

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64098 от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:

05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкций и производство летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], (входит в Перечень ВАК)

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ], (**не входит в Перечень ВАК**)
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.09 Материаловедение (по отраслям)] (входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.
Макаревич Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Аббасова Т.С., Привалов В.И., Бондаренко В.Г.

СИНТЕЗ БАЗОВОЙ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....3

Азаренко Л.Г.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСШИРЕННОЙ КРИТЕРИАЛЬНОЙ БАЗЫ В УПРАВЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ВАЖНЕЙШИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....17

Артюшенко В.М., Воловач В.И.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА СЛЕДЯЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ В АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ НА ФОНЕ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ. КРУТИЗНА ДИСКРИМИНАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ЧАСТЬ I.....26

Вокин Г.Г., Гуменюк А.М.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ, АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....38

Захаров А.А., Захаров В.А.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ И НАЛИЧИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....48

Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И.

ГЕНЕРАТОР ФОРМАТОВ ГРУППОВОГО ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОГРАММНО УПРАВЛЯЕМЫМ СПОСОБОМ СБОРА ДАННЫХ.....58

Щурин К.В., Береснев С.А., Капустин В.А.

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ.....69

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
16. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
17. **Стрелюк Ю.В.**, д.т.н., профессор
18. **Халиулин В.И.**, д.т.н., профессор
19. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
20. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 17.06.2021
Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л.12,6
Тираж 500 экз.
Заказ № 91-02

Отпечатано в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И
УПРАВЛЕНИЕ**

Брусков А.А.
**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОТКАЗОВ ВО
ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ СЕТЯХ...76**

Воловач В.И.
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТОЧНОСТИ СОВМЕСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДВУХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА.....91**

Истратова Е.Е., Антонянц Е.Н., Амельченко А.О.
**МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
СЕТЕВОГО ТРАФИКА В КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ
ПРЕДПРИЯТИЯ.....104**

Маслобоев А.В., Путилов В.А.
**ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЦЕЛЕВЫЕ МОДЕЛИ
УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ
(ЧАСТЬ 1. СИНТЕЗ ЦЕПОЧЕК ЦЕЛЕЙ
И ДЕЙСТВИЙ).....114**

Семенов А.Б., Гончаров Д.А., Лёвкин А.В.
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭШЕЛОННОЙ СХЕМЫ
ФОРМИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННОГО ПОЛЯ
УЗЛА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ
ОФИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ
СИСТЕМ.....127**

Суркова Л.Е., Давыдов Д.В.
**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕГРАЦИИ
ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ВIM
МОДЕЛИРОВАНИЯ С ОФИСНЫМ ПРИЛОЖЕНИЕМ...139**

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Абразумов В.В., Спирин Б.Л.
**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИТОВ.....148**

Баринкова А.А., Пиирайнен В.Ю., Баринков В.М.
**НОВЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ
С НЕЙТРАЛИЗОВАННЫМ КРАСНЫМ ШЛАМОМ.....156**

Ерошенко В.Д., Овчинников А.Н., Васильев А.Н.
**РАЗРАБОТКА СПОСОБА СИЛИЦИРОВАНИЯ
ВЫСОКОПЛОТНОГО ГРАФИТА МАРКИ МПГ.....170**

Спирин Б.Л., Фролов С.В., Абразумов В.В.
**МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НАСЫПНЫХ СТРУКТУР.....180**

Шахназаров К.Ю., Михайлов А.В., Цуканов Д.В.
**ОБОСНОВАНИЕ ПРИЗНАКОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ
В ЖЕЛЕЗЕ И УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ
ПРИ ~ 450 °С.....190**

УДК 629.7.017.1

Распространение отказов во взаимозависимых многоуровневых сетях

А.А. Брусков, аспирант второго года обучения кафедры информационных технологий и управляющих систем,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В этой работе разрабатываются новый подход и алгоритмические инструменты для моделирования и анализа живучести сетей с разнородными узлами, а также рассматривается их применение в космических сетях. Космические сети позволяют совместно использовать ресурсы космических аппаратов на орбите, такие как хранение, обработка и обмен данными. Каждый космический аппарат в сети может иметь различный состав и функциональность подсистем, что приводит к неоднородности узлов. Большинство традиционных анализов живучести сетей предполагают однородность узлов и в результате не подходят для анализа космических сетей. Эта работа предполагает, что гетерогенные сети могут быть смоделированы как взаимозависимые многоуровневые сети, что позволяет проводить анализ их живучести. Многоуровневый аспект фиксирует разбивку сети в соответствии с общими функциональными возможностями в различных узлах и позволяет создавать однородные подсети, в то время как аспект взаимозависимости ограничивает сеть для захвата физических характеристик каждого узла.

Взаимозависимые многоуровневые сети, анализ живучести, космические сети, отказы, сбои, деградация.

Failure propagation in interdependent multi-level networks

A.A. Bruskov, second-year postgraduate student of the Department of Information Technologies and Control Systems,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

In this paper, we develop a new approach and algorithmic tools for modeling and analyzing the survivability of networks with heterogeneous nodes, and also consider their application in space networks. Space networks allow the sharing of spacecraft resources in orbit, such as data storage, processing, and exchange. Each spacecraft in the network may have a different composition and functionality of subsystems, which leads to heterogeneity of nodes. Most traditional network survivability analyses assume node homogeneity and as a result are not suitable for space network analysis. This work suggests that heterogeneous networks can be modeled as interdependent

multi-level networks, allowing analysis of their survivability. The multi-level aspect captures the network breakdown according to the common functionality in different nodes and allows for the creation of homogeneous subnets, while the interdependence aspect restricts the network to capture the physical characteristics of each node.

Interdependent multi-level networks, survivability analysis, space networks, failures, failures, degradation.

Оценка живучести взаимозависимой многослойной сети требует оценки целевой функции, связанной с временем отказа узлов в сети. Из-за взаимозависимости в модели эта оценка не является тривиальной и требует тщательного учета различных вопросов, обсуждаемых далее. Часть распространения отказа обусловлена как «эффектом убийцы», так и «эффектом предшественника». В следующих подразделах подробно рассматриваются эти эффекты. Способ включает четыре стадии:

- генерация времени до отказов T_F для каждого узла и внутриуровневой линии связи;
- распространение отказов через межуровневые линии связи, связанные с «эффектом убийцы»;
- распространение отказов через межуровневые линии связи, связанные с «эффектом предшественника»;
- объединение всех эффектов для получения вероятности недоступности каждого узла.

Ниже приводится математическая характеристика этих этапов.

Взаимозависимая многоуровневая сеть, представляющая интерес, определяется как $N(A_1, A_2, A_3, C, f)$. В этой работе исследуются отказы узлов и каналов связи.

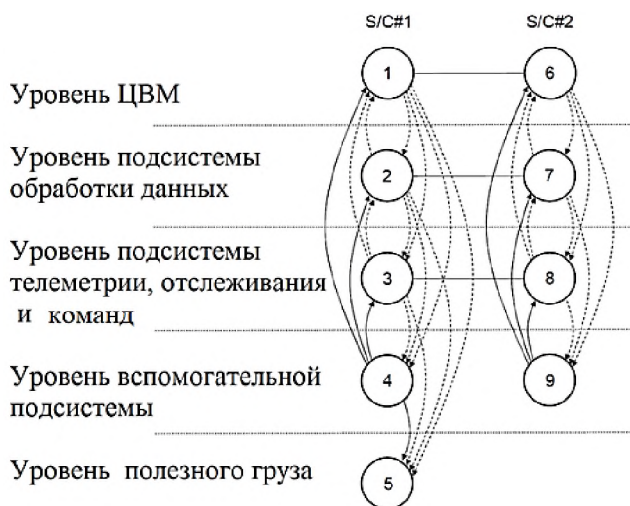


Рисунок 1 – Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление космической сети с резервированием центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных

Таблица 1 – Параметры Вейбулла для времени отказа подсистем космического аппарата в случае центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных

Функциональность	Параметр формы Вейбулла β	Параметр масштаба Вейбулла θ (лет)
Центральная вычислительная машина	1.251	691.2
Подсистемы обработки данных	0.6266	350,000
Подсистема телеметрии, отслеживания и команд	0.4650	47,770
Поддерживающая подсистема	0.5529	918.5
Полезная нагрузка	0.5767	49,990

Генерация времени до отказа. Для распространения отказов по сети необходимо сначала генерировать время до отказов для различных объектов в космической сети – узлов и внутриуровневых связей. Используя кумулятивные функции распределения, представляющие поведение отказа каждого узла, можно генерировать случайное время до отказа для узлов $T_{F, \text{узел } i} (i \in N_n^*)$. Следует отметить, что для каждого узла общего уровня нет необходимости совместно использовать одно и то же поведение отказа (разнесение избыточности).

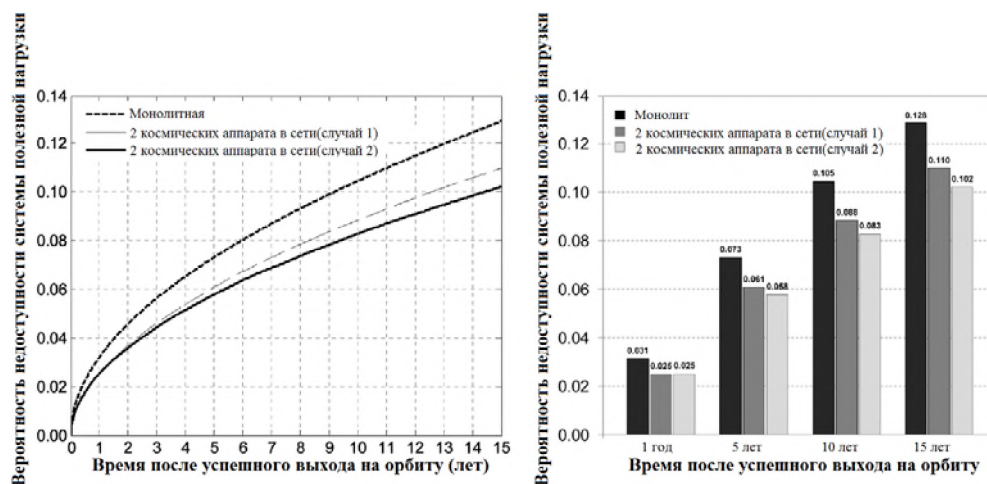


Рисунок 2 – Выходная вероятность неготовности полезной нагрузки с функциональным резервированием центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных наряду с случаем монолита и случаем подсистемы телеметрии, отслеживания и команд

Для формирования времени отказа для внутрислойных связей $T_{F, \text{канал связи } j \rightarrow t^*}$ необходимо два шага: связь между двумя космическими аппаратами устанавливается через беспроводной блок, встроенный в каждый космиче-

ский аппарат.

Для функционирования канала оба блока должны быть работоспособными, отказ одного из них приводит к отказу канала:

- генерация времени до отказа беспроводных блоков на каждом космическом аппарате с использованием заданных кумулятивных функций распределения;

- генерировать время до отказов для каждого внутриуровневого канала $T_{F, \text{канал связи } j \rightarrow i^*}$ принимая минимальное время до отказов двух связанных беспроводных устройств (блок i и блок j).

Распространение сбоя через «Эффект убийцы». Информация об «эффекте убийцы» содержится в межслойной матрице C , и первый шаг заключается в извлечении из C пар вершин «убийца» и «жертва». Как показано в предыдущем параграфе, E_k может быть определен из C следующим образом:

$$E_k = \{(j, i) | c_{ij} = 1\} \quad (2)$$

Определив v вектор k_1 как «убийцу» и вектор v_1 как «жертву» так, чтобы:

$$\begin{cases} k_1, v_1 \in N^{|E_k|} \\ \forall q \in N^*_{|E_k|}, (k_1(q), v_1(q)) \in E_k \\ \forall r, s \in N^*_{|E_k|} \text{ и } r \neq s, (k_1(r), v_1(r)) \neq (k_1(s), v_1(s)) \end{cases} \quad (2)$$

Последний шаг заключается в вычислении времени до недоступности $T_U^{k,F}$ – вершины «жертвы» с использованием времени до отказа вершины «убийцы». Математически это выражается как:

$$\forall q \in N^*_{|E_k|}, T_{U, \text{вершина } v_1(q)}^{k,F} = T_{F, \text{вершина } k_1(q)} \quad (3)$$

В случае, когда вершина жертвы имеет несколько «убийц», $T_U^{k,F}$ равно минимуму времени до отказа вершин «убийцы».

Распространение отказа через «Эффект предшественника». Что касается «эффекта убийцы», то информация о «эффекте предшественника» содержится в межуровневой матрице C , а C используется для извлечения пар вершин «убийцы» и «жертвы». Как определено в предыдущей главе, E_p определяется следующим образом:

$$E_k = \{(j, i) | c_{ij} = 2\} \quad (4)$$

«Убийца» вектора k_2 и «жертва» вектора v_2 определяются как:

$$\begin{cases} k_2, v_2 \in N^{|E_p|} \\ \forall q \in N^*_{|E_p|}, (k_2(q), v_2(q)) \in E_p \\ \forall r, s \in N^*_{|E_p|} \text{ и } r \neq s, (k_2(r), v_2(r)) \neq (k_2(s), v_2(s)) \end{cases} \quad (5)$$

Расчет времени до неисправности из-за «эффекта предшественника» не так прост, как для «эффекта убийцы». Действительно, отказ вершины, имеющей функциональную избыточность, не обязательно будет немедленно распространяться на вершины, принадлежащие одному и тому же объекту (здесь, космический аппарат). Время, в которое функция, представленная вершиной, станет недоступной, зависит от времени до отказа самой вершины, а также от времени до

отказа других вершин и рёбер части того же слоя. Например, в моем исследовании космических сетей отказ узла 1 будет распространяться на узлы 2 и 3, если узел 1 не способен подключиться к ресурсам узла 4, то есть если неисправна линия связи между узлами 4 и 1, или узел 4. Следовательно, необходимо сравнить время до отказа узла, с теми парами линии связи/узла, к которым он подключен. Необходимо выполнить несколько шагов, которые описаны ниже.

1. Чтобы узнать, когда вершина становится недоступной после «эффекта убийцы», вводится «минимальное время недоступности» $T_U^{m,F}$ и определяется как:

$$\forall q \in N_n^* \begin{cases} T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} = \min [T_{F, \text{вершина } q}, T_{U, \text{вершина } q}^{k,F}] & \text{если } T_{U, \text{вершина } q}^{k,F} \text{ существует,} \\ \text{иначе } T_{U, \text{вершина } q}^{k,F} = T_{F, \text{вершина } q} & \end{cases} \quad (6)$$

2. Для сравнения времени до отказа вершины i и тех пар рёбер ($j \rightarrow i$)/вершина j , с которыми она связана (т.е. рёбра к этой вершине i), вводится конструктивный $H_i^F = [h_{ij}^{l,F}]_{n_l \times n_l}$ объект - матрица, определённая следующим образом для $l \in E_L$:

$$\forall l \in E_L, \begin{cases} \text{если } i = j, h_{ij}^{l,F} = T_{U, \text{вершина } f^{-1}(l,j)}^{m,F} \\ \text{если } a_{ij}^l = 1, h_{ij}^{l,F} = \\ \text{если } i \neq j, \left\{ \begin{aligned} & \text{если } a_{ij}^l = 1, h_{ij}^{l,F} = \\ & \text{если } a_{ij}^l = 0, h_{ij}^{l,F} = 0 \end{aligned} \right. = \min [T_{F, \text{ребро } f^{-1}(l,j) \rightarrow f^{-1}(l,i)}, T_{U, \text{вершина } f^{-1}(l,j)}^{m,F}] \\ \text{если } a_{ij}^l = 0, h_{ij}^{l,F} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Эта матрица H полезна тем, что она представляет время до отказа вершины и пары ребер/вершин, с которыми она связана.

3. Время до недоступности с учетом функциональной избыточности $T_U^{r,F}$, интересующей вершины, можно найти как максимальное время до отказа в связанной линии. Рассмотрим вектор столбца $m_i^F = [m_i^{l,F}]_{n_l \times 1}$, определенный для $l \in E_L$ как:

$$\forall l \in E_L, m_i^{l,F} = \max_j h_{ij}^{l,F} \quad (8)$$

4. $T_U^{r,F}$ теперь можно вычислить как:

$$\forall l \in E_L, \forall i \in N_{nl}^*, T_{U, \text{вершина } f^{-1}(l,i)}^{r,F} = m_i^{l,F} \quad (9)$$

5. Теперь может быть применен тот же процесс, что и для «эффекта убийцы», то есть распространение «отказа» узла по слоям на узлы, принадлежащие одному и тому же объекту. Этот шаг заключается в вычислении времени до недоступности $T_U^{p,F}$ вершины «жертвы» с использованием времени до отказа вершины «убийцы». Математически это выражается как:

$$\forall q \in N_{|E_p|}^*, T_{U, \text{вершина } v_1(q)}^{p,F} = T_{U, \text{вершина } k_1(q)}^{r,F} \quad (10)$$

В случае, когда вершина жертвы имеет несколько «убийц», $T_U^{p,F}$ равно минимуму времени $T_U^{r,F}$ вершин «убийцы».

6. Из-за того, что несколько уровней избыточности могут рассматривать-

ся одновременно, взаимозависимость «эффекта предшественника» между вершинами, принадлежащими одному и тому же космическому аппарату, но в разных слоях, может потребовать итеративной схемы времени недоступности, чтобы сойтись к их правильным значениям. Следующее условие указывает, если требуется больше итераций: если $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} \leq T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$, распространение отказа из-за «эффекта предшественника» завершено (можно пропустить шаг 7). В противном случае перейдите к следующему шагу.

7. Пока $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} > T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$, установите $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} = T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$ и повторите шаги 2-5.

Комбинация всех эффектов. Наконец, для каждой вершины во взаимозависимой многоуровневой сети время недоступности получается следующим образом:

$$\forall q \in N_n^*, T_{U, \text{вершина } q}^F \\ = \min[\max(T_{F, \text{вершина } q}, T_{U, \text{вершина } q}^{rF}), T_{U, \text{вершина } q}^{kF}, T_{U, \text{вершина } q}^{pF}] \quad (11)$$

Где $T_{U, \text{вершина } q}^{rF}$, $T_{U, \text{вершина } q}^{kF}$ и $T_{U, \text{вершина } q}^{pF}$ включены, если они имеют место.

Алгоритм распространения отказов. Ниже приведен алгоритм процесса, используемого для распространения катастрофических отказов по сети. Требуются следующие входные данные: матрицы смежности и межслойная матрица, функция отображения (эти три элемента определяют сетевую архитектуру) и кумулятивную функцию распределения для распределения отказов вершин и рёбер.

1. Создать для каждой вершины $T_{F, \text{вершина } q}$
2. Создать для каждого ребра $T_{F, \text{ребро } j \rightarrow i}$
3. Вычислить E_k с использованием выражение (1)
4. Вычислить k_1 и v_1 , используя выражение (2)
5. Вычислить T_U^{kF} для каждой вершины жертвы, используя выражение (3)
6. Вычислить E_p с использованием выражение (4)
7. Вычислить k_2 и v_1 , используя выражение (5)
8. Вычислить T_U^{mF} для каждой вершины, используя выражение (6)
9. Для всех $l \in E_L$ вычислить H_l^F , используя выражение (7)
10. Для всех $l \in E_L$ вычислить m_l^F , используя выражение (8)
11. Вычислить T_U^{rF} для каждой вершины для всех слоев $l \in E_L$, используя выражение (9)
12. Вычислить T_U^{pF} для каждой вершины жертвы, используя выражение (10)
13. Повторить шаги 9-12 до $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} \leq T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$ для всех вершин жертвы q в «эффекте предшественника»
14. Вычислить T_U^F для каждой вершины, используя выражение (11)

Функциональная избыточность подсистемы телеметрии, отслеживания и команд с использованием идеальной беспроводной связи. Первая рас-

сма­три­вае­мая кос­ми­че­ская сеть – это про­стой при­мер, ис­поль­зо­вав­ший­ся ране­е (ри­сун­ок 3), ко­то­рый со­сто­ит из сети из двух кос­ми­че­ских ап­па­ра­тов, ко­то­рые мо­гут со­вмес­тно ис­поль­зо­вать свои ре­сур­сы под­си­сте­мы те­ле­мет­рии, от­сле­жи­ва­ния и ко­ман­д.

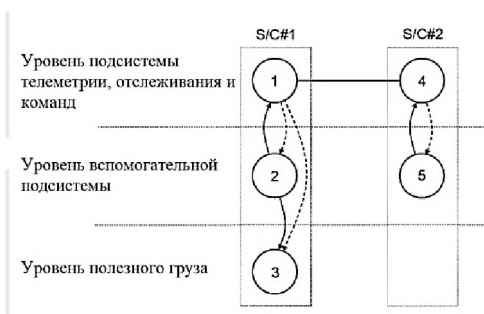


Рисунок 3 – Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление для примера космической сети

Этот конкретный пример был выбран, так как предыдущие исследования определили подсистему телеметрии, отслеживания и команд как основной движущей силы ненадежности космических аппаратов [1], поэтому космические аппараты в сети выиграют, если смогут подключаться к подсистеме телеметрии, отслеживания и команд друг друга. В этом иллюстративном случае основное внимание уделяется эндогенным отказам, и, как следствие, результаты живучести ограничиваются этим конкретным классом угрозы, и их не следует экстраполировать на другие классы ударов на орбите. Характеристики отказов различных подсистем космического аппарата приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры Вейбулла для времени отказа подсистем космического аппарата в случае подсистемы телеметрии, отслеживания и команд

Функциональность	Параметр формы Вейбулла β	Параметр масштаба Вейбулла θ (лет)
Подсистема телеметрии, отслеживания и команд	0.4650	47,770
Поддерживающая подсистема	0.5529	918.5
Полезная нагрузка	0.5921	30,150

Анализ живучести взаимозависимой многослойной сети, показанной на рисунке 3, рассматривает способность космической системы генерировать полезность, то есть вероятность того, что узел полезной нагрузки (узел 3) остается полностью работоспособным, или вероятность того, что он станет недоступным. Как следствие, интересующей метрикой является $P(T_{U,3}^F < t)$. Представленные здесь результаты живучести ограничены этой метрикой, но они могут быть легко

расширены до других интересующих показателей производительности.

Предполагая сначала совершенно надежную беспроводную связь между космическим аппаратом и запуском моделирования Монте-Карло, можно получить вероятность недоступности узла полезной нагрузки, показанного на рисунке 4.

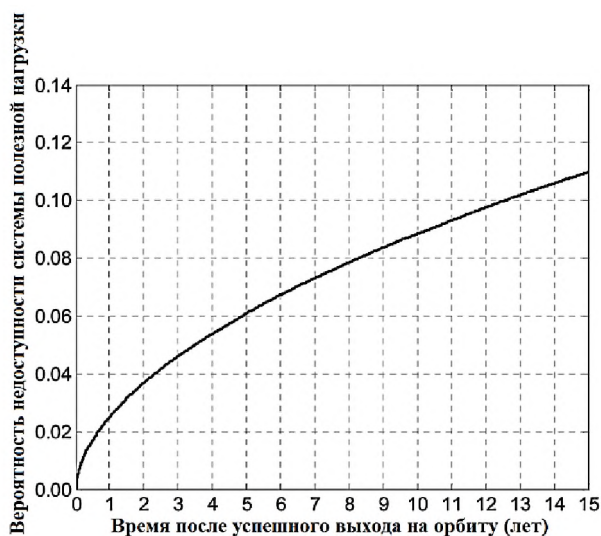
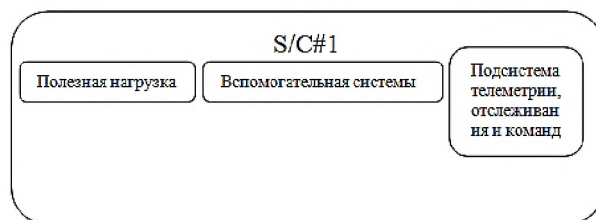


Рисунок 4 – Выходная вероятность неготовности системы полезной нагрузки с функциональным резервированием подсистемы телеметрии, отслеживания и команд

Рисунок 4 выглядит следующим образом: например, через 5 лет на орбите существует примерно 6% вероятность того, что полезная нагрузка будет недоступна для генерации утилиты. Эта вероятность увеличивается примерно до 9% после 10 лет пребывания на орбите.

В дополнение к таким результатам, как показано на рисунке 4, предложенный здесь способ позволяет быстро проводить сравнительный анализ живучести различных архитектур. Например, далее рассматриваются две дополнительные архитектуры: традиционный монолитный космический аппарат и трех сетевая архитектура космического аппарата, представленная на рисунке 5, наряду с космической сетью из двух космических кораблей, изученным выше.

Традиционная монолитная архитектура:



Космическая сеть из двух космических аппаратов:



Космическая сеть из трех космических аппаратов:

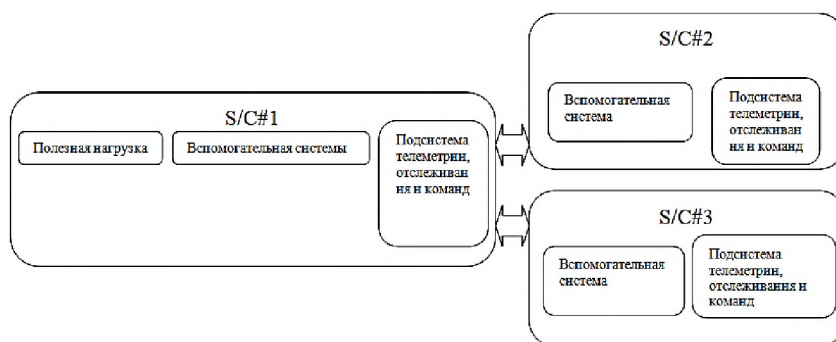


Рисунок 5 – Космические архитектуры с различными уровнями избыточности подсистемы телеметрии, отслеживания и команд

Взаимозависимое многослойное представление сети трех космических аппаратов показано на рисунке 5, а соответствующие матрицы и функция отображения являются следующими:

$$\text{Матрица смежности: } A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = 0_{3 \times 3} \text{ и } A_3 = 0_{1 \times 1};$$

$$\text{Межслойная матрица: } C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\text{(Обратная) функция отображения: } f^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 \\ 2 & 4 & 7 \\ 5 & \text{NaN} & \text{NaN} \end{bmatrix}.$$

Если предположить, что беспроводные каналы связи между космическими аппаратами абсолютно надежны, то вероятность недоступности полезной нагрузки для каждой из трех архитектур показана на рисунке 6.

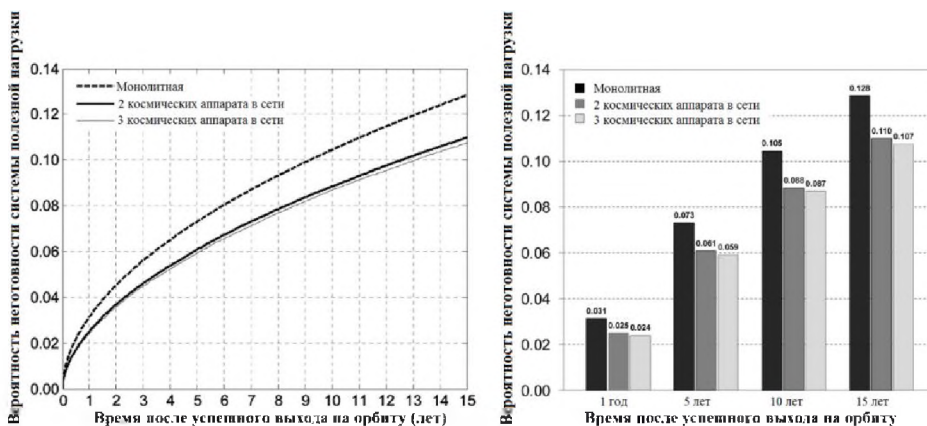


Рисунок 6 – Сравнение вероятностей недоступности системы полезной нагрузки для архитектуры одного, двух и трёх космических аппаратов

На рисунке 6 показано, что по прошествии 15 лет вероятность того, что традиционный монолитный космический аппарат будет недоступен, составляет 12,8% (без выработки энергии), по сравнению с 11,0% для сети с двумя космическими аппаратами и 10,7% для сети с тремя космическими аппаратами. Другими словами, добавление космических аппаратов в сеть с резервированием подсистемы телеметрии, отслеживания и команд увеличит коэффициент живучести архитектуры по отношению к эндогенным отказам. Подход моделирования и анализ здесь предложили количественно оценить степень живучести различных сетевых архитектур. В этом примере уменьшение вероятности полного отказа узла полезной нагрузки (или недоступности узла) для сетевых архитектур двух космических аппаратов представляет собой 14% вариацию по сравнению с вероятностью полного отказа монолитной архитектуры, что можно считать значительным улучшением по сравнению с нынешней парадигмой проектирования космического аппарата. Значительная часть разницы происходит в начале жизни космической сети, что согласуется с тем, что большинство подсистем космических аппаратов страдают от младенческой смертности [2].

Следует провести тщательный анализ затрат и выгод для оценки того, стоит ли эта дополнительная вероятность создания полезного ресурса для его получения за счет проектирования, производства и запуска дополнительных космических аппаратов.

На рисунке 6 показано незначительное дополнительное преимущество 3-космических аппаратов по сети 2-космических аппаратов в соответствии с рассмотренными здесь предположениями (эндогенные сбои и идеальная беспроводная связь): добавление одного космического аппарата к традиционному монолитному космическому аппарату для функционального резервирования подсистемы телеметрии, отслеживания и команд снижает вероятность неготовности полезной нагрузки на 1,8%, но добавление двух космических аппаратов к монолиту для той же цели уменьшает такую же вероятность на 2,1%. Возможность получения таких результатов важна для системных инженеров при оценке стоимости и количественной оценки преимуществ различных вариантов проектирования сети.

Влияние сбоя беспроводной линии связи. Допущение, сделанное ранее относительно совершенно надежной беспроводной связи между космическими аппаратами, может быть не оправдано на практике, и, как следствие, преимущества живучести космической сети по сравнению с монолитным космическим аппаратом могут быть не в полной мере реализованы. Для оценки влияния отказа беспроводной линии связи при моделировании вводится поведение износа линии связи. Вероятность отказа линии связи обозначается как $v_F(t)$. Предполагая, что оба беспроводных блока для сети на рисунке 4 идентичны и что их отказ моделируется с использованием распределения Вейбулла с параметром формы β и параметром масштаба θ , вероятность отказа линии связи задается следующим образом:

$$v_F(t) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\theta / 2^{(1/\beta)}} \right)^\beta \right) \quad (24)$$

Мы изучили широкий спектр параметров поведения отказа Вейбулла беспроводной линии связи, демонстрируя как младенческую смертность, так и сбои износа. Результаты, показанные на рисунке 7, относятся к характерным параметрам Вейбулла $\beta = 3$ и $\theta = 21,36$ лет, которые приводят к 50% вероятности отказа линии связи после 15 лет нахождения на орбите.

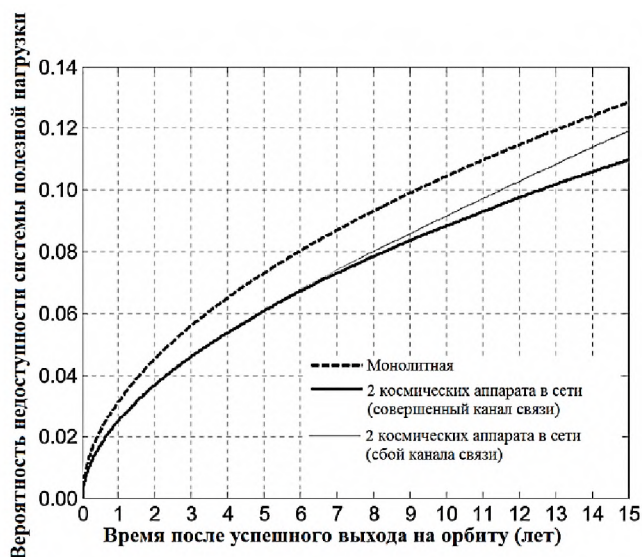


Рисунок 7 – Влияние несовершенного беспроводного канала

На рисунке 7 показана вероятность недоступности узла полезной нагрузки наряду с результатами для монолитной архитектуры и архитектуры сети двух космических аппаратов с идеальной связью. По существу, на рисунке 9 четко идентифицирует эффект отказа беспроводной линии связи.

На рисунке 7 показано, как ненадежность канала влияет на вероятность недоступности полезной нагрузки. В случае, показанном здесь, когда связь демонстрирует изношенные отказы, мы отмечаем, как и ожидалось, что вероятность отказа для архитектуры сети двух космических аппаратов с несовершенной связью расходится с ее идеальным случаем в конце жизни системы на орбите (около 7 года на рисунке). Более общий вывод заключается в том, что преимущество живучести космической сети возникает до того, как линия связи начинает демонстрировать отказы, и что, чем больше вероятность отказа линии связи, тем меньше преимущество живучести (больше расхождения от идеального случая).

«Младенческая смертность» по беспроводной линии связи (распространенность ранних сбоев) притупило преимущество живучести космической сети на ранней стадии и, как следствие, искоренить такое поведение отказа беспроводной линии связи, путем включения или других процедур, должно быть высоким приоритетом для конструкторов и производителей, если космическая сеть должна предложить устойчивое преимущество по сравнению с традиционной конструкцией монолитного космического аппарата.

Вариант функционального резервирования центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных с идеальным беспроводным каналом. Предыдущий пример с избыточностью подсистемы телеметрии, отслеживания и команд показал простой пример демонстрации возможностей и использования представленного здесь подхода. Этот подход позволяет обрабатывать более сложные архитектуры, которые выходят за рамки возможностей

современных средств обеспечения надежности. В качестве примера ниже представлена более сложная архитектура. Для совместного использования орбитальных ресурсов могут быть выбраны и другие подсистемы космических аппаратов: например, управляющий процессор (основной компьютер космического аппарата) является хорошим кандидатом, поскольку космический аппарат может объединять свою вычислительную мощность, или один космический аппарат может запускать процессы и управлять другим космическим аппаратом, если центральная вычислительная машина этого космического аппарата вышла из строя, если достаточный запас вычислительной мощности встроено в поддерживающий космический аппарат. Дополнительной фракционируемой подсистемой является подсистема обработки данных (отвечающая за хранение и обмен данными): например, в качестве «жесткого диска» созвездия можно предусмотреть один космический аппарат, на котором сетевые модули загружают свои данные, данные затем спускаются на наземную станцию космическим аппаратом-сборщиком.

Макросистема, объединяющая подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, обработки данных и центральную вычислительную машину также называется подсистемой обработки команд и данных.

Взаимозависимая многослойная модель должна учитывать эти новые отдельные функциональные возможности: в настоящее время существует пять функциональных возможностей: подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, обработки данных и центральную вычислительную машину, а также вспомогательные подсистемы и полезная нагрузка. Как следствие, представление сети будет состоять из пяти уровней, по одному для каждой из вышеупомянутых функциональных возможностей. Два КА входят в сеть: первый КА имеет все подсистемы, в то время как второй имеет все подсистемы, кроме полезной нагрузки и выступает в качестве функционального резервирования для первого КА для подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, обработки данных и центральную вычислительную машину. Ассоциированное представление показано на рисунке 8, и далее представлены матрицы смежности и межуровневые матрицы, а также функция отображения.

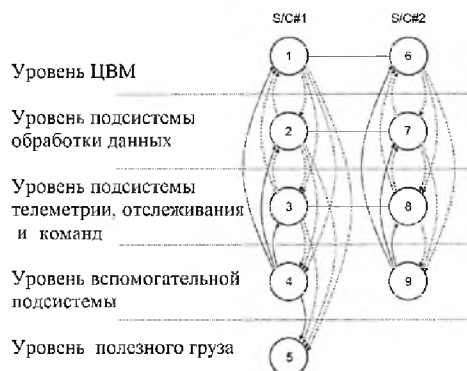


Рисунок 8 – Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление космической сети с резервированием центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных

Характеристики отказов этих функций (узлов) приведены в таблице 1.

Матрица смежности: $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $A_4 = 0_{2 \times 2}$ и $A_5 = 0_{1 \times 1}$;

$$\text{Межслойная матрица: } C = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\text{(Обратная) функция отображения: } f^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 2 & 7 \\ 3 & 8 \\ 4 & 9 \\ 5 & \text{NaN} \end{bmatrix}.$$

Если исходить из того, что между космическим аппаратом и имитацией Монте-Карло существует абсолютно надежная беспроводная связь, то можно получить следующие результаты, представленные на рисунке 2, наложенные на показанные ранее случаи: традиционную архитектуру монолита и случай функционального резервирования системы телеметрии, отслеживания и команд.

На рисунке 2 показаны улучшения живучести космических аппаратов на орбите, которые позволяют им подключаться к подсистемам обработки команд и данных друг друга. Например, видно, что через 15 лет сеть снижает риск недоступности полезной нагрузки на 2,6% по сравнению с космическим аппаратом-монолитом. Это представляет собой снижение риска потери полезной нагрузки на 20,5% (по отношению к эндогенным сбоям подсистемы обработки команд и данных), что является одним дополнительным аргументом, со стороны выгоды, в пользу космических сетей. Как отмечалось ранее, все преимущества, живучесть и другие преимущества, обеспечиваемые подключением космических аппаратов на орбите, должны быть тщательно взвешены с учетом затрат и риска, связанных с этим.

Современные космические технологии легко поддерживают фракционирование и создание сетей подсистемы обработки команд и данных и ее составных элементов. Другие подсистемы, такие как подсистема электропитания и подсистемы контроля положения и орбиты, потребуют технологических прорывов, прежде чем их можно будет подключить к сети.

Рассматриваемая здесь проблема была ограничена эндогенными отказами космических аппаратов, но она может быть адаптирована к другим классам угроз (орбитальный мусор или спутниковое оружие), как только будут смоделированы их вероятности возникновения.

Выводы. В этой работе представлен новый подход и алгоритмические

инструменты для моделирования и анализа живучести сетей с гетерогенными узлами. Исследование было мотивировано, с одной стороны, предполагаемыми ограничениями традиционного анализа живучести сети, которые предполагают по большей части однородность узлов (или некоторые вариации одной и той же функции), а с другой стороны, растущий интерес к космическим сетям, в которых различные узлы (космические аппараты) могут совместно использовать различные ресурсы на орбите с соседними космическими аппаратами.

Предлагаемый подход основан на идее отображения сети с разнородными узлами во взаимозависимую многоуровневую сеть. Многослойный аспект фиксирует разбивку сети в соответствии с общими функциональными возможностями в различных узлах и допускает появление однородных подсетей, в то время как аспект взаимозависимости ограничивает сеть для захвата физических характеристик каждого узла.

Примитивы распространения отказов по сети были разработаны в поддержку анализа живучести рассматриваемой сети. Также был предоставлен алгоритм распространения отказов узла и линии связи.

Этот подход и разработанные инструменты были применены в случае космических сетей, которые состоят из нескольких сетевых космических аппаратов, которые могут совместно использовать орбитальные ресурсы. Рассмотренные примеры включали сетевые космические аппараты, которые могут совместно использовать подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных.

Результаты количественно определяли прирост живучести, демонстрируемой космической сетью по сравнению с традиционными монолитными космическими аппаратами, и они подчеркивали, среди прочего, важность надежности беспроводных линий связи между космическими аппаратами (узлами) для достижения этого прироста.

Литература

1. Zio E, Sansavini G (2001) Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins. IEEE T Reliab 60(1): 94-101.
2. Брусков А.А. Определение объема комплексных электрических испытаний наноспутников, Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сборник статей по материалам участников X Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» (14 мая 2020 г., наукоград Королев). М.: Издательство «Научный консультант», 2020. 554 с.