

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РИСКОВ НЕСООТВЕТСТВИЙ ПРОДУКЦИИ (НА ПРИМЕРЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ)

*Институт надежности машин НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Пусть имеется опытный образец продукции (сборочной единицы) либо лишь его проектная документация. Для простоты примем, что рассматриваемая продукция - объект невозстанавливаемый и контроль его функционирования в эксплуатации не предусмотрен. В проекте технических условий либо в техническом задании нормируется, что данный объект определяет средний ресурс (X_n) и гарантийный срок эксплуатации (x_n) для всей системы, составной частью которой он является. К традиционной информации добавим новые исходные данные, определяемые исходя из требований к системам менеджмента качества и конкурентной экономики [1-4]: величина потерь (в денежном выражении) из-за не достижения качества, затрат на предупреждение (перепроектирование и т.п.) и контроль объекта [15,16]; классификация серьезности последствий для несоответствий на всех уровнях детализации объекта [5, 16]; допустимый показатель FMEA [5] для продукта - [RPN]; количество несоответствий на миллион - [PPM]. Величины параметров, упомянутых в дополнении, могут определяться не только внутренними требованиями предприятия, но и условиями контракта на поставку. Исходя из изложенных выше данных, проиллюстрируем методику прогнозирования показателей надежности на этапе анализа проекта продукции (п. 4.4.6. [1]). Оценку вероятности несоответствия продукции по причинам, возникающим при ее тиражировании в производстве [17] в данной работе не рассматриваем. Идти по пути структурного анализа [15], т. е. оценки вероятности отказа сборочной единицы путем перемножения и (или) сложения вероятностей отказа составных частей с учетом многообразия механизмов повреждения и т. д. [11, 15] – малоперспективно (отсутствие многих исходных данных; сложные зависимости взаимосвязанных процессов; крайняя удаленность результатов от экономических показателей предприятия и продукции; даже в случае оценки вероятности отказа – возврат к исходным данным для поиска слабых звеньев, а затем поиска причин их возникновения; и т. п.).

Предлагается идти по пути – от сложного к простому, развертывая функции качества, структурированием: конструкции; функций; «дерева дефектов – дерева причин».

В качестве примера реализации рассмотрим объект – несущую конструкцию. Причиной неблагоприятного события является разрушение вследствие усталости, а данные о нагруженности известны. Структура конструкции: узел; соединение с группой крепежа; соединение с единицей крепежа; образец [7]. Функции: компоновка; обеспечение нормальной работы агрегатов, контакта колес с дорогой и т. д. «Дерево дефектов» - снижение жесткости несущей конструкции, элементов и т. п. «Дерево причин» – разрушение несущих элементов, крепежных деталей.

Прогнозирование вероятности появления неблагоприятного события осуществим поэтапно:

1. Оценим характеристики сопротивления конструкции нагружению (характеристики сопротивления усталости) по справочникам [6] либо путем локального моделирования с учетом влияния различных конструкторско-технологических факторов [7].

2. Проанализируем нагруженность:

2.1. Случай I (имеются записи о нагруженности опытного образца в эксплуатации):

а) схематизация методом «потоков дождя» (либо другим) случайных процессов нагружения потенциальных зон зарождения трещин при эксплуатации (на полигоне, стенде) [9, 10];

б) приведение случайных процессов нагружения с переменным коэффициентом асимметрии к эквивалентному по повреждению с постоянным R

при этом используется выражение

$$\sigma_i = \sigma_{ai} + \psi (\sigma_{mi} - \bar{\sigma}_m),$$

где σ_{ai} и σ_{mi} – амплитуда и среднее напряжение i -го цикла случайного процесса; ψ – коэффициент чувствительности асимметрии нагружения; $\bar{\sigma}_m$ – общее значение среднего напряжения;

в) представление полученных процессов в виде вариационных рядов с помощью трехпараметрического уравнения:

$$n_i / (N_{бл} + 1) = \exp [-(\sigma_i^m - A) / B],$$

где $N_{бл}$ – число значений амплитуд σ_i – в полученном ряду; n_i – порядковый номер амплитуды σ_i – в убывающем вариационном ряду; A, B, m – параметры [9].

г) формирование обобщенного блока нагружения учитывающий комплекс эксплуатационных условий.

2.2 Случай II (имеются результаты расчета конструкции, например, методом конечных элементов с соответствующими уточнениями (коэффициент чувствительности КЭ модели и т. п.) [13].

а) формирование обобщенного блока нагружения, учитывающего комплекс расчетных случаев.

Затем повторяются этапы б), в).

3. Рассчитаем циклическую долговечность в циклах, блоках, км пробега и т. д., используя гипотезы суммирования усталостных повреждений: линейную, скорректированную и с учетом снижения предела выносливости [9, 6]

$$N = \sum_{j=1}^{j=q} \left(1 / \sum_{i=1}^{i=k} \beta_i / \Delta N_i \right),$$

где q – число фиксированных значений предела выносливости, k – число повреждающих ступеней напряжения при j -том значении предела выносливости, ΔN_i – разность долговечностей, вычисляемых по уравнению кривой усталости при i -том напряжении в рассматриваемом интервале снижения предела выносливости, β_i – относительная продолжительность действия напряжения σ_i в блоке.

4. Оценим вероятное количество несоответствий (для каждой зоны повреждения). Критерии несоответствия – не достижение заданного среднего ресурса, гарантийной наработки и т. д. При допущении о нормальном распределении и использовании таблиц [12] квантиль нормального распределения

$$U = (X_n - \bar{X}_i) / S_i,$$

где X_n – граничные значения (средний ресурс, гарантийный пробег и т. д.); \bar{X}_i – среднее значение ресурса; S_i – стандартное отклонение.

5. Сравним расчетную величину несоответствий (PPM) с базовой [PPM].

6. Оценим вероятность появления несоответствия в связи с серьезностью возникновения последствий [19]. Для этого используем фактические показатели FMEA – RPN [5] и сравним их с допустимой величиной.

7. На основании анализа потенциальных затрат и потерь [14, 18] примем решение о соответствии конструкции требованиям контракта, о необходимости корректировки (конструк-

торской документации, снижение рассеяния характеристик соответствия деталей путем ужесточения требований к субпоставщикам, резервирование ресурсов на рекламации и т.п.) либо экономической нецелесообразности совершенствования продукции.

Пример реализации. Объект – рама автомобиля, состоящая из несущих элементов и крепежных деталей. По техническим условиям: средний ресурс, $X_H = 800000$ км; гарантийная наработка $x_n = 80000$ км; критерий отказа – необеспечение функционирования закрепленных на раме узлов и агрегатов в заданных ограничениях, причина – разрушение несущих элементов и крепежных деталей; вид нагружения – циклическая нагрузка от заданных условий эксплуатации, приведенная к эквивалентному блоку [13].

Известно: стоимость возврата транспортного средства из-за обнаруженных несоответствий 1200\$; гарантийного ремонта - 1000\$; перепроектирования - 5000\$; потери имиджа (ниши рынка) – 100\$ на каждый несоответствующий автомобиль; серьезность последствий повреждения – С: а) для полки лонжерона $C = 8$, б) для крепежных деталей (заклепок, болтов) $C = 7$; показатель $[PPM] = 2000$; объем выпуска – 10000 автомобилей; показатель $[RPN] = 200$; характеристики сопротивления усталости для зон повреждений несущих элементов и крепежных деталей (болты, заклепки, сварка) и их чувствительность к конструкторско-технологическим факторам (например, остаточным напряжениям от сборки) [6,7,8,9].

В результате прогнозирования по предложенному алгоритму получили для каждой i -той зоны: \bar{X}_i ; S_i ; PPM_i ; RPN_i :

- для полки лонжерона: $\bar{X} = 1100000$ км; $S = 184547$ км; 5,2 % автомобилей не выработает средний ресурс; фактический показатель $RPN = 8 \times 8 \times 10 = 640 > 200$, серьезность последствий - “отказ не связан с безопасностью человека, полная потеря функции продукции”; фактический $PPM = 52000 > 2000$;

- для каждой заклепки (болта), перегрузка которой больше 0%; $X_H = 0\%$ (превышение предела выносливости); $\bar{X} = 128\%$ (перегрузка заклепок [8]); $S = 10\%$; то есть практически все 100% автомобилей при среднем ресурсе будут иметь разрушенный крепеж; $RPN = 7 \times 6 \times 10 = 420 > 200$, серьезность последствий – “функционирование продукции на очень низком уровне, потребитель крайне неудовлетворен”. Фактический PPM стремится к 1000000.

Вероятность отказа несущей конструкции, представленной как независимые последовательно соединенные элементы [15,17], рассчитанная по традиционной методике, составляла бы 0,97, то есть вероятность того, что автомобиль выработает средний ресурс практически близка к нулю, что далеко от реальности.

Поскольку анализ проекта конструкции показал, что требования не выполнены, необходимо принять решение об экономической целесообразности перепроектирования конструкции, либо с несоответствием можно смириться, поскольку величина потерь из-за недостижения качества незначительна. Для нашего примера затраты на перепроектирование составляют 5000\$, а потери имиджа (ниши рынка) $520 \times 100\$ = 52000\$$. Следовательно, экономически целесообразно совершенствовать конструкцию. Указанный алгоритм повторяется до достижения требуемых величин $[RPN]$, $[PPM]$ и оптимального соотношения затрат и потерь, связанных с качеством.

В заключение отметим, что приведенная методика прогнозирования показателей надежности сложных конструкций позволяет: а) оценивать вероятное количество несоответствующей продукции вместо вероятности работы единицы продукции; б) учитывать серьезность возможных последствий от каждого несоответствия; в) достигать отказа системы для несоответствий с высокой степенью серьезности последствий до практически невероятного события и с незначительной степенью серьезности последствий - с высокой вероятностью появления; г) добиваться максимальной удовлетворен-

ности потребителя при заданных ограничениях ресурсов (финансовых, временных, трудовых, информационных); д) создавать системы «равной удовлетворенности потребителя»; е) осуществлять неразрывную связь анализов экономической эффективности предприятия и надежности проекта продукции.

Литература. 1. ISO 9001: 1994. Системы качества. Модель для обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании. 2. ISO 9004-1: 1994. Общее руководство качеством и элементы системы качества – часть 1: Руководящие указания. 3. Quality System Requirements. QS – 9000 Licensed under Copyright with Ford/, General Motors/ Chrysler - England, 1995. – 100 с. 4. QM – Systemaudit (materielle Produkte) VDA 6 Teil 1/ Verband der Automobilindustrie e/ V. (VDA), 1998. – 137 с. 5. Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Licensed under Copyright with Ford/, General Motors/ Chrysler - England, 1995. - 61 с. 6. Кораев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник – М.: Машиностроение, 1985.–224с. 7. Панов А.Н., Ракицкий А.А., Горбацевич М.И. и др. Прогнозирование ресурса несущих элементов рам автомобилей. Опер.-инф. материалы. - Мн.: ИНДМАШ АН БССР, 1991. 55с. 8. Панов А. Н. Характеристики сопротивления усталости и предельное состояние заклепочных соединений рам транспортных средств //Динамика и прочность автомобиля: Тез. докл. 5-го науч.-техн. совещ. /Акад. наук СССР. Ин-т машиноведения. – М., 1992. – С. 63-65. 9. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. - Мн.: Наука и техника, 1988. - 166 с. 10. Автоматизированная система ускоренных испытаний автомобильных конструкций. /М.С. Высоцкий, А.А. Ракицкий, М.И. Горбацевич и др. - Мн: Наука и техника, 1989. - 168 с. 11. Альгин В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 256 с. 12. Математические таблицы: Таблицы математической статистики / Большев Л. Н., Смирнов Н. В.. – М.: Наука, 1968. 13. Панов А. Н. Методические основы прогнозирования и нормирования несущей способности сборных рамных конструкций транспортных средств // Динамика и прочность автомобиля: Тез. докл. 7-го междунауч.-техн. совещ. / Рос. акад. наук. Ин-т машиноведения. – М., 1997. – С. 37-38. 14. Панов А. Н. Методологические основы эффективного управления системой качества машиностроительного предприятия // Новости. Стандартизация и сертификация. Инф. сб. – 1998. – №5. – С. 13-18. 15. Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. – М.: Машиностроение. 1986. – 224 с. 16. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдусевский (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1986. Т.1. 17. Испытания и надежность технических систем / Переверзев Е. С., Даниев Ю. Ф. – Днепропетровск : НАН, НКА Украины; Институт технической механики, 1999. – 224 с. 18. Панов А. Н. Оптимизация затрат на качество // Техника. Экономика. Организация. – 2000. - №1-2. – С. 30-32. 19. Панов А. Н. Выбор, обоснование и нормирование параметров безопасности элементов транспортных средств // Техника. Экономика. Организация. – 1999. - №3. – С. 24-27.