

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/vol8-6.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/131TVN616.pdf>

Статья опубликована 25.01.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Елисеева Т.А., Протасьев В.Б. Некоторые аспекты расчета надежности машиностроительной продукции на стадии проектирования // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/131TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 005.6

Елисеева Татьяна Алексеевна

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Россия, Тула¹

Аспирант

E-mail: eliseeva__tatiana@mail.ru

Протасьев Виктор Борисович

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Россия, Тула

Доктор технических наук, профессор

E-mail: avprotasev@mail.ru

Некоторые аспекты расчета надежности машиностроительной продукции на стадии проектирования

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы расчета надежности технических систем на стадии проектирования с использованием метода "Анализ видов, последствий и критичности отказов". Этот метод относится к категории экспертных методов и широко применяется в отечественной и зарубежной практике. Рассматриваемый вопрос является актуальным, так как ошибки в расчетах, допущенные на стадии проектирования, приводят к несвоевременному назначению и проведению мероприятий по повышению качества продукции, значительно удорожая ее. Авторами предложено выражать результат расчета надежности в интервальной форме с учетом погрешности, для определения которой разработаны математические зависимости. Затронут вопрос о необходимости учета видов технической совместимости при проектировании систем, который возможен посредством введения поправочного коэффициента в формулу для расчета критичности отказов при использовании метода анализа видов, последствий и критичности отказов.

Полученные результаты позволят внести уточнения в существующую процедуру проведения анализа, а также произвести оценку вероятности риска производителя от принятия необоснованных или неправильных управленческих и технических решений на основе результатов расчета надежности с учетом основных видов технической совместимости.

Ключевые слова: анализ видов; последствий и критичности отказов; дефектность; надежность; отказ; риск; совместимость; экспертное оценивание

¹ 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92

В настоящее время трудно представить машиностроительную продукцию, которая не содержит стандартных деталей и узлов и не имеет аналогов и прототипов.

С повышением доли стандартных деталей и узлов возрастает коэффициент унификации, сокращаются производственные затраты, и если эти объекты соответствуют стандартам или техническим условиям и применяются строго по назначению, то повышается надежность продукции.

Такие рассуждения можно продолжить, поскольку корпусные детали, полученные литьем или сваркой по робастным технологиям, не могут преподнести сюрпризы в отношении надежности, если марки материалов соответствуют чертежам, и выполнены предусмотренные контрольные операции.

По качеству сборки и регулировки справедливы ранее приведенные рассуждения, т.е. если выходной контроль не обнаружил выходов за назначенные допуски, то претензии к сборке не обоснованы.

В полной мере все рассуждения относятся и ко всем т.н. оригинальным деталям и узлам.

Следует также анализировать отличия новой продукции от прототипов и аналогов.

При такой расчетной системе доля неопределенности сводится к минимуму, особенно если выполнены проектные расчеты, адекватные условиям эксплуатации.

Надежность снижается в механизмах, которые используют большое число последовательно соединенных элементов.

Большое число работ по оценке надежности технических систем [1-5, 7-9] подтверждает актуальность данного вопроса.

В работе [6] приведено уравнение, определяющее добротность технологического процесса, которое в полной мере можно отнести к изделию с последовательно соединенными элементами:

$$P_{\Sigma} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где: P_{Σ} - добротность системы, выраженная в долях единицы, ($P_{\Sigma} < 1$); $P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \dots P_n$ - добротность последовательно соединенных узлов и деталей; n - число соединяемых элементов.

Дефектность (или же риски по отказу) можно определить, используя выражение:

$$P_{\Sigma} = 1 - \alpha_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i), \quad (2)$$

где: α_{Σ} - дефектность изделия или риск по отказу; α_i - тоже, для каждого соединяемого элемента.

Если предположить, с целью анализа возможностей, что заданная дефектность $\alpha_{\Sigma} = 0,05$, а $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots \alpha_n = \alpha$, то выражение сведется к виду:

$$1 - 0,05 = (1 - \alpha)^n. \quad (3)$$

Решая (3) относительно α , получим при $n=10$:

$$\alpha = 1 - (1 - 0,05)^{0,1} = 0,0051. \quad (4)$$

Отечественные производственные процессы в большинстве не обеспечивают такой низкий уровень дефектности.

Решение задачи получения продукции с заданным уровнем дефектности α_{Σ} возможно двумя способами:

- выбраковкой дефектных изделий, что невыгодно, но очень часто производится из-за сложившейся ситуации;
- наличием регулировочных элементов, позволяющих довести дефектность α_i до требуемого уровня.

С учетом изложенного, сюрпризов в надежности следует ожидать в соблюдении принципов совместимости деталей и узлов при выполнении функционального назначения изделия.

Следуя логике, что отдельно рассматриваемые детали и узлы имеют высокую надежность, можно заключить, что причины снижения надежности связаны с нарушением принципов совместимости при изготовлении изделия (сборке) и его функционировании. Другими словами, нельзя соединять технически несовместимые детали и узлы, а для обеспечения надежности - детали и узлы, совместимость которых ограничивается техническими характеристиками.

Стандарт 30709-2002 «Техническая совместимость. Термины и определения»², по мнению авторов, часто игнорируемый при проектировании, предусматривает виды и характеристики совместимости технических объектов.

Для удобства характеристики совместимости (ГОСТ 30709-2002) разместим в табл. 1, с целью последующего использования их при оценке надежности изделий на стадии проектирования.

Таблица 1

Оценка выполнения требований совместимости (разработано авторами)

№ п/п	Характеристики совместимости	Сигнатура + или -	Экспертная оценка Q_{Ci}
1	Размерная	+	1
2	Функциональная	+	2
3	Экологическая	+	1
4	Стандартно-эпидемиологическая	+	1
5	Пожаробезопасная	+	1
6	По видам трения	+	1
7	По надежности	+	2
8	Электромагнитная по ГОСТ Р 50397-2011 ³	+	1
9	Электрическая	+	1

Современные требования надежности не позволяют игнорировать ни одну из приведенных характеристик совмещения.

² ГОСТ 30709-2002. Техническая совместимость. Термины и определения. - Минск.: ИПК Издательство стандартов, 2003. - 8 с.

³ ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2013. - 62 с.

Знак «+» в четвертой колонке (см. табл. 1) означает соблюдение принципов, знак «-» несоблюдение, а балльная оценка, поставленная экспертами по 10-ти балльной шкале, означает степень полноты обеспечения совместимости. Для облегчения экспертизы оценки должны соответствовать требованиям табл. 2.

Таблица 2

**Определение балльных оценок по выполнению условий совместимости
(разработано авторами)**

№ п/п	Условия оценки	Экспертная оценка в баллах
1	Полная уверенность в совместимости	1
2	Проведен анализ всех найденных прототипов, уверенность на 90%	2
3	Проведен анализ прототипов с уверенностью не более 75%	3
4	Проведен анализ прототипов с уверенностью не более 50%	4
5	Анализ не дает уверенности в соблюдении совместимости	10 штрафная оценка

Экспертная оценка формируется по принципу «чем балл меньше, тем лучше!». Однако, по нашему мнению, балл более четырех недопустим, поскольку при использовании ГОСТ 27.310-95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения»⁴ (АВПКО) выполняется перемножение 3-х балльных оценок B_1 , B_2 и B_3 , и простое перемножение этих величин при $B_1=B_2=B_3=5$ приводит к результату $5^3=125$, т.е. предельно допустимому.

Предлагается из оценок табл. 1 формировать поправочный коэффициент K_C по принципу определения средневзвешенной величины:

$$K_C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i \cdot Q_i, \quad (5)$$

где: g_i - весовые коэффициенты для различных видов совместимости; Q_i - балльная экспертная оценка, полученная по данным табл. 1.

По нашему мнению, все виды совместимости равнозначны и их весовые коэффициенты равны единице.

При необходимости весовые коэффициенты могут использоваться с применением традиционной методики их определения [10].

Для примера, по таблице 1 коэффициент K_C составит:

$$K_C = \frac{1}{9} \cdot (1 \cdot 7 + 2 \cdot 2) = 1,22.$$

В итоге балльная оценка сформируется с использованием зависимости, используемой в системе АВПКО (или FMEA-анализа):

$$C = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot K_C, \quad (6)$$

⁴ ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. - М.: Изд-во стандартов, 1998. - 14 с.

где: B_1 - оценка вероятности i -го отказа в баллах; B_2 - оценка последствий i -го отказа в баллах; B_3 - оценка вероятности обнаружения i -го отказа до поставки продукции потребителю в баллах.

Коэффициент K_C увеличивает вероятность возникновения отказа.

Современные требования к результатам измерений (а экспертные оценки являются их разновидностью) должны содержать значения средней величины и вариации относительно среднего значения с указанием вероятности получения этого результата [10].

Применительно к определению надежности запись результата измерений имеет вид:

$$C = \bar{C} \pm t \cdot \Delta C, \quad (7)$$

где: \bar{C} - средняя величина показателя надежности; t - коэффициент Стьюдента, учитывающий вероятность попадания величины \bar{C} в диапазон $\pm \Delta C$; ΔC - вариация показателя C .

Средняя величина \bar{C} определяется как среднее арифметическое мнений экспертов, в роли которых могут использоваться члены FMEA-команды.

$$\bar{C} = \frac{1}{m} \sum_1^m Q_i, \quad (8)$$

где: m - число экспертов; Q_i - балльные оценки экспертов.

Вариацию ΔC можно определить с помощью полного дифференциала выражения (6):

$$dC = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot dK_C + B_1 \cdot B_2 \cdot K_C \cdot dB_3 + B_1 \cdot B_3 \cdot K_C \cdot dB_2 + B_2 \cdot B_3 \cdot K_C \cdot dB_1. \quad (9)$$

Принимая $dC \approx \Delta C$ получим:

$$\Delta C = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot \Delta K_C + B_1 \cdot B_2 \cdot K_C \cdot \Delta B_3 + B_1 \cdot B_3 \cdot K_C \cdot \Delta B_2 + B_2 \cdot B_3 \cdot K_C \cdot \Delta B_1, \quad (10)$$

где ΔB_1 , ΔB_2 , ΔB_3 , ΔK_C - вариации соответствующих величин.

Поскольку величины ΔB_1 , ΔB_2 , ΔB_3 , ΔK_C определяются по таблицам с дискретностью, равной одному баллу, то можно принять, что:

$$\Delta B_1 = \Delta B_2 = \Delta B_3 = \Delta K_C = 1 \quad (11)$$

Выражение (10) при такой логике приводит к абсурдно большим значениям величины ΔC . Такая ситуация свидетельствует, что табличный способ определения анализируемых величин имеет существенные недостатки, и что равенство dC и ΔC при использовании табличных методов неправомерно. Необходимы аналитические зависимости, при которых полученное противоречие отсутствует.

При выборе зависимостей для определения величин B_1 , B_2 , B_3 и K_C нужно учитывать, что линейные зависимости не отражают реальной ситуации, поскольку чем ближе ситуация к 10 балльной оценке, тем более высокие баллы будут соответствовать правильным решениям, также более низкие баллы в ситуациях близких к единице больше соответствуют реальности.

Предлагается использовать зависимости вида:

$$B_i = B_{\max} \cdot \left(\frac{B_{\min}}{B_{\max}} \right)^{\frac{10-n}{9}}, \quad (12)$$

где $B_{\max}=10$, $B_{\min}=1$ - баллы, соответствующие граничным значениям величин B_1, B_2, B_3 ; n - номер строки, по которой в таблицах стандарта (ГОСТ 27.310-95) экспертно назначаются баллы для величин B_1, B_2, B_3 , $n=10$.

Для приведения конкретных значений зависимость (12) примет вид:

$$B_i = 10 \cdot 0,1^{\frac{10-n}{9}}. \quad (13)$$

При $n_{\min}=1$ и $n_{\max}=10$ параметр B_i принимает значения 1 и 10. Промежуточные значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Балльные экспертные оценки (разработано авторами)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B_i	1	1,29	1,67	2,15	2,78	3,59	6,93	7,15	7,78	10

График функции показан на рисунке.

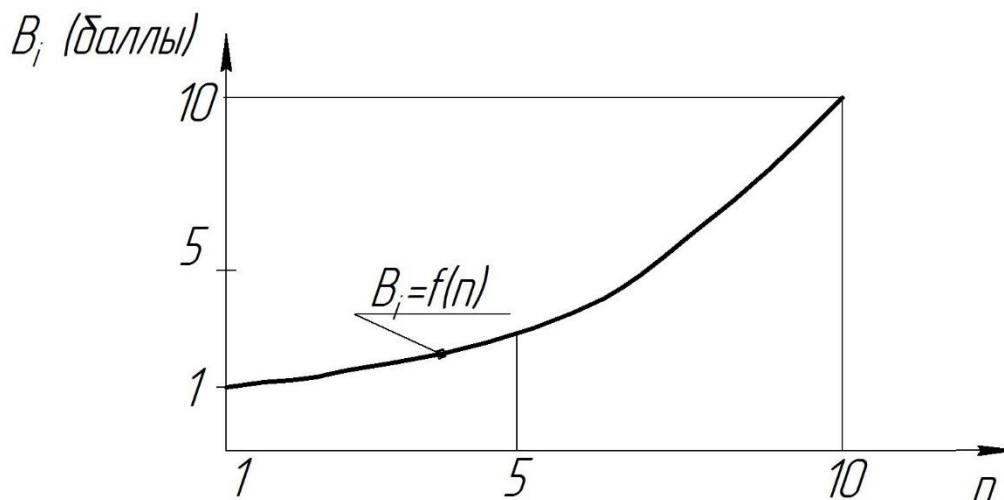


Рисунок. Зависимость балльных оценок от параметра n (разработано авторами)

Проведем расчет:

$$\Delta n_{1-2} = 1,29 - 1 = 0,29;$$

$$\Delta n_{8-9} = 7,78 - 7,15 = 0,63.$$

Для определения ΔB_i определим дифференциал по формуле (12), приравняв его искомой величине ΔB_i :

$$\Delta B_i = 0,26 \cdot 0,1^{\frac{10-n}{9}} \cdot \Delta n. \quad (14)$$

Например, если значение B_i определяется по пятой строке ($n=5$), то:

$$\Delta B_i = 0,26 \cdot 0,1^{\frac{5}{9}} \cdot \Delta n = 0,26 \cdot 0,1^{\frac{5}{9}} \cdot (2,78 - 2,15) = 0,079 \cdot 0,63 = 0,0497 \approx 0,05$$

где $\Delta n = 2,78 - 2,15 = 0,63$.

Допустим условно, что $K_C = 1,22$. Далее будет показана методика определения ΔK_C , но в данном примере не станем ее использовать, а примем $\Delta K_C = 0$.

Примем, что:

$$\Delta B_1 = 0,05,$$

$$\Delta B_2 = 0,26 \cdot 0,1^{\frac{6}{9}} \cdot (3,59 - 2,78) = 0,045,$$

$$\Delta B_3 = 0,26 \cdot 0,1^{\frac{4}{9}} \cdot (2,15 - 1,67) = 0,044,$$

$$\Delta K_C = 0. \quad B_1 = 2,78, B_2 = 3,59, B_3 = 2,15.$$

В этом случае с использованием формулы (10) получим:

$$\begin{aligned} \Delta C &= B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot \Delta K_C + B_1 \cdot B_2 \cdot K_C \cdot \Delta B_3 + B_1 \cdot B_3 \cdot K_C \cdot \Delta B_2 + B_2 \cdot B_3 \cdot K_C \cdot \Delta B_1 = \\ &= 2,78 \cdot 3,59 \cdot 1,22 \cdot 0,044 + 2,78 \cdot 2,15 \cdot 1,22 \cdot 0,045 + 3,59 \cdot 2,15 \cdot 1,22 \cdot 0,05 = 1,384. \end{aligned}$$

Допустим, что среднее значение $\bar{C} = 28,5$, то с вероятностью безотказной работы $P = 0,95$ можно записать результат расчета надежности:

$$C = 28,5 \pm 2,1 \cdot 1,384,$$

где $t = 2,1$ - коэффициент, учитывающий вероятность попадания величины 28,5 в заданный интервал.

Или $C = 28,5 - 2,906 \dots 28,5 + 2,906 = 25,564 \dots 31,480$.

Полученное выражение является более информативным по сравнению с точечным результатом оценки, так как несет в себе сведения о погрешности, с которой произведен расчет. Данная информация может быть полезна производителям, принимающим управленческие и технические решения по результатам анализа надежности систем. Кроме этого, предложенные математические зависимости позволяют внести уточнения в расчет надежности методом АВПКО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов В.С. Оценка надежности общесудовых систем на стадии их разработки и получение исходных данных для ее реализации // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - №1 (103). - URL: www.nntu.ru/trudy/2014/01/156-164.pdf (дата обращения: 04.07.2016).
2. Горина В.В., Чернышов К.В. Методика определения показателей надежности восстанавливаемых технических объектов // Известия ВолгГТУ. - 2014. - №19

- (146). - URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-pokazateley-nadezhnosti-vosstanavlivaemyh-tehnicheskikh-obektov> (дата обращения: 04.07.2016).
3. Елисеева Т.А. Построение модели управления надежностью технических систем на стадии проектирования // Сборник научных трудов 2-й Международной молодежной научно-технической конференции. - Курск, 2015. - С. 317-320.
 4. Елисеева Т.А., Плахотникова Е.В. Построение модели прогнозирования надежности системы электроприводной запорной арматуры // Сборник научных трудов XI Международной практической конференции: в 4 т. - Т. 2. Курск, 2014. - С. 57-61.
 5. Калимулина Э.Ю. Расчет надежности сложных систем с параллельной структурой, полностью восстанавливаемых в процессе эксплуатации // Управление большими системами. Вып. 23. - URL: www.mtas.ru/upload/library/UBS2309.pdf (дата обращения: 05.07.2016).
 6. Косаревская А.В. Квалиметрическая оценка управленческих решений в системе менеджмента качества: дис. ... канд. техн. наук. - Тула, 2010. - 141 с.
 7. Саливоник А.В. Методика определения показателей долговечности деталей форвардеров Timberjack // Resour. Technol. - 2005. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-pokazateley-dolgovechnosti-detaley-forvarderov-timberjack> (дата обращения: 05.07.2016).
 8. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. - М.: Машиностроение, 2003. - 320 с.
 9. Чан Донг Хынг. Технология оценки надежности автоматизированных систем управления противопожарной защитой объектов с использованием математических моделей // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» <http://ipb.mos.ru/ttb>. - Вып. №1 (29). - 2010. - URL: agps-2006.narod.ru/ttb/2010-1/12-01-10.ttb.pdf (дата обращения: 06.07.2016).
 10. Шишкин И.Ф., Станякин В.М. Квалиметрия и управление качеством: учебник для вузов. - М.: Изд-во ВЗПИ, 1992. - 256 с.

Eliseeva Tat'yana Alekseevna

Tula state university, Russia, Tula
E-mail: eliseeva__tatiana@mail.ru

Protas'ev Viktor Borisovich

Tula state university, Russia, Tula
E-mail: avprotasev@mail.ru

Some aspects of the reliability calculation of engineering products at the design stage

Abstract. The article considers the problem of calculating the reliability of technical systems at the design stage using Failure Mode, Effects and Criticality Analysis method. It is one of the experts methods widely applied in Russia and abroad. Considering problem is actual because mistakes in calculation made at the design stage lead to untimely activities to improve the quality of products that significantly raise the price of it. Authors suggest to express the result of reliability calculation with intervals that taking into account the calculation error. Mathematical dependences has been developed for this operation. The article deals with the problem of taking into account of types of technical compatibility at the design stage. It's possible through adding of correction coefficient into the formula for failure criticality while using the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis method.

The results allow to make adjustments in the existing procedure of analysis and evaluate the probability of producer risk to take unreasonable or improper management decisions based on reliability calculation considering the main types of technical compatibility.

Keywords: failure mode; effects and criticality analysis; deficiency; reliability engineering; structural integrity and failure; risk; compatibility; expert evaluation