

**М.П. Корельский**

студент кафедры авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов

**Б.И. Марченко** – доктор технических наук, профессор – научный руководитель

## **АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ АРХИТЕКТУРЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА «СОЕХ КЛЕВЕР 4 CODE»**

Активное развитие отрасли беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) типа «квадрокоптер» и появление новых возможностей их применения в гражданской и военной сферах ставят задачу обеспечения высокой надежности данного типа летательных аппаратов. Целью данной работы является анализ архитектуры БПЛА мультикоптерного типа, а именно квадрокоптера «СОЕХ Клевер 4 Code», с точки зрения надежности. Анализ надежности системы позволяет избежать потенциальных сбоев и отказов системы в процессе ее функционирования.

В результате выполнения данной работы будет разработана схема надежности квадрокоптера «СОЕХ Клевер 4 Code», получена оценка степени надежности и разработаны предложения по её повышению.

Актуальность этой работы объясняется тем, что эксплуатация коммерческих квадрокоптеров в настоящее время слабо регулируется на законодательном уровне, а производители хоть и сопровождают свою продукцию правилами техники безопасности, но при этом полностью отказываются от ответственности за последствия эксплуатации.

Часто в сопроводительной документации можно встретить следующие формулировки: «продукт и все доступные с продуктом материалы представлены «как есть» и в «существующем состоянии» без каких-либо гарантий или условий, явно выраженных или подразумеваемых <...> компания DJI не несет ответственность за повреждения, травмы или любую юридическую ответственность, прямо или косвенно вызванную использованием данного продукта» [1, с. 47].

Такая политика компаний при отсутствии строгого регулирования даёт возможность избежать ответственности за последствия конструктивных и производственных отказов квадрокоптеров, что может нанести непредсказуемый ущерб не только людям, но и другим техническим системам.

COEX Клевер 4 Code – это образовательный квадрокоптер, производимый компанией «Коптер Экспресс». Он предназначен для практико-ориентированного обучения школьников и студентов СПО и ВПО конструированию и эксплуатации квадрокоптеров. Внешний вид «COEX Клевер 4 Code» представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – COEX Клевер 4 Code

Основные ЛТХ БПЛА «COEX Клевер 4 Code» [2]:

- Габаритные размеры: 355x355x195 мм;
- Максимальная скорость: 72 км/ч;
- Максимальная высота полета: 500 м;
- Продолжительность полета: до 15 мин.;
- Максимальная взлетная масса: 1 кг.

Квадрокоптер способен выполнять управляемый FPV полет, автономный полет по ArUco маркерам и переносить небольшие грузы. «COEX Клевер 4 Code» поставляется со всеми необходимыми для успешного обучения методическими материалами и программным обеспечением.

Основные понятия и термины в сфере надежности установлены ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике». В соответствии с этим документом приведем основные термины, которые необходимы для понимания сущности рассматриваемой задачи [3].

*Надежность* – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

При исследовании надежности технической системы часто ставится задача определения причин, приводящих к формированию той или другой стороны надежности, и задача определения путей повышения надежности. Это приводит к

делению надежности на разные виды:

- *Физическая надежность* – обуславливается физическими и химическими свойствами, условиями эксплуатации, действующими нагрузками и т.д.;
- *Схемная надежность* – обуславливается схемой взаимосвязи отдельных элементов и уровнем их физической надежности;
- *Аппаратная надежность* – обуславливается состоянием аппаратуры;
- *Программная надежность* – обуславливается состоянием и качеством программного обеспечения;
- *Функциональная надежность* – надежность выполнения отдельных функций, возлагаемых на объект.

В рамках данной работы ставится задача оценки именно схемной надежности беспилотного летательного аппарата.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств.

*Работоспособное состояние* – это состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции.

*Отказ* – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

*Вероятность безотказной работы* – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

*Наработка до отказа* – это наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа.

*Средняя наработка до отказа* – это математическое ожидание наработки объекта до отказа.

*Интенсивность отказов* – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Одним из основных показателей надежности является *вероятность безотказной работы* (ВБР). Вероятность безотказной работы является функцией времени и выражает вероятность того, что случайное время работы объекта до отказа  $T$  будет не меньше заданной наработки  $t$ , отсчитываемой от начала эксплуатации, т.е.

$$P(t) = P(T \geq t) . \quad (1)$$

Эту функцию часто называют *функцией надежности*.

Вместе с вероятностью безотказной работы используется понятие вероятность отказа, т.е. вероятность того, что в пределах заданной наработки объект откажет, при условии того, что в начальный момент времени отказ еще не наступил. Очевидно, что состояния, в котором объект является работоспособным, и в котором он уже отказал, составляют полную группу событий. Поэтому вероятность отказа можно выразить через ВБР:

$$q(t) = P(T < t) = 1 - P(t) . \quad (2)$$

Надежность элемента или системы не всегда удобно характеризовать вероятностью безотказной работы, так как для небольших величин наработки значение ВБР будут близкими к единице. Поэтому наряду с ВБР используются другие показатели, например, интенсивность отказов.

Поскольку на установившихся режимах эксплуатации интенсивность отказов можно считать постоянной, то формулу ВБР можно представить в следующем виде:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Тогда средняя наработка на отказ вычисляется по следующей формуле:

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

Выше были рассмотрены характеристики надежности невосстанавливаемых объектов, т.е. объектов, работающих до первого отказа. Беспилотные летательные аппараты являются восстанавливаемыми техническими системами.

Оценка характеристик надежности восстанавливаемых объектов производится во многом аналогично оценке невосстанавливаемых, однако есть и характерные отличия. Так, при расчете ВБР восстанавливаемых объектов используется та же формула, только отсчет времени ведется не от начала эксплуатации, а от момента последнего ремонта или технического обслуживания. И тогда изменение ВБР во времени можно представить таким же образом, как на рисунке 2.

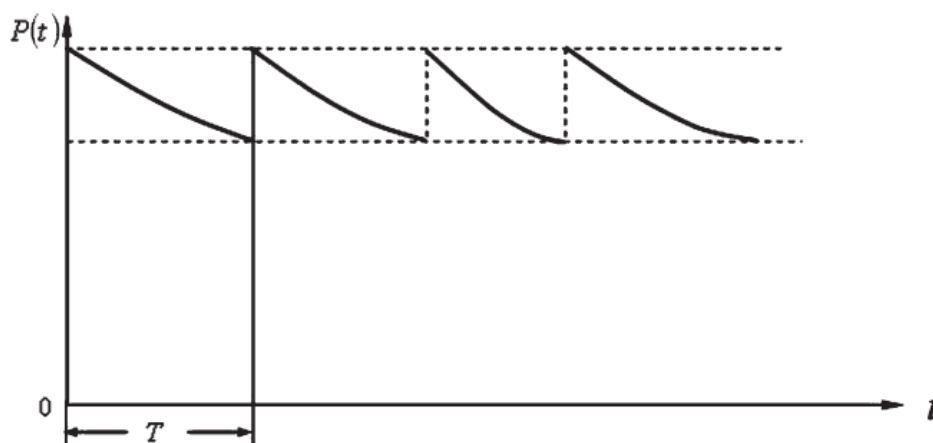


Рисунок 2 – График зависимости  $P(t)$  для восстанавливаемых систем

А в формуле ВБР вместо интенсивности отказов используется так называемый параметр потока отказов  $\Lambda$ , физический смысл которого фактически такой же, как и интенсивности отказов:

$$P(t) = e^{-\Lambda t} = e^{-\frac{t}{\overline{T}_0}}, \quad (5)$$

где  $\overline{T}_0$  – математическое ожидание времени наработки на один отказ.

Для оценки показателей безотказности технической системы составляется структурная схема надежности. В соответствии с ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике», *структурная схема надежности* – логическое и графическое представление объекта, отображающее, каким образом безотказность его блоков и их сочетаний влияет на безотказность объекта.

Перед расчетом надежности определяется содержание термина «безотказная работа системы», рассматриваются условия функционирования системы с целью оценки влияния каждого элемента на ее работоспособность. Затем составляется блок-схема надежности системы.

Сформулируем правила составления блок-схемы надежности:

1) Если работоспособность системы или ее части обеспечивается только совместной работой группы элементов, то такие элементы соединяются последовательно.

2) Если работоспособность системы или ее части обеспечивается работой хотя бы одного элемента из группы, то такие элементы соединяются параллельно.

Для того, чтобы оценить влияние элементов квадрокоптера COEX Клевер 4 Code на его работоспособность, составим перечень элементов и электрическую структурную схему с помощью материалов с сайта производителя [2]. Перечень

элементов представлен в таблице 1. Фрагмент электрической принципиальной схемы приведен на рисунке 3 (номера элементов таблицы соответствует позиционным обозначениям на рисунке).

Таблица 1 – Перечень элементов квадрокоптера

Номер элемента	Название элемента
1	Бесколлекторный электродвигатель COEX BR2306, 2400 kV
2	Регулятор оборотов COEX ESC 25A
3	Литиевая аккумуляторная батарея Tattu 3S LiPo 2300 mAh 45C
4	Плата распределения питания COEX PDB
5	Светодиодная лента адресная, 144 led/m 5V IP65, 50 см
6	Модуль памяти micro SD 1 Gb для полетного контроллера
7	Полетный контроллер COEX Pix
8	Приемник FS-IA6B
9	Одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pie 4 Model B 1 Gb
10	Камера для одноплатного компьютера, Raspberry Pi 4 Camera (G)
11	Лазерный дальномер CJMCU-531
12	Модуль памяти micro SD 16 Gb для одноплатного компьютера
13	Пропеллер пластиковый 5046x3 (комплект)

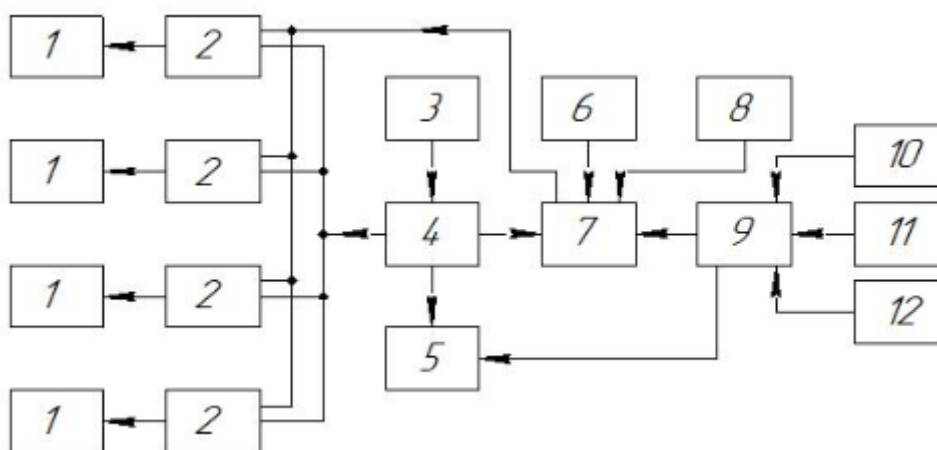


Рисунок 3 – Электрическая структурная схема квадрокоптера

Теперь сформулируем понятие безотказной работы системы. Отказ системы – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы. Работоспособным будем считать состояние, в котором квадрокоптер способен выполнять управляемый и автономный полет. Тогда отказ системы наступает в результате следующих событий:

- отказ пропеллеров (отказ резьбового крепежа);
- отказ бесколлекторных электродвигателей;
- отказ регуляторов оборотов;
- отказ аккумуляторной батареи;

- отказ платы распределения питания;
- отказ модуля памяти для полетного контроллера;
- отказ полетного контроллера;
- отказ приемника;
- отказ микрокомпьютера Raspberry Pie;
- отказ модуля памяти для микрокомпьютера;
- отказ дальномера;
- отказ камеры.

Интенсивность отказов пропеллеров и деталей конструкции квадрокоптера будем считать близкой нулю и в расчетах не учитываем.

Так как отказ любого из элементов приведет к отказу системы в целом, то структурную схему надежности COEX Клевер 4 Code можно представить в виде последовательно соединенных элементов из таблицы 1. Для наглядности представления разобьем систему на блоки по функциональному назначению:

1 Блок винтомоторной группы, структурная схема которого представлена на рисунке 4.

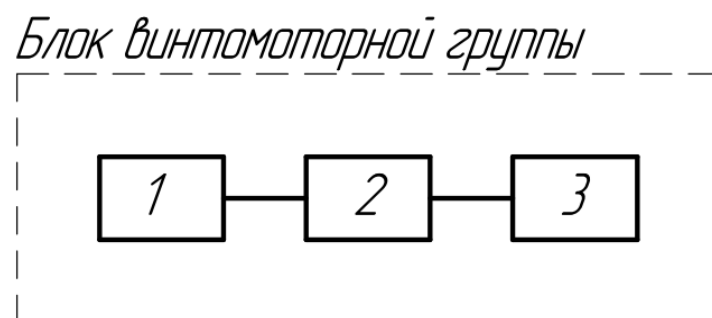


Рисунок 4 – Структурная схема надежности блока винтомоторной группы, где 1 – крепления воздушных винтов (4 шт.); 2 – бесколлекторные электродвигатели COEX BR2306, 2400 kV (4 шт.); 3 – регулятор оборотов COEX ESC 25A (4 шт.).

2 Блок питания, структурная схема которого представлена на рисунке 5.

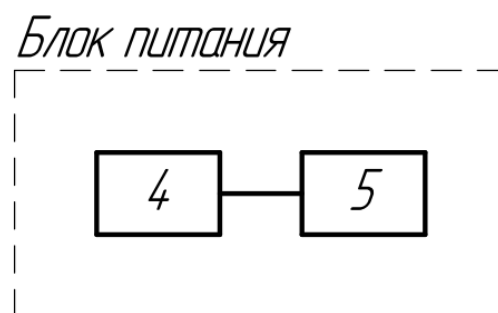


Рисунок 5 – Структурная схема надежности блока питания,

где 4 – литиевая аккумуляторная батарея Tattu 3S LiPo 2300 mAh 45C; 5 – плата распределения питания COEX PDB.

3 Блок ручного управления, структурная схема которого представлена на рисунке 6.

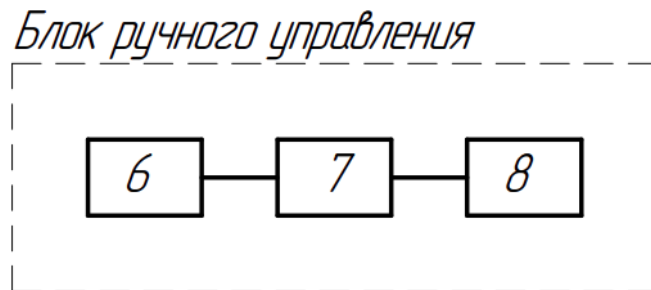


Рисунок 6 – Структурная схема надежности блока ручного управления, где 6 – модуль памяти micro SD 1 Gb для полетного контроллера; 7 – полетный контроллер COEX Pix; 8 – приемник FS-IA6B.

4 Блок программного управления, структурная схема которого представлена на рисунке 7.

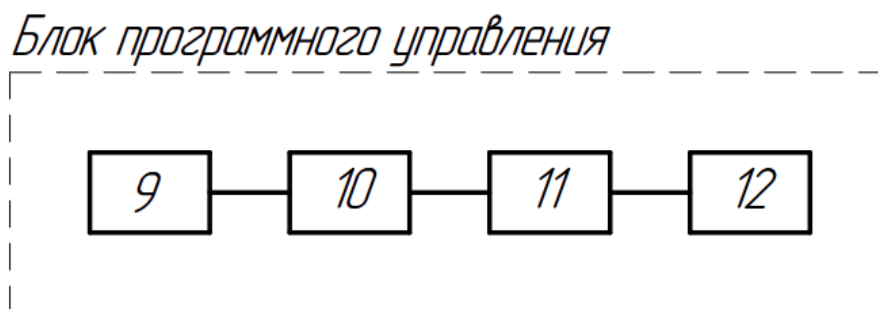


Рисунок 7 – Структурная схема надежности блока программного управления, где 9 – одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pie 4 Model B 1 Gb; 10 – камера для одноплатного компьютера, Raspberry Pi 4 Camera (G); 11 – лазерный дальномер CJMCU-531; 12 – модуль памяти micro SD 16 Gb для одноплатного компьютера.

Рассмотренные блоки на структурной схеме надежности квадрокоптера соединяются последовательно. Структурная схема надежности квадрокоптера COEX Клевер 4 Code представлена на рисунке 8.



## *Квадрокоптер COEX Клевер 4 Code*

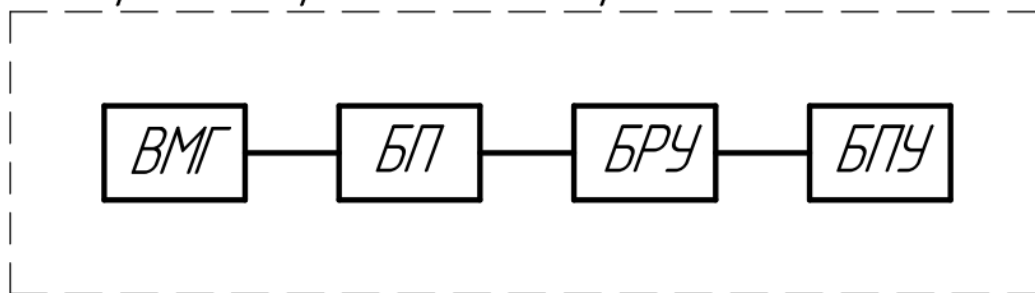


Рисунок 8 – Структурная схема надежности квадрокоптера,  
где ВМГ – блок винтомоторной группы; БП – блок питания; БРУ – блок ручного  
управления; БПУ – блок программного управления.

Для оценки показателей надежности по разработанной структурной схеме надежности необходимо определить значения интенсивностей отказов всех элементов квадрокоптера.

В таблице 2 представлены значения базовых интенсивностей отказов для всех элементов и соединений между ними, определенные с помощью источников [2, 4, 5, 6, 7].

Таблица 2 – Базовые интенсивности отказов элементов

Название группы элементов	Интенсивность отказов $\lambda_o \cdot 10^{-6}$ , 1/ч	Количество элементов, $n_i$	$\lambda_o n_i \cdot 10^{-6}$ , 1/ч
Резьбовое соединение гайкой	0.072	4	0.288
Бесколлекторный электродвигатель COEX BR2306, 2400 kV	0.359	4	1.436
Регулятор оборотов COEX ESC 25A	3	4	12
Литиевая аккумуляторная батарея Tattu 3S LiPo 2300 mAh 45C	7.2	1	7.2
Плата распределения питания COEX PDB	2.65	1	2.65
Модуль памяти micro SD 1 Gb для полетного контроллера	0.018	1	0.018
Полетный контроллер COEX Pix	7.8	1	7.8
Приемник FS-IA6B	2.7	1	2.7
Одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pie 4 Model B 1 GB	5.83	1	5.83
Камера для одноплатного компьютера, Raspberry Pi 4 Camera (G)	4.33	1	4.33
Лазерный дальномер CJMCU-531	1.27	1	1.27
Модуль памяти Micro SD 16 Gb для одноплатного компьютера	0.018	1	0.018
Соединения пайкой	0.01	122	1.22
Соединители штепсельные	0.062	70	4.34
Провода соединительные	0.015	61	0.915

Определение эксплуатационных интенсивностей отказов для каждого из элементов затруднительно, так как отсутствуют данные о режимах работы всех ЭРИ, входящих в состав элементов квадрокоптера. Поэтому введем поправочные коэффициенты для определения эксплуатационных интенсивностей отказов.

Условия эксплуатации: самолетные ( $K_1=1.65$  при суммарном воздействии ударных и вибрационных нагрузок), влажность 60-70%, температура 20-40 °С ( $K_2 = 1$ ), высота 0-1 км ( $K_3 = 1$ ) [7].

Суммарную интенсивность отказов вычислим по формуле

$$\lambda_{\text{сум}} = K_1 K_2 K_3 \sum_{i=1}^n n_i \lambda_{\sigma_i} \quad (6)$$

где  $n_i$  – количество элементов  $i$ -ой группы,  $\lambda_{\sigma_i}$  – базовая интенсивность отказов элементов  $i$ -ой группы.

По формуле (6) получим  $\lambda_{\text{сум}} = 85.825 \cdot 10^{-6}$  1/ч.

Среднюю наработку на отказ вычислим по формуле (4). Получим

$T = \frac{1}{\lambda_{\text{сум}}} = 11651.6$  1/ч. Полученное значение средней наработки на отказ является

приблизительным, так как при расчетах не учитывались режимы работы ЭРИ в электрических схемах элементов.

Максимальное время полета квадрокоптера COEX Клевер 4 Code составляет 15 мин. Вероятность безотказной работы за время полета вычислим по формуле (5). Получим значение  $P = 0.999997$ . Результаты вычисления интенсивностей отказов и вероятностей безотказной работы по блокам структурной схемы надежности представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты вычисления  $\lambda(t)$  и ВБР за время полета

Название блока	Интенсивность отказов $\lambda(t) \cdot 10^{-6}$ , 1/ч	Вероятность безотказной работы за время полета, $P$
Блок винтомоторной группы	13.724	0.99999657
Блок питания	9.85	0.99999754
Блок ручного управления	10.518	0.99999737
Блок программного управления	11.448	0.99999714

Так как в технической документации на квадрокоптер COEX Клевер 4 Code требования по надежности не установлены, то вывод о соответствии или не

соответствии полученных оценок показателей безотказности требуемым значениям сделать невозможно.

Полученное значение средней наработки на отказ (11651.6 1/ч) и вероятности безотказной работы за время полета (0.999997) являются достаточно высокими для учебного квадрокоптера, эксплуатируемого преимущественно в лабораториях и закрытых помещениях.

По таблице 2 можно сделать вывод о том, что наиболее уязвимыми с точки зрения надежности являются полетный контроллер COEX Pix, одноплатный компьютер Raspberry Pie 4 Model B 1 GB и литиевая аккумуляторная батарея Tattu 3S LiPo 2300 mAh 45C. Резервирование этих элементов в данном случае не является целесообразным, так как это значительно увеличит массу и стоимость квадрокоптера.

Важно отметить, что в полетном контроллере реализована программная функция «Failsafe», которая позволяет перевести квадрокоптер в режим посадки при потере связи с пультом управления, что снижает потенциальные повреждения вследствие отказа приемника. Так же при выполнении программируемого полета есть возможность перевести БПЛА в режим ручного управления и безопасно посадить его.

В связи с спецификой эксплуатации данного квадрокоптера наиболее существенный вклад в повышение надежности внесут мероприятия в сфере технического обслуживания: введение предполетных и послеполетных подготовок по прописанному регламенту.

### **Библиографический список**

1. SZ DJI Technology Co., Ltd. Mavic Air 2 Заявление об отказе от ответственности и руководство по технике безопасности v1.0, 2020. URL: [https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic\\_Air\\_2/Mavic\\_Air\\_2\\_In\\_the\\_Box\\_Disclaimer\\_and\\_Safety\\_Guidelines\\_eu.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_Air_2/Mavic_Air_2_In_the_Box_Disclaimer_and_Safety_Guidelines_eu.pdf) (дата обращения: 04.01.2021).
2. «Коптер Экспресс». COEX Клевер 4 Code. URL: <https://ru.coex.tech/clover> (дата обращения: 11.04.2021).
3. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136419> (дата обращения: 11.04.2021).
4. MIL-HDBK-217F. Military Handbook Reliability prediction of electronic equipment URL: <http://nomtbf.com/wp-content/uploads/2015/01/MIL-HDBK-217F-Notice2.pdf> (дата обращения: 11.04.2021).

5. NAVAL SURFACE WARFARE CENTER (NSWC), HANDBOOK OF RELIABILITY PREDICTION PROCEDURES FOR MECHANICAL EQUIPMENT. URL: [https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/static/Handbook\\_of\\_Reliability\\_Prediction\\_Procedures\\_for\\_Mechanical\\_Equipment\\_NSWC-11.pdf](https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/static/Handbook_of_Reliability_Prediction_Procedures_for_Mechanical_Equipment_NSWC-11.pdf) (дата обращения: 11.04.2021).

6. Справочник: Надежность электрорадиоизделий. URL: [https://chipinfo.pro/books/Reliability\\_\(2006\).pdf](https://chipinfo.pro/books/Reliability_(2006).pdf) (дата обращения: 11.04.2021).

7. Пашков В.П. Оценка надежности электронных узлов в различных условиях эксплуатации: методические указания для проведения лабораторных работ / В.П. Пашков – СПб: СПбГУАП, 2019.