

## ВЫБОР СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ НАДЁЖНОСТИ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.А. Фролов

*Рассмотрены различные варианты построения сетевой архитектуры бортового комплекса управления (БКУ) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) с применением технологии мультиплексного канала обмена (МКО). Выполнены расчёты вероятностей полной функциональности систем для различных вариантов построения сетевой архитектуры с наиболее приближёнными к реальным вероятностям безотказной работы (ВБР) бортовых систем, входящих в состав БКУ. Также сделан сравнительный анализ полученных результатов для различных входных параметров и выявлены наиболее оптимальные методы построения архитектуры БКУ. Для КА ДЗЗ наиболее оптимальными вариантами для построения сетевой архитектуры БКУ с применением технологий МКО являются варианты, где бортовая вычислительная сеть дублирована, либо троирована и имеет межблочные связи. При этом другая аппаратура из состава БКУ дублирована. Также, при больших финансовых затратах, направленных на повышение ВБР элементов БКУ, можно рассматривать вариант построения сети, где все элементы дублированы, но основной комплект никак не связан с резервным.*

**Ключевые слова:** сетевая архитектура, космический аппарат, надёжность, бортовой комплекс управления.

За последнее десятилетие ракетно-космическая отрасль стала одним из важнейших и динамично развивающихся секторов мировой экономики. Как и в прежние годы, наличие и разновидность космической отрасли является важной составляющей авторитета государства в мировом сообществе. Успехи в этой отрасли возможны только в условиях обеспечения высокой надёжности и безопасности ракетно-космических систем. В частности, важным является значение надёжности бортового комплекса управления (БКУ). На основании проанализированных проблем, экономической составляющей, особенностей производства космической аппаратуры, улучшения надёжности и достижения новых информационно-логических решений, актуальной является постановка задачи определения проектного облика БКУ с учётом системного анализа рисков в процессе эксплуатации сложной технической системы.

Целью работы является выбор наиболее оптимальной сетевой архитектуры БКУ космических аппаратов (КА), оценка рисков при помощи некоторых математических моделей и наглядную визуализацию, что позволит дать рекомендации при проектировании и создании БКУ.

### Вычисление вероятности полной функциональности для различных архитектур построения БКУ

С развитием техники и технологий, человечество ставит себе всё более глобальные и дерзкие задачи в космической отрасли. Значительное место в них занимают автоматические КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это направление продолжает развиваться из-за большого спектра задач по получению информации с различных то-

чек Земли и околоземного пространства, как в исследовательском, так и прикладном плане. Повышаются требования к качеству получаемых данных, что ведёт к развитию технических средств управления КА. Это развитие привело к модернизации систем управления и к существенному расширению их возможностей при одновременном повышении качества работы этих систем. Важную роль в получении необходимой целевой информации (ЦИ) от КА играет БКУ, который непосредственно определяет процессы управления бортовых систем (БС) КА как в штатных, так и в нештатных ситуациях.

БКУ представляет собой совокупность приборов и устройств с информационным и программным обеспечением, предназначенным для управления движением КА и управлением функционированием бортового оборудования.

Основными задачами БКУ для КА ДЗЗ являются:

- приведение КА и его систем в исходное состояние после вывода КА на орбиту;
- управление работой всех бортовых систем по командам и программам управления, полученным с наземного комплекса управления (НКУ);
- хранение временных программ и программно-временное управление бортовыми информационными и служебными системами по командам бортовой вычислительной сети (БВС);
- формирование обобщённой информации о выполнении циклов управления, данных о функционировании бортовых систем КА и передаче их на НКУ;
- контроль выполнения программы полёта, состояния бортовых систем КА, управление режимами работы и комплектностью бортовой аппаратуры;

- приём и дешифрирование разовых команд и программ управления, передаваемых со средств НКУ;
- формирование и выдача на средства НКУ информации о прохождении команд (программ) управления;
- автономность функционирования без участия НКУ с выполнением заранее заданной целевой программы;
- автономность функционирования без участия НКУ с выполнением служебных функций;
- коррекция бортовой шкалы времени и синхронизация работы бортовых систем, привязка ЦИ и информации, используемой для управления, к единому времени;
- навигационное обеспечение управления КА с использованием аппаратуры спутниковой системы навигации для обеспечения штатной работы целевой аппаратуры и средств обработки ЦИ;
- обеспечение необходимой ориентации КА;
- совокупность параметров стабильности положения и ориентации КА, определения параметров движения центра масс и положения осей КА;
- коррекция орбиты КА;
- необходимое среднесуточное и сеансное энергообеспечение целевой нагрузки и положительный баланс энергообеспечения служебных систем при отключённой целевой нагрузке и произвольной ориентации КА;

– сбор ТМ-информации и передача на НКУ.  
 Для решения необходимого спектра задач БКУ должен быть укомплектован следующими служебными системами:

- бортовой аппаратурой командно-измерительной системы (БА КИС);
- бортовой вычислительной системой (БВС);
- системой ориентации (СО);
- бортовой коммутационной аппаратурой (БКА);
- бортовой аппаратурой радиотелеметрической системы (БА РТМС).

Для надёжного функционирования КА и выполнения им необходимых целевых функций, необходимо обеспечение надёжности функционирования БКУ. Опыт, полученный за долгие годы создания и эксплуатации космической техники, показывает, что наиболее оптимальным проектным решением для построения БКУ и выполнения им поставленных задач, является сетевая архитектура с применением технологий мультимплексного канала обмена (МКО) [1]. Особенность сетевой архитектуры заключается в создании инфраструктуры передачи данных, позволяющей дублировать компоненты сети, иметь несколько альтернативных путей пере-

дачи данных, масштабировать или модифицировать сеть под имеющееся оборудование на борту КА. Обеспечим наилучшую вероятность полной функциональности (ВПФ) БКУ выбором её архитектуры сети.

Центральным элементом БКУ является бортовая вычислительная машина (БВС), которая должна обладать, помимо высоких показателей надёжности и стойкости к внешним воздействиям, широким спектром возможностей. Система управления информационными потоками на борту КА осуществляется через БВС, выступающей инфраструктурным элементом сетевой архитектуры, и устройств БКУ, являющимися узлами сети.

Рассмотрим различные виды построения архитектуры БКУ, с учётом его составных частей (СЧ) [2].

**1-й вариант.** Резервирование отсутствует. СЧ БКУ соединены по типу «звезда» с БВС (рис. 1):

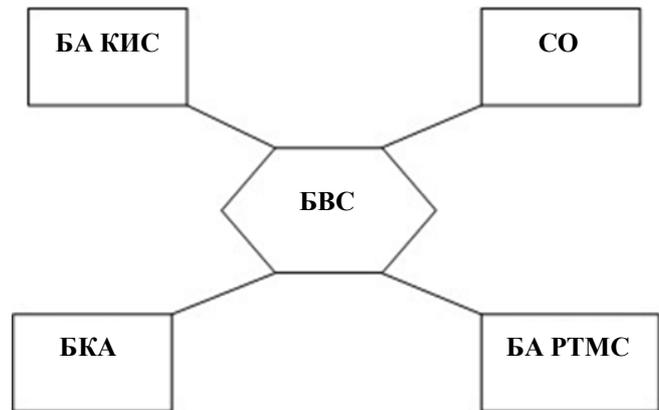


Рис. 1. Схема 1-го варианта

Для удобства подсчётов обозначим вероятности безотказной работы (ВБР) систем БА КИС, СО, БКА и БА РТМС как  $p_1, p_2, p_3, p_4$  соответственно, ВБР БВС как  $p_0$ . БВС, вообще говоря, имеет большую ВБР, чем её смежные системы, т. е.  $p_0 > p_i, i = 1, 2, 3, 4$ .

ВПФ вычисляется по формуле:

$$P_f = p_0 p_1 p_2 p_3 p_4,$$

$$P_f = \prod_{i=0}^4 p_i.$$

Основной целью при проектировании является повышение ВБР системы. Этого можно добиваться несколькими способами:

- 1) увеличением надёжности отдельных элементов;
- 2) резервированием;
- 3) оптимизацией структурной схемы надёжности системы.

Далее мы будем рассматривать второй и третий способы.

**2-й вариант.** Для каждой из систем, с которой связана БВС, имеется основной комплект (ОК) и резервный (РК). При отказе основного устройства автоматически происходит переключение на резервное. БВС не резервируется (рис. 2). Вероятности безотказной работы основного устройства и резервного одинаковы, так как делаются на одной элементной базе.

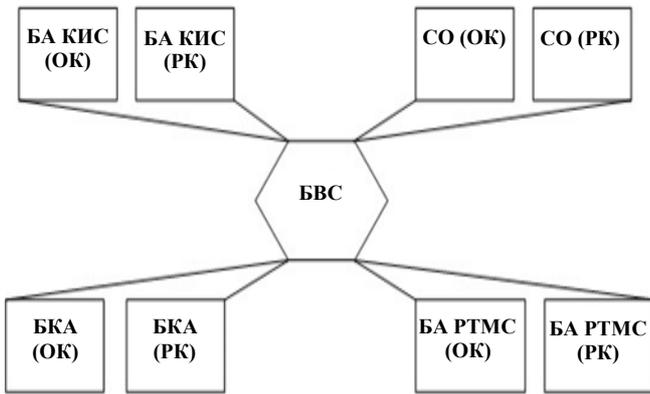


Рис. 2. Схема 2-го варианта

Вероятности отказа устройств:  $1 - p_i$ , вероятность работы хотя бы одного (основного или резервного) из устройств равна  $p_1 + (1 - p_1) p_1 = p_1 (2 - p_1)$ . Аналогично для других портов. В итоге ВПФ системы

$$P_f = \prod_{i=0}^4 p_i \prod_{i=1}^4 (2 - p_i).$$

**3-й вариант.** Резервируется БВС. Первоначально все устройства работают через основную БВС. При отказе ОК БВС автоматически происходит переключение на РК БВС. Устройства начинают работать через него (рис. 3).

Вероятность полной функциональности:

$$P_f = \prod_{i=0}^4 p_i (2 - p_0).$$

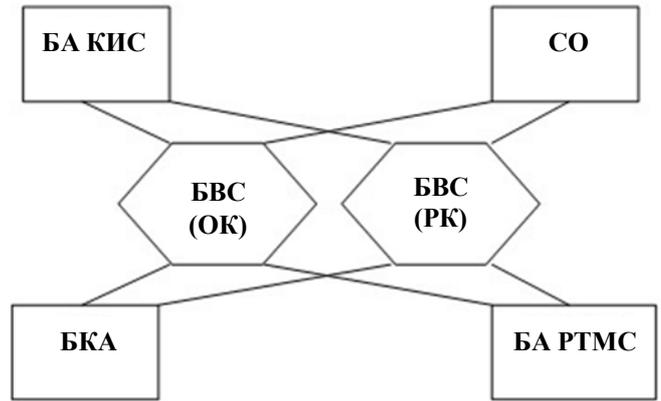


Рис. 3. Схема 3-го варианта

**4-й вариант.** Имеется два комплекта. При отказе любого устройства в основном комплекте автоматически происходит переключение на резервный (рис. 4).

Вероятность полной функциональности

$$P_f = p_0 p_1 p_2 p_3 p_4 + (1 - p_0) p_0 p_1 p_2 p_3 p_4 = (2 - p_0) \prod_{i=0}^4 p_i.$$

Вероятность того, что первый комплект работает и переключения не происходит:

$$P^{(1)} = \prod_{i=0}^4 p_i.$$

В данной постановке задачи вероятность переключения

$$P_s = 1 - P^{(1)} = 1 - \prod_{i=0}^4 p_i.$$

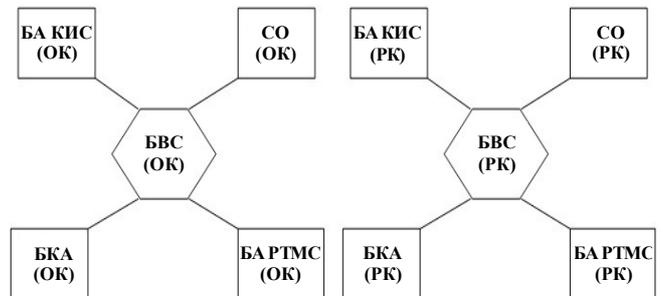


Рис. 4. Схема 4-го варианта

Вероятность полной функциональности для второго комплекта после переключения

$$P_f^{(2)} = \prod_{i=0}^4 p_i.$$

Видно, что

$$P_f = P^{(1)} + P_s P_f^{(2)} = \prod_{i=0}^4 p_i + (1 - \prod_{i=0}^4 p_i) \prod_{i=0}^4 p_i = \prod_{i=0}^4 p_i (2 - \prod_{i=0}^4 p_i).$$

**5-й вариант.** В схеме БВС (ОК) и БВС (РК) постоянно включены. При отказе основного устройства соответствующее резервное устройство подключается к системе через БВС (РК) (рис. 5).

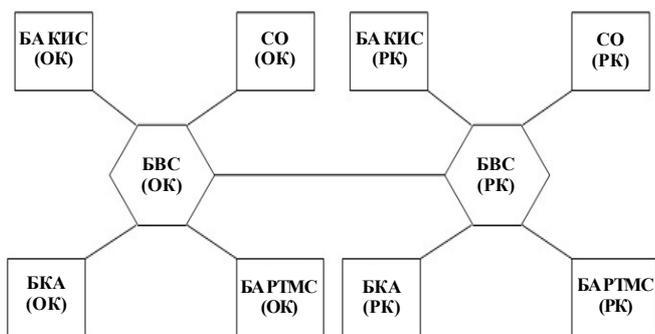


Рис. 5. Схема 5-го варианта

Рассмотрим различные случаи.

*Первый случай:* бортовая вычислительная сеть работает штатно БВС (ОК), все основные комплекты систем (БА КИС, СО, БКА, БА РТМС) работают. Система полнофункциональна. Вероятность такого события равна

$$p_0 p_1 p_2 p_3 p_4. \quad (1)$$

*Второй случай:* бортовая вычислительная сеть работает штатно БВС (ОК), часть основных систем отказала, включились соответствующие резервные устройства, при этом резервная машина работает.

Разберём этот случай подробно.

Вероятность события, что отказала система БА КИС (ОК), остальные основные устройства работают, работает БА КИС (РК), работает резервная бортовая машина, равна

$$p_0 (1 - p_1) p_1 p_2 p_3 p_4 p_0.$$

Аналогично, вероятность события, что отказала СО (ОК), остальные основные работают, включилась СО (РК), резервная БВС работает, равна

$$p_0 p_1 (1 - p_2) p_2 p_3 p_4 p_0.$$

Рассматривая все возможные случаи отказа подмножества систем множества {БА КИС (ОК), СО (ОК), БКА (ОК), БА РТМС (ОК)} (соответствующее подмножество резервных элементов работает), следуя известной методике [3], приходим к формуле для ВПФ:

$$p_0 \prod_{i=0}^4 p_i \left( \prod_{i=1}^4 (2 - p_i) - 1 \right). \quad (2)$$

*Третий случай:* работают обе БВС, непустое подмножество основных систем отказало, соответствующее подмножество резервных систем не работает. Например, отказали БА КИС (ОК) и СО (ОК), включилось БА КИС (РК), а СО (РК) не работает. Система не полнофункциональна.

*Четвёртый случай:* основная БВС работает, резервная отказала, непустое подмножество основных систем отказало. В этом случае нет полной функциональности. Действительно, если, например, отказала система БА КИС (ОК), то даже если БА КИС (РК) и работает, при отказе резервной БВС нет информационного обмена между БВС и системы БА КИС.

*Пятый случай:* отказали обе БВС. Система не полнофункциональна.

*Шестой случай:* отказала основная БВС, резервная работает, не все основные системы отказали. Нет полной функциональности. Поясним. Пусть, например, устройство БА КИС (ОК) работает. В этом случае не произошло включения резервного комплекта системы БА КИС (РК) и даже при работающем резервном комплекте БВС нет информационного обмена между БВС и системой БА КИС.

*Седьмой случай:* отказал основной комплект БВС, резервный работает, все основные устройства отказали, все резервные работают. В этом случае система полнофункциональна. Соответствующая вероятность данного события равна

$$\prod_{i=0}^4 p_i \prod_{i=0}^4 (1 - p_i). \quad (3)$$

Теперь используя (1), (2) и (3), получим:

$$P_f = \prod_{i=0}^4 p_i \left( p_0 \prod_{i=1}^4 (2 - p_i) - p_0 + 1 + \prod_{i=0}^4 (1 - p_i) \right).$$

**6-й вариант.** В нормальном состоянии все резервные комплекты систем, включая БВС (РК), отключены. Если отказывает основной комплект системы, автоматически подключается резервный, не подключая БВС. Если отказывает БВС (ОК), то автоматически подключается БВС (РК) (рис. 6). С вероятностью  $p_0$  основной комплект БВС работает, при этом вероятности отказов каждого из основных комплектов систем равны  $1 - p_i$ , вероятность работоспособности хотя бы одного из комплекта систем (основного или резервного) каждого типа равна

$$1 - (1 - p_i)^2 = p_i(2 - p_i).$$

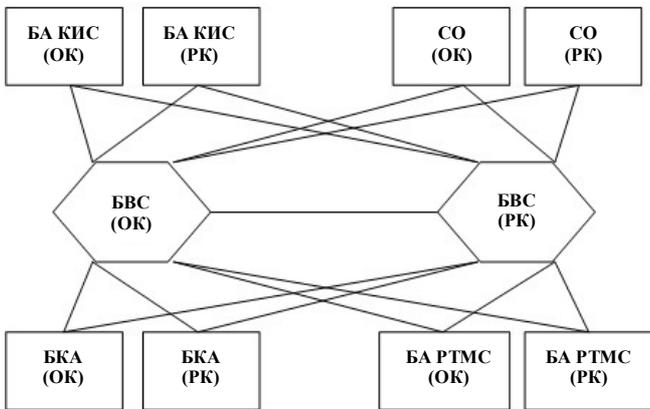


Рис. 6. Схема 6-го варианта резервирования

И ВПФ без переключения на резервную БВС равна

$$p_0 \prod_{i=1}^4 p_i (2 - p_i).$$

Отказ основной БВС происходит с вероятностью  $1 - p_0$ , при этом вероятность работы резервной БВС равна  $p_0$  и ВПФ системы равна

$$(1 - p_0) p_0 \prod_{i=1}^4 p_i (2 - p_i).$$

Окончательно получим

$$P_f = \prod_{i=0}^4 p_i \prod_{i=0}^4 (2 - p_i).$$

**7-й вариант.** В нормальном состоянии все резервные комплекты систем, включая БВС (РК), отключены. Основная БВС находится во включённом состоянии. Одна БВС РК находится в состоянии «холодного» резерва и одна БВС РК в состоянии

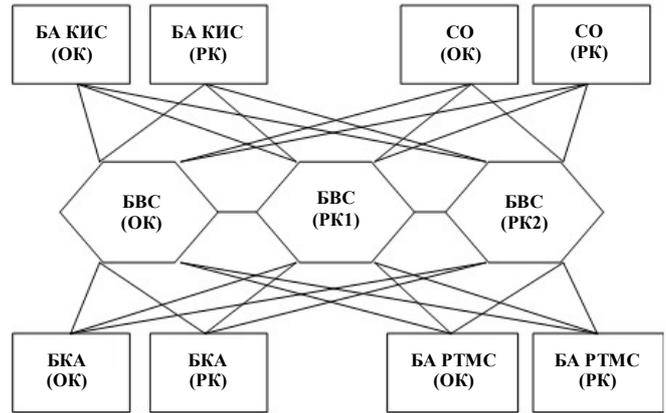


Рис. 7. Схема 7-го варианта резервирования

«горячего» резерва. Если отказывает основной комплект системы, автоматически подключается резервный, не подключая БВС. Если отказывает БВС (ОК), то автоматически подключается БВС (РК), находящаяся в «горячем» резерве, при этом БВС (РК), находящаяся в «холодном» резерве, переходит в «горячий» (рис. 7). С вероятностью  $p_0$  основной комплект БВС работает, при этом вероятности отказов каждого из основных комплектов систем равны  $1 - p_i$ , вероятность работоспособности хотя бы одного из устройств (основного или резервного) каждой системы, связанной с БВС,

$$1 - (1 - p_i)^2 = p_i(2 - p_i).$$

И ВПФ без переключения на резервную БВС равна

$$p_0 \prod_{i=1}^4 p_i (2 - p_i).$$

Отказ основной БВС происходит с вероятностью  $1 - p_0$ , при этом вероятность безотказной работы БВС равна  $1 - (1 - p_0)^3$ , а значит ВПФ всей системы равна

$$(1 - (1 - p_0)^3) \prod_{i=1}^4 p_i (2 - p_i).$$

Окончательно получим

$$P_f = (p_0^2 - 3p_0 + 3) \prod_{i=0}^4 p_i \prod_{i=0}^4 (2 - p_i).$$

Вычисления ВПФ  $P_f$  для случаев одинаковых ВБР элементов

| Вариант | Значения $P_f$ |               |               |               |                       |                            |                            |
|---------|----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
|         | 0,5            | 0,7           | 0,8           | 0,9           | 0,99                  | 0,999                      | 0,9999                     |
| 1       | 0,03125        | 0,16807       | 0,32768       | 0,59049       | 0,9509900499          | 0,995009990004999          | 0,99950009999000005        |
| 2       | 0,158203125    | 0,480024727   | 0,679477248   | 0,864536409   | 0,9896040593960401    | 0,998996004005994          | 0,9998999600040006         |
| 3       | 0,046875       | 0,218491      | 0,393216      | 0,649539      | 0,960499950399        | 0,996004999995004          | 0,9996000499999995         |
| 4       | 0,0615234375   | 0,3078924751  | 0,5479858176  | 0,8323015599  | 0,9975980247911955    | 0,9999750998002498         | 0,99999975009998           |
| 5       | 0,095703125    | 0,386846719   | 0,609222656   | 0,837137673   | 0,9892179193961787    | 0,998992017991994          | 0,9998999200179992         |
| 6       | 0,2373046875   | 0,6240321451  | 0,8153726976  | 0,9509900499  | 0,9995000999000005    | 0,99999500001              | 0,999999950000001          |
| 7       | 0,27685546875  | 0,66723437053 | 0,84255178752 | 0,95963541399 | 0,9995990603959401039 | 0,999995999006003995994001 | 0,999999959999000600039995 |

### Сравнение значений ВПФ для различных архитектур построения БКУ

Итак, мы рассмотрели несколько возможных вариантов построения архитектуры БКУ, теперь необходимо сравнить и выбрать наиболее оптимальный вариант. Выбор структурной схемы производится на основе сравнения значений ВПФ возможных схем с определённым в ТЗ значением ВПФ и на основе вышеприведённых формул. По различным значениям ВБР составляющих элементов вычисляем ВПФ каждой из семи схем. Определяем множество схем, ВПФ которых не меньше указанного в ТЗ требуемого значения. Если такое множество окажется пустым, то делается вывод о необходимости повышения надёжности системы применением следующих мер:

- замена элементов на другие, имеющие большие значения ВБР;
- выбор другого режима резервирования;
- увеличение кратности резервирования.

Если полученное множество не пусто, то из удовлетворяющих критерию ВПФ схем выбирается та схема, которая удовлетворяет таким дополнительным критериям, как:

- энергопотребление;
- габариты;
- масса;
- стоимость.

По формулам полученным для различных вариантов резервирования БВС, можно вычислить ВПФ, подставляя различные значения ВБР ( $p_i=0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 0,99; 0,999; 0,9999$ ) систем БКУ (см. таблицу). Будем пользоваться таблицей, содержащей числовые значения для некоторых частных случаев. Чаще всего для служебных систем задаётся одно и то же число ВБР.

Для КА ДЗЗ типа «Метеор» значения, задаваемые для ВБР служебных систем, которыми являются системы, входящие в БКУ, должны быть не

менее 0,999. А для всего КА не менее 0,9. Из таблицы видно, что для обеспечения заданных требований подходит весь последний столбец и предпоследний столбец с 4, 6 и 7 вариантами построения архитектуры БКУ. Так как для обеспечения ВБР каждой системы из состава БКУ со значением 0,9999 понадобится множество ресурсов, считаем эти варианты нецелесообразными. Для 4, 6 и 7 вариантов построения сетевой структуры БКУ в предпоследнем столбце следует выбирать нужный по дополнительным критериям.

Таким образом, в результате представленного анализа, можно сделать выводы, что для КА ДЗЗ, наиболее оптимальными вариантами для построения сетевой архитектуры БКУ с применением технологий МКО [1], являются 6-й и 7-й варианты, где БВС дублирована, либо троирована и имеет межблочные связи. При этом другая аппаратура из состава БКУ дублирована. Также, при больших финансовых затратах, направленных на повышение ВБР элементов БКУ, можно рассматривать 4-й вариант построения сети, где все элементы дублированы, но основной комплект никак не связан с резервным.

### Литература

1. ГОСТ Р 52070-2003 Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования.
2. Шахматов А. В., Вергазов М. Ю., Чекмарев, С. А., Ханов В. Х. Сетевая архитектура сопряжения комплексов бортового оборудования космического аппарата: [Электронный ресурс] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, 2012. – С. 148 – 151.
3. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надёжности / Б. В. Гнеденко и др. – М. : Наука, 1965. – 525 с.

Поступила в редакцию 15.05.2015

*Андрей Александрович Фролов,*  
ведущий инженер,

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Т. (495) 366-00-65, e-mail: Frolenok2007@yandex.ru.

## CRITERIA for SELECTION of RELIABILITY STRUCTURE DIAGRAM for ONBOARD CONTROL SYSTEM of EARTH REMOTE SENSING SATELLITES

**A.A. Frolov**

*In the article a variety of onboard control system (OCS) network architecture using data exchange multiplex channel (DEMC) technology for Earth remote sensing satellites (ERSS) are considered. Probability calculations are made for determining of full-functionality of systems depending on different versions of network architecture. These calculations provide most real probability of failure-free operation (PPFO) for onboard systems of OCS. Additionally, comparative analysis of obtained results for different input parameters is performed, and most optimal methods for building of OCS architecture are found. For ERSS, OCS DEMC network architecture with duplicated or triplicated computer network and inter-block connections shall be most optimal. Other hardware facilities of OCS are duplicated too. Also, in case of heavy expenses intended to increase PPFO of OCS components, network architectures with all duplicated components could be applicable, whereas the main component set is not connected with redundant one.*

**Key words:** network architecture, satellite, reliability, onboard control system.

### List of References

1. ГОСТ Р 52070-2003: Highway Series Interface for Electronic Circuits System. General Requirement.
2. Shakhmatov A. V., Vergazov M. Yu., Chekmarev S. A., Khanov V. Kh. Network interfacing architecture for satellite avionic set: [Digital Resource] // Bulletin of Siberian State Airspace University named after Member of the Academy of Sciences M.F. Reshetnev [Vestnik SibGAU], 2012, pp. 148 – 151.
3. Gnedenko B. V., Belyayev Yu. K., Solovyev A. D. Mathematical methods in reliability theory. – Moscow: Nauka [Science] Publ., 1965. – 525 p.

**Andrey Alexandrovich Frolov,**  
Senior Engineer

(‘VNIEM Corporation’ JC).

Tel.: (495) 366-00-65, e-mail: Frolenok2007@yandex.ru.