

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ**

УДК 621.396 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.78.86

Выбор состава бортовых средств для обеспечения заданной живучести наноспутника

А. М. Егоров, аспирант, *eandrm07@mail.ru*

Самарский университет, Самара, Российская Федерация

И. В. Белоконов, д. т. н., профессор, *ibelokonov@mail.ru*

Самарский университет, Самара, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается задача формирования проектного облика малоразмерных космических аппаратов (КА) класса наноспутник (НС), обладающих требуемым уровнем живучести. Особенностью КА такого класса является широкое применение коммерческих комплектующих общего назначения, при этом для удешевления конструкции, как правило, отсутствует дублирование отдельных бортовых систем. В связи с этим при создании НС предлагается учитывать требования по живучести как возможности системы адаптироваться и сохранять способность выполнять целевую задачу при возникновении отказов в бортовых системах. Предложена методика построения математической модели для расчета количественной оценки живучести НС. В основу модели положено отношение эффективности функционирования совокупности обеспечивающих систем НС, сохраняющейся после фиксированного набора неблагоприятных воздействий, к начальному значению эффективности функционирования НС.

Рассмотрено применение модели на этапе разработки технических предложений при проектировании НС, приведена методика выбора состава бортовых средств из доступных комплектующих для создания байпасности и достижения требуемой живучести НС. Приведен пример использования данной методики при выборе состава бортовых средств низковысотного НС формата CubeSat 3U, совершающего ориентированный полет и имеющего показатель живучести 0,9.

Ключевые слова: наноспутник, живучесть, эффективность, оценка, надежность, отказ, целевая задача, элементы борта, критичность

Selection of the Onboard Elements' Composition to Ensure the Specified Survivability of the Nanosatellite

A. M. Egorov, *postgraduate student, eandrm07@mail.ru*

Samara University, Samara, Russian Federation

I. V. Belokonov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., ibelokonov@mail.ru*

Samara University, Samara, Russian Federation

Abstract. The paper considers the design of small-size spacecraft of a nanosatellite class with the required level of survivability. A feature of this class of spacecraft is the wide utilization of commercial components for a general purpose, while to reduce the cost of construction, as a rule, there is no duplication of individual onboard systems. In this regard, it is proposed to take into account the survivability requirements as an opportunity for the system to adapt and save the ability to perform the target task in case of failures in onboard systems. A method of constructing a mathematical model for calculating the quantitative estimation of survivability of a nanosatellite is proposed. The model is based on the ratio of the efficiency of performance of a set of support systems of a nanosatellite, which remains stable after a fixed row of harmful interferences, to the initial value of effectiveness of nanosatellite performance.

The application of the model at the stage of development of technical proposals in the design of a nanosatellite is considered; the method of selection of the composition of the onboard elements from the available components to create bypass and achieve the required survivability of a nanosatellite is given. An example of using this method in selecting the composition of the onboard equipment of a low altitude nanosatellite of a CubeSat 3U type performing an oriented flight and having the increased survivability of 0.9 is offered.

Keywords: nanosatellite, survivability, effectiveness, assessment, reliability, failure, target, onboard elements, criticality

Введение

Современное направление развития космических экспериментов, проводимых университетами мира, неразрывно связано с использованием наноспутников (НС) стандарта CubeSat.

Широкое использование НС во многом обусловлено малым временем их разработки, а также значительной дешевой попутного запуска, небольшой стоимостью.

При разработке НС с целью удешевления проекта часто применяются коммерческие комплектующие общего назначения, дублирование отдельных систем избегается. Статистические данные по НС [1, 2] свидетельствуют о высоком проценте аварийных ситуаций, не связанных со средствами выведения, а обусловленных работой самих НС. Это связано с тем, что на ранних этапах проектирования НС до настоящего времени не закладывались условия достижения требуемого уровня живучести НС.

Высокий процент аварийных ситуаций НС доказывает необходимость обеспечения живучести НС, что достигается введением структурной избыточности бортовых средств, байпасности [3, 4], реализацией специальных алгоритмов работы бортовой системы управления.

Постановка задачи оценки живучести НС

В данной работе ставится задача разработать математическую модель, позволяющую произвести количественную оценку живучести НС как сложной системы, обладающей набором структурно и информационно связанных элементов бортовых систем. Реализация специальных алгоритмов работы бортовой системы управления не рассматривается.

Свойство живучести в общем случае состоит в способности объекта противостоять развитию критических отказов вследствие возникающих дефектов и повреждений [5]. Применительно к НС живучесть — это свойство системы адаптироваться и сохранять способность выполнять целевую задачу полета с некоторым снижением качества при возникновении отказов в элементах бортовой системы [6].

Живучесть отражает стойкость НС к неблагоприятным воздействиям (отказоустойчивость системы), а также избыточный потенциал, заложенный в алгоритмическую и аппаратную части НС, позволяющий парировать возникающие отказы.

В нештатных условиях полета предусматривается возможность изменения структуры и алгоритмов работы бортовой системы НС. Живучесть может быть реализована за счет использования избыточности различных типов, а также от эффекта синергии при взаимодействии различных систем [7].

Наиболее простая оценка живучести сложной системы может быть получена путем анализа способности выполнять определенный набор функций в условиях неблагоприятных воздействий. При возникновении отказов в элементах бортовой системы часть функций НС может быть не выполнена, что снижает качество выполнения миссии. Такой подход к оценке живучести описан в [9].

В качестве показателя количественного измерения живучести G целесообразно использовать отношение эффективности E_F , сохраняющейся у системы после возникновения определенной совокупности негативных воздействий, к начальной эффективности функционирования НС E_0 до возникновения отказов [8]:

$$G = \frac{E_F}{E_0}.$$

При разработке математической модели для оценки живучести НС принимаются следующие допущения и ограничения.

1. При определении количественного показателя эффективности учитываются основные характеристики элементов бортовых систем (энергопотребление, объем запоминающих устройств, скорость приема и передачи данных и т. д.), однако не учитывается режим работы НС, включение и выключение отдельных бортовых систем НС.

2. Формируемая математическая модель оценки живучести НС учитывает состав бортовых средств и является актуальной до наступления первого отказа, после возникновения отказа модель оценки живучести корректируется.

3. Случаи одновременного отказа нескольких элементов бортовых систем НС не рассматриваются.

Согласно принятой системе допущений, оценка живучести НС G осуществляется путем анализа



Рис. 1. Обобщенная функциональная схема НС

эффективности выполнения им всех $i = 1 \dots N$ задач в рамках космической миссии при различных возможных состояниях НС.

Состояние НС рассматривается с точки зрения возможности выполнения миссии и может быть охарактеризовано совокупностью работоспособных элементов бортовой системы или совокупностью неработоспособных элементов $S = (F_1, F_2, \dots, F_M)$.

Типовые задачи, решаемые при функционировании НС:

Z_1 — обеспечение электропитания всех бортовых систем,

Z_2 — формирование и накопление телеметрической информации,

Z_3 — передача телеметрической информации с НС на наземный комплекс управления,

Z_4 — прием команд НС с НКУ,

Z_5 — определение текущей ориентации и угловой скорости движения НС относительно центра масс,

Z_6 — обеспечение требуемой ориентации и стабилизации НС.

Выполнение всех перечисленных задач является необходимым условием выполнения миссии НС. Поэтому эффективность функционирования НС E_S для каждого состояния S определяется произведением коэффициентов эффективности Φ_{Si}

выполнения задач и вероятности P_S нахождения системы в рассматриваемом состоянии [8]:

$$E_S(F_1, F_2, \dots, F_M) = P_S \cdot \prod_{i=1}^N \Phi_{Si}. \quad (1)$$

Для решения каждой задачи используется определенный набор элементов бортовых систем, что иллюстрирует обобщенная функциональная схема бортовой системы НС на рис. 1, где Φ_{ij} — коэффициент эффективности элемента j при решении i задачи при условии отсутствия отказов.

Считая отказы отдельных элементов независимыми событиями, вероятность нахождения системы в рассматриваемом состоянии P_S определяется произведением вероятностей работоспособности всех элементов бортовой системы с учетом информации о произошедших отказах. При исправной работе элемента вероятность его работоспособности принимается равной надежности P_{ij} , в противном случае — равной вероятности отказа $(1 - P_{ij})$.

Для рассмотренной функциональной схемы бортовой системы НС эффективность его функционирования может быть определена как сумма эффективностей работы во всех возможных состояниях:

$$E = \sum_S E_S = \sum_S P_S \cdot \prod_{i=1}^N \Phi_{Si}. \quad (2)$$

Для каждого элемента бортовой системы в модели задается перечень функций, для решения которых он может быть использован, а также рассчитывается коэффициент эффективности:

$$\Phi_{Sij} = k_{ij} \cdot \frac{q_{Sij}}{e_{Sij} \cdot m_{Sij} \cdot v_{Sij}}, \quad (3)$$

где q_{Sij} — показатель качества работы элемента при выполнении заданной функции (точность измерения, скорость вычисления), e_{Sij} — потребляемая электрическая мощность, m_{Sij} — масса, v_{Sij} — занимаемый объем, k_{ij} — коэффициент нормирования.

Коэффициент нормирования определяется из условия: $\max \Phi_{ij} \leq 1$ для всех элементов, выполняющих одну функцию.

При проектировании бортовой системы НС одна и та же задача (или часть задачи) может реализовываться различными способами. Это требует описания логической связи элементов функциональной схемы.

Целесообразно рассматривать несколько подходов.

1. Аддитивный: функция выполняется хотя бы одним из элементов, коэффициенты эффективности суммируются (горячий резерв):

$$\Phi_i = \sum_j \Phi_{ij} \mid \Phi_i \leq 1.$$

2. Замещающий: функция выполняется одним из работоспособных элементов, имеющим наибольший коэффициент эффективности (холодный резерв):

$$\Phi_i = \max_j(\Phi_{ij} \mid \Phi_{ij} > 0).$$

3. Совместный: функция выполняется всеми элементами одновременно, коэффициенты эффективности перемножаются:

$$\Phi_i = \prod_j \Phi_{ij}.$$

При синтезе архитектуры типовой бортовой системы НС в отсутствие аддитивных связей и с учетом использования нормирующего коэффициента коэффициент эффективности выполнения каждой задачи и работы системы в целом не будет превышать 1. При отсутствии отказов в элементах бортовой системы НС коэффициент эффективности

будет максимальным, эффективность функционирования НС в этом случае определяется вероятностью безотказной работы (надежностью) элементов бортовой системы НС.

При введении в бортовую систему НС аддитивных связей значения отдельных коэффициентов эффективности могут превысить значение 1. Чтобы этого избежать, все коэффициенты эффективности элементов всех типов, которые задействованы в аддитивных связях, дополнительно нормируются.

Описанная математическая модель позволяет получить количественную оценку живучести НС в диапазоне от 0 до 1. При возникновении отказов в элементах бортовой системы НС и использовании альтернативного набора бортовых средств показатель эффективности функционирования и живучесть НС снижаются.

Методика выбора состава бортовых средств

При проектировании НС одним из целевых показателей, приведенных в техническом задании, должен быть количественный показатель живучести $G_P(T_{AC}) \geq \text{const}$ при заданном времени активного существования T_{AC} .

Данный уровень живучести, помимо специальных алгоритмов работы бортового компьютера, обеспечивает совокупность элементов бортовой системы НС. Постановка задачи синтеза бортовой системы НС может быть сформулирована следующим образом: требуется определить набор бортовых средств (элементов) НС, который одновременно позволит выполнить все задачи НС и будет обеспечивать заданную живучесть НС G_P на заданном времени активного существования T_{AC} .

На практике основанием для выбора бортовых средств для научно-образовательного НС является стоимость, которую нужно минимизировать при учете ограничений на массу, габариты и заданное. Минимально допустимое значение живучести НС переводится в разряд ограничений.

Возможны следующие подходы к решению задачи.

1. Выбор состава элементов бортовой системы НС, обладающей высокой живучестью, за счет

увеличения надежности (и, как правило, стоимости) отдельных элементов. При этом необходимо вести конструкторские работы, модифицировать стандартные комплектующие, что сложно реализовать в условиях создания малоразмерного космического аппарата в короткие сроки и с малым объемом финансирования.

2. Последовательное изменение (наращивание) структуры бортовой системы типового НС по критерию увеличения живучести с одновременной минимизацией стоимости. Данный подход заслуживает внимания, учитывая практику создания НС из готовых унифицированных модулей, использование которых позволяет создавать НС в кратчайшие сроки [9].

3. Разработка новой (оригинальной) бортовой системы НС для решения конкретной целевой задачи НС. Подход не является рациональным, так как потребует большого времени на разработку, изготовление и отладку специальных элементов бортовой системы, что увеличит время разработки НС и его стоимость.

Из возможных подходов наиболее эффективным с точки зрения времени и стоимости разработки НС является принцип выбора состава бортовых средств НС путем изменения структуры бортовой системы типового НС.

Типовой НС представляет собой платформу КА нанокласса, обладающую минимальным набором аппаратных средств, необходимых для решения обеспечивающих задач [8]. Такой НС содержит бортовой компьютер (БК) с одним вычислительным ядром и запоминающим устройством (ЗУ), приемопередатчик, состоящий из приемной и передающей частей, антенны с модулем раскрытия, солнечные панели, контакт отделения (КО), систему электропитания, системы определения ориентации, системы стабилизации НС.

Резервирование отдельных элементов не предусмотрено. Наличие двух экземпляров приемных и передающих антенн, расположенных на противоположных гранях, а также солнечных панелей, расположенных ортогонально, обусловлено необходимостью сохранять возможность работы при различных угловых положениях НС.

При наращивании структуры бортовой системы НС необходимо определить критерии и огра-

ничения (по массе m , габаритам v , стоимости e , живучести G) для выбора элементов, планируемых к добавлению в бортовую систему НС. Для НС CubeSat 3U их можно представить в виде математической записи:

$$\begin{aligned} G(T_{AC}, S) &= \prod_{i=1}^N \Phi_i \cdot P \geq G_P(T_{AC}), \\ \sum_S m &\leq 4,5 \text{ кг}, \\ \sum_S v &\leq 100 \times 100 \times 340 \text{ мм}^3 \\ \sum_S e &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4)$$

Принимается допущение, что мощность источников электроэнергии, установленных на НС, окажется достаточной для обеспечения работы всех элементов бортовой системы проектируемого НС. При расчете общей стоимости НС не принимаются во внимание затраты на элементы и конструкции сопряжения элементов борта.

С целью определения элементов бортовой системы НС, для которых введение избыточности наиболее востребовано, также используется описанная выше математическая модель оценки живучести. В процессе моделирования дополнительно проводится анализ последствий от отказа каждого из элементов бортовой системы. Те отказы, которые приводят к невозможности выполнения задачи НС, считаются критическими. Вероятность наступления таких отказов определяет критичность элемента Cr_j для бортовой системы НС.

Избыточность следует вводить прежде всего для элементов, имеющих максимальную критичность. При равных значениях критичности выбирается элемент, имеющий максимальное значение критерия, характеризующего экономическую эффективность введения избыточности:

$$\min_e \max_j J = \min_e \max_j \left(\frac{Cr_j}{m_j \cdot e_j} \right). \quad (5)$$

Синтез структуры бортовой системы НС производится последовательным выполнением итераций добавления бортовых средств. На каждой итерации для элементов бортовой системы вычисляется

значение критерия J , производится резервирование элемента, имеющего наибольшее значение критерия до достижения заданного уровня живучести.

При введении избыточности происходит изменение структуры бортовой системы, поэтому после каждой итерации требуется повторная оценка живучести с использованием математической модели. В случае если значение живучести оказывается меньше предыдущего или неравенства (4) не выполняются, следует отказаться от выбранного способа введения избыточности, использовать альтернативный способ или создать избыточность для другого критичного элемента бортовой системы НС. Таким образом реализуется контроль корректности создаваемой конфигурации бортовой системы НС.

Пример использования методики

Рассмотрим случай проектирования НС формата CubeSat 3U с заданным показателем живучести не ниже 0,9.

В качестве прототипа выберем типовой НС, совершающий ориентированный полет [10]. Аппарат решает обозначенные выше стандартные задачи $Z_1 \dots Z_6$. Для решения задач используются определенные компоненты бортовой системы, согласно функциональной схеме (рис. 2).

Для каждого из элементов бортовой структуры НС необходимо указать вероятность возникновения отказа (определяется из технической документации на комплектующие), вычислить коэффициент эффективности по формуле (3). На основе функциональной схемы и коэффициентов эффективности элементов бортовой системы НС рассчитываются коэффициенты эффективности решения задач в случае отсутствия отказов, а также начальное (максимально возможное) значение эффективности функционирования НС:

$$E_0 = \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \Phi_3 \cdot \Phi_4 \cdot \Phi_5 \cdot \Phi_6 \cdot P_0 = \\ = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,928 = 0,116.$$

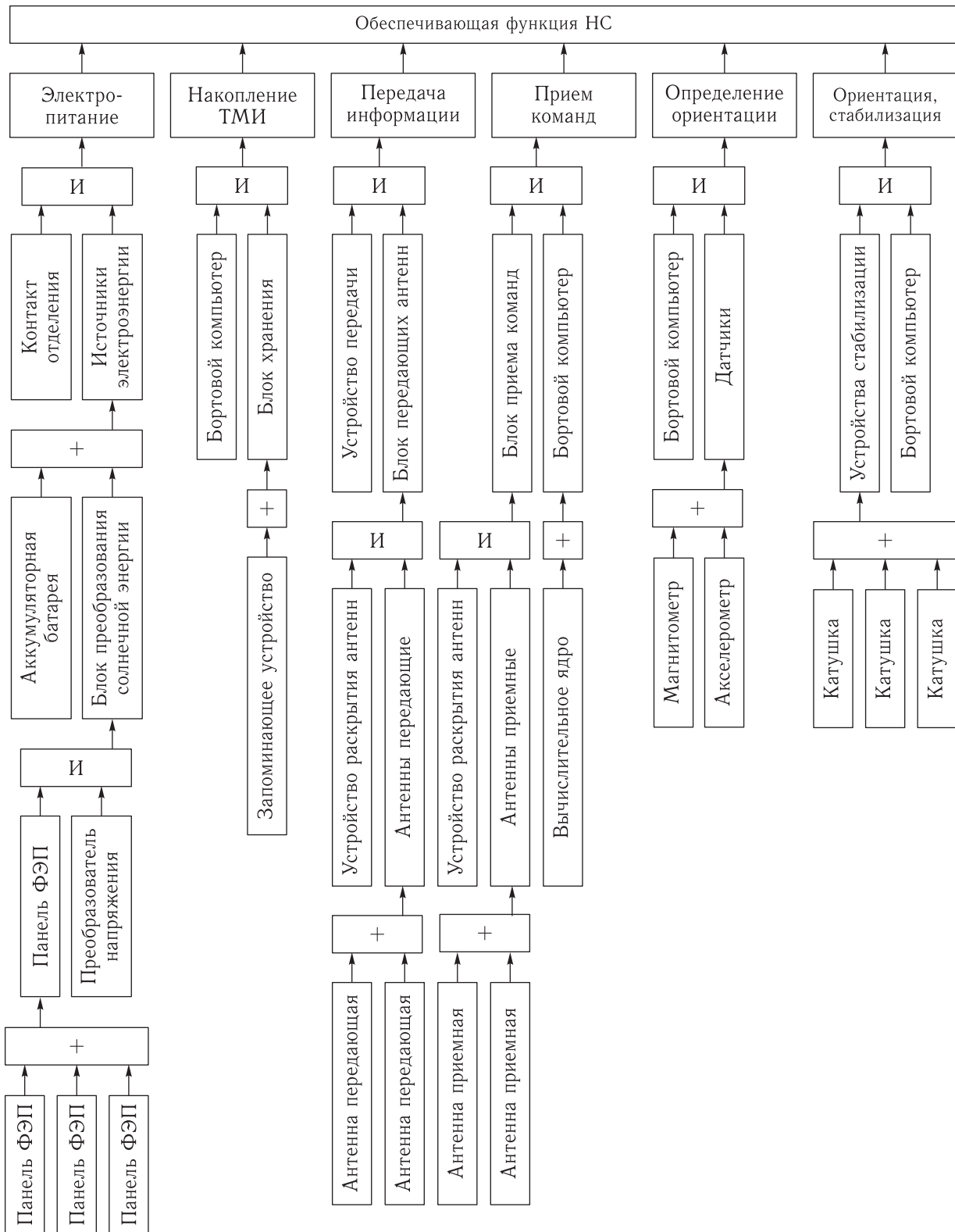
Для случаев отказа каждого из элементов бортовой системы НС рассчитывается эффективность функционирования НС (см. таблицу).

Анализ показал, что начальное значение живучести НС с рассмотренным составом бортовых средств составляет $G = 0,32$. Данное значение свидетельствует о том, что эффективность функционирования НС при возникновении отказов в среднем ухудшится почти втрое. Полученная оценка живучести оказалась ниже требуемой, необходимо произвести синтез структуры бортовой системы НС по приведенной выше методике.

По данным столбца 1 таблицы можно выделить ряд наиболее критичных элементов бортовой системы НС, отказ которых приводит к невыполнению миссии НС. Производя для них расчет критерия J по формуле (5), определяем элемент «Контакт отделения», для которого вводится резервирование на первой итерации. Живучесть НС повышается и составляет $G = 0,46$.

Действуя аналогично по данным столбца 2, рассмотрим случай резервирования БК как элемента, влияющего на выполнение многих задач. Расчет показал, что живучесть возрастет до $G = 0,54$. Однако более результативным подходом к выполнению второй итерации является реализация возможности выполнения программы полета из запоминающего устройства в случае отказа приемника. При этом потребуются минимальные затраты на коммутацию элементов, а живучесть возрастет до $G = 0,88$.

На третьей итерации выполняется резервирование ЗУ, также требующее минимальных затрат, живучесть возрастает до $G = 0,89$. Последующее усложнение бортовой системы будет связано с более значимыми затратами. Рассматривая возможные варианты реализации четвертой итерации, целесообразно рассмотреть возможность установки на НС дополнительно передающего модуля системы Иридиум, снабженного своей антенной. Данный модуль позволяет сохранить возможность передачи информации с НС на Землю, однако скорость передачи данных будет снижена (снижается качество выполнения целевой задачи полета — получение научной или целевой информации). Однако такой подход (создание байпасности) позволит понизить критичность сразу двух элементов бортовой системы НС: модуля раскрытия антенн и передающего устройства. Живучесть НС превысит требуемое значение: $G = 0,91$, рис. 3.



И — совместный тип связи, + — аддитивный

Рис. 2. Функциональная схема типового НС

Т а б л и ц а. Определение эффективности работы и живучести НС при различных отказах

	Начальное состояние (1)	Итерация 1: резервирование КО (2)	Итерация 2: резервирование БК (3)	Итерация 2: хранение команд в ЗУ (4)	Итерация 3: резервирование ЗУ (5)	Итерация 4: добавление передатчика системы Иридиум (6)
E_0	0,116	0,116	0,115	0,097	0,096	0,095
Контакт отделения № 1	0	0,125	0,125	0,104	0,104	0,104
Контакт отделения № 2	–	0,125	0,125	0,104	0,104	0,104
Аккумулятор	0,063	0,063	0,063	0,052	0,052	0,052
Панель ФЭП № 1	0,104	0,104	0,104	0,087	0,087	0,087
Панель ФЭП № 2	0,104	0,104	0,104	0,087	0,087	0,087
Панель ФЭП № 3	0,104	0,104	0,104	0,868	0,868	0,868
Преобразователь напряжения	0,063	0,063	0,063	0,052	0,052	0,052
Бортовой компьютер № 1	0	0	0,125	0	0	0
Бортовой компьютер № 2	–	–	0,125	–	–	–
Запоминающее устройство № 1	0,063	0,063	0,063	0,042	0,069	0,069
Запоминающее устройство № 2	–	–	–	–	0,069	0,069
Модуль раскрытия антенн	0	0	0	0	0	0,010
Передающая антенна № 1	0,063	0,063	0,063	0,052	0,052	0,052
Передающая антенна № 2	0,063	0,063	0,063	0,052	0,052	0,052
Передатчик	0	0	0	0	0	0,010
Приемная антенна № 1	0,063	0,063	0,063	0,069	0,069	0,069
Приемная антенна № 2	0,063	0,063	0,063	0,069	0,069	0,069
Приемник	0	0	0	0,035	0,035	0,035
Магнитометр	0,063	0,063	0,063	0,052	0,052	0,052
Акселерометр	0,063	0,063	0,063	0,052	0,052	0,052
Катушка индуктивности X	0	0	0	0	0	0
Катушка индуктивности Y	0	0	0	0	0	0
Катушка индуктивности Z	0	0	0	0	0	0
E_F	0,038	0,054	0,063	0,085	0,085	0,086
$G = E_F/E_0$	0,32	0,46	0,54	0,88	0,89	0,91

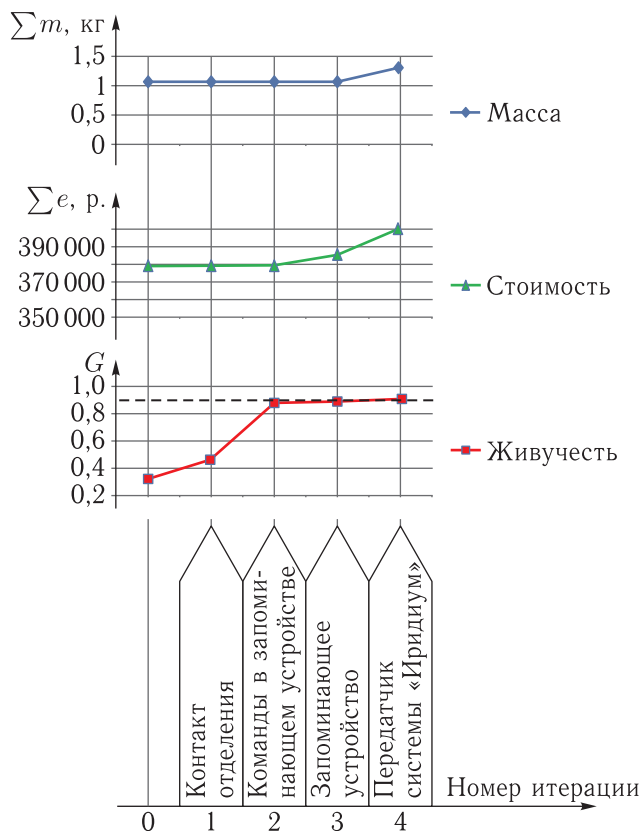


Рис. 3. Изменение параметров НС при введении избыточности

Заключение

Важным этапом проектирования НС является определение конфигурации его бортовой системы. Совокупность бортовых средств является основой для реализации алгоритмов повышения живучести НС, которые управляют работой всех компонентов.

Математическая модель оценки живучести НС, предложенная в статье, может быть использована на этапе формирования технических предложений согласно изложенной методике. Это позволит создать конфигурацию бортовой системы НС, состоящего из типовых коммерческих комплектующих и обладающего заданной живучестью. При этом бортовой компьютер реализует алгоритм, обеспечивающий режим работы компонентов бортовой системы НС согласно функциональной схеме. Следующим

шагом является создание бортового алгоритма принятия решения о выборе схемы реконфигурации бортовой системы при возникновении отказов.

Список литературы

1. Langer M., Bouwmeester J. Reliability of CubeSats – Statistical Data, Developers' Beliefs and the Way Forward // 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites SSC16-X-2. 2016. P. 1–12.
2. Nanosatellite database. https://creator.zohopublic.com/plspace/nanosat-database-demo/view-perma/Nanosat_database (дата обращения: 10.01.2018).
3. Кирилин А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. М.: Машиностроение, 2010. 382 с.
4. Kirilin A., Belokonov I., Timbai I., Kramlikh A., Melnik M., Ustiugov E., Egorov A., Shafran S. SSAU Nanosatellite Project for the Navigation and Control Technologies Demonstration // Procedia Engineering. 3rd IAA-RACTs Conf. on Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites, SPEXP 2014, 2015, vol. 104. P. 97–106.
5. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1989. 32 с.
6. Додонов А. Г. Живучесть информационных систем. Киев: Наукова думка, 2011. 256 с.
7. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2015, № 4. С. 17–37. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-17-37.
8. Черкесов Г. Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.: Знание, 1987. 55 с.
9. Егоров А. М. Оценка живучести наноспутника на примере SamSat-218D // Сборник статей VI Международной заочной научно-технической конференции ITRT-2016, 2016. С. 190–194.
10. Егоров А. М. Анализ возможных отказов типового наноспутника // Известия вузов. Приборостроение, 2016, т. 59, № 9. С. 471–476. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-471-476.