

ПРОБЛЕМА ЖИВУЧЕСТИ НАНОСПУТНИКА И ЕЁ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

А.М. Егоров, И.В. Белоконов

Рассматривается задача обеспечения живучести малоразмерных космических аппаратов (КА) класса «Наноспутник» (НС) при орбитальном полёте. Особенностью аппаратов является широкое применение коммерческих комплектующих общего назначения. Наличие дополнительных датчиков позволяет использовать их в качестве функциональной избыточности для обеспечения живучести. Предложен алгоритм оптимальной по Парето реконфигурации структуры бортовой системы, позволяющей обеспечить максимально возможный показатель живучести НС при заданном наборе бортовых средств. Приведён пример использования алгоритма для НС, совершающего ориентированный полёт.

Ключевые слова: наноспутник, живучесть, эффективность, оценка, избыточность, отказ, байпас.

Разработка наноспутников (НС) с целью проведения космических экспериментов активно применяется в ведущих университетах мира. Наибольшее распространение получили аппараты стандарта CubeSat, которые выводятся на орбиту попутно, в добавление к основной полезной нагрузке.

Широкая доступность коммерческих комплектующих для таких НС позволяет разработчикам значительно сокращать сроки проектирования, использовать проверенные решения. Элементная база общего применения, используемая при производстве комплектующих, приводит к высокому проценту аварийных ситуаций НС, выведенных на орбиту [1, 2].

Таким образом, актуальной является задача обеспечения живучести НС, которая характеризует устойчивость функционирования, его способность эффективно выполнять определённый набор задач в рамках космической миссии в условиях неблагоприятных воздействий на аппарат [3].

Рассматривая устойчивость функционирования НС, представляющего собой совокупность бортовых обеспечивающих систем и целевой нагрузки, представим его в виде теоретико-множественной модели, состоящей из множества $S = \{s\}$ физических элементов бортовой системы, а также из множества реализуемых ими алгоритмов $F = \{f\}$, причём каждому элементу $s \in S$ соответствует подмножество элементов $F_s \subset F$. Необходимо учитывать причинно-следственную связь: исключение элемента s из множества S неизбежно приводит к исключению подмножества F_s из F [4, 5].

НС может быть описан матрицей \mathbf{M} размерности $|S| \times |F|$. Элемент $m_{ij} = 1$, если выход из строя элемента s_i не влияет на решение алгоритма f_j , $m_{ij} = 0$ - в противном случае, когда реализация алгоритма f_j становится невозможной.

С элементами булеана Π_S возможно отождествлять технические состояния аппаратно-программных средств, каждое из которых является причиной изменений в функционировании НС, а элементы булеана Π_F - следствиями. Тогда для исследования устойчивости функционирования НС следует использовать отображение:

$$\Gamma: \Pi_S \rightarrow \Pi_F.$$

Областью устойчивости НС относительно области допустимых следствий $\Pi_F' \subset \Pi_F$ является предельная область допустимых причин $\Pi_S' \subset \Pi_S$, для которой справедлив предикат:

$$(\Gamma(\Pi_S') = \Pi_F') \& (\forall (\Pi_S \subset \Pi_S) \notin \Pi_S') \quad (\Gamma(\Pi_S' \cup \Pi_S) \supset \Pi_F').$$

Проблема исследования возможностей повышения живучести НС сводится к задаче исследования возможностей расширения области устойчивости функционирования.

Введение аппаратной или алгоритмической избыточности не изменяет область допустимых следствий Π_F' , при этом отказоустойчивость определяется кратностью резервирования. Практика применения походов к повышению живучести для бортовых систем космических аппаратов с использованием кратного резервирования элементов, описанная в [6, 7], сталкивается с ограничениями массогабаритных характеристик НС.

Наличие одновременно аппаратной и алгоритмической избыточности может приводить к расширению области допустимых следствий (функциональной избыточности) за счёт изменения логической структуры НС, использования дополнительных ресурсов для обеспечения функционирования.

Расширим рассмотренную модель НС. Пусть для выполнения любой из функций $f_i \in F$ в системе определяется функциональное соответствие [5] – способ реализации (вычисления) f_i , который характеризуется композицией δ_i задействованных физических элементов из состава бортовых средств НС:

$$\delta_i = \{s_1, s_2, \dots\} \in S.$$

Принимая, что каждый физический элемент s_j реализует элементарную функцию ϕ_j , опишем механизм реализации алгоритма f_i :

$$\delta_i \sim f_i = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \dots$$

При построении НС из коммерческих комплектующих по модульному принципу в системе может возникнуть функциональная избыточность, при которой некоторый алгоритм f_i выполняется (реализуется) k_i способами, например:

$$f_i \sim \delta_{i1} | \delta_{i2} | \dots | \delta_{ik_i}, \delta_{i1} \neq \delta_{i2} \neq \dots \neq \delta_{ik_i}.$$

Тогда реализацию (выполнение) алгоритма f_i можно представить так:

$$f_i = \varphi_{i1} | \varphi_{i2} | \dots | \varphi_{ik_i},$$

где $\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{ik_i}$ – эквивалентные функциональные соответствия.

Для выполнения целевой задачи НС необходима реализация всех элементов множества F . Таким образом, функциональная система F является функционально полной, а для каждой функции f_i должно существовать хотя бы одно функциональное соответствие φ_i .

На этапе проектирования НС можно говорить о некоторой гипотетической теоретически достижимой области устойчивости, о начальной эффективности функционирования (живучести) НС. В работе [8] рассмотрен подход, позволяющий на раннем этапе проектирования выбрать оптимальный набор бортовых средств НС, обладающего определённым уровнем живучести. Такой подход является целесообразным, так как приводит к наличию избыточности бортовых средств НС.

Задача обеспечения живучести НС в полёте сводится к реализации оптимального алгоритма (порядка) использования избыточности бортовых средств в условиях возникающих отказов.

Ограничением является существующий набор элементов (бортовых средств), а также следующий из него объём избыточности. При решении задачи принимается допущение, что элементы бортовой системы НС могут быть по отдельности исключены из работы. При этом циклограмма работы бортовой аппаратуры и суточные различия в энергопотреблении не рассматриваются.

Обеспечение живучести НС осуществляется путём реконфигурации структуры бортовой системы при нештатной ситуации с целью достижения максимально возможного качества выполнения функций F_1, F_2, \dots, F_N (функциональной системы F) в рамках целевой задачи.

Наличие нескольких функциональных соответствий для функций и алгоритмов $f_i \in F$ позволяет в случае нештатных ситуаций производить эквивалентную замену (эмуляцию) отсутствующих алгоритмов, используя другую комбинацию бортовых средств. Важным является описание специального правила γ преобразования области определения отсутствующего алгоритма в область определения эквивалентной ей композиции:

$$f_i \sim \delta_{i1} | \delta_{i2} = \gamma \cdot \varphi_{i21} \cdot \varphi_{i22} \cdot \dots \cdot \varphi_{i2N}.$$

При решении задачи замены (эмуляции) отсутствующего алгоритма за счёт использования функциональной избыточности, сначала необходимо определить перечень Δ эквивалентных композиций для каждого алгоритма $f_i \in F$:

$$\bigcup_{i=1}^{k_i} \delta_i = \Delta, \quad \delta_i \in (F \setminus \{f_i\}), \quad \delta_m \cap \delta_n = \emptyset,$$

$$m \in \overline{1..k_i}, \quad n \in \overline{1..k_i}, m \neq n;$$

$$(\forall s_{ij} \in \delta_i \neq 0)(\exists! f_i \in F) (s_{ij} \sim f_i) \ \& \ (\forall (s_{i1j1}, s_{i2j2}) \in \delta_i, |\delta_i| \geq 2) (s_{i1j1} \sim s_{i2j2}).$$

Так как область причин определяется множеством компонентов, для сохранения функционирования НС после отказа необходимо определить и эмулировать все функции, в реализации которых использовался отказавший элемент.

Принимая во внимание возможную неоднозначность выбора эквивалентного функционального соответствия (байпаса) для восстановления отсутствующего алгоритма, необходимо рассмотреть задачу определения оптимального выбора байпасов.

Для оптимизации выбора байпаса достаточно упорядочить элементы Δ . Так как выбор байпаса приведёт к изменению эффективности функционирования НС E , а также повлияет на общее энергопотребление W , то целесообразно выполнить оптимизацию по Парето.

$$\min_{\Delta'} \{E_0 - E(\Delta'), W(\Delta')\},$$

где Δ' – упорядоченный перечень эквивалентных композиций; E_0 – начальное значение эффективности функционирования НС.

Первым критерием оптимизации является минимальное снижение эффективности функционирования НС от начального значения. В случае, если две композиции позволяют достичь одинаковой эффективности функционирования, необходимо выбрать байпас с меньшим значением потребляемой электрической мощности.

Таким образом, для каждого алгоритма $f_i \in F$ набор эквивалентных комбинаций (байпасов) Δ_i будет оптимально упорядочен. В первоначальный момент времени алгоритм реализуется согласно первой комбинации. При возникновении отказа в элементах этой комбинации достаточно выбрать следующую комбинацию из перечня. Такой подход позволит достичь максимально возможного значения эффективности функционирования, использовать заложенный потенциал функциональной избыточности, обеспечить живучесть НС.

Алгоритм реконфигурации бортовой системы НС, выполняющий оптимальную эмуляцию отсутствующего алгоритма НС после нештатной ситуации, представлен на рис. 1.

В начальный момент времени при включении НС, а также периодически при выполнении команд, согласно программе полёта, производится анализ состояния всех элементов бортовой системы. В силу ограниченности возможностей бортового компьютера НС целесообразно использовать единый подход к анализу состояния элементов бортовой системы согласно

обобщённым условиям регистрации отказа: выход измеряемого параметра за пределы установленного диапазона, значение параметра не изменяется длительное время, нет признаков выполнения отправленной команды, нет признаков выполнения функции элемента [9].

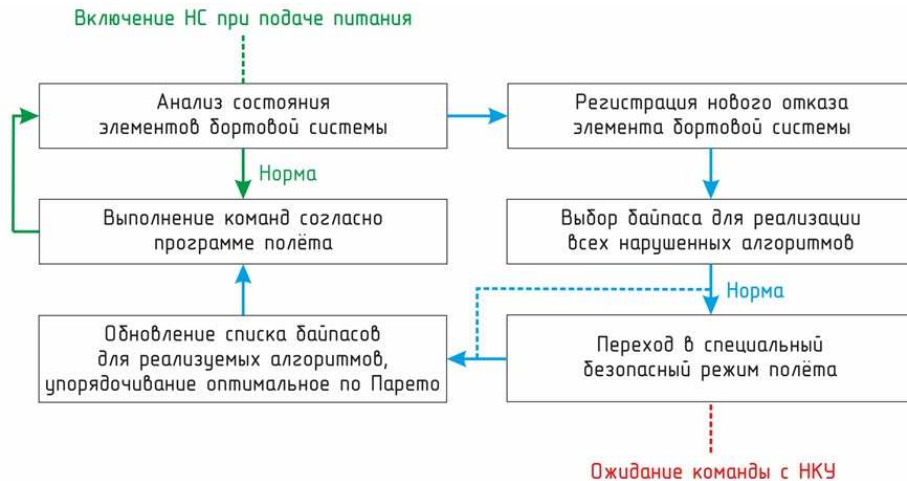


Рис. 1. Алгоритм обеспечения живучести НС

Отсутствие двух последних условий в большинстве случаев возможно формализовать, сводя к первым двум условиям. Таким образом, при анализе состояния элемента s_i бортовой системы достаточно проверить выполнение условия отказа s_i , используя параметр x :

$$s_i(x) : ((x = const) \cup (t \geq T_{MAX})) \mid x \in (x_{MIN}; x_{MAX}).$$

При выявлении отклонения значения числового параметра x от нормы происходит регистрация отказа в системном журнале событий. Согласно перечню эквивалентных композиций (байпасов) Δ_i , составленных для каждого алгоритма, определяются алгоритмы работы, которые оказались нарушенными в результате отказа элемента s_i . Для каждого нарушенного алгоритма производится выбор следующей эквивалентной композиции, соответствующей максимально возможной эффективности функционирования НС.

В случае невозможности реализации отказавших алгоритмов, бортовая система НС оказывается функционально неполной. НС переходит в специальный безопасный режим полёта и ожидает команд с наземного комплекса управления.

При успешном парировании отказа происходит заблаговременная подготовка к парированию других возможных отказов. Изменение конфигурации бортовой системы влечёт необходимость актуализации перечней доступных эквивалентных композиций.

Алгоритм обеспечения живучести может быть реализован на базе отдельного электронного устройства, однако это приведёт к увеличению массы космического аппарата. Так как НС характеризуются малыми массо-

габаритными характеристиками, данный подход практически не находит применения. Подход, требующий минимальных затрат, подразумевает анализ состояния бортовых средств непосредственно бортовым компьютером.

Анализ состояния бортовых средств может проводиться непрерывно в циклическом режиме. При использовании многозадачной операционной системы в бортовом компьютере программный код анализа бортовых средств может быть полностью выделен в отдельный поток и выполняться параллельно с основными задачами управления НС. Так как анализ осуществляется постоянно, такой подход может быть применён на НС, имеющем достаточные запасы энергии на борту.

При другом подходе анализ состояния бортовых средств производится непосредственно перед использованием того или иного элемента борта. Этот подход отличается экономией вычислительных и энергетических ресурсов борта, что весьма актуально для НС, обладающих аккумулятором с малой ёмкостью.

В качестве иллюстрации работы алгоритма рассмотрим НС, совершающий ориентированный полёт. НС оснащён двумя контактами отделения (КО), тремя наборами панелей фотоэлектродпреобразователей (ФЭП), расположенными ортогонально, приёмопередающим радиоустройством, спутниковым модемом. Для определения положения НС в пространстве установлены измерительные устройства: магнитометр, датчик угловых скоростей, навигационный приёмник, датчики освещённости. Для гашения возникающего начального кинетического момента устанавливается совокупность исполнительных органов в виде магнитных катушек, а также гистерезисные стержни для демпфирования колебаний. Рабочим положением НС является устойчивое положение равновесия.

В рамках решения целевой задачи НС выполняет набор типовых функций:

F_1 – обеспечение электропитания всех бортовых систем;

F_2 – формирование и накопление телеметрической информации;

F_3 – передача телеметрической информации с НС на наземный комплекс управления;

F_4 – приём команд НС с НКУ;

F_5 – определение текущей ориентации и угловой скорости движения НС относительно центра масс;

F_6 – обеспечение требуемой ориентации и стабилизации НС.

Для решения каждой задачи используется определённый набор элементов S , что удобно представить в виде функциональной схемы бортовой системы НС, (рис. 2) [9, 10].

На основе функциональной схемы и коэффициентов эффективности элементов бортовой системы НС можно рассчитать показатели эффективности $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_6$ выполнения функций F_1, F_2, \dots, F_6 в случае

отсутствия отказов, которые вычисляются с учётом логических связей и показателей эффективности каждого задействованного элемента Φ_{Si} :

$$\Phi_{Si} = k_i \cdot \frac{q_{Si}}{e_{Si} \cdot m_{Si} \cdot v_{Si}},$$

где q_{Si} – показатель качества работы элемента при выполнении заданной функции (точность измерения, скорость вычисления); e_{Si} – потребляемая электрическая мощность, Вт; m_{Si} – масса, кг; v_{Si} – занимаемый объём, м³; k_i – коэффициент нормирования [8].

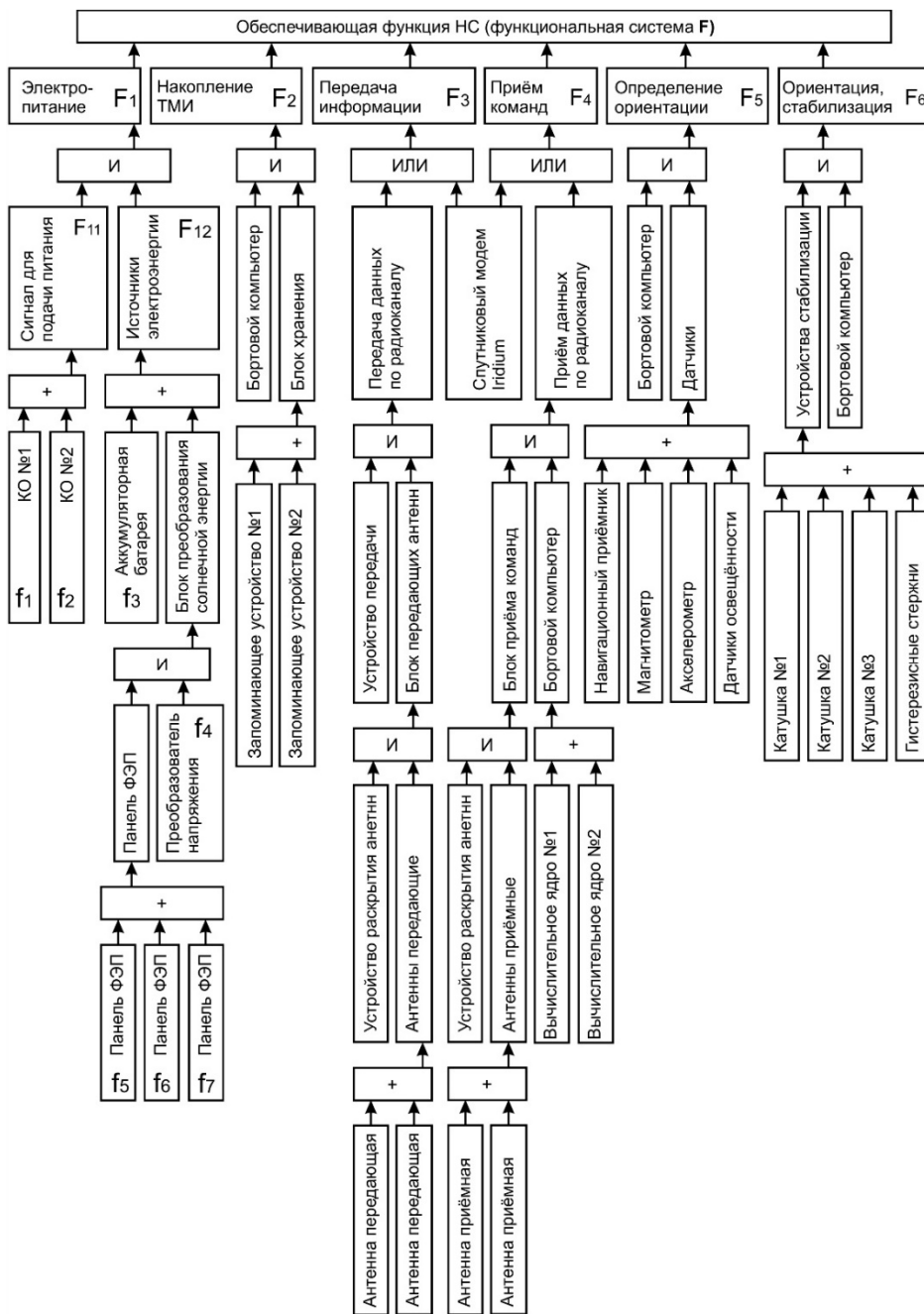


Рис. 2. Функциональная схема НС

Начальное (максимально возможное) значение эффективности функционирования НС определяется выражением

$$E_0 = k \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \Phi_3 \cdot \Phi_4 \cdot \Phi_5 \cdot \Phi_6 \cdot P_0 = k \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,71 = 1.$$

При выполнении функции электропитания бортовых систем на основе функциональной схемы можно записать следующее выражение:

$$F_1 \sim F_{11} \cup F_{12} = (f_1|f_2|f_1 \cup f_2) \cup \\ \cup (f_3|f_4 \cup (f_5|f_6|f_7|f_5 \cup f_6|f_5 \cup f_7|f_6 \cup f_7|f_5 \cup f_6 \cup f_7)) \cup \\ \cup (f_3 \cup f_4 \cup (f_5|f_6|f_7|f_5 \cup f_6|f_5 \cup f_7|f_6 \cup f_7|f_5 \cup f_6 \cup f_7)).$$

Это позволяет выделить эквивалентные комбинации:

$$F_1 \sim (f_1; f_2; f_3) \mid (f_1; f_3) \mid (f_2; f_3) \mid (f_1; f_2; f_3; f_4; f_5) \mid \dots$$

С целью оптимального использования функциональной избыточности необходимо вычислить [8] коэффициент эффективности для каждой комбинации (байпаса). Результаты расчётов приведены в таблице.

Определение оптимального порядка использования байпасов

№	Состав байпаса	Показатель эффективности Φ_{F_1} , ед.
1	$f_1; f_2; f_3; f_4; f_5; f_6; f_7$	1
2	$f_1; f_2; f_3; f_4; f_5; f_6$	0,66
3	$f_1; f_3; f_4; f_5; f_6; f_7$	0,5
4	$f_1; f_2; f_3; f_4; f_5$	0,33
5	$f_1; f_3; f_4; f_5$	0,15
6	$f_1; f_2; f_3$	0,1
7	$f_1; f_2$	0,05

Из диаграммы следует, что с целью обеспечения наибольшей живучести НС на начальном этапе будут задействованы все элементы системы электропитания. При появлении отказа, например, в преобразователе напряжения, бортовая система перейдёт на комбинацию с индексом 6, имеющую наибольшее значение коэффициента эффективности и неиспользующую неисправный преобразователь напряжения f_4 .

В случае отказа одной из панелей ФЭП функционирование НС продолжится, однако эффективность работы схемы заряда АКБ может быть снижена. В случае отказа двух панелей ФЭП эффективность работы значительно снижается. Для сохранения энергетике НС возможно изменить его ориентацию так, чтобы исправная панель ФЭП была ориентирована на Солнце.

В составе НС использован бортовой компьютер, содержащий несколько вычислительных ядер (контроллеров). Для штатного функционирования используется контроллер, обладающий наибольшей производи-

тельностью. Вспомогательный контроллер выполняет задачу поддержания живучести, контролируя работу основного ядра. При отказе главного контроллера, его функции передаются вспомогательному ядру, при этом происходит потеря эффективности функционирования.

Для сохранения возможности приёма команд управления вне зависимости от ориентации КА, на нём устанавливаются две приёмные антенны, расположенные на противоположных гранях. При выходе из строя одного из каналов приёма, НС, совершающий ориентированный полёт должен изменить своё угловое положение таким образом, чтобы исправная приёмная антенна была ориентирована к Земле.

В качестве резервного устройства приёма и передачи информации на борту НС установлен спутниковый модем системы Iridium. Использование специального антенного устройства позволяет дополнительно повысить живучесть.

При решении задачи определения движения относительно центра масс следует рассматривать замкнутый контур управления. Операция определения положения НС в пространстве может быть выполнена с использованием различного набора бортовых средств, для повышения живучести применяется изменение информационного поля.

В первую очередь используется избыточность, позволяющая изменить набор используемых датчиков при сохранении алгоритма определения ориентации. Происходит формирование виртуального датчика освещённости взамен физического отказавшего. При невозможности сформировать виртуальную замену производится корректировка алгоритма определения ориентации. При отказе магнитометра используется акселерометр.

При невозможности реализации алгоритма определения ориентации на борту НС из-за отказов измерительных средств возможна замена результатов измерений их оценками на основе математической модели, которая должна корректироваться во время сеансов связи.

Байпас при определении ориентации НС может быть организован с использованием навигационного приёмника. При этом используется информация о совокупности спутников глобальных навигационных спутниковых систем, находящихся в зоне радиовидимости [11].

Используя методику оценки живучести [8], путем математического моделирования можно рассчитать эффективность функционирования НС для случая отказа каждого из элементов бортовой системы, двух элементов одновременно. Результаты расчётов показывают, что при возникновении отказа эффективность функционирования НС снижается, однако за счёт работы алгоритмов и использования описанной функциональной избыточности снижение эффективности удаётся частично скомпенсировать (рис. 3).

При возникновении отказов в одном элементе НС показатель эффективности функционирования НС снижается в среднем до значения $E_1 = 0,2$. Благодаря использованию байпаса показатель эффективности

функционирования возрастает в среднем до значения $E_2 = 0,82$. Таким образом, в случае единичного отказа алгоритм управления живучестью позволяет повысить её более, чем в 3,5 раза.

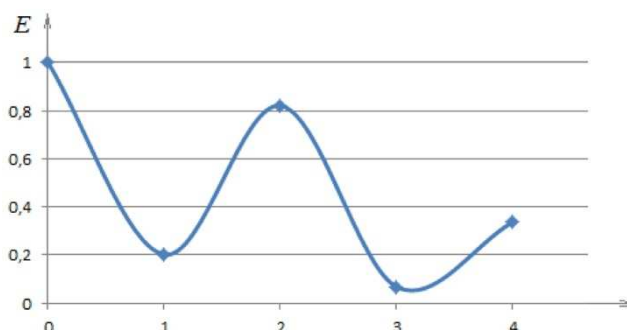


Рис. 3. Диаграмма изменения эффективности функционирования НС

При возникновении второго отказа показатель эффективности НС снижается в среднем до значения $E_3 = 0,07$. Благодаря использованию байпаса показатель эффективности функционирования возрастает в среднем до значения $E_4 = 0,33$. Таким образом, в случае двух отказов алгоритм управления живучестью позволяет повысить её более, чем в 4,5 раза.

Таким образом, предложенный универсальный алгоритм реконфигурации борта позволяет существенно увеличить эффективность функционирования НС после отказа бортовых средств. Заблаговременная сортировка байпасов по приоритету использования позволяет оперативно принимать решение о реконфигурации и восстанавливать работоспособность системы.

Для возможности обработки непредвиденных отказов необходимо предусматривать специальный режим полёта, когда борт функционирует в режиме приёма команд управления, а анализ бортовых средств осуществляется в наземном центре управления. Перспективным направлением обнаружения отказов является их прогнозирование.

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. [Электронный ресурс] URL: https://creator.zohopublic.com/plspace/nanosat-database-demo/view-perma/Nanosat_database (дата посещения: 03.04.2019).
3. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.: Знание, 1987. 55 с.
4. Додонов А.Г. Живучесть информационных систем. Киев: Наукова думка, 2011. 256 с.

5. Харитонов В.А. Основы теории живучести функционально-избыточных систем: препринт №170. СПб, 1993. 60 с.
6. Кирилин А.Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. М.: Машиностроение, 2010. 382 с.
7. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полётных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. №4. С. 17 – 37. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-17-37.
8. Егоров А.М., Белоконов И.В. Выбор состава бортовых средств для обеспечения заданной живучести наноспутника // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. №3. С. 78 – 86. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.78.86.
9. Егоров А.М. Анализ возможных отказов типового наноспутника // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. №9. С. 471 – 476. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-471-476.
10. Проектирование системы электропитания наноспутников семейства Samsat // Известия высших учебных заведений / Д.Д. Давыдов, А.А. Соболев, Е.В. Устюгов, С.В. Шафран // Приборостроение. 2016. Т. 59. №6. С. 459 – 465. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-459-465.
11. Егоров А.М. Разработка модели приёма сигналов от спутниковых радионавигационных систем для наноспутника Samsat1 при использовании двух антенн // Вестник совета молодых учёных и специалистов СГАУ. 2013. № 2 (3). С. 25 – 28

Белоконов Игорь Витальевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, ibelokonov@mail.ru, Россия, Самара, Самарский университет,

Егоров Андрей Михайлович, аспирант, eandrm07@mail.ru, Россия, Самара, Самарский университет

**THE PROBLEM OF SURVIVABILITY OF THE NANOSATELLITE AND ENSURING ITS
THROUGH THE USE OF FUNCTIONAL REDUNDANCY**

I.V. Belokonov, A.M. Egorov

The paper deals with the problem of ensuring the survivability of small-size spacecraft class nanosatellite (NS) in orbital flight. A feature of the devices is the widespread use of commercial components for general purposes. The presence of additional sensors allows them to be used as functional redundancy to ensure survivability. The algorithm of optimal Pareto reconfiguration of the structure of the onboard system, which allows to provide the maximum possible rate of survivability of the NS for a given set of onboard facilities. An example of using the algorithm for NS solving the problem of orientation control is given.

Key words: nanosatellite, survivability, efficiency, evaluation, redundancy, failure, bypass.

Belokonov Igor Vitalevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, ibelokonov@mail.ru, Russia, Samara, Samara National Research University (Samara University),

Egorov Andrey Mikhailovich, postgraduate, eandrm07@mail.ru, Russia, Samara, Samara National Research University (Samara University)

УДК 531.383

ТЕРМОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ОБЪЕКТИВ ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В.А. Горячева, В.Л. Мазаев

Рассмотрены два варианта термостабилизированного объектива. В первом варианте применяется стекло марки ОК4, второй вариант системы рассчитан с использованием обычных марок стекол.

Ключевые слова: термостабилизация, ахроматическая коррекция, апохроматическая коррекция, частотно-контрастная характеристика.

В настоящее время большое распространение получили телевизионные наблюдательные приборы, работающие в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Такой спектральный диапазон необходим для повышения обнаружительной способности прибора. Объектив таких приборов должен иметь практически дифракционную абберационную коррекцию как монохроматических, так и хроматических аббераций. Кроме того, для него требуется компенсация термоаббераций в широком диапазоне рабочих температур.

Апохроматическая коррекция оптической системы возможна только при использовании оптических материалов с разным ходом дисперсии [1]. В качестве таких материалов могут быть использованы следующие стекла: особый крон марок ОК1, ОК4, особый флинт марок ОФ4, ОФ6. При этом необходимость коррекции термоаббераций ограничивает выбор материалов и усложняет расчет оптической системы.

Задачей настоящей работы ставилась разработка термостабилизированного объектива в диапазоне температур от -50 до $+60$ °С с апохроматической коррекцией аббераций в диапазоне длин волн от 0,40 до 0,85 мкм.

Объектив предназначен для работы с цветным матричным фотоприемником на КМОП-структуре. Рабочий спектральный диапазон матрицы составляет 0,3...1,0 мкм, формат – 2048x2048 активных элементов, размер элемента – 5,5 мкм. Размер диагонали фоточувствительной площади 16 мм.