

УДК 681.5.09: 629.783

А.Н. Таран, С.Н. Фирсов, И.В. Бычкова

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ И СТАБИЛИЗАЦИИ СПУТНИКА

В статье предложен метод для оценки эффективности систем управления динамическими объектами со свойством активной отказоустойчивости. Представлены результаты расчета и сравнительного анализа эффективности классической системы управления ориентацией и стабилизации малого спутника и системы со свойствами активной отказоустойчивости в нештатных режимах функционирования, вызванных отказами в функциональных элементах.

Ключевые слова: спутник, ориентация, стабилизация, объект автоматического управления, активная отказоустойчивость, эффективность.

Введение

Одной из наиболее актуальных задач, решаемых при разработке современных конкурентно способных космических аппаратов (КА), является повышение точностных, надежностных и ресурсных показателей разрабатываемых объектов и их функциональных элементов. Преследуемой целью является повышение эффективности применения космического аппарата в различных режимах работы, в том числе и в случае возникновения в нем нештатных ситуаций, приводящих к полным либо частичным отказам его функциональных элементов [1]. Одним из распространенных способов решения задачи является обеспечение отказоустойчивости бортового оборудования КА. При этом особое внимание уделяется системам угловой ориентации и стабилизации (СУОС), так как ни одна из подсистем спутника не решит поставленных перед ней задач при отказе СУОС [2].

Для малых спутников целесообразно использование системного подхода к обеспечению активной отказоустойчивости, основанного на глубоком диагностировании функционального состояния системы и гибком восстановлении этого состояния за счет параметрической и сигнальной подстроек, реконфигурации аппаратуры, а также применения минимально-избыточных схем установки исполнительных механизмов и датчиков. В системном подходе к обеспечению отказоустойчивости систем автоматического управления рассматриваемые отказы характеризуются неопределенностью, связанной со временем, местом возникновения, а также классом и видом [2]. Это не позволяет применять классические подходы, использующие инструментарию теории автоматического управления, а также теории надежности для оценки эффективности применения систем со свойством активной отказоустойчивости. Исходя из этого необходимо введение других показателей, учитывающих специфику применяемого подхода, а также характеризующих качество обеспечения отказоустойчивости [3, 4].

Критерий оценки эффективности отказоустойчивой системы

Поскольку в системе со свойством активной отказоустойчивостью отказы достоверно идентифицируются и парируются, такая система принадлежит к классу функциональных систем, обладающих свойством живучести [3, 4]. Количественный показатель эффективности применения подобных систем может быть определен соотношением между комплексными показателями качества системы с активной отказоустойчивостью, а также системой, не обладающей какими либо свойствами отказоустойчивости. Комплексные показатели качества отражают степень влияния множества видов отказов на основные характеристики системы. Для оценки комплексных показателей качества СУОС используются наиболее существенные показатели, характеризующие качество ее функционирования. Множество показателей качества функционирования СУОС может быть представлено как

$$Pk = \{Pk_1, Pk_2, Pk_3, Pk_4, Pk_5\}, \quad (1)$$

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 комплексного показателя качества системы формируются сводная матрица, содержащая L столбцов и M строк, где L – количество рассматриваемых видов отказов, а M – количество показателей качества функционирования. Таблица отражает влияние видов отказов $d_j, j = \overline{1, L}$ на соответствующие показатели качества $Pk_i, i = \overline{1, M}$. Значению элемента s_{ij} , находящегося на пересечении i -й строки и j -го столбца присваивается значение «0», если вид отказа приводит к измене-

нию показателя качества Pk_i системы в худшую сторону и значение «1» в противоположном случае.

Значение комплексного показателя качества J для различных вариантов системы определяются как

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L s_{ij} / (M \cdot L). \quad (2)$$

В случае, когда множество видов отказов не оказывает влияния на показатели качества, что соответствует наличию одних единичек в ячейках сводной матрицы, комплексный показатель качества равен «1». Если все виды отказов оказывают влияние на показатели качества функционирования системы, что соответствует наличию одних нулей в ячейках сводной матрицы, то комплексный показатель качества равен «0».

Расчет эффективности отказоустойчивой СУОС

Проведем расчет количественного показателя эффективности для СУОС малого спутника, рассмотренной в работах [5,6].

В данной СУОС объект автоматического управления (ОАУ) наделен свойствами активной отказоустойчивостью. Сам ОАУ включает в себя блок инерционных исполнительных механизмов (ИМ), блок датчиков угловой скорости (БДУС) и собственно сам КА. ОАУ отличается от классического наличием одного резервного ИМ и одного ДУС, установленных неколлинеарно основным элементом и позволяющих переложить на себя функции одного из них. Каждый из ИМ в свою очередь включает в себя усилитель мощности, двигатель-маховик (ДМ) и датчик скорости вращения ротора, соединенные согласно принципу управления по управлению. Множество видов отказов ОАУ D_{OAU}

включает в себя виды отказов функциональных элементов ИМ, КА и блока ДУС, приводящие к отклонению статических и динамических параметров этих элементов от своих номинальных значений (изменения коэффициентов передачи, дрейфы, изменение моментов инерции) а также отказы, приводящие к полному выходу из строя элемента (обрывы, короткие замыкания, прогорания).

Сводную матрицу S_{OAU} , отражающую влияние всех видов отказов ОАУ на показатели качества функционирования системы, получаем объединением соответствующих матриц $S_{ИМ_i}$, $S_{\Delta \Omega \dot{N}_i}$, $i = \overline{1,4}$ и $S_{КА}$, характеризующих влияние видов отказов каждого функционального элемента на качество работы СУОС

$$S_{OAU} = [S_{ИМ_1}, \dots, S_{ИМ_4}, S_{ДУС_1}, \dots, S_{ДУС_3}, S_{КА}]. \quad (3)$$

Оценка влияния видов отказов элементов на показатели качества СУОС для двух вариантов ОАУ представлены в табл. 1 и 2.

Всего рассматривается 77 видов отказов, все из которых достоверно диагностируются в процессе работы СУОС. Часть отказов может быть парирована за счет любых из имеющихся в наличии избыточностей, что позволяет многократно восстанавливать требуемое функциональное состояние ОАУ, а часть отказов – только лишь за счет использования одного вида избыточности, преимущественно структурной. Результаты, представленные в табл. 1 и 2, получены в результате машинного моделирования движения малого спутника в различных режимах работы, проведенного на специализированном программно-аппаратном комплексе [5, 6].

На основании выражения (2) и табл. 1, 2 получены значения комплексных показатели качества для системы с классическим J_1 и отказоустойчивым J_2 ОАУ:

$$J_1 = 133 / 385 \approx 0.345; J_2 = 375 / 385 \approx 0.974. \quad (4)$$

Таблица 1

Влияние видов отказов ИМ на показатели качества функционирования СУОС

Показатель качества	Виды отказов $d_j \in D_{ИМ\ i}$														
	$d_{ум1}$	$d_{ум2}$	$d_{ум3}$	$d_{ум4}$	$d_{ум5}$	$d_{ум6}$	$d_{ум7}$	$d_{дм1}$	$d_{дм2}$	$d_{дм3}$	$d_{дм4}$	$d_{дс1}$	$d_{дс2}$	$d_{дс3}$	$d_{дс4}$
ОАУ без активной отказоустойчивости															
Pk_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pk_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Pk_3	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
Pk_4	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Pk_5	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0
ОАУ с активной отказоустойчивостью															
Pk_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Pk_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pk_3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pk_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pk_5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Влияние видов отказов КА и ДУС на показатели качества функционирования СУОС

Показатель качества	Виды отказов $d_j \in D_{КА} \cup d_j \in D_{ДУС}, h \in \{x, y, z\}$										
	$d_{ка1}$	$d_{ка2}$	$d_{ка3}$	$d_{ка4}$	$d_{ка5}$	$d_{ка6}$	$d_{ка7}$	$d_{ка8}$	$d_{дуч1}$	$d_{дуч2}$	$d_{дуч3}$
ОАУ без активной отказоустойчивости											
Pk_1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Pk_2	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
Pk_3	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
Pk_4	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
Pk_5	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
ОАУ с активной отказоустойчивостью											
Pk_1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Pk_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pk_3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Pk_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pk_5	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1

Получаем, что эффективность работы СУОС с отказоустойчивым ОАУ в нештатных режимах функционирования, вызванных отказами в ее элементах, в 2.4 раза выше, чем у системы с классическим ОАУ.

Заключение

Предложенный метод расчета эффективности работы системы управления динамическим объектом в нештатных режимах функционирования позволяет оценить насколько целесообразно обеспечение активной отказоустойчивости системы в целом либо ее элементов. Представленные расчеты комплексных показателей качества СУОС с отказоустойчивым и классическим ОАУ, показали, что наделение элементов системы свойствами активной отказоустойчивости значительно повышает эффективность ее работы в нештатных ситуациях.

Список литературы

1. Афанасьев В.А. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В.А. Афанасьев и др. - М.: МАИ, 1994. - 412 с.

2. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления / А.С. Кулик. - Х.: ХАИ, 1991. - 91 с.

3. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.-Введ.28.12.94. - К.:Держстандарт України, 1994. -91с.

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

5. Кулик А.С. Диагностирование функционального состояния электромаховичной системы ориентации углового положения микроспутника / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, А.Н. Таран // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2010. - № 3/30. - С. 39-46.

6. Таран А.Н. Обеспечение отказоустойчивости электромаховичной системы угловой ориентации и стабилизации космического аппарата/ А.Н. Таран // Системи управління, навігації та зв'язку. - К.: ЦНДІ НіУ, 2011. - Вып. 1(17). - С. 135-144.

Поступила в редколлегию 1.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДМОСТОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОРІЕНТАЦІЄЮ ТА СТАБІЛІЗАЦІЄЮ СУПУТНИКА

О.М.Таран, С.М. Фірсов, І.В. Бичкова

У статті запропоновано метод для оцінки ефективності систем керування динамічними об'єктами, що наділені активною відмовою стійкістю. Представлено результати розрахунку та порівняльного аналізу ефективності класичної системи керування орієнтацією та стабілізацією малого супутника та системи з відмовою стійким об'єктом автоматичного керування у позаштатних режимах роботи, спричинених відмовами в функціональних елементах.

Ключові слова: супутник, орієнтація, стабілізація, об'єкт автоматичного керування, активна відмова стійкість, ефективність.

CALCULATION OF FAULT TOLERANCE ATTITUDE CONTROL SYSTEM EFFICIENCY FOR SMALL SATELLITE

A.N. Taran, S.N. Firsov, I.V. Bichkova

In the article the methods for calculation of dynamic object automatic control system efficiency with active fault tolerance property is offered. Results of estimation and comparative analysis for system efficiency of classic attitude control system for small satellite and control system with fault tolerance automatic control object in out-of-staff mode with faults in system element are presented.

Keywords: satellite, orientation, stabilization, automatic control object, active fault tolerance, efficiency