

Маркин А.В., Полесский С.Н., Жаднов В.В.

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИКИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Классический аппарат теории надежности сложных систем, который базируется на гипотезе о постоянстве интенсивностей отказов элементов, широко используется в инженерной практике для анализа надёжности электромеханики и электронных средств. При проведении этих работ значения интенсивностей отказов элементов механики и электронных средств определяются по справочнику «Надежность ЭРИ» или не учитываются вовсе. Если принять электромеханики определяются по справочнику «Надежность ЭРИ» или не учитываются вовсе. Если принять внимание, что последняя редакция Справочника датируется 2006 г., а доля стандартизованных элементов в современных электронных средствах постоянно сокращается, то становится очевидной потребность в инженерных методах расчётов оценки надёжности таких элементов.

**Ключевые слова:** надежность, проектирование, электронные средства, элементы механики и электромеханики, математические модели, интенсивность отказов.

При проектировании сложных электронных средств (ЭС) одной из важных задач является оценка проектного уровня надёжности, которая осуществляется расчёты методами. Практическим руководством по проведению таких расчётов по сей день является ОСТ 4Г 0.012.242 [1]. В соответствии с методиками, приведёнными в этом стандарте, значения интенсивностей отказов составных частей (в т.ч. и элементов электромеханики) должны определяться по справочнику «Надежность ЭРИ» [2]. Однако справочник содержит данные по характеристикам надежности весьма ограниченной номенклатуры классов электромеханических изделий, поэтому при проведении инженерных расчётов механические изделия (не вошедшие в номенклатуру [2]) принимаются «абсолютно надёжными» (т.е. не учитываются при синтезе Схемы расчёта надежности).

Такое допущение обусловлено тем, что в ГОСТ Р 51901.5 [3] рекомендованы методы «Анализ прочности и напряжений» и «Анализ конечных элементов» для оценки величин статических и динамических нагрузок на элементы. Эти методы позволяют рассчитать и сопоставить уровень рабочих и максимально-допустимых нагрузок на механических элементах. Впрочем, кроме метода «Конечных элементов» на практике применяется и метод «Конечных разностей». Этот метод реализован в подсистеме АСОНИКА-TM системы АСОНИКА [4]. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты расчёта печатного узла на воздействие гармонической вибрации.

Тогда, в соответствии с [5], если уровни действующих механических нагрузок (факторов) меньше максимально-допустимых, то отказы по этим причинам можно не учитывать, т.е. принимать механические элементы «абсолютно надёжными».

Вместе с тем, в работах [6] и [7] показано, что и в тех случаях, когда уровни нагрузок не превышают допустимые, все-таки возможны отказы из-за деградационных процессов (износа, накопления усталостных повреждений и т.д.). Для таких видов отказов разработаны специализированные модели, «установленные»

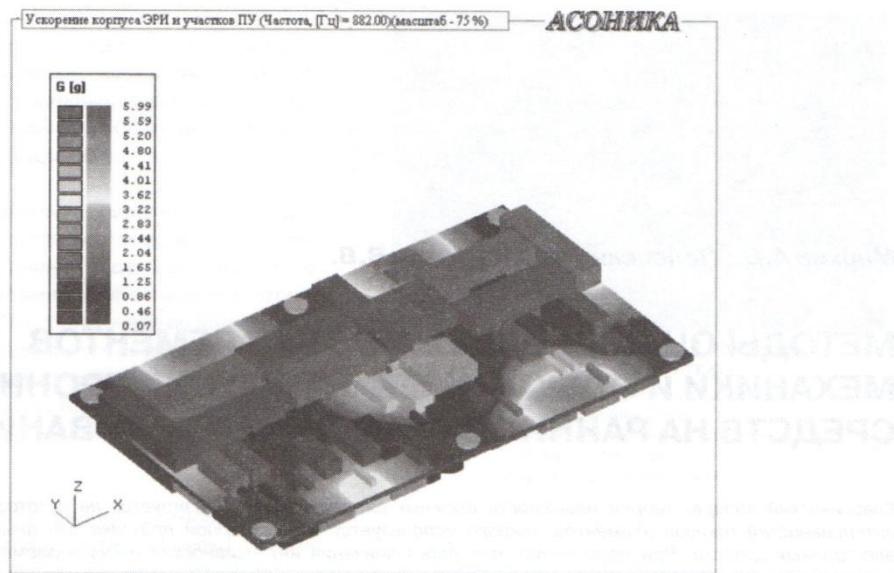


Рис. 1. АСОНИКА-ТМ: Поле ускорений печатного узла при воздействии гармонической вибрации

в межгосударственных стандартах (см. ГОСТ 27.005 [8]). Так, для деградационных процессов, реализации которых имеют линейную зависимость (механический износ и др.) рекомендуется  $\alpha$ -распределение [6, 8], а для процессов с монотонными реализациями – DM-распределение [7, 8].

Однако эти модели так и не нашли широкого распространения в инженерной практике, т.к. их использование требует оценки значений их коэффициентов по экспериментальным данным, которые отсутствуют на ранних этапах проектирования.

Другим подходом к расчёту характеристик надёжности нестандартных электромеханических и механических элементов ЭС является методика, приведенная в американском стандарте NSWC [9]. По сути, методика полностью аналогична методике расчёта надёжности электронных модулей первого уровня (ЭМ1) [1], где под «ЭРИ» подразумеваются конструктивные и механические элементы. Аналогичная методика приведена и в работе [10], причем математические модели интенсивностей отказов адаптированы к отечественной номенклатуре.

При всех очевидных достоинствах методики [10] её весьма ограниченный набор моделей, а также отсутствие официальной аттестации и программной реализации привело к тому, что по сей день она не нашла широкого распространения. Что касается применения методик [9], то и оно сдерживается с одной стороны тем, что размерность коэффициентов моделей не соответствует принятой в России системе (системе «СИ»), а с другой стороны – высокой стоимостью программных средств зарубежных производителей (см., например, [11]).

Поэтому назрела необходимость создания программных средств, реализующих модели и методы [9] и [10], но свободные от их ограничений в части полноты номенклатуры моделей, и адаптации к принятой в России системе измерений.

В свете решения этой задачи в Научно-образовательном центре «Функциональная безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств космических систем» МИЭМ совместно с ООО «СИНЦ» разрабатываются информационные технологии проектных исследований надёжности ЭС. На рис. 2 приведена блок-схема инженерной методики расчётной оценки надёжности ЭС с учетом механических элементов при проектировании (см. рис. 2).

Ниже приведено краткое пояснение к наиболее важным операциям (блокам на рис. 1) методики:

Блок А<sub>5</sub>. Если схема расчёта надёжности (СРН) представляет собой соединение резервированных групп, то для расчета показателей надёжности изделия используются стандартные методы, рекомендованные в [1] и ГОСТ 27.301 [12].

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИКИ  
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

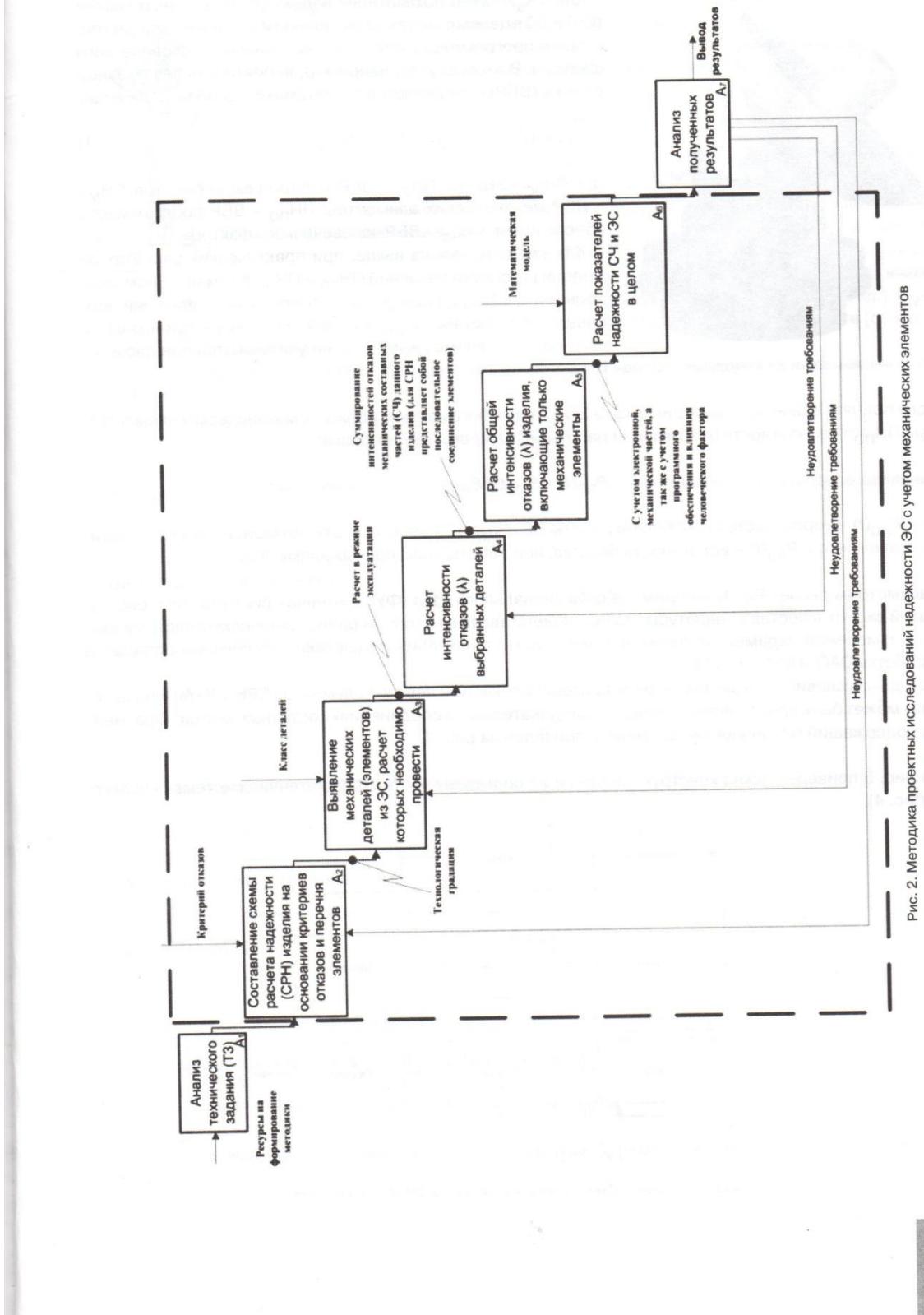




Рис. 3. Функциональный узел «Антennaная система»

Блок А<sub>6</sub>. Расчет показателей надежности составных частей (СЧ) и ЭС в целом с учетом электронной и механической частей, а также программного обеспечения и влияния человеческого фактора. В этом случае, например, вероятность безотказной работы (ВБР) определяется по математической модели вида:

$$\Pi_{\text{ЭС}} = (\Pi_{\text{ЭЭ}}, \Pi_{\text{МЭ}}, \Pi_{\text{ПО}}, \Pi_{\text{ЧФ}}) \quad (1)$$

где:  $\Pi_{\text{ЭС}}$  – ВБР ЭС;  $\Pi_{\text{ЭЭ}}$  – ВБР электронных элементов;  $\Pi_{\text{МЭ}}$  – ВБР механических элементов;  $\Pi_{\text{ПО}}$  – ВБР программного обеспечения;  $\Pi_{\text{ЧФ}}$  – ВБР человеческого фактора.

Как уже отмечалось выше, при практических расчётах по модели (1) оценка значений  $\Pi_{\text{ЭЭ}}$  и  $\Pi_{\text{ПО}}$  в том или ином виде проводится,  $\Pi_{\text{ЧФ}}$  1 при условии высокой квалификации персонала, а значения  $\Pi_{\text{МЭ}}$ , как правило, также принимаются максимально-возможными (т.е. не учитываются при расчетах  $\Pi_{\text{ЭС}}$ ).

Если принять в качестве критерия отказа ЭС отказ любого из электронных и механических элементов, то при  $\Pi_{\text{ПО}}=1$  вероятность безотказной работы ЭС за время  $t$  будет равна:

$$P_{\text{ЭС}}(t) = P_{\text{МЭ}}(t) \cdot P_{\text{ЭЭ}}(t)$$

где:  $P_{\text{ЭС}}(t)$  – вероятность безотказной работы ЭС;  $P_{\text{МЭ}}(t)$  – вероятность безотказной работы механических элементов;  $P_{\text{ЭЭ}}(t)$  – вероятность безотказной работы электронных элементов.

Рассмотрим расчет  $P_{\text{ЭС}}(t)$  на примере функционального узла (ФУ) «Антennaная система» (см. рис. 3), который входит в состав аппаратуры «КУРС», представляющую собой радиотехническую систему взаимных измерений параметров движения для поиска, сближения истыковки космических аппаратов (разработка ОАО «НИИ ТП») [13].

Исходя из условий функционирования, критериев отказов и перечня элементов СРН ФУ «Антennaная система» может быть представлена в виде «последовательного соединения» составных частей. Фрагмент СРН, содержащий механические элементы, приведен на рис. 4.

На рис. 5 приведен эскиз конструкции одной из составных частей ФУ «Антennaная система» – «Жгут» (см. рис. 4).

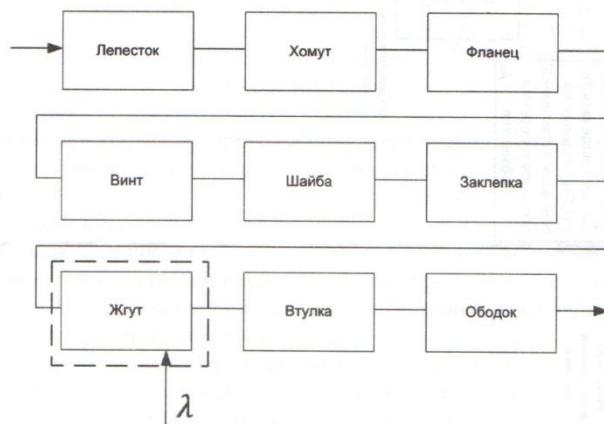


Рис. 4. Фрагмент Схемы расчета надежности ФУ «Антennaная система»

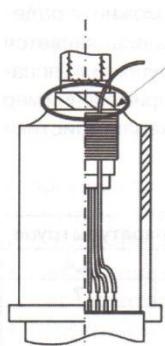


Рис. 5. Конструкция жгута

Рассмотрим расчет характеристик надежности механических элементов на примере «Прокладки» (см. рис. 5).

Для расчета интенсивности отказов прокладки в режиме эксплуатации воспользуемся математической моделью, приведенной в [9]:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot C_P \cdot C_Q \cdot C_{DL} \cdot C_H \cdot C_F \cdot C_V \cdot C_T \cdot C_N \quad (2)$$

где:  $\lambda_{SE,B} = 2,4 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}]$  – базовая интенсивность отказов;  $C_P$  – коэффициент, зависящий от рабочего давления [отн. ед.];  $C_Q$  – коэффициент, зависящий от допустимой утечки [отн. ед.];  $C_{DL}$  – коэффициент, зависящий от внутреннего диаметра [отн. ед.];  $C_H$  – коэффициент, зависящий от напряжения контакта [отн. ед.];  $C_F$  – коэффициент, зависящий от шероховатости [отн. ед.];  $C_V$  – коэффициент, учитывающий вязкость жидкости [отн. ед.];  $C_T$  – температурный коэффициент [отн. ед.];  $C_N$  – коэффициент учитывающий наличие загрязняющих веществ [отн. ед.].

В свою очередь, коэффициенты математической модели (2) рассчитываются по следующим формулам [9]:

$$C_P = \left( \frac{P_1 - P_2}{3000} \right)^2$$

где  $P_1$  – давление, оказываемое на прокладку в системе;  $P_2$  – нормальное атмосферное давление.

$$C_Q = \frac{0,055}{Q_f}$$

где  $Q$  – допустимая утечка.

$$C_{DL} = 54 \cdot D_{SL} + 0,008128$$

где  $D_{SL}$  – внутренний диаметр.

$$C_H = \left( \frac{M}{\frac{C}{0,55}} \right)^{4,3}$$

где  $M$  – мейеровская твердость;  $C$  – напряжение контакта.

$$C_F = \frac{f^{1,65}}{0,82}$$

где  $f$  – шероховатость элемента.

$$C_V = \frac{v}{3,83 \cdot 10^{-8}}$$

где  $v$  – вязкость.

$$C_T = \frac{1}{2^{\frac{T_r - T_o}{18}}}$$

где  $T_r$  – допустимая температура;  $T_o$  – рабочая температура.

$$C_N = \left( \frac{C_0}{C_{10}} \right)^3 \cdot N_{10} \cdot GPM_r$$

где  $C_0$  – системный размер фильтра;  $C_{10}$  – стандартный системный размер фильтра;  $GPM_r$  – скорость потока.

Необходимые для расчёта коэффициентов  $C_i$  значения воздействующих факторов (ВФ) можно определить по ГОСТ Р В 20.39.304 [14]. «Прокладка» входит в состав «Жгута», а тот, в свою очередь, является составной частью ФУ «Антennaя система», который по уровню воздействий относится к группе 5.4 (аппаратура, предназначенная для установки на внешней поверхности космических аппаратов без применения мер защиты) по классификации [14]. Для этой группы в [14] приведены следующие ВФ, их характеристики и значения (см. табл. 1).

Таблица 1. Перечень и характеристики ВВФ

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора	Значение воздействующего фактора для аппаратуры групп			
		5.1	5.2	5.3	5.4
1	2	4	5	6	7
Синусоидальная вибрация	Амплитуда ускорения, $\text{м}/\text{с}^2$ (g)		100 (10)		
	Диапазон частот, Гц		5-2000		
Случайная вибрация	Среднеквадратическое значение			По ТТЗ (T3)	
	Диапазон частот, Гц		20-2000		
Акустический шум	Диапазон частот, Гц		150-10 000		
	Уровень звукового давления, дБ		150		
Механический удар одиночного действия	Пиковое ударное ускорение, $\text{м}/\text{с}^2$ (g)		1500 (150)		
	Длительность действия ударного ускорения, мс		0,3-1		
Механический удар многократного действия	Пиковое ударное ускорение, $\text{м}/\text{с}^2$ (g)		50 (5)		
	Длительность действия ударного ускорения, мс		2-10		
Линейное ускорение	Значение ускорения, $\text{м}/\text{с}^2$ (g)		150 (15)		
Повышенное давление воздуха или газа	Значение при эксплуатации, Па (мм. рт. ст.)	$1,3 \cdot 10^5$ (1000)	$3,1 \cdot 10^5$ (2300)	-	
		$1,3 \cdot 10^5$ (1000)	$3,1 \cdot 10^5$ (2300)	По ТТЗ (T3)	
Атмосферное пониженное давление	Значение при эксплуатации, Па (мм. рт. ст.)		$1,2 \cdot 10^4$ (90)		
		$4,7 \cdot 10^4$ (350)	$4 \cdot 10^4$ (300)	$1,3 \cdot 10^{-4}$ ( $10^{-6}$ )	$1,3 \cdot 10^{-11}$ ( $10^{-13}$ )
		$4,7 \cdot 10^4$ (350)	$4 \cdot 10^4$ (300)	$1,3 \cdot 10^{-4}$ ( $10^{-6}$ )	
		$4,7 \cdot 10^4$ (350)	$4 \cdot 10^4$ (300)	$1,3 \cdot 10^{-7}$ ( $10^{-9}$ )	$1,3 \cdot 10^{-11}$ ( $10^{-13}$ )
		$4,7 \cdot 10^4$ (350)	$4 \cdot 10^4$ (300)		По ТТЗ (T3)

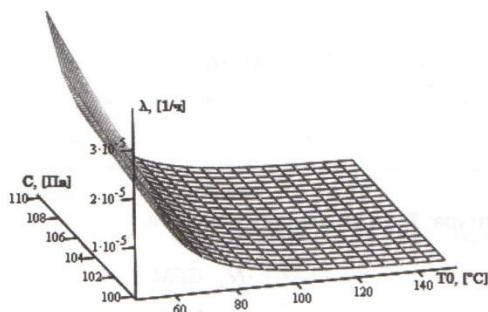


Рис. 6. Зависимость интенсивности отказов прокладки от изменения напряжения контакта и рабочей температуры

Исходя данных, приведенных в табл. 1 для группы 5.4, получим следующие значения параметров, необходимые для расчета коэффициентов модели (2):

- давление, оказываемое на прокладку в системе:

$$P_1 = 2000 + 1,3 \cdot 10^{-11} (\text{Па});$$

- допустимая утечка:  $Q = 7,864 \cdot 10^{-5} (\text{м}^3/\text{ч})$ ;
- внутренний диаметр:  $D_{SL} = 0,0254 (\text{м})$ ;
- мейеровская твердость:  $M = 10000 (\text{Па})$ ;
- напряжение контакта:  $C = 10000 \pm 10 (\text{Па})$ ;
- шероховатость:  $f = 2,032 \pm 0,01 (\text{мкм})$ ;
- допустимая температура:  $T_r = 100 (\text{°C})$ ;
- рабочая температура:  $T_o = 50 (\text{°C})$ ;
- вязкость:  $\nu = 2,57 \cdot 10^{-8} (\text{кг/с·м})$ ;
- скорость потока:  $GPM_r = 0,254 (\text{м}^3/\text{ч})$ ;
- стандартный системный размер фильтра:  $C_{10} = 10^{-6} (\text{м})$ ;
- системный размер фильтра:  $C_0 = 2 \cdot 10^{-6} (\text{м})$ ;

Тогда эксплуатационная интенсивность отказов прокладки ( $\lambda_{SE}$ ) по модели (2) равна:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot \left[ \left( \frac{P_1 - P_2}{3000} \right)^2 \cdot \left( \frac{0,055}{Q_r} \right) \cdot \left[ (54 \cdot Ds/l + 0,008128) \cdot \left( \frac{M}{C} \right)^{4,3} \cdot \left( \frac{f^{1,65}}{0,55} \right) \cdot \left( \frac{\nu}{0,82} \right) \cdot \left( \frac{C_0}{10} \right)^3 \cdot N_{10} \cdot GPM_r \right] \right] \cdot \left[ \frac{1}{2^{18}} \cdot \left( \frac{T_r - T_o}{18} \right) \right] = 6,367 \cdot 10^{-4} (1/\text{ч}).$$

Примечание: В расчете принято, что  $C = 10000 [\text{Па}]$ ;  $f = 2,032 [\text{мкм}]$ .

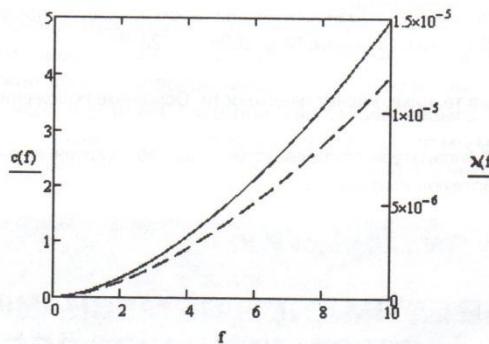


Рис. 8. Графики зависимостей коэффициента  $C_f$  и интенсивности отказов прокладки от шероховатости

На рис. 6 приведен график зависимости  $\lambda_{SE}$  от изменения напряжения контакта ( $C$ ) и рабочей температуры ( $T_0$ ), на рис. 7 приведены графики зависимостей  $\lambda_{SE}$  и коэффициента  $C_P$  от изменения рабочего давления  $P_s$ , а на рис. 7 – графики зависимостей  $\lambda_{SE}$  и коэффициента  $C_f$  от изменения шероховатости прокладки ( $f$ ).

Как видно из рис. 6-8, при увеличении параметров  $P_s$ ,  $f$ ,  $C$  и  $T_0$  значения как коэффициентов  $C_P$  и  $C_f$ , так и эксплуатационной интенсивности отказов прокладки существенно возрастают.

Аналогично были проведены расчёты характеристик надежности остальных элементов «Жгута» (рис. 5), ФУ «Антennaя система» (рис. 3, 4) и аппаратуры «КУРС» в целом [13]. Как показали результаты расчетов,

средняя наработка аппаратуры «КУРС» с учетом надежности механических элементов составляет не менее 2000 ч.

Таким образом, проведенные расчеты, с одной стороны, лишний раз подтвердили необходимость учета механических элементов при расчетной оценки надежности ЭС, а, с другой стороны, показали высокую трудоемкость «ручных» расчетов. Поэтому одним из приоритетных направлений развития функциональных возможностей программного комплекса АСОНИКА-К [4] является создание базы данных по характеристикам надежности и математическим моделям механических элементов, модификация интерфейса пользователя и, на этой основе, автоматизация инженерных расчетов надежности ЭС, содержащих механические элементы.

## Литература

1. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчёта показателей надёжности.
2. Надежность ЭРИ: Справочник. / 22 ЦНИИ МО РФ. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.
3. ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
4. Шалумов А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий: Том 1. / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, В.В. Жаднов и др. // Под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 538 с.
5. Сотсков Б.С. Основы теории и расчёта надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. / Б.С. Сотсков. – М.: Высшая школа, 1970. – 270 с.
6. Дружинин Г.В. Методы оценки и прогнозирования качества. / Г.В. Дружинин. – М.: Изд-во «Радио и связь», 1982. – 160 с.
7. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – Киев: Логос, 2002. – 486 с.
8. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.
9. NSWC-98/LE1. Mechanical The Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment. Military and Commercial, United States Provides for analyzing a broad range of mechanical parts (seals, springs, solenoids, bearings, gears, etc.).
10. Шавыкин Н.А. Оценка показателей безотказности механических элементов продукции приборостроения. / Н.А. Шавыкин, Б.П. Петрухин. // Датчики и Системы, № 6, 2006. – с. 28-35.
11. <http://www.relex.com/>
12. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
13. <http://www.niitp.ru/>
14. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.

Markin A.V., Polesskey S.N., Zhadnov V.V.

## METHODS OF THE ESTIMATION OF MECHANICS ELEMENTS RELIABILITY AND ELECTROMECHANICS OF ELECTRONIC MEANS AT EARLY DESIGN STAGES

The classical apparatus of reliability theory of complex systems which is based on hypothesis about constancy failure rate of elements, is widely used in engineering practice for the analysis of reliability electronic means. At carrying out of these jobs value failure rate of mechanics and electromechanics elements are defined in the directory «Надежность ЭРИ» or aren't considered at all. If to take into consideration that last edition of the Directory is dated 2006, and the share of the standardized of mechanics and electromechanics elements in modern electronic means is constantly reduced to become obvious requirement for engineering methods of settlement estimation of reliability such elements.

**Keywords:** reliability, designing, electronic means, mechanics and electromechanics elements, mathematical model, failure rate