 4, 5]. Такие требования к точности приборов обуславливают

необходимость глубокого, с достаточной степенью обобщения, исследования особенностей взаимного влияния различных по своей природе физических процессов, учета влияния внешней среды функционирования этих датчиков и, в частности, таких важнейших факторов, оказывающих влияние на точность и эффективность приборов инерциальной информации, как вибрационные воздействия.

При эксплуатации в реальных условиях микромеханические датчики инерциальной информации могут испытывать вибрации с амплитудами до 10g и с частотами до 2 кГц. Так как микромеханические гироскопы имеют подвижную вибрирующую часть [4, 5], то при проектировании и исследовании микромеханических датчиков инерциальной информации представляется важным более точное моделирование колебательных процессов, происходящих в приборе. Также важно при моделировании результата, более близкого к реальным процессам,