

4. Коршунов, А. Импульсные преобразователи напряжения переменного тока. / А. Коршунов. // Силовая электроника. - 2006. - №4.
5. Гаалас, Э. Казакевич А. Звуковые усилители класса D: Что, зачем и как? / Э. Гаалас, А. Казакевич. // Компоненты и технологии. - 2006. - № 11.
6. Савельев Е. Усилитель класса D для сабвуфера. / Е. Савельев. // Радио. – 2003. - № 5.

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Жаднов В.В.

Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ

Рассмотрены вопросы расчетной оценки надежности электронной аппаратуры со вспомогательными элементами. Показано, что в качестве вспомогательного элемента может выступать жидкостная система охлаждения. Приведена классификация параметров модели интенсивности отказов механических элементов для класса «Фильтры» и даны рекомендации по формированию базы данных.

Reliability prediction models filters for liquid cooling systems electronic equipment. V.V. Zhadnov

The problems of estimation of reliability of electronic equipment with accessories. It is shown that as a support element can be a liquid cooling system. A classification of the model parameters of failure rate of mechanical elements for the class «Filters» is given and offers advice on the formation of a database.

Исследование осуществлено в рамках «Программы фундаментальных исследований» НИУ ВШЭ в 2013 году. Надежность электронной аппаратуры (ЭА) в значительной степени зависит от тепловых режимов электрорадиоизделий (ЭРИ). Для обеспечения тепловых режимов ЭРИ используются разнообразные конструкторские решения, в т.ч. и системы охлаждения (СО) [1]. Очевидно, что отказ СО непосредственно влияет на безотказность БА, причем отказ СО может как привести к немедленному отказу ЭА, так и к снижению характеристик ее безотказности. А из этого следует, что при расчетах надежности ЭА необходимо учитывать и надежность «вспомогательных элементов» (ВЭ), к которым относится СО.

Например, если критерием отказа аппаратуры является отказ любого ЭРИ или ВЭ, то вероятность безотказной работы $P(t)$ равна:

$$P(t) = \left(\prod_{n=1}^N e^{-\lambda_n t} \right) \cdot P_{ВЭ}(t),$$

где: t - время; λ_n - интенсивность отказов ЭРИ; N - число ЭРИ в ЭА; $P_{ВЭ}(t)$ - безотказной работы СО.

Расчетные соотношения для $P(t)$, учитывающие изменения λ_n при отказах ВЭ, можно найти, например, в [2]. При расчетах $P(t)$ с использованием этих соотношений необходимо задать значение интенсивности отказов ВЭ. Поскольку СО состоит из механических элементов (МЭ), то расчеты можно провести по методике, изложенной в [3].

Однако в [3] приведены модели не для всех классов МЭ, которые входят в состав жидкостных СО (например, нет класса «Фильтры»), а формулы настолько

упрощены, что не позволяют учитывать влияние особенностей конструктивно-технологического исполнения МЭ и режима его применения в СО на эксплуатационную интенсивность отказов [4].

Поэтому для оценки надежности МЭ большой интерес представляют модели интенсивности отказов, регламентированные американским стандартом NSWC-2011/LE10 [5], разработанным специалистами Кардерокской дивизии ВМФ США. Ряд вопросов, связанных с возможностью применения моделей этого стандарта для расчетов надежности механических и электромеханических элементов электронных средств были рассмотрены в [6]. В развитие этого направления исследований, рассмотрим особенности применения данного стандарта для оценки характеристик надежности элементов жидкостных СО на примере класса «Фильтры», который (как уже отмечалось выше) отсутствует в отечественном документе [3].

Математическая модель интенсивности отказов (λ_F) для класса «Фильтры» имеет следующий вид:

$$\lambda_F = \lambda_{F,B} \cdot C_{DP} \cdot C_{CF} \cdot C_V \cdot C_{CS}, \quad (1)$$

где: $\lambda_{F,B}$ - базовая интенсивность отказов фильтра (фильтрующего элемента); C_{DP} - коэффициент, учитывающий влияние перепада давления жидкости на входе и выходе фильтра; C_{CF} - коэффициент, учитывающий влияние частоты пульсаций потока жидкости из-за работы насоса; C_V - коэффициент, учитывающий влияние внешних вибрационных воздействий; C_{CS} - коэффициент, учитывающий влияние температуры жидкости в момент включения насоса.

Значение $\lambda_{F,B}$ в формуле (1) принимается постоянной для всех типоминималов фильтров.

Значение коэффициента C_{DP} рассчитывается по модели:

$$C_{DP} = \frac{P'_i \cdot a^2 - P'_o \cdot b^2 + \frac{a^2 \cdot b^2 (P'_o - P'_i)}{r^2}}{P_i \cdot a^2 - P_o \cdot b^2 + \frac{a^2 \cdot b^2 (P_o - P_i)}{r^2}}, \quad (2)$$

где: P'_i - давление на внутреннюю поверхность в режиме применения; P'_o - давление на внешнюю поверхность в режиме применения; P_i - давление на внутреннюю поверхность в номинальном рабочем режиме по ТУ; P_o - давление на внешнюю поверхность в номинальном рабочем режиме по ТУ; a - внутренний радиус фильтра; b - внешний радиус фильтра; r - радиус, соответствующий поверхности с максимальной нагрузкой.

Значение r зависит от конструктивного исполнения фильтра. Если конструкция фильтра такова, что поток жидкости в фильтре направлен от внешней поверхности к внутренней, то $r = b$, в противном случае $r = a$.

Значение коэффициента C_{CF} рассчитывается по модели:

$$C_{CF} = \frac{1,7 \cdot a^2 \cdot (2 \cdot P'_{i\max} - 0,3 \cdot P'_{i\min}) - 0,7 \cdot P'_{o\max} \cdot (a^2 + b^2) - 0,3 \cdot P'_{o\min} \cdot (a^2 + b^2)}{1,4 \cdot T_s \cdot (b^2 - a^2)}, \quad (3)$$

где: $P'_{i\min}$ - минимальное давление на внутреннюю поверхность в режиме применения; $P'_{i\max}$ - максимальное давление на внутреннюю поверхность в режиме применения; $P'_{o\min}$ - минимальное давление на внешнюю поверхность в режиме применения; $P'_{o\max}$ - максимальное давление на внешнюю поверхность в режиме применения; T_s - предел прочности материала фильтра.

Значение коэффициента C_V зависит от характеристик вибрационного воздействия на фильтр на объекте установки и определяется по данным стандарта NSWC-06/LE10 [5].

Значение коэффициента C_{CS} рассчитывается по модели:

$$C_{CS} = \left(\frac{V_{coldstart}}{V_{normal}} \right)^x, \quad (4)$$

где: $V_{coldstart}$ - вязкость жидкости в момент включения насоса; V_{normal} - вязкость жидкости при температуре нормального рабочего режима; x - коэффициент, зависящий от типа жидкости.

Значение коэффициента x так же определяется по данным стандарта NSWC-06/LE10 [5].

Исходные данные, необходимые для расчета λ_F фильтра по формулам (1)-(4) сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Исходные данные для расчета λ_F фильтра

№ п/п	Обозначение	Наименование	Ед. измерения	Примечание
1	2	3	4	5
1	$\lambda_{F,B}$	Базовая интенсивность отказов	failures/million hours	NSWC-06/LE10
2	a	Внутренний радиус фильтра	in	ТУ на фильтр
3	b	Внешний радиус фильтра	in	ТУ на фильтр
4	r	Радиус, соответствующий поверхности с максимальной нагрузкой	in	ТУ на фильтр
5	P_i	Давление на внутреннюю поверхность в номинальном рабочем режиме	psi	ТУ на фильтр
6	P'_i	Давление на внутреннюю поверхность в режиме применения	psi	ТЗ на объект
7	P_o	Давление на внешнюю поверхность в номинальном рабочем режиме	psi	ТУ на фильтр
8	P'_o	Давление на внешнюю поверхность в режиме применения	psi	ТЗ на объект
9	P'_{imax}	Максимальное давление на внутреннюю поверхность в режиме применения	psi	ТЗ на объект
10	P'_{Omax}	Максимальное давление на внешнюю поверхность в режиме применения	psi	ТЗ на объект
11	P'_{imin}	Минимальное давление на внутреннюю поверхность в режиме применения	psi	ТЗ на объект
12	P'_{Omin}	Минимальное давление на внешнюю поверхность в режиме применения	psi	ТЗ на объект
13	T_s	Предел прочности материала фильтров	lbs/in ²	ТУ на материал
14	C_v	Эмпирический коэффициент, зависящий от характеристик	-	ТЗ на объект, NSWC-06/LE10

		вибрационного воздействия		
15	$\nu(T_{\text{normal}})$	Вязкость жидкости при температуре режима применения	Centistokes	T3 на объект, TУ на жидкость
16	$\nu(T_{\text{coldstart}})$	Вязкость жидкости в момент включения насоса	Centistokes	T3 на объект, TУ на жидкость
17	x	Эмпирический коэффициент, зависящий от типа жидкости	-	T3 на объект, NSW-06/LE10

Как следует из таблицы 1, для расчета λ_F необходимо задать 17 параметров, из которых только 3 ($\lambda_{F,B}$, C_V и x - см. столбец 5 таблицы 1) в явном виде представлены в стандарте NSW-06/LE10 [5]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что основная проблема расчета λ_F состоит в определении численных значений ее параметров. Поэтому в этом стандарте для ряда параметров приведены рекомендации по оценке их численных значений. Так, значения $\nu(T_{\text{normal}})$ и $\nu(T_{\text{coldstart}})$ можно определить по таблице вязкостей жидкостей (см. рисунок 1).

Liquid	Viscosity in Centistokes, ν								X
	0 C	20 C	40 C	60 C	80 C	100 C	125 C	150 C	
Water	1.8	1.0	0.75	0.56	0.35	0.28			0.2
Sea water	1.9	1.1	0.87						0.2
Gasoline, 0.68 s.g.	0.51	0.42	0.35	0.30					0.3
Kerosene, 0.81 s.g.	3.7	2.3	1.6	1.2	0.96				0.2
Light lubricating oil, 0.91 s.g.	390	96	34	16	8.7	5.4			0.2
Heavy lubricating oil, 0.91 s.g.	3492	500	123	43	20	10			0.7
SAE 10 oil	555	122	41	14	8.7	5.4	3.3	2.2	0.5
SAE 20 oil	1141	213	65	22	11	6.8	4.4	2.8	0.6
SAE 30 oil	2282	358	101	33	15	9.4	5.5	3.6	0.7
SAE 40 oil	4640	624	137	51	26	13	7.8	5.0	0.8
SAE 50 oil	8368	1179	251	76	32	17	9.5	6.4	0.9
SAE 60 oil	15215	2206	380	107	38	20	11	7.5	1.0
SAE 70 oil	23203	2853	456	137	49	25	14	8.5	1.1

Рисунок 1. Зависимости вязкости жидкостей от температуры

Как видно из рисунка 1, в таблице содержатся значения вязкостей только для различных видов жидкостей, а не для конкретных их марок (Data Sheet). Очевидно, что при прогнозировании надежности фильтра на этапе его проектирования это не столь важно, т.к. на этом этапе ТУ просто нет, а вся автоматизация расчетов сводится к простой автоматизации вычислений по формулам (1)-(4). Другое дело расчет λ_f промышленных фильтров для конкретного режима применения, т.к. в этом случае можно сформировать базу данных (БД) на основе соответствующих ТУ.

Для формирования такой базы данных, исходя из вышензложенного и источников получения исходных данных (см. столбец 5 таблицы 1), можно выделить следующие классификационные признаки:

- конструктивно-технологические параметры (данные ТУ на фильтры, ТУ на материалы, ТУ на жидкости)

- параметры режима применения (данные ТЗ на объект установки)

- эмпирические коэффициенты (данные стандарта NSW-06/LE10)

Результаты проведенной классификации приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры и коэффициенты модели эксплуатационной интенсивности отказов

Обозначение	Наименование	Значение	Ед. измерения	Примечание
1	2	3	4	5
Параметры ТУ				
	Типономинал (ТУ) фильтра	Из БД	-	ТУ на фильтр
a	Внутренний радиус фильтра	Из БД	in	ТУ на фильтр
b	Внешний радиус фильтра	Из БД	in	ТУ на фильтр
P_i	Давление на внутреннюю поверхность в номинальном рабочем режиме	Из БД	psi	ТУ на фильтр
P_o	Давление на внешнюю поверхность в номинальном рабочем режиме	Из БД	psi	ТУ на фильтр
T_{normal}	Температура жидкости в номинальном рабочем режиме	Из БД	$^{\circ}C$	ТУ на фильтр
	Марка материала фильтра	Из БД	-	ТУ на фильтр
	Марки (ТУ) материалов фильтров	Из БД	-	ТУ на материалы
T_s	Пределы прочности материалов фильтров	Из БД	lbs/in ²	ТУ на материалы
	Типы (ТУ) жидкостей	Из БД	-	ТУ на фильтр
	Типы (ТУ) жидкостей	Из БД	-	ТУ на жидкости
$v(T)$	Зависимости вязкости жидкости от температуры	Из БД	Centistokes	ТУ на жидкости
Параметры режима применения				
	Типономинал (ТУ) фильтра	Список из БД	-	ТЗ на объект
P'_i	Давление на внутреннюю поверхность в режиме применения	-	psi	ТЗ на объект
$\Delta P'_i$	Допуск на давление на	-	psi	ТЗ на объект

	внутреннюю поверхность в режиме применения			
P'_o	Давление на внешнюю поверхность в режиме применения	-	psi	ТЗ на объект
$\Delta P'_o$	Допуск на давление на внешнюю поверхность в режиме применения	-	psi	ТЗ на объект
	Тип (ТУ) рабочей жидкости	Список из БД	-	ТЗ на объект
$T_{coldstart}$	Температура жидкости в момент включения насоса	-	$^{\circ}C$	ТЗ на объект
	Вид объекта установки	Список из БД	-	ТЗ на объект
Эмпирические коэффициенты				
λ_{FB}	Базовая интенсивность отказов	Из БД	failures/million hours	NSWC-06/LE10
x	Коэффициент, зависящий от типа жидкости	Из БД	-	NSWC-06/LE10
C_V	Авиационные и др. мобильные объекты установки	Из БД	-	NSWC-06/LE10
	Прочие объекты установки	Из БД		

При формировании раздела «Параметры ТУ» учитывалось, что величина параметра γ определяется конструкцией фильтра и может принимать одно из двух значений: a или b . Кроме того, в этом случае, формулу (2) можно представить в следующем виде:

$$C_{DP} = \begin{cases} \frac{P'_o}{P'_i}, n_{pur} = b \\ \frac{P'_i}{P'_o}, n_{pur} = a \end{cases}.$$

При формировании раздела «Параметры режима применения» учитывалось, что значения давлений на одной и той же поверхности в режиме применения связаны соотношениями:

$$P'_i = \frac{P'_{i\max} + P'_{i\min}}{2}; P'_o = \frac{P'_{o\max} + P'_{o\min}}{2},$$

т.е., можно записать, что:

$$P'_{i\max} = P'_i + \Delta P'_i; P'_{i\min} = P'_i - \Delta P'_i; P'_{o\max} = P'_o + \Delta P'_o; P'_{o\min} = P'_o - \Delta P'_o,$$

где $\Delta P'_i$ - допуск на давление на внутреннюю поверхность в режиме применения; $\Delta P'_o$ - допуск на давление на внешнюю поверхность в режиме применения.

Таким образом, при использовании БД по конструктивно-технологическим параметрам фильтров (фильтрующих элементов), при автоматизированном расчете λ_F необходимо задать не 17, а только 8 параметров (параметры режима применения), причем численные значения задаются только для пяти из них (P'_i , $\Delta P'_i$, P'_o , $\Delta P'_o$ и $T_{coldstart}$), а оставшиеся («Типономинал (ТУ) фильтра», «Тип (ТУ) рабочей жидкости» и «Вид объекта установки») будут выбираться из списков, содержащихся в БД (см. таблицу 2).

Литература

1. Жаднов, В.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств: учебное пособие. / В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов - М.: Солон-ПРЕСС, 2012. - 464 с. - Сер. «Библиотека инженера».
2. Полесский, С. Обеспечение надежности НКРТС. / С. Полесский, В. Жаднов. - LAP Lambert Academic Publishing, 2011. - 280 с.
3. Шавыкин, Н.А. Методика оценки показателей безотказности технических средств. / Н.А. Шавыкин, Б.П. Петрухин, Е.М. Жидомирова. - М.: ИПУ РАН, 1998. - 79 с.
4. Zhadnov, V. Methods and means of the estimation of indicators of reliability of mechanical and electromechanical elements of devices and systems. [Электронный ресурс]. / V. Zhadnov. // Reliability: Theory & Applications: e-journal. 2011. - Vol. 2, No 4, p. 94-102. - Режим доступа: http://www.gnedenko-forum.org/Journal/2011/042011/RTA_4_2011-07.pdf.
5. NSWC-06/LE10. Handbook of Reliability prediction Procedures for Mechanical Equipment.
6. Маркин, А.В. Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования. / А.В. Маркин, С.Н. Полесский, В.В. Жаднов. // Надежность. - 2010. - № 6 (33). - с. 63-70.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РЭС ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ

Затылкин А.В., Голушко Д.А. Рындин Д.А.
г. Пенза ФБГОУ ВПО «ПГУ»

Предложен волновой метод исследования динамических характеристик упругих конструкций РЭС при внешних механических воздействиях. Показана актуальность и теоретические основы метода. Приведены аналитические расчеты стержневых элементов конструкций РЭС, а также результаты экспериментов проведенных предложенным методом.

Study of dynamic characteristics of the core elements of the recs wave method.
Zatylykin A.V., Golushko D.A., Ryndin D.A.

Proposed wave method of research of dynamic characteristics of elastic structures of the RECs in external mechanical impacts. The urgency of this and theoretical foundations of the method. The analytical calculations of the core elements of the RECs, as well as the results of experiments conducted by the proposed method.

Силовыми элементами конструкций радиоэлектронных средств (РЭС) могут быть стержни, рамы, стержневые каркасы. При эксплуатации на подвижных носителях в указанных конструкциях могут возникать вибрации. Возникновение резонансных колебаний в этих конструкциях и их элементах оказывает существенное влияние на функционирование электронного средства в целом.

Поэтому, по-прежнему остаётся актуальной задача исследования и анализа работы конструкций и их элементов в условиях динамических внешних воздействий. При этом сочетание экспериментальных и теоретических методов исследования даёт хорошие результаты при решении различных практических задач.