

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.3.029

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВЧ-УСТРОЙСТВ

М. А. Карапузов, С. Н. Полесский, В. В. Жаднов

На сегодняшний день СВЧ-аппаратура имеет широкий спектр применения: от простых бытовых приборов до сложных устройств космической техники. И вот работоспособность таких устройств чрезвычайно важна, поэтому так важно наиболее точно оценивать как вероятность безотказной работы, наработку, так и ресурс. Это связано с тем, что космическая техника является невосстанавливаемой и после наступления предельного состояния (т.е. полная выработка ресурса) вероятность отказа начинает возрастать очень быстро.

В соответствии с [1] ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние, гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет своего предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, а средний ресурс – математическое ожидание ресурса. Под предельным состоянием понимается состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [4].

Еще одним важным пунктом определения значения ресурса радиоэлектронных приборов, в том числе СВЧ-устройств, является учет механических составных частей. Также стоит отметить, что отказы могут быть взаимосвязаны: нарушения работоспособности механических частей приводят к отказу электронной составляющей, и наоборот. Повреждения конструкции, деформации могут приводить к искажению сигналов, а нарушения электрического режима вследствие отказа ЭКБ могут приводить к отпаиванию проводов от контактных площадок, повышению температуры и т.п. Таким образом, пренебрегая отказами механических составных частей, мы завышаем результирующие значения показателей безотказности и долговечности СВЧ-устройств.

Методы оценки ресурса регламентированы ОСТ [3], значения ресурса для предельных и облегченных условий эксплуатации приведены в ТУ (необходимо уточнить, что ТУ только на отечественные разработки). Однако в них не описывается переход от этих значений к заданным на изделие, т.е. разработчики вынуждены оценивать ресурс изделия по нижней границе, так как космическая техника функционирует в отличных от предельных и облегченных условиях. Также сейчас не учитывается временной график работы изделия, когда изделие до непосредственного запуска в космос проходит различные проверки на земле, транспортируется к месту запуска, хранится и т.д. Освещению этих вопросов и посвящена статья – как оценить ресурс изделия, функционирующего в определенных условиях, и как учесть неравномерное расходование ресурса с момента ввода в эксплуатацию.

Для того, чтобы учесть неравномерное расходование ресурса, необходимо значения для различных групп аппаратуры нормировать относительно одного, произвольно выбранного (для определенности назовем его «ресурс при нормальных условиях» –  $T_{p,н.у.}$ ). Таким образом, мы получаем коэффициент пропорциональности расходования ресурса  $K(T_p)$ : для  $T_{p,н.у.}$  он будет равен единице, для более легких условий эксплуатации коэффициент будет строго больше единицы, для более жестких условий коэффициент будет строго меньше единицы. Действительно, если обратиться к ТУ, то для облегченных условий ресурс больше, чем для предельных, а следовательно, и результат нормировки относительно  $T_{p,н.у.}$ :

$$K(T_p) = \begin{cases} > 1, & \text{при } T_p > T_{p,н.у.} \\ 1, & \text{при } T_p = T_{p,н.у.} \\ < 1, & \text{при } T_p < T_{p,н.у.} \end{cases} \quad (1)$$

Далее с помощью этого коэффициента рассчитываем израсходованный ресурс за время эксплуатации изделия в условиях каждой группы аппаратуры, т.е. для «нормальных условий» количество израсходованного ресурса равно времени эксплуатации в этих условиях, а, например, для более жестких условий за то же время израсходуется больше ресурса. Для отрезков времени эксплуатации в условиях каждой группы аппаратуры находим разницу между реальным значением ресурса и нормальным и вычитаем ее из  $T_{p,н.у.}$ , тем самым получая истинное значение ресурса  $T_p$  изделия в заданных условиях групп аппаратуры:

$$T_p = T_{p,н.у.} - \sum_{i=1}^n t^{(i)} \cdot \left( \frac{1}{K_i(T_p)} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $T_{p,н.у.}$  – значение ресурса для выбранных «нормальных» условий эксплуатации;  $n$  – количество групп условий эксплуатации аппаратуры (исключая «нормальные»);  $t^{(i)}$  – время эксплуатации в условиях  $i$ -й группы аппаратуры;  $K_i(T_p)$  – коэффициент пропорциональности расходования ресурса для условий  $i$ -й группы аппаратуры.

Методика расчета ресурса для определенных условий групп аппаратуры приведена в [2]. В ТУ обычно приводятся значения ресурса для предельных и облегченных условий эксплуатации, в статье же рассматривается способ перехода от заданных в ТУ значений к действительным:

$$T_p = \frac{T_p(\text{ПУ})}{K_{И} \cdot K_{Н}}, \quad (3)$$

где  $T_p(\text{ПУ})$  – заданное в ТУ значение ресурса для предельных условий эксплуатации;  $K_{И}$  – коэффициент использования;  $K_{Н}$  – коэффициент нагрузки (по критичному параметру).

В равенстве (3)  $K_{И}$  определяется согласно формуле (4), а  $K_{Н}$  согласно формуле (5):

$$K_{И} = \frac{t_{\Sigma pp}}{t_{\Sigma pp} + t_{\Sigma ож}}, \quad (4)$$

где  $t_{\Sigma pp}$ ,  $t_{\Sigma ож}$  – суммарное время нахождения в режиме работы и режиме ожидания за период эксплуатации;

$$K_{Н} = \frac{\Psi_{pp}}{\Psi_{ном}}, \quad (5)$$

где  $\Psi_{pp}$  – значение критичного параметра в режиме работы;  $\Psi_{ном}$  – номинальное значение критичного параметра согласно ТУ.

Рассмотрим в качестве примера изделие бортовой радиоэлектронной аппаратуры космической техники – СВЧ-коммутатор. В процессе эксплуатации коммутатор подвергается влиянию различных внешних воздействующих факторов (ВВФ). Сначала изделие хранится в помещении (на складе) в течение одного года (8760 ч), что соответствует группе 1.1 [8], в дальнейшем транспортируется каким-либо видом транспорта (группа 1.3 – для автомобильного, 3.1 – авиационного, 1.9 – железнодорожного) к месту пуска ракеты-носителя в течение пяти дней (120 часов), после чего происходит запуск в составе ракеты-носителя и вывод на орбиту (группа 4.1) в течение двух суток (48 часов) и, в конце концов, осуществляет свои основные функции (прием и передача в СВЧ-диапазоне) до окончания срока активного существования (САС) в условиях группы 5.3 (рис. 1). Согласно ТУ и статье [3] ресурс изделия для каждой из групп аппаратуры будет различен. С учетом вышесказанного о хранении, транспортировании и непосредственном функционировании изделия делаем вывод, что ресурс расходуется неравномерно.

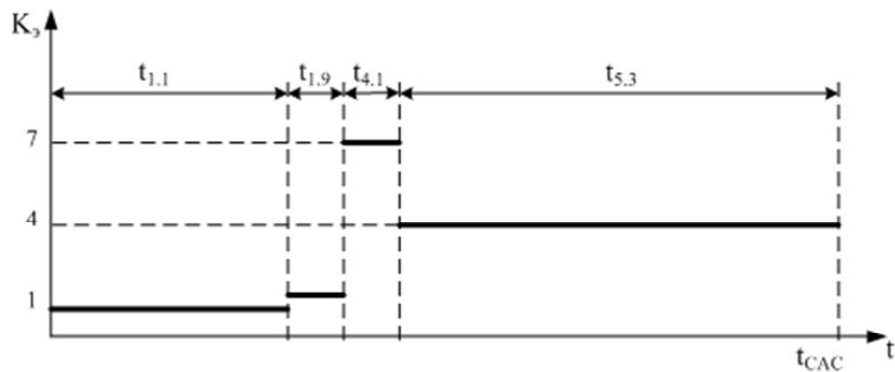


Рис. 1. Временной график эксплуатации коммутатора

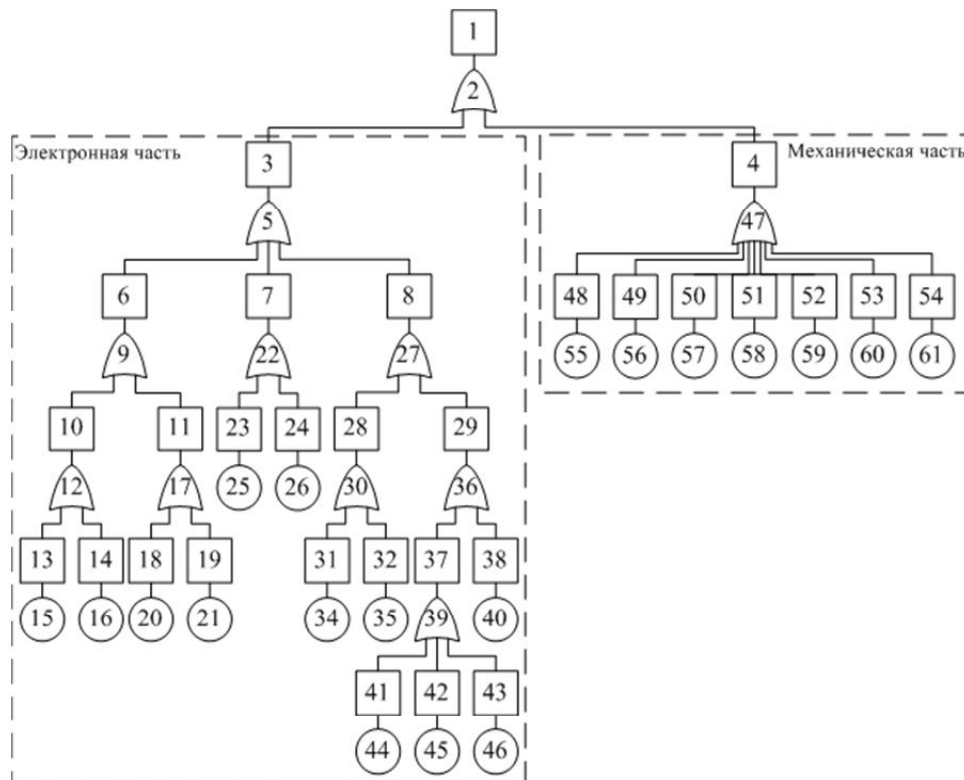


Рис. 2. Дерево отказов коммутатора

После анализа данных технической документации на коммутатор было построено дерево отказов (рис. 2) [7], где цифрами отмечены следующие события: 1 – изделие неработоспособно; 2 – отказ изделия; 3 – нет обработки сигнала; 4 – нарушение крепления и герметизации; 5 – отказ

электронной части; 6 – нет сигнала на входе цепи; 7 – нет обработки сигнала в платах; 8 – нет сигнала на выходе; 9 – отказ входных каскадов; 10 – нет сигнала на входе № 1; 11 – нет сигнала на входе № 2; 12 – отказ элементов входа № 1; 13 – отказ W1; 14 – отказ XW1; 15 – выгорание вентиля W1; 16 – выгорание разъема XW1; 17 – отказ элементов входа № 2; 18 – отказ W2; 19 – отказ XW2; 20 – выгорание вентиля W2; 21 – выгорание разъема XW2; 22 – отказ платы; 23 – отсутствие питания диода платы XN1; 24 – отсутствие питания диода платы XN2; 25 – отказ одного из диодов VD1-VD8; 26 – отказ одного из диодов VD1-VD8; 27 – отказ выходного каскада; 28 – нет сигнала на мостах XN8, XN9; 29 – отказ выходов изделия; 30 – отказ мостов XN8, XN9; 31 – отсутствие сигнала моста XN8; 32 – отсутствие сигнала моста XN9; 33 – повреждение токоведущих дорожек моста XN8; 34 – повреждение токоведущих дорожек моста XN9; 36 – нет сигнала в выходных каналах; 37 – отказ выходных разъемов XW3-XW5; 38 – отказ циркулятора W3; 39 – нет сигнала на разъемах XW3-XW5; 40 – выгорание циркулятора W3; 41 – отказ разъема XW3; 42 – отказ разъема XW4; 43 – отказ разъема XW5; 44 – выгорание разъема XW3; 45 – выгорание разъема XW4; 46 – выгорание разъема XW5; 47 – разрушение сварных, паяных и клееных соединений и разгерметизация заглушек и прокладок; 48 – отказ винтов крепления вентилях W1, W2; 49 – отказ паяного соединения перемычек плат XN1, XN2; 50 – отказ сварного соединения перемычек плат XN5, XN6; 51 – отказ заглушки; 52 – отказ клеевого соединения плат XN4, XN6; 53 – отказ винтов крышки; 54 – отказ прокладки крышки; 55 – ослабление крепления вентилях W1, W2; 56 – разрушение паяного соединения перемычек плат XN1, XN2; 57 – разрушение отказ сварного соединения перемычек плат XN5, XN6; 58 – деформация заглушки; 59 – отслоение пленки клея в соединении плат XN4, XN6; 60 – ослабление крепления крышки; 61 – деформация прокладки крышки. Как можно видеть, отказ изделия в равной мере зависит и от отказа электронных, и от отказа механических СЧ.

Результаты проведенного в соответствии с построенным деревом расчета показателей надежности приведены в табл. 1, а на рис. 3 изображен вклад в общую надежность электронных и механических компонентов коммутатора. Расчет электронной части проводился на основе данных, приведенных в [5], механической части – на основе [6].

Таблица 1

Результаты расчета показателей надежности коммутатора

Наименование компонента	Эксплуатационная интенсивность отказов, 1/ч	Интенсивность отказов в режиме ожидания, 1/ч	Гамма-процентный ресурс, ч
Электронная часть	7,27e-07	5,56e-08	23400
Механическая часть	9,92e-07	7,26e-08	26200
Коммутатор	1,71806079201876E-6	1,281957368E-7	23400

Как видно из рисунка, надежность механической части сопоставима с электронной частью и, пренебрегая ей, мы «улучшаем» надежность в 2 раза. Другими словами, очевидна необходимость учета механических компонентов при расчете показателей надежности и долговечности СВЧ-устройств. В табл. 2 представлены полученные значения показателей надежности, причем ресурс рассчитан с учетом нестационарных условий функционирования с использованием выражения (2).

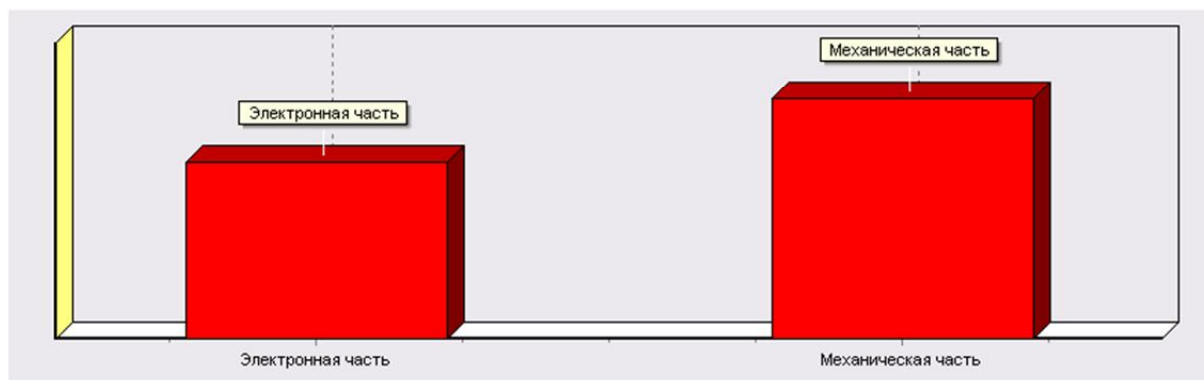


Рис. 3. Вклад в надежность коммутатора электронной и механической части

Таблица 2

## Показатели надежности СЧ коммутатора

Тип изделия	Эксплуатационная интенсивность отказов	Интенсивность отказов в режиме ожидания	Ресурс				
			1.1	1.9	4.1	5.3	Итоговый
Электронная часть							
ФПВН2-88	7,30e-08	8,76e-10	120000	80000	21800	60000	64300
ФЦП2-13	1,90e-07	8,93e-10	120000	80000	21800	60000	64300
СРГ-50 (ВР0.364.026ТУ)	5,49e-09	7,69e-09	200000	133000	53300	100000	104000
Пайка ЭРИ волной	6,90e-10	6,90e-12	131400	87600	35000	65700	70000
2А517А-2Н, Б-2Н	4,50e-08	1,68e-09	50000	47600	10000	17800	23400
Печатный монтаж	3,40e-11	3,40e-13	500000	230800	95200	178600	184000
Механическая часть							
Винт крепления вентиля	1,00e-09	1,00e-11	876000	584500	233600	438000	442400
Пайка перемычек	1,20e-09	1,20e-11	131400	87600	35000	65700	70000
Сварка провода к контактным площадкам	2,40e-10	2,40e-12	87600	58400	23300	43800	48100
Заглушка разъема фторопласт Ф-4(или Ф5)	3,60e-07	3,60e-08	175200	116800	46700	87600	91970
Клееное соединение платы	2,40e-08	2,40e-09	61300	40800	16300	30600	34900
Винт крепления крышки	6,00e-09	6,00e-11	876000	584500	233600	438000	442400
Прокладка крышки	2,88e-07	2,88e-08	43800	29200	11600	21900	26200
Пайка крышки и герметизация	2,40e-07	2,40e-09	131400	87600	35000	65700	70000

При расчете итогового ресурса из табл. 2 с помощью выражения (2) за «нормальные» условия принимались условия группы 5.3 и, как можно видеть, итоговое значение выше, чем для группы 5.3 в среднем на 4000 ч (чуть менее полугода).

Проведенный расчет подтвердил необходимость учета функционирования в условиях различных групп аппаратуры при оценке ресурса. В связи с ужесточением требований к аппаратуре не всегда можно позволить себе роскошь оценки по нижней границе (наихудшему случаю), так как подобные требования подразумевают проведение точных расчетов. Предложенная методика расчета ресурса делает шаг навстречу повышению точности проводимых расчетов ресурса. Также важным фактом является наглядная демонстрация влияния механических компонентов СВЧ-устройств на надежность (см. рис. 3). Примечательно, что учет механических компонентов ухудшает результирующие значения показателей надежности в равной степени, что и электронные [9–11]. Таким образом, все предложенные меры по проведению более точных расчетов наглядно обоснованы и подтверждают необходимость развития методов точных расчетов при ужесточающихся требованиях к СВЧ-устройствам.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

- при оценке показателей надежности, в частности долговечности, необходимо учитывать механические компоненты СВЧ-устройств;
- значение ресурса зависит от группы аппаратуры, т.е. от набора ВВФ, и при оценке показателей долговечности необходимо учитывать нестационарность условий эксплуатации СВЧ-устройства.

#### Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Жаднов, В. В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем / В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 65–73.

3. ОСТ 4Г0.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
4. ГОСТ 27.003-89. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
5. Надежность электрорадиоизделий : справочник. – URL: <http://www.twirpx.com/file/1062157/>
6. NSWC-11. Handbook of Reliability Prediction Procedure for Mechanical Equipment.
7. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей.
8. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.
9. Затылкин, А. В. Система адаптивного тестирования на основе нечеткого логического вывода / А. В. Затылкин // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 133–135.
10. Литвинов, А. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях / А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 16–22.
11. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 340–340.

### УДК 621.3.029

*Карпузов, М. А.*

**Влияние внешних возмущающих факторов на долговечность СВЧ-устройств / М. А. Карпузов, С. Н. Полесский, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 14–20.**

*Карпузов Михаил Александрович*

магистрант,  
кафедра информационных технологий  
и автоматизированных систем,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(109028, Россия, г. Москва,  
Б. Трехсвятительский пер., 3)  
(495) 916-88-80  
E-mail: [pinv@bk.ru](mailto:pinv@bk.ru)

*Полесский Сергей Николаевич*

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных технологий  
и автоматизированных систем,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(109028, Россия, г. Москва,  
Б. Трехсвятительский пер., 3)  
8-926-563-70-04  
E-mail: [spolesky@hse.ru](mailto:spolesky@hse.ru)

*Жаднов Валерий Владимирович*

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
(495) 916-88-80  
E-mail: [vzhadnov@hse.ru](mailto:vzhadnov@hse.ru)

*Karapuzov Mikhail Aleksandrovich*

master,  
sub-department of information technologies  
and automated systems,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(109028, 3 B. Trekhsvyatitel'skiy lane, Moscow, Russia)

*Polesskiy Sergey Nikolaevich*

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information technologies  
and automated systems,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(109028, 3 B. Trekhsvyatitel'skiy lane, Moscow, Russia)

*Zhadnov Valeriy Vladimirovich*

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio electronic  
and telecommunications,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(101000, 20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

**Аннотация.** Обосновывается необходимость учета показателей долговечности деталей СВЧ-устройств, в том числе механических частей. Обычно при оценке показателей надежности и, в частности, показателей долговечности радиоэлектронной аппаратуры учитывают только применяемую электронную компонентную базу, принимая все механические детали высоконадежными элементами, практически не влияющими на результирующее значение оцениваемого показателя. Но механические детали могут подвергаться разрушению, которое является наиболее опасным проявлением процессов старения, деформироваться или изменять свойства материала – его пластичность, электропроводимость, магнитные свойства и т.п. Таким образом, совершенно очевидной становится связь между электронной и механической частями устройства, причем, как описано выше, механический износ детали может привести к ухудшению ее электрических свойств. Отметим также, что взаимосвязь процессов отказа механических и электронных частей сложна. Отсюда возникает естественным образом необходимость, во-первых, корректной оценки показателей надежности механических деталей, и, во-вторых, выявление взаимосвязи отказов механической и электронной частей СВЧ-устройств. В статье будут намечены пути решения этих двух задач и представлены первые результаты анализа методов оценки показателей надежности механических деталей. Об актуальности этих задач свидетельствуют требования, предъявляемые заказчиком, к разрабатываемой аппаратуре, в состав которой входят СВЧ-устройства, – малая вероятность отказов и сбоев, большой срок эксплуатации, стойкость к ВВФ и простота обслуживания.

**Ключевые слова:** надежность, долговечность, СВЧ-устройства, внешние воздействующие факторы, ресурс.

**Abstract.** This article is about consideration must be given to durability's indexes of SHF devices including mechanical parts. Only electronic parts of SHF devices are considered at evaluating reliability of whole device and mechanical parts are supposed reliable very much, almost failure-free. But mechanical parts may be exposed to effects of deterioration and destruction processes, they are able to deform and change their material properties – flexibility, electroconductivity, magnet properties and etc. It shows interconnection of electronic and mechanical parts of SHF devices. Necessary to mention, that this interconnection is very difficult to describe. That's why it so important to be able to properly evaluate reliability both mechanical and electronic parts and their durability. Ways of solving these problems are initiated in this article and described analysis of methods for evaluating reliability of mechanical parts.

**Key words:** reliability, durability, SHF devices, outside factors, useful life.