

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. Л. Лушпа, В. В. Жаднов (научный руководитель)

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 20
E-mail: ilushpa@hse.ru*

Данная работа посвящена сравнительному анализу методик оценки надежности электромеханических элементов, входящих в состав радиоэлектронной аппаратуры. Рассмотрены основные методики, позволяющие дать оценку надежности электромеханическим и механическим компонентам. Проведено сравнение этих методик. Сделаны выводы.

Современная радиоэлектроника имеет широкое развитие. Применяются новые технологии, усложняются схемы, обновляется элементная база. Всё это создаёт конструкторам и проектировщикам определенные сложности. Одной из них является повышение требований по надежности, которые необходимо обеспечить уже на ранних этапах проектирования [1].

Проблемой оценки надежности любой аппаратуры является то, что состоит она не только из электронной составляющей, но и из механической и электромеханической, которые также необходимо учитывать, чтобы получить более точный результат [2].

Так как отказ механики в равной степени может привести к отказу всего устройства. К тому же эта проблема усложняется допущением, что если в состав аппаратуры входят механические или электромеханические элементы, обладающие необходимой стойкостью, то она абсолютна надежна. С учетом таких поправок возникает вопрос использования методик расчета [3–5].

Среди методик по расчету механических и электромеханических компонентов [6] можно выделить РМ 446 87 [7] и американский стандарт NSWC [8], разработанный Кардерокской дивизией ВМФ США, а также ряд электромеханических компонентов представлен в справочнике «Надежность ЭРИ» [9] и американском стандарте MIL-HDBK-217F [10].

Ниже приведены общие модели расчета представленных методик.

В справочнике «Надежность ЭРИ» значения интенсивности отказов рассчитывается по следующей модели:

$$\lambda_o = \lambda_o \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (1)$$

где λ_o – базовая интенсивность отказов типа, рассчитанная по результатам испытаний на безотказность, долговечность, ресурс; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n – число учитываемых факторов.

Коэффициенты, входящие в математические модели интенсивности отказов, условно можно разделить на две группы:

– первая группа коэффициентов является общей для моделей большинства классов, групп и типов изделий и характеризует режимы и условия их эксплуатации, уровень качества производства;

– вторая группа коэффициентов включается в модели конкретных классов (групп) и характеризует зависимость интенсивности их отказов в заданных условиях эксплуатации от конструкционных, функциональных и технологических особенностей.

В РМ 446 27 приводится методика оценки интенсивности отказов для механических элементов, таких как соединения, оси, валы, подшипники, прокладки, мембраны, пружины, муфты, часовые устройства и др. В общем виде интенсивность отказов рассчитывается по формуле

$$\lambda_3 = \lambda_0 \cdot \prod_{i=1}^I a_i, \quad (2)$$

где λ_0 – интенсивность отказов соединения, детали или комплексного изделия в номинальном режиме и нормальных условиях (температура окружающей среды 20 ± 10 °С; относительная влажность воздуха 30...70 %; атмосферное давление $0,825 \dots 1,06 \cdot 10^5$ Па; отсутствие вибрации и ударов); a_i – коэффициенты, учитывающие конструктивные особенности детали, условия производства и эксплуатации детали.

Значение a_i рассчитывается по формуле

$$a_i = \prod_{j=1}^I K_{ij}, \quad (3)$$

В стандарте NSWC приведена методика, дающая оценку показателей безотказности и ремонтпригодности механического оборудования.

Математическая модель интенсивности отказов имеет следующий вид:

$$\lambda_p = \lambda_{p,b} \cdot \prod_{i=1}^n C_i, \quad (4)$$

где $\lambda_{p,b}$ – базовая интенсивность отказов типа (группы), рассчитанная по результатам испытаний на безотказность, долговечность, ресурс; C_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n – число учитываемых факторов.

В стандарте MIL-HDBK-217F приведена методика, дающая оценку показателей безотказности основных типов электрорадиоизделий и механических компонентов.

Математическая модель интенсивности отказов имеет следующий вид:

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \prod_{i=1}^n \pi_i, \quad (5)$$

где $\lambda_{p,b}$ – базовая интенсивность отказов типа (группы), рассчитанная по результатам испытаний на безотказность, долговечность, ресурс; π_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n – число учитываемых факторов.

Каждая из приведенных методик имеет ряд недостатков [11]. Для их выявления был проведен анализ этих методик.

Так как не все методики включают математические модели механических элементов, поэтому изначально был рассмотрены методики, посвященные исключительно механике на примере класса «Подшипники».

В РМ 446 27 математическая модель класса подшипники имеет вид

$$\lambda_3 = \lambda_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot a_k \quad (6)$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов; K_{11} – коэффициент, учитывающий воздействие вибрации; K_{12} – коэффициент, учитывающий воздействие ударов; K_{13} – коэффициент, учитывающий воздействие климата; K_{14} – коэффициент, учитывающий воздействие ка-

чества обслуживания; K_{15} – коэффициент, учитывающий воздействие качества изготовления; a_k – коэффициент зависимости уплотнения.

В NSWC математическая модель класса подшипники имеет вид

$$\lambda_{\vartheta} = \left(\frac{10^6}{n} \right) \cdot \left(\frac{L_S}{L_A} \right)^y \cdot \left(\frac{0.223}{\left(\ln \left(\frac{100}{R} \right) \right)^{2/3}} \right) \cdot \left(\frac{v_0}{v_L} \right)^{0.54} \cdot C_{CW} \cdot C_t \cdot C_{SF} \cdot C_C,$$

где n – рабочая скорость; L_S – грузоподъемность подшипника; L_A – эквивалентная радиальная нагрузка; y – константа, равная для шарикового подшипника 3.0, для роликового 3,3; R – коэффициент надежности; v_0 – вязкость заводской смазки; v_L – вязкость используемой смазки; C_{CW} – поправочный коэффициент, учитывающий загрязнение воды; C_t – поправочный коэффициент, учитывающий рабочую температуру; C_{SA} – поправочный коэффициент, учитывающий эксплуатацию; C_C – поправочный коэффициент, учитывающий загрязнение.

Результаты расчета интенсивность отказов подшипника NSK приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значение интенсивности отказов подшипника NSK

| № п/п | Наименование методики | Значение интенсивности отказов, ч ⁻¹ |
|-------|-----------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | PM 446 87 | $0,73 \cdot 10^{-6}$ |
| 2 | NSWC | $3,2 \cdot 10^{-6}$ |

Как видно из табл. 1, подшипник NSK по PM 446 87 имеет более низкую интенсивность отказов, но это получено за счёт того, что в математической модели отсутствует ряд коэффициентов учета геометрических и физико-химических свойств элемента. Поэтому для расчета механических компонентов лучше использовать методику NSWC.

С электромеханическими компонентами всё обстоит более сложно [12]. Для примера проведен анализ класса «Электродвигатели».

Математическая модель, представленная в «Надежность ЭРИ», имеет вид

$$\lambda_{\vartheta} = (\lambda_{\sigma.c.g.эл} \cdot K_t + \lambda_{\sigma.c.g.м} \cdot K_{T,nt}) \cdot K_{\vartheta}, \quad (7)$$

где: $\lambda_{\sigma.c.g.эл}$ – базовая среднегрупповая интенсивность электрических отказов для температуры окружающей среды $t=25^{\circ}C$ на время минимальной наработки $T_{н,м}$; K_t – коэффициент влияния температуры нагрева изоляции; $\lambda_{\sigma.c.g.м}$ – базовая среднегрупповая интенсивность механических отказов на время наработки при температуре окружающей среды $t=25^{\circ}C$; $K_{T,nt}$ – коэффициент влияния времени наработки, частоты вращения и температуры окружающей среды на интенсивность механических отказов; K_{ϑ} – коэффициент жесткости условий эксплуатации.

Математическая модель, представленная в «MIL-HDBK-217F» имеет вид

$$\lambda_p = \left[\frac{t^2}{\alpha_B^3} + \frac{1}{\alpha_W} \right], \quad (8)$$

где t – время работы двигателя; α_B и α_W – параметры распределения Вейбулла для подшипника и обмотки.

Значения параметров распределения Вейбулла имеют вид

$$\alpha_B = \left[10^{\left(2.534 \cdot \frac{2357}{T_A + 273}\right)} + \frac{1}{10^{\left(20 \cdot \frac{4500}{T_A + 273}\right)} + 300} \right]^{-1};$$

$$\alpha_W = 10^{\left[\frac{2357}{T_A + 273} - 1.83\right]},$$

где T_A – температура окружающей среды.

Математическая модель, представленная в «NSWC» имеет вид:

$$\lambda_M = (\lambda_{M,B} \cdot C_{SF}) + \lambda_{WI} + \lambda_{BS} + \lambda_{ST} + \lambda_{AS} + \lambda_{BE} + \lambda_{GR} + \lambda_C, \quad (9)$$

где: $\lambda_{M,B}$ – базовая интенсивность отказов электродвигателя; C_{SF} – коэффициент влияния нагрузки; λ_{WI} – интенсивность отказов обмотки; λ_{BS} – интенсивность отказов щёток; λ_{ST} – интенсивность отказов корпуса статора; λ_{AS} – интенсивность отказов вала; λ_{BE} – интенсивность отказов подшипника; λ_{GR} – интенсивность отказов зубчатых передач; λ_C – интенсивность отказов конденсатора.

Для расчета взят двигатель, состоящий из следующих компонентов, представленных в табл. 2. Основные технические характеристики двигателя приведены в табл. 3.

Таблица 2
Состав электродвигателя

| № п/п | Наименование | Количество |
|-------|-----------------------------|------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Статор | 1 |
| 2 | Пакет статора | 1 |
| 3 | Обмоточный провод | 1 |
| 4 | Пропитка-компаунд | 1 |
| 5 | Выводные провода | 5 |
| 6 | Корпус (сварные соединения) | 7 |
| 7 | Ротор | 1 |
| 8 | Подшипник | 1 |
| 9 | Пакет ротора | 1 |
| 10 | Медные стержни | 5 |
| 11 | Кольца короткозамыкающие | 2 |
| 12 | Вал | 1 |

Таблица 3
Технические характеристики двигателя

| № п/п | Наименование | Технические характеристики |
|-------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Температура окружающей среды | От -50° С до +40° С |
| 2 | Высота над уровнем моря | 1200 м |
| 3 | Номинальная мощность на валу | 300 кВт |
| 4 | Номинальное напряжение | 2340 В |
| 5 | Максимальная частота вращения | 4800 об/мин |
| 6 | Номинальная частота вращения | 2400 об/мин |
| 7 | Номинальный ток фазы статора | 90 А |
| 8 | Масса двигателя | 725 кг |

Как видно из табл. 2, формулы (7)–(9) не учитывают отказы пропитки, стержней, колец, корпуса и др. Поэтому для получения уточненной оценки надежности необходимо модифицировать расчетную формулу (9), и тогда она будет иметь вид

$$\lambda_{MM} = \lambda_M + \lambda_{SE} + \lambda_G + \lambda_K, \quad (10)$$

где λ_M – интенсивность отказов электродвигателя (9); λ_{SE} – интенсивность отказов прокладки; λ_G – интенсивность отказов сварных соединений; λ_K – интенсивность отказов электрических кабелей.

Значения интенсивностей отказов, рассчитанных по каждой из методик, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значение интенсивностей отказов

| № п/п | Методика | Значение интенсивности отказов, ч ⁻¹ |
|-------|-------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Надежность ЭРИ | 2,291*10 ⁻⁶ |
| 2 | MIL-HDBK-217F | 4,733*10 ⁻⁶ |
| 3 | NSWC-11 | 3,427*10 ⁻⁶ |
| 4 | Уточненная модель | 1,02*10 ⁻⁵ |

Таким образом, несмотря на большое количество различных методик, посвященных расчетам надежности электромеханических компонентов, ни одна из них не учитывает всех параметров. Поэтому для получения наиболее точного результата необходимо комбинировать математические модели или их дополнять.

Список литературы

1. Жаднов В.В. Прогнозирование надежности электронных средств с механическими элементами: науч. издание. Екатеринбург: Изд-во ООО «Форт Диалог-Исеть», 2014. 172 с.
2. Жаднов В.В., Лушпа И.Л. Прогнозирование показателей безотказности механических элементов электронных средств при проектировании // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 4. С. 17–23.
3. Маркин А.В., Полесский С.Н., Жаднов В.В. Методы оценки надёжности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования // Надёжность. 2010. № 2. С. 63–70.
4. Жаднов В.В. Методы и средства оценки показателей надежности механических и электромеханических элементов приборов и систем // Датчики и системы. 2013. № 4. С. 15–20.
5. Zhadnov V. Methods and Means of the Estimation of Indicators of Reliability of Mechanical and Electromechanical Elements of Devices and Systems // Reliability: Theory & Applications. 2011. Vol. 2, No 4. P. 94–102.
6. Лушпа И.Л. Обзор основных методик расчета надежности механических элементов // Науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014.
7. РМ 25 446-87. Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безотказности. Рекомендуемый материал.
8. NSWC-11. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment. USA: CARDEROC DIV, 2011. 522 p.
9. Надежность ЭРИ: справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
10. MIL-HDBK-217. Reliability Prediction of Electronic Equipment. USA: DoD, 1991. 205 p.
11. Лушпа И.Л., Жаднов В.В. Модели интенсивности отказов виброизоляторов для электронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 50–57.
12. Воробьев В.Е. Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции. СПб. СЗТУ, 2004. 56 с.