

УДК 681.5.015:629.7.05

С.Н. ФИРСОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ

*Введены показатели функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации космических аппаратов. Предложены методы оценки введенного комплексного показателя уровня функциональной устойчивости систем ориентации и стабилизации, а также получены критерии, позволяющие количественно оценивать уровень функциональной устойчивости перспективной и классической спутниковых систем стабилизации. Показано, что применение методологии обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации позволяет значительно повысить уровень работоспособности как типового динамического объекта, так и всей системы в целом.*

**Ключевые слова:** спутниковая система стабилизации и ориентации, функциональная устойчивость, комплексный показатель функциональной устойчивости.

### Введение

Выбор показателей функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации (ССО) космических аппаратов – важный и ответственный этап формирования теоретических основ данного свойства систем и, кроме того, обоснования программы отработки свойства функциональной устойчивости ССО космических аппаратов (КА) [1 – 3]. Процесс выбора сопряжен с необходимостью удовлетворения ряда противоречивых требований, предъявляемых к показателям. Разрешение этих противоречий возможно путем разумного компромисса, также использования в ряде специфических задач системы частных показателей, область использования которых ограничена. Именно поэтому формирование показателей функциональной устойчивости ССО КА является актуальной и востребованной задачей.

### Постановка задачи исследования

Из опыта эксплуатации ССО КА вытекает тот факт, что основу требований к их показателям функциональной устойчивости составляют:

- по смысловому содержанию выбор показателей должен соответствовать определению свойства функциональной устойчивости систем;
- показатель должен обеспечивать достаточно высокий уровень системности исследований;
- показатель должен обеспечивать возможность разработки моделей обеспечения функциональной устойчивости ССО МКА, доступных для проведения исследований и выполнения расчетов;

– показатель должен быть чувствительным к изменениям на уровне характеристик свойства функциональной устойчивости.

На основании рассмотренных требований необходимо сформировать показатели функциональной устойчивости ССО КА, отражающие в той или иной степени соответствие проектируемой или эксплуатируемой системы указанным требованиям.

### Показатели функциональной устойчивости

В современной литературе преобладают вероятностные показатели функциональной устойчивости, для оценки этих показателей в теории надежности разработаны определенные методики, рассматривающие отказы как вероятные события. Однако в связи с тем, что при адаптивном подходе отказ характеризуется неопределенностью, связанной со временем, местом возникновения, а также классом и видом отказа, теория вероятностей не дает подходящего механизма для определения уровня функциональной устойчивости. Поэтому необходимо введение других показателей, учитывающих специфику применяемого подхода, а также характеризующих качество обеспечения функциональной устойчивости. Анализ адаптивного подхода позволяет выделить следующие основные факторы, обеспечивающие функциональную устойчивость без введения дополнительной избыточности: модели и инструментальные средства технической диагностики; модели и инструментальные средства восстановления работоспособности. К общим показателям, характеризующим качество использования моделей и инструментальных средств техниче-

ской диагностики и восстановления работоспособности можно отнести:

- оперативность диагностирования функционального состояния ССО КА, с;
- оперативность восстановления работоспособности элементов ССО КА, с;
- достоверность технического диагностирования (степень объективного соответствия результатов диагностирования действительному функциональному состоянию ССО КА);
- средняя эффективность восстановления (арифметическое среднее эффективности восстановления после вида отказа каждым видом ресурса);
- трудоемкость восстановления (затраты (энергетические, временные, стоимостные, ресурсные и др.) на восстановление);
- коэффициент сохранения эффективности (отношение значения показателя эффективности использования ССО КА по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что виды отказов ССО КА в течение того же периода не возникают);
- сложность программных средств диагностирования;
- сложность программных средств восстановления;
- уровень функциональной устойчивости (комплексная характеристика, задаваемая указанием достоверности, глубины диагностирования, эффективности восстановления и времени диагностирования и восстановления):

$$L=f(D, \lambda, E_{cp}, t_d, t_b), \quad (1)$$

где  $D$  – достоверность технического диагностирования;  $\lambda$  – глубина диагностирования;  $E_{cp}$  – средняя эффективность восстановления;  $t_d$ ,  $t_b$  – время диагностирования и восстановления соответственно;

- срок активного использования (календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации ССО КА или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние).

Общие показатели, в большинстве случаев, являются комплексными и включают в себя ряд частных, позволяющих более точно охарактеризовать качество обеспечения функциональной устойчивости. К частным показателям функциональной устойчивости относятся:

- максимальное время диагностирования функционального состояния ССО КА, с (ожидаемое максимальное время диагностирования функционального состояния ССО КА для заданного множества видов отказов (определяется требуемой глубиной диагностирования));
- глубина диагностирования (характеристика,

задаваемая указанием этапа, с точностью до которого осуществляется диагностирование; этапы: обнаружение, поиск места, установление класса, определение вида);

- коэффициент охвата (отношение числа элементов, для которых введена избыточность, к числу элементов);
- коэффициент покрытия видов отказов (возможность самостоятельного устранения определенных видов отказов при условии, что возникший вид отказа принадлежит заданному множеству видов отказов);
- адекватность диагностических моделей;
- максимальное время восстановления работоспособности элементов ССО КА, с (ожидаемое максимальное время восстановления работоспособного состояния элементов ССО КА после отказа (для заданного множества видов отказов));
- остаточный ресурс (множество ресурсов от момента восстановления работоспособного состояния до возникновения нового вида отказа);
- предельный ресурс (множество ресурсов, при котором поддержание и (или) восстановление работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно).

Требуемые числовые значения показателей функциональной устойчивости определяются с учетом следующих факторов:

- вид отказа и характеристики видов отказов;
- возможные последствия и величины ущербов вследствие отказов;
- достигнутый уровень функциональной устойчивости аналогичных с ССО КА;
- возможные пути повышения и обеспечения функциональной устойчивости.

Так, например, показатель оперативности диагностирования функционального состояния ССО КА является комплексным показателем, характеризующимся такими показателями как максимальное и минимальное время диагностирования. Величина показателей максимального и минимального времени диагностирования зависит от организации дихотомического дерева диагностирования и требуемой глубины диагностирования:

$$\begin{aligned} t_{\min} &= \sum_{i=1}^G t_{i1} = \sum_{i=1}^G (t_{op} \cdot N_{op})_{i1}; \\ t_{\max} &= \sum_{i=1}^G t_{iq} = \sum_{i=1}^G (t_{op} \cdot N_{op})_{iq}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $t_{i1}$  – время прохождения по дихотомическому дереву с глубиной  $G$  ветви с минимальной длиной;  $t_{iq}$  – время прохождения по дихотомическому дереву с глубиной  $G$  ветви с максимальной длиной;  $t_{op}$  – время выполнения одного оператора в процедуре диагностирования на данном уровне иерархии задач

диагностирования;  $N_{op}$  – количество операторов.

Показатель оперативности восстановления работоспособности элементов ССО КА также является комплексным показателем, характеризующимся такими показателями как максимальное и минимальное время восстановления. Величина показателей максимального и минимального времени восстановления зависит от вида выбранного ресурса и требуемого качества восстановления:

$$\begin{aligned} t_{\min} &= t_{i1} = t_{pd\_i1} + t_{kom\_i1} + t_{pp\_i1}; \\ t_{\max} &= t_{iw} = t_{pd\_iw} + t_{kom\_iw} + t_{pp\_iw}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $t_{i1}$  – время восстановления работоспособности первым ресурсом;  $t_{iw}$  – время восстановления работоспособности  $w$  – м ресурсом;  $t_{pd}$  – время подготовки ресурса;  $t_{kom}$  – время коммутации ресурса;  $t_{pp}$  – время переходного процесса.

Показатель достоверности функционального диагностирования определяет степень объективного соответствия диагноза действительному функциональному состоянию ССО КА. Данный показатель определяется адекватностью диагностических моделей.

Показатель средней эффективности восстановления определяется следующим образом:

$$E_{cp} = \frac{1}{N} \sum_i E_i, \quad (4)$$

где  $E_i$  – эффективность восстановления  $i$ -тым ресурсом,  $E_i = y_{i\_vost} / y_{i\_nom}$ .

Динамическая сложность характеризуется такими показателями, как вычислительная сложность, сложность подготовки данных, сложность анализа результатов вычислений. Вычислительная сложность является групповым показателем и включает в себя следующие показатели: время решения задачи, объем памяти, емкость запоминающих устройств и ряд других.

### Критерии функциональной устойчивости ССО КА

Все существующие категории критериев, предназначенные для оценки составляющих качества функциональной устойчивости систем, можно свести к трем группам: критерии пригодности, сравнительной оценки и оптимальности.

Критерий пригодности можно сформировать в виде неравенства:

$$L \geq L_{зад}, \quad (5)$$

где  $L_{зад}$  – заданное значение показателя уровня функциональной устойчивости.

Данный критерий предназначен для обоснования требований к уровню отказоустойчивости сис-

тем управления с учетом заданного уровня.

Критерий сравнительной оценки представляет собой неравенство вида:

$$L_i \geq L_j, \quad (6)$$

где  $L_i$ ,  $L_j$  – показатели уровня функциональной устойчивости  $i$  и  $j$  вариантов ССО МКА.

Данный критерий используется при выборе ССО МКА из множества альтернативных с лучшим показателем уровня функциональной устойчивости.

Критерий оптимальности:

$$L = \max_{\{L_i\}, i=1..n} L. \quad (7)$$

Данный критерий позволяет синтезировать систему таким образом, чтобы показатель уровня функциональной устойчивости принял максимальное значение из некоторого ограниченного множества.

Таким образом, выбор критерия функциональной устойчивости ССО КА определяется типом решаемой прикладной задачи.

### Оценка комплексного показателя уровня функциональной устойчивости ССО КА

В ряде случаев оценка комплексного показателя уровня функциональной устойчивости ССО КА через проведение испытания системы целиком оказывается затруднительным либо требует больших материальных затрат. В то же время имеется возможность экспериментальной обработки отдельных независимых подсистем, входящих в состав ССО КА. В связи с этим возникает задача оценки показателя уровня функциональной устойчивости ССО КА в целом по отдельным подсистемам. В этом случае показатель уровня функциональной устойчивости ССО КА можно записать так:

$$L = \prod_{i=1}^l L_i, \quad (8)$$

где  $L_i$  – показатель уровня функциональной устойчивости  $i$ -го элемента системы;  $l$  – число элементов, входящих в состав системы.

При решении задачи будем предполагать известными оценки показателей уровня функциональной устойчивости отдельных элементов системы, полученные по результатам их испытаний:  $\underline{L}_i$  – нижняя граница доверительного интервала уровня отказоустойчивости  $i$ -го элемента, соответствующая принятому уровню доверия  $\gamma$ ;  $\hat{L}_i$  – точечная оценка показателя уровня функциональной устойчивости  $i$ -го элемента.

Тогда точечная оценка уровня функциональной

устойчивости всей системы согласно (8) будет равна

$$\hat{L} = \prod_{i=1}^1 \hat{L}_i . \quad (9)$$

Очевидно, определение нижней границы показателя уровня функциональной устойчивости системы по соотношению

$$\underline{L} = \prod_{i=1}^1 \underline{L}_i , \quad (10)$$

будет слишком грубым, так как совместное попадание показателей уровней функциональной устойчивости всех элементов на нижнюю границу их доверительных интервалов очень маловероятно. Поэтому использование соотношения (10) может привести к слишком малым значениям  $\underline{L}$

Более точный результат основывается на использовании приближенного соотношения

$$\underline{L} \cong \hat{L} - t_\gamma \sigma_{\hat{L}} , \quad (11)$$

где  $t_\gamma$  – коэффициент, соответствующий принятому уровню доверия  $\gamma$ ;  $\sigma_{\hat{L}}$  – отклонение точечной оценки, например, в виде среднеквадратичного.

Для конкретизации соотношения необходимо найти выражения для  $\sigma_{\hat{L}}$ . Отклонение для функции (11) может быть получено методом линеаризации следующего соотношения:

$$\sigma_{\hat{L}} \cong \sqrt{\sum_{i=1}^1 \left( \frac{\partial \hat{L}}{\partial \hat{L}_i} \right)_{\hat{L}=\underline{L}}^2} D_{\hat{L}_i} \cong \hat{L} \sqrt{\sum_{i=1}^1 \left( \frac{1}{\hat{L}_i} \right)^2} \sigma_{\hat{L}_i}^2 . \quad (12)$$

Для нахождения  $\sigma_{\hat{L}_i}$  воспользуемся соотношением (11) применительно к  $i$ -му элементу

$$\underline{L}_i \cong \hat{L}_i - t_\gamma \sigma_{\hat{L}_i} . \quad (13)$$

Выполнив ряд преобразований с (13) получено:

$$\sigma_{\hat{L}_i} = (\hat{L}_i - \underline{L}_i) / t_\gamma \cong \hat{L}_i \frac{1}{t_\gamma} \sqrt{\sum_{i=1}^1 \left( 1 - \frac{\underline{L}_i}{\hat{L}_i} \right)^2} . \quad (14)$$

С учетом (13) соотношение (1) примет вид

$$\underline{L} \cong \hat{L} \left[ 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^1 \left( 1 - \frac{\underline{L}_i}{\hat{L}_i} \right)^2} \right] . \quad (15)$$

Соотношение (15) позволяет достаточно просто оценивать  $\underline{L}$  системы по известным  $\underline{L}_i$  и  $\hat{L}_i$ .

Более строгие оценки нижней границы показателя уровня функциональной устойчивости ССО КА можно получить, воспользовавшись общими методами интервального оценивания функции от многих параметров, например, представленных в работах [4-5].

## Оценка эффективности применения функционально-устойчивой ССО КА

Поскольку в функционально устойчивых ССО КА виды отказов достоверно идентифицируются и парируются, данная система принадлежит к классу функциональных систем, обладающих свойством живучести [6]. Количественный показатель эффективности применения подобных систем может быть определен соотношением между комплексными показателями качества объекта с функциональной устойчивостью, а также объекта, не обладающего какими либо свойствами функциональной устойчивости. Комплексные показатели качества отражают степень влияния множества видов отказов на основные характеристики системы. Для оценки комплексных показателей качества ССО КА используются наиболее существенные показатели, характеризующие качество его функционирования в структуре ССО КА: точность, быстродействие, устойчивость, колебательность и перерегулирование [7]. Множество показателей качества функционирования может быть представлено в следующем виде

$$Pk = \{Pk_1, Pk_2, Pk_3, Pk_4, Pk_5\} , \quad (16)$$

где  $Pk_1$  – показатель качества, характеризующий точность;  $Pk_2$  – показатель качества, характеризующий быстродействие;  $Pk_3$  – показатель качества, характеризующий устойчивость;  $Pk_4$  – показатель качества, характеризующий колебательность;  $Pk_5$  – показатель качества, характеризующий перерегулирование.

Для определения комплексных показателей качества различных систем стабилизации формируются сводные таблицы, отражающие влияние видов отказа ( $d_j \in D_{ССО}$ ) на соответствующие показатели качества. Значение ячейки таблицы определяется следующим уравнением

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если при } d_j \in D_{ССО}, \Delta Pk_i = 0; \\ 0, & \text{если при } d_j \in D_{ССО}, \Delta Pk_i \neq 0, \end{cases} \quad (17)$$

где  $S_{ij}$  – значение ячейки находящейся на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца.

На основании выражения (17) ячейке  $S_{ij}$  присваивается значение «0», если вид отказа  $d_j \in D_{ССО}$  изменяет значение показателя качества ССО КА в худшую сторону и значение «1» в противоположном случае.

Для дальнейших расчетов составляется матрица  $S_{ССО}$  из строк и столбцов таблиц влияния видов отказа на показатели качества системы.

Значение комплексного показателя качества для различных вариантов ССО КА определяется следующим образом:

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L S_{ij} / ML, \quad (18)$$

где  $J$  – комплексный показатель качества;  $M$  и  $L$  – соответственно количество строк и столбцов в матрице  $S_{CCO}$ .

Комплексный показатель качества (18) является интегральной оценкой качества функционирования ССО при возникновении в ней отказа [8]. В случае, когда множество видов отказов не оказывает влияния на показатели качества, что соответствует наличию одних единичек в ячейках сводной таблицы, комплексный показатель качества равен «1». Если все виды отказов оказывают влияние на показатели качества функционирования ССО, что соответствует наличию одних нулей в ячейках сводной таблицы, то комплексный показатель качества равен «0».

### Оценка уровня функциональной устойчивости ССО КА

Отличительной особенностью функционально устойчивой системы управления, работающей в реальном масштабе времени, является то, что она способна восстанавливать качество управления после появления отказов. Система, обладающая свойством функциональной устойчивости, выполняет свои функции с требуемым качеством, даже если в ее функциональных элементах возникают виды отказов, а также обеспечивает постепенное ухудшение своих характеристик при увеличении числа видов отказов. Такая система остается работоспособной до отказа некоторой кратности, после которого ее характеристики уже не позволяют выполнять возлагаемые на нее задачи с требуемым качеством.

Для анализа свойств функциональной устойчивости технических систем и сравнительной оценки двух или нескольких технических систем, а также для синтеза технических систем с заданными свойствами функциональной устойчивости разработаны методы определения количественной оценки живучести [6]. Один из методов основывается на том, что в системе может присутствовать отказ произвольной кратности, а увеличение кратности отказа в системе происходит постепенно от отказа меньшей кратности к отказу большей кратности. Состояние отказа  $i$ -й кратности для всех возможных комбинаций состояния системы при этом называется обобщенным отказом  $i$ -й кратности  $q^i$ . При исследовании функциональной устойчивости технических систем в них вводится обобщенный отказ и определяется состояние системы.

Коэффициентом функциональной ус-

тойчивости  $G(q^i)$  технической системы для данного обобщенного отказа называется отношение числа работоспособных состояний системы ко всей совокупности состояний [6]

$$G(q^i) = M_i / C_p^i, \quad (19)$$

где  $C_p^i$ ,  $M_i$ , – соответственно общее количество и количество работоспособных состояний для обобщенного отказа  $q^i$  кратности;  $p$  – общее количество возможных отказов в системе.

Зависимость коэффициента функциональной устойчивости от кратности обобщенного отказа представляет собой функцию функциональной устойчивости системы  $G = f(q^i)$ , которая является интегральной оценкой функциональной устойчивости.

Сравним показатели функциональной устойчивости типовых ССО КА, обладающих свойствами парирования нештатных ситуаций в режиме реального времени, применением статического резервирования и предлагаемого подхода. Будем считать, что стандартная ССО КА отличается от классического наличием одного резервного исполнительного механизма (ИМ) и одного датчика угловых скоростей (ДУС), установленного неколлинеарно соответствующим резервируемым элементам и позволяющим переложить на себя функции одного из них. В качестве базового множества отказов примем множество рассматриваемых в статье [9] видов отказов. Схема для расчета показателя функциональной устойчивости ССО представлена на рис. 1.

Система, обладающая свойством активной отказоустойчивости, будет отличаться от системы, использующей только статическое резервирование, внутренней структурой каждого из блоков. На рис. 2 представлены схемы ИМ для расчета функций функциональной устойчивости сравниваемых объектов.

Представленные на рис. 2 схемы составлены из блоков, каждый из которых ставится в соответствие определенному виду отказа. Блок пропускает сигнал с входа на выход в случае, если вид отказа отсутствует и блокирует сигнал в случае, если вид отказа присутствует в системе. ИМ считается работоспо-

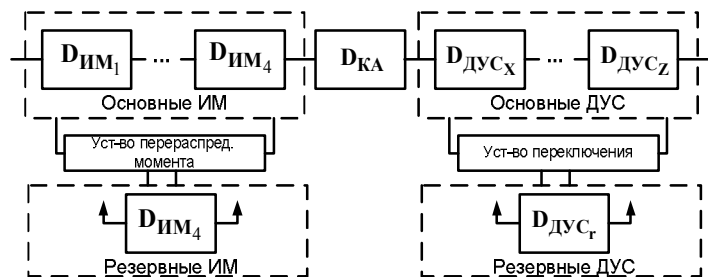


Рис. 1. Схема для расчета показателя функциональной устойчивости ССО КА

собным, если сигнал проходит с его входа на выход. Вышедший из строя функциональный элемент, заменяется на резервный в случае, если последний имеется в наличии. Так как в системе со свойством функциональной устойчивости имеется возможность парировать некоторые виды отказов за счет сигнальной, параметрической подстройки и реконфигурации аппаратуры на схеме параллельно соответствующему блоку установлен дополнительный блок (БСП, БПП), позволяющий сигналу пройти через соответствующий участок цепи. В системе, не обладающей свойством функциональной устойчи-

вости, подобные блоки отсутствуют, а парирование отказов, в случае возникновения отказа в ИМ или ДУС, осуществляется за счет перераспределения его функций между работоспособными элементами. Аналогичным образом выглядят схемы для КА и ДУС (рис. 3).

На рис. 3 введены следующие обозначения: ИМ – исполнительный механизм; ДУС – датчик угловых скоростей;  $D_n$  – множество видов отказов  $n$ -го функционального элемента;  $d_{ni}$  –  $i$ -тый вид отказа  $n$ -го функционального элемента.

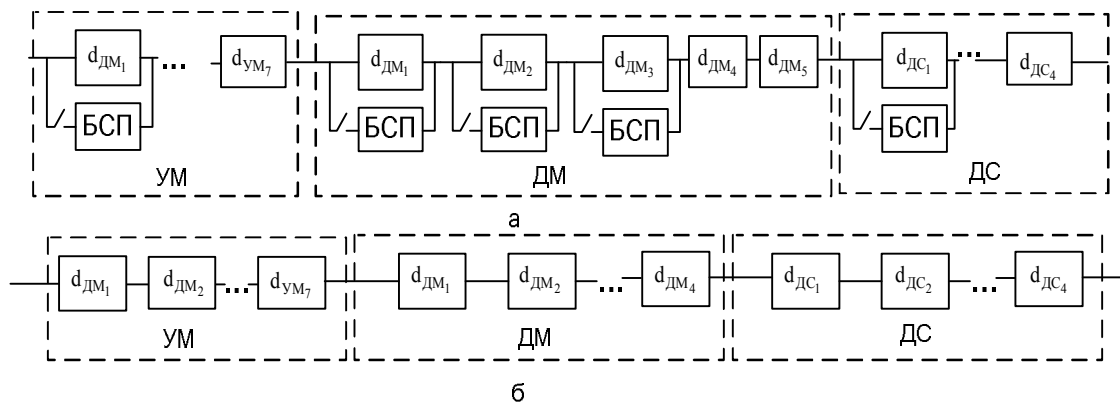


Рис. 2. Схема ИМ для расчета функциональной устойчивости для ССО КА перспективной (а) и мажоритарной (б)

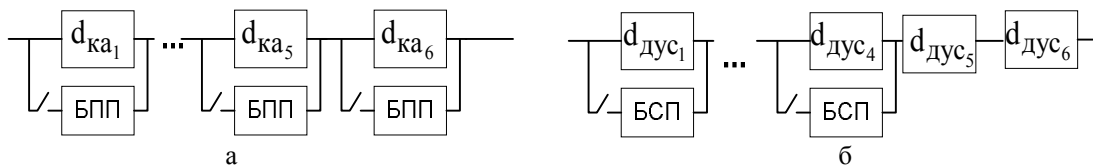


Рис. 3. Схемы КА (а) и ДУС (б) для расчета показателей функциональной устойчивости перспективной ССО КА

Знаменатель функции (19) для рассматриваемых ССО идентичен и определяется кратностью обобщенного отказа и количеством видов отказов

$$C_p^i = p! / i!(p-i)! = 94! / i!(94-i)! \quad (20)$$

Числитель функции (19) зависит от типа ССО КА. Так, в случае однократного отказа ССО без свойств функциональной устойчивости останется работоспособным только в случае, если этот отказ произойдет в одном ИМ либо ДУС. Отказы КА такой объект парировать не сможет. В случае кратности обобщенного отказа  $q^i$ ,  $2 \leq i \leq 94$  объект без функциональной устойчивости останется работоспособным только, если все отказы будут иметь место относительно одного ИМ и ДУС. В то же время система с функциональной устойчивостью сохраняет свою работоспособность, так как часть отказов может быть парирована другими видами избыточности.

В случае наделения ССО свойством функциональной устойчивости, выражения для расчета количества

работоспособных состояний  $M_{2i}$  принимает вид

$$M_{2i} = C_{N_{ПАР}}^i + N_{Э} \sum_{j=1}^i C_{N_{ПЭ}}^j C_{N_{ПАР}}^{i-j} + N_{Д} \sum_{j=1}^i C_{N_{ПД}}^j C_{N_{ПАР}}^{i-j} + N_{ЭД} \sum_{j=1}^i \left( C_{N_{ПЭ}+N_{ПД}}^j - C_{N_{ПЭ}}^j - C_{N_{ПД}}^j \right) C_{N_{ПАР}}^{i-j} \quad (21)$$

где  $N_{ПАР}$  – количество всех видов отказов в ССО, парлируемых сигнальной, и параметрической подстройками;  $N_{Э}$ ,  $N_{Д}$  – соответственно количество ИМ и ДУС, включая резервные;  $N_{ПЭ}$ ,  $N_{ПД}$  – количество видов отказов в пределах одного ИМ и ДУС, парлируемых лишь за счет структурной избыточности.

Выражение для определения количества  $M_{2i}$  работоспособных состояний в ССО, парирование отказов которого осуществляется только за счет

структурной избыточности, имеет вид:

$$M_{2i} = N_{\text{Э}} \sum_{j=1}^i C_{N_{\text{ПЭ}}}^j + N_{\text{Д}} \sum_{j=1}^i C_{N_{\text{ПД}}}^j + N_{\text{ЭД}} \sum_{j=1}^i \left( C_{N_{\text{ПЭ}} + N_{\text{ПД}}}^j - C_{N_{\text{ПЭ}}}^j - C_{N_{\text{ПД}}}^j \right), \quad (22)$$

где  $N_{\text{ПЭ}}^*$ ,  $N_{\text{ПД}}^*$  – общее количество видов отказов в пределах соответственно одного ИМ и ДУС.

Уравнение (22) можно получить из (21) приравняв нулю все члены, содержащие элементы  $C_{N_{\text{ПАР}}}^i$ , кроме сочетания  $C_{N_{\text{ПАР}}}^0$ , которое равняется единице, так как для системы без функциональной устойчивости  $N_{\text{ПАР}} = 0$ . Для рассматриваемой структуры ССО, численные значения параметров, входящих в выражения (21) и (22), равны:

$$\begin{aligned} N_{\text{ПАР}} &= 58; N_{\text{Э}} = 4; N_{\text{Д}} = 4; N_{\text{ЭД}} = 7; N_{\text{ПЭ}} = 2; \\ N_{\text{ПД}} &= 0; N_{\text{ПЭ}}^* = 16; N_{\text{ПД}}^* = 6. \end{aligned} \quad (23)$$

На рис. 4 (а) представлены графики изменения коэффициента функциональной устойчивости от кратности обобщенного отказа для сравниваемых систем, рассчитанные на основании выражений (19) – (23). Рисунок 4 (б) показывает во сколько раз коэффициент функциональной устойчивости  $G_2(q^i)$  ССО, использующей для обеспечения функциональной устойчивости только лишь аппаратную избыточность ИМ и ДУС, отличается от коэффициента функциональной устойчивости  $G_1(q^i)$  аналогичной по структуре ССО, обладающей широкими свойствами парирования нештатных ситуаций применением методологии обеспечения функциональной устойчивости.

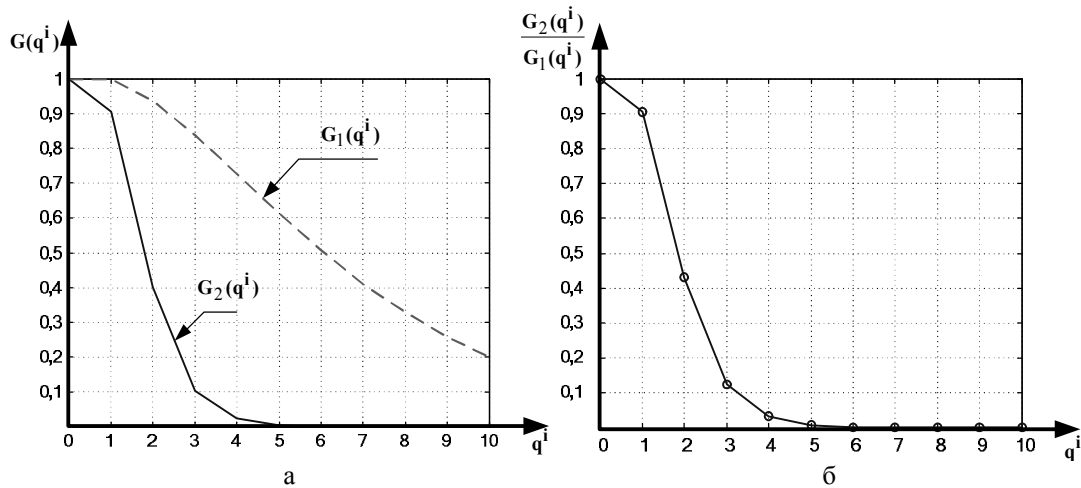


Рис. 4. Зависимость коэффициентов функциональной устойчивости от кратности отказов для рассматриваемых объектов

Сравнение представленных графиков показывает, что коэффициент функциональной устойчивости первого варианта ССО на всем интервале определенно выше соответствующего значения для второго варианта. Разница между графиками увеличивается в пользу системы с функциональной устойчивостью по мере введения в ССО МКА многократных обобщенных отказов.

При рассмотрении однократных отказов значение  $G_2(q^1)$  на 10% меньше, чем  $G_1(q^1)$ . В случае двукратных отказов  $G_2(q^1)$  на 57% меньше аналогичного показателя для объекта с функциональной устойчивостью, а интегральное значение показателя для перспективной ССО КА в 2,8 раза больше.

### Заключение

В результате проведенного исследования, с целью оценки уровня функциональной устойчивости, введены показатели функциональной устойчивости

ССО КА. Предложены методы оценки введенного комплексного показателя уровня функциональной устойчивости ССО КА. Получены критерии, позволяющие количественно оценивать уровень функциональной устойчивости перспективной и классической спутниковых систем стабилизации, которые показали, что использование предлагаемой методологии для обеспечения функциональной устойчивости позволяет повысить комплексный показатель качества системы в 2.4 раза по сравнению с аналогичной, без свойств функциональной устойчивости, а также увеличить интегральное значение функциональной устойчивости в 2.8 раз по сравнению с системой, в которой используются традиционные методы обеспечения работоспособности. Кроме того, проведенные исследования и оценка показателей функциональной устойчивости свидетельствуют о том, что применение методологии обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации позволяет значительно повысить уровень работоспособности как типового динамического объекта, так и всей системы в целом.

## Литература

1. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 1. Проектирование систем управления ракетносителей [Текст]: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Ю.Е. Балабей, Т.А. Барышникова и др.; / под общей ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", НПП Харtron-Аркос, 2012. – 578 с.

2. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст]: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев и др./ под общей ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", НПП Харtron-Аркос, 2012. – 680 с.

3. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 3. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники [Текст]: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев и др./ под общей ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика,

В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. Ин-т», НПП «Хартон-Аркос», 2012. – 501 с.

4. Ходько, С.Т. Проектирование систем управления с нестабильными параметрами [Текст] / С.Т. Ходько. – Л.: Машиностроение, 1987. – 232 с.

5. Шароватов, В.Т. Обеспечение стабильности показателей качества автоматических систем [Текст] / В.Т. Шароватов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.

6. Подлесный, Н.И. Специальные методы идентификации, проектирования и живучести систем управления [Текст] / Н.И. Подлесный, А.А. Рассоха, С.П. Левков. – К.: Вища шк., 1990. – 446 с.

7. Пестов, М.Д. Боевая надежность и эффективность ЛА. Методы расчетов [Текст] / М.Д. Пестов. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 100 с.

8. Фирсов, С.Н. Обеспечение активной отказоустойчивости пневматического сервопривода беспилотного летательного аппарата: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.03 / Фирсов Сергей Николаевич. – Х., 2005. – 244 с.

9. Gavrilenko, O.I. The Adaptive Approach to Active Fault Tolerance Maintenance of Automatic Control Systems [Text] // O.I. Gavrilenko, A.S. Kulik, O.A. Luchenko // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDWTW'05). – Odessa: KNURE, 2005. – P. 195-200.

Поступила в редакцию 08.01.2013, рассмотрена на редколлегии 16.01.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## КОМПЛЕКСНІ ПОКАЗНИКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ОРІЄНТАЦІЇ

**С.М. Фирсов**

Введено показники функціональної стійкості супутникових систем стабілізації та орієнтації космічних апаратів. Запропоновано методи оцінки введеного комплексного показника рівня функціональної стійкості систем орієнтації і стабілізації, а також отримані критерії, що дозволяють кількісно оцінювати рівень функціональної стійкості перспективної і класичної супутникових систем стабілізації. Показано, що застосування методології забезпечення функціональної стійкості супутникових систем стабілізації та орієнтації дозволяє значно підвищити рівень працездатності як типового динамічного об'єкта, так і всієї системи в цілому.

**Ключові слова:** супутникова система стабілізації та орієнтації, функціональна стійкість, комплексний показник функціональної стійкості.

## COMPLEX INDEXES OF FUNCTIONAL STABILITY OF STABILIZATION AND ORIENTATION SATELLITE SYSTEMS

**S.N. Firsov**

Functional stability indexes of stabilization and orientation satellite systems of the spacecraft are implemented. The methods for evaluating of the implemented integrated index of orientation and stabilization systems functional stability level are offered; criteria for quantitative evaluation of functional stability level of perspective and classical stabilization satellite system are obtained. It is shown that the application of the methodology of providing functional stability of stabilization and orientation satellite systems can significantly increase the level of efficiency of as a typical dynamic object as the system in whole.

**Keywords:** stabilization and orientation satellite system, functional stability, complex index of functional stability.

**Фирсов Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Firsov@d3.khai.edu.