
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.09
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-880-887

ОЦЕНИВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. АВЕРЬЯНОВ, В. В. КУЗНЕЦОВ, А. В. КАЛЮЖНЫЙ

*Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Aver957@mail.ru*

Оценена надежность функционирования многоканальной информационно-управляющей системы (ИУС). В качестве примера реализации ИУС выбран бортовой комплекс управления (БКУ) малого космического аппарата (МКА). Используются количественные показатели надежности: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ. Проанализированы различные схемы резервирования отдельных блоков и модулей БКУ. Обоснована нецелесообразность чрезмерной аппаратной избыточности многоканальных систем, применяемых на борту МКА. Сформулированы предложения и рекомендации, которые могут быть использованы на этапе проектирования сложных многоканальных ИУС при выборе рациональной структуры их аппаратной части, определении обоснованных пределов избыточности аппаратных и программных средств.

Ключевые слова: *надежность, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, сбой, бортовой комплекс управления, малый космический аппарат, резервирование, аппаратная избыточность, структурная схема надежности, многоканальная система*

При использовании многоканальных информационно-управляющих систем управления первоочередной задачей является обеспечение надежности их функционирования. Можно выделить группу структурных (схемных) методов повышения надежности объектов путем совершенствования принципов их построения. При этом необходимо значительно усложнять их структуру, вводя избыточные аппаратные и программные средства и все более сложные схемные решения [1—4].

Одним из основных методов повышения надежности объектов является резервирование, при котором применяют дополнительные средства и возможности для сохранения работоспособного состояния объекта в случае отказа одного или нескольких элементов.

Для оценивания надежности функционирования многоканальных систем используются следующие количественные показатели:

— вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$ — вероятность того, что за время t не возникнет отказ;

— интенсивность отказов $\lambda(t)$ — условная плотность распределения времени безотказной работы для момента времени t при условии, что до этого момента времени отказ не произошел;

— средняя наработка на отказ (среднее время безотказной работы) T — математическое ожидание наработки до первого отказа.

Обоснование рациональных пределов аппаратной избыточности многоканальных систем будем рассматривать на примере бортового комплекса управления (БКУ) малого космического аппарата (МКА).

Надежность такой сложной технической системы, как БКУ МКА, определяется надежностью составляющих ее элементов и способом их соединения. Предположим, что структурная схема унифицированного БКУ включает связанные последовательными интерфейсами и каналами прямого доступа блок исполнительных органов системы ориентации и стабилизации, бортовую аппаратуру командной радиолинии, бортовую аппаратуру телеметрической радиолинии, бортовую радиотехническую систему навигации и ориентации, блок исполнительных органов, бесплатформенную инерциальную навигационную систему, целевую аппаратуру, бортовую аппаратуру радиолинии передачи целевой информации, а также информационно-вычислительное ядро.

Для оценивания надежности БКУ необходимо ввести ряд упрощений представления структуры и определенных допущений. Упрощенная схема БКУ для расчета его надежности представлена на рис. 1 (1 — процессорная плата с процессором; 2 — блок оперативной памяти; 3 — периферийные модули, обеспечивающие информационный обмен с блоками исполнительных органов, бортовой аппаратурой радиолиний, системой навигации и ориентации, бесплатформенной инерциальной навигационной системой, целевой аппаратурой; 4 — аппаратура исполнительных органов, радиолиний, системы навигации и ориентации, инерциальной навигационной системы, целевая аппаратура). Блоки 1—3 в совокупности образуют информационно-вычислительное ядро БКУ МКА.

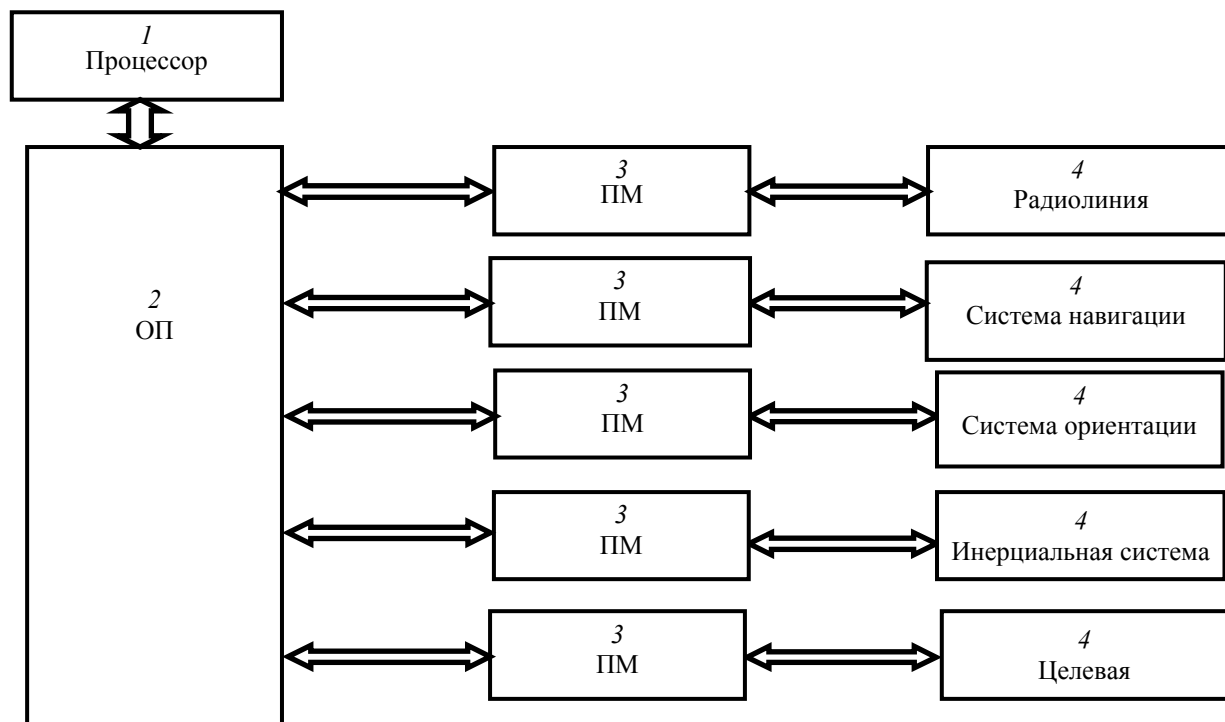


Рис. 1

Оценки современного состояния элементной базы и изделий электронной вычислительной техники, используемых при построении БКУ, позволяют сделать следующие допущения.

Предполагаем, что процессорная плата реализована на десяти интегральных микросхемах (ИМС) высокой степени интеграции с интенсивностью отказов 10^{-7} 1/ч и одной программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) с интенсивностью отказов 10^{-6} 1/ч. Блок оперативной памяти состоит из восьми ИМС оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) с интенсивностью отказов 10^{-6} 1/ч.

Периферийные модули 3 состоят из трех ИМС каждый с интенсивностью отказов 10^{-7} 1/ч, блоки 4 идентичны по характеристикам надежности модулям 3. Считаем, что отказ любого из блоков приводит к отказу БКУ в целом в силу приведенных ниже причин:

- 1) выход из строя процессорной платы и (или) оперативной памяти не позволит реализовать алгоритмы управления МКА;
- 2) выход из строя любого из блоков 4 не позволит БКУ выполнять целевые функции либо функционировать в заданном режиме;
- 3) выход из строя любого из блоков 3 не позволит правильно функционировать соответствующему блоку 4.

Таким образом, анализ структурной схемы БКУ позволяет сделать вывод о том, что в нем отсутствует схемная избыточность, следовательно, все элементы с точки зрения надежности включены в структурной схеме надежности (ССН) последовательно (рис. 2).

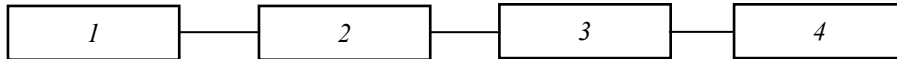


Рис. 2

В связи с тем, что на этапе проектирования отсутствует полный комплект функциональных, принципиальных электрических схем блоков, модулей и узлов, карты электрических режимов работы МКА, расчет показателей надежности БКУ носит предварительный и приближенный характер. Результаты расчета значений показателей надежности представлены в таблице.

Оценка показателей надежности БКУ

| Номер строки | $\lambda_{\text{ИМС}}, 10^{-8}$ 1/ч | $P(t)$ | | | $\lambda_k,$ 10^{-6} 1/ч | $T,$ лет |
|--------------|--|-----------|------------|-----------|-------------------------------|-------------|
| | | $t=1$ год | $t=3$ года | $t=5$ лет | | |
| 1 | 10 | 0,89 | 0,71 | 0,57 | 13,0 | 8,8 |
| 2 | 2 | 0,977 | 0,93 | 0,89 | 2,6 | 44 |
| 3 | 1 | 0,989 | 0,966 | 0,945 | 1,3 | 88 |
| 4 | 10 | 0,95 | 0,60 | 0,24 | 30,9 | 3,7 |
| 5 | 10 | 0,995 | 0,92 | 0,85 | 7,2 | 15,8 |
| 6 | 10 | 0,95 | 0,85 | 0,73 | 9,0 | 12,7 |
| 7 | 10 | 0,91 | 0,74 | 0,57 | 12,7 | 9 |

Предположим, что поток отказов элементов, составляющих БКУ, подчиняется показательному (экспоненциальному) закону. В этом случае вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени не зависит от того, сколько времени он проработал до этого интервала, и интенсивность отказов является величиной постоянной во времени. Тогда справедливы следующие соотношения:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\lambda}, \quad (2)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i. \quad (3)$$

Таким образом, сумма интенсивностей отказов элементов, составляющих блок или модуль, будет равна интенсивности отказа блока или модуля. Обозначив как $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ интенсивность отказов блоков 1, 2, 3, 4 соответственно и λ_c — интенсивность отказов БКУ, получим:

$$\lambda_1 = 10 \cdot 10^{-7} + 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч),}$$

$$\lambda_2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч),}$$

$$\lambda_3 = \lambda_4 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч),}$$

$$\lambda_k = \lambda_1 + \lambda_2 + 5 \cdot \lambda_3 + 5 \cdot \lambda_4 = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ (1/ч).}$$

Подставив λ_c вместо λ в соотношения (1) и (2) при различных значениях времени t , получим вероятности безотказной работы и среднее время наработки на отказ БКУ, представленные в таблице (строка 1).

Данные расчета вероятности безотказной работы и среднего времени наработки на отказ БКУ при показательном законе распределения отказов по формулам (1) и (2) при интенсивностях отказов в 5 и 10 раз меньше, чем в рассмотренном выше случае, представлены в таблице (строки 2 и 3 соответственно).

Для расчета надежности электронных устройств, работающих с большой нагрузкой, применяют закон распределения Рэлея. Значения вероятности безотказной работы и среднего времени наработки на отказ БКУ при распределении потока отказов по закону Рэлея представлены в строке 4 таблицы.

Помимо отказов на работу БКУ существенное влияние оказывают сбои. Современный подход предполагает, что поток сбоев, возникающих при работе устройств вычислительной техники, можно считать простейшим. Предположим, что появление сбоя в одном элементе ведет к сбою в функционировании БКУ в целом. Предположим, что блоки 4 в значительно меньшей степени будут являться источниками сбоев по сравнению с 1, 2 и 3. Исследования элементов и устройств цифровой вычислительной техники показали, что для полупроводниковых устройств интенсивность сбоев λ_c на порядок выше интенсивности отказов. Тогда примем допущение, что интенсивность сбоев БКУ в целом соответствует $\lambda_c \approx 10^{-5}$ 1/ч.

Учитывая, что вероятность появления k сбоев за время t равна

$$P_k(t) = \frac{(\lambda_c t)^k}{k!} e^{-\lambda_c t}, \quad (4)$$

получим результаты оценивания вероятности появления сбоев за время t . Вероятность сбойной работы БКУ составит: в течение года — 0,42; двух лет — 0,17; трех — 0,08.

Если установлено, что вероятность безотказной работы БКУ при орбитальном полете в течение срока активного существования пять лет должна быть не меньше 0,99, то на основе анализа полученных оценок вероятности безотказной работы БКУ в течение 5 лет и средней наработки на отказ можно сделать вывод, что без использования аппаратной избыточности, то есть резервирования отдельных блоков и модулей, невозможно обеспечить приемлемые уровни надежности функционирования БКУ.

Рассмотрим вариант БКУ, при котором дублируются процессорная плата, модуль оперативной памяти и периферийные модули. Резерв нагруженный. В случае дублирования блоков 1—3 вероятность безотказной работы каждой пары блоков P_m будет рассчитываться по формуле

$$P_m = 2e^{-\lambda_m t} - e^{-2\lambda_m t}, \quad (5)$$

а вероятность безотказной работы блоков 4 останется прежней. Тогда вероятность безотказной работы БКУ рассчитывается по формуле

$$P(t) = (2e^{-\lambda_1 t} - e^{-2\lambda_1 t})(2e^{-\lambda_2 t} - e^{-2\lambda_2 t})(2e^{-\lambda_3 t} - e^{-2\lambda_3 t})e^{-5\lambda_4 t}. \quad (6)$$

Используя соотношения (5) и (6), получим результаты, представленные в строке 5 таблицы.

Рассмотрим вариант, при котором дублируется (нагруженный резерв) только блок оперативной памяти (ввиду того, что ОЗУ наименее устойчиво к воздействию внешних возмущающих факторов). Аналогично рассмотренному выше варианту вероятность безотказной работы БКУ составит

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} (2e^{-\lambda_2 t} - e^{-2\lambda_2 t}) e^{-5\lambda_3 t} e^{-5\lambda_4 t}. \quad (7)$$

Результаты расчетов с использованием соотношения (7) приведены в строке 6 таблицы.

Рассмотрим вариант троирования с мажорированием процессорной платы. Интенсивность отказов элемента голосования примем равной $\lambda_m = 10^{-7}$ 1/ч. В этом случае вероятность безотказной работы блока процессорных плат составит

$$P_1(t) = e^{-\lambda_m t} (3e^{-2\lambda_1 t} - 2e^{-3\lambda_1 t}), \quad (8)$$

ВБР блоков 2—4 не изменится, и вероятность безотказной работы БКУ будет рассчитываться по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda_m t} (3e^{-2\lambda_1 t} - 2e^{-3\lambda_1 t}) e^{-\lambda_2 t} e^{-5\lambda_3 t} e^{-5\lambda_4 t}. \quad (9)$$

Результаты расчетов по формуле (9) приведены в таблице (строка 7).

Сравнение значений ВБР, интенсивности отказов и средней наработки на отказ БКУ в последнем случае с результатами, представленными в строке 1 таблицы, позволяет сделать вывод о том, что троирование процессорной платы не приводит к значимому выигрышу в надежности по сравнению с одноканальной реализацией БКУ. Это хорошо согласуется с представленными в [5, 6] результатами по сравнительному оцениванию надежности автоматизированных систем управления со структурным резервированием. Применительно к БКУ МКА эти результаты могут быть сформулированы следующим образом:

— надежность двухканальной и трехканальной реализаций БКУ практически одинакова, что обуславливает нецелесообразность чрезмерной аппаратной избыточности многоканальных систем, применяемых на борту МКА;

— достаточность простого дублирования или двухканальной реализации для обеспечения надежного функционирования информационно-управляющей системы подтверждается и строением (морфологией) живых организмов, а именно симметрией внутренних органов, наличием парных органов, обеспечивающих важнейшие функции организма — зрение, слух, дыхание и др. [7];

— многоканальное БКУ более эффективно обеспечивает заданные показатели надежности в течение долгого времени;

— троированный процессорный модуль, с единственным мажоритарным элементом при $P(t) < 1$ менее надежен по сравнению с дублированной процессорной платой с „горячим“ резервом. Использование в структуре трех мажоритарных элементов позволяет достичь уровня надежности дублирования при одновременном снижении требований к ВБР мажоритарных элементов.

Как правило, срок активного существования МКА не менее 5—7 лет. Исходя из этого приведенные выше результаты оценивания надежности и устойчивости функционирования БКУ позволяют сформулировать следующие предложения и выводы.

1. Без применения резервирования при указанных выше допущениях вероятность безотказной работы БКУ в течение одного года составит 0,89, средняя наработка на отказ — 8,8 лет (см. таблицу, строка 1).

2. Надежность функционирования двухканального и трехканального БКУ МКА практически одинакова, что обуславливает нецелесообразность чрезмерной аппаратной избыточности в структуре БКУ, т.е. использование третьего канала неэффективно [5, 6, 8].

3. Многоканальные системы более надежны на длительных интервалах времени.

4. Для повышения безотказности функционирования БКУ целесообразно резервирование его компонентов. Исходя из полученных оценок вероятности безотказной работы и средней наработки на отказ различных вариантов реализации БКУ предлагается в информационно-вычислительном ядре использовать нагруженный резерв (дублирование) его основных модулей: процессорной платы, блока оперативной памяти, периферийных модулей. В этом случае вероятность безотказной работы при указанных выше допущениях в течение одного года составит не менее 0,995, а средняя наработка на отказ — 15,8 лет (см. таблицу, строка 5).

5. С целью повышения защищенности информационно-вычислительного ядра БКУ от сбоев предлагается ввести временное резервирование на основе метода двойного-тройного просчета задач.

6. Срок службы радиоэлектронных компонентов БКУ, его ресурс определяются гарантийными сроками службы элементов, применяемой элементной базой. Гарантийный срок большинства ИМС и дискретных радиоэлектронных элементов отечественного производства не менее 10 лет.

7. Использование облегченных режимов функционирования модулей БКУ, резервирования процессорной платы, модуля оперативной памяти и периферийных модулей-устройств сопряжения с объектами управления позволит обеспечить требования по вероятности безотказной работы в течение срока активного существования. Например, при коэффициенте нагрузки 0,1 для $t = 43\,800$ ч вероятность безотказной работы БКУ $P(t) \approx 0,9345$. Полученная оценка учитывает и надежность функционирования бортовой целевой аппаратуры — объектов управления БКУ. При ограничении структурной схемы надежности только блоками 1—3 (рис. 1) для управляющих модулей БКУ получим $P(t) \approx 0,9979$.

8. Представленные выводы могут быть использованы на этапе проектирования сложных многоканальных информационных управляющих систем при выборе рациональной структуры их аппаратной части, определении обоснованных пределов избыточности аппаратных и программных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.
2. Фатеев В. Ф., Кремез Г. В., Фролков Е. В. Исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры космических аппаратов посредством экспериментальных комплексов „Призма-1“ и „Призма-2“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 78—81.
3. Захаров И. В., Иваненко А. Ю., Кремез Г. В., Фролков Е. В., Шпак А. В. Повышение функциональной устойчивости бортовых вычислительных систем малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 65—67.
4. Басыров А. Г., Гончаренко В. А., Забузов В. С., Кремез Г. В., Эсаулов К. А. Повышение устойчивости функционирования бортовых вычислительных систем по результатам космических экспериментов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 70—74.
5. Аверьянов А. В. Оценивание надежности автоматизированных систем управления подготовкой и проведением пуска космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 62—65.
6. Аверьянов А. В., Барановский А. М., Эсаулов К. А. Определение пределов аппаратной избыточности информационных управляющих систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 3. С. 23—26.
7. Аверьянов А. В., Белозёров В. А., Горичев Ю. В., Осипов Н. А. Надежность систем космических комплексов. Руководство к практическим и лабораторным занятиям. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. 92 с.
8. Проблемные вопросы проектирования и эксплуатации бортовых и наземных систем управления объектов ракетно-космической техники РВСН. НТК (21—22 октября 1999 г.). Тез. докл. МО РФ, 1999, 78 с.

Сведения об авторах

- Алексей Васильевич Аверьянов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: Aver957@mail.ru
- Вадим Викторович Кузнецов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vadimkuznetsov@mail.ru
- Алексей Викторович Калюжный** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: aleksei.kalyuzhnyi@yandex.ru

Поступила в редакцию
25.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: Аверьянов А. В., Кузнецов В. В., Калюжный А. В. Оценивание надежности функционирования многоканальной системы на примере бортового комплекса управления малого космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 880—887.

**ESTIMATING MULTICHANNEL SYSTEM RELIABILITY ON THE EXAMPLE
OF A SMALL SPACECRAFT ONBOARD CONTROL COMPLEX**

A. V. Averyanov, V. V. Kuznetsov, A. V. Kalyuzhnyi

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: Aver957@mail.ru*

The reliability of the multi-channel information and control system functioning is evaluated. As an example of such a system implementation, an onboard control system of a small spacecraft is chosen. The probability of failure-free operation, the failure rate, and the average time to failure are used as quantitative reliability indicators. Various redundancy schemes for separate blocks and modules of the onboard control system are analyzed. The inexpediency of excessive hardware redundancy of multichannel systems used on board the small spacecraft is substantiated. Suggestions and recommendations are formulated that can be used at the design stage of a complex multichannel information and control system when choosing a rational structure for hardware, determining reasonable limits for redundancy of hardware and software.

Keywords: reliability, probability of failure-free operation, failure rate, failure, on-Board control system, small spacecraft, redundancy, hardware redundancy, reliability block diagram, multi-channel system

REFERENCES

1. Druzhinin G.V. *Nadezhnost' avtomatizirovannykh proizvodstvennykh system* (Reliability of Automated Production Systems), Moscow, 1986, 480 p. (in Russ.)
2. Fateev V.F., Kremez G.V., Frolkov E.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 6(48), pp. 78–81. (in Russ.)
3. Zakharov I.V., Ivanenko A.Yu., Kremez G.V., Frolkov E.V., Shpak A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2007, no. 6(50), pp. 65–67. (in Russ.)
4. Basyrov A.G., Goncharenko V.A., Zabuzov V.S., Kremez G.V., Esaulov K.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 4(52), pp. 70–74. (in Russ.)
5. Averyanov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 4(52), pp. 62–65. (in Russ.)
6. Averyanov A.V., Baranovsky A.M., Esaulov K.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 3(57), pp. 23–26. (in Russ.)
7. Averyanov A.V., Belozherov V.A., Gorichev Yu.V., Osipov N.A. *Nadezhnost' sistem kosmicheskikh kompleksov. Rukovodstvo k prakticheskim i laboratornym zanyatiyam* (Reliability of Systems of Space Complexes. Guide to Practical and Laboratory Studies), St. Petersburg, 2006, 92 p. (in Russ.)
8. *Problemnyye voprosy proyektirovaniya i ekspluatatsii bortovykh i nazemnykh sistem upravleniya ob"yektov raketno-kosmicheskoy tekhniki RVSN* (Problematic Issues of Design and Operation of Onboard and Ground Control Systems for Objects of Rocket and Space Technology of the Strategic Missile Forces), Scientific and technical conference (October 21–22, 1999), Abstracts of reports, Ministry of Defense of the Russian Federation, 1999, 78 p. (in Russ.)

Data on authors

- Aleksey V. Averyanov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: Aver957@mail.ru

- Vadim V. Kuznetsov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks;
E-mail: vadimkuznetsov@mail.ru
- Aleksey V. Kalyuzhnyi** — PhD Student; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks;
E-mail: aleksei.kalyuzhnyi@yandex.ru

For citation: Averyanov A. V., Kuznetsov V. V., Kalyuzhnyi A. V. Estimating multichannel system reliability on the example of a small spacecraft onboard control complex. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 10. P. 880—887 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-880-887