

## ПОИСК СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ

© 2004 В.М. Радомский

Самарский государственный технический университет

Рассматривается технология поиска скрытых дефектов, прогнозирование нежелательных явлений в технических объектах и технологиях, основанная на FMEA-анализе, теории решения изобретательских задач, функционально-ресурсном анализе, методе экспертных оценок.

На производстве по разным причинам бывают явные случаи изготовления бракованных деталей. Причины брака выясняют сравнительно легко, брак устраняют. Скрытые дефекты, которые проявляются в процессе эксплуатации изделия, своевременно выявить намного сложнее. Более сложная задача – прогнозирование возможных дефектов в конструкциях и технологиях на стадии проектирования. Б.Л. Злотин, один из авторов теории решения изобретательских задач, разработал методику выявления и прогнозирования нежелательных явлений, на основе так называемой “обращенной” задачи [2]. Фирмы Крайслер, Форд, Дженерал Моторс совместно разработали FMEA-анализ выявления различных дефектов. Согласно [1] FMEA-анализ представляет собой технологию анализа возможности возникновения дефектов и их влияния на потребителя. FMEA-анализ проводится для разрабатываемых изделий и процессов, и результатом анализа является снижение риска потребителя от потенциальных дефектов.

Целью FMEA-анализа процесса производства является обеспечение выполнения всех требований по качеству процесса производства и сборки путем внесения изменений в план процесса для технологических действий с повышенным риском. В настоящее время FMEA-анализ является одной из стандартных технологий анализа качества изделий и процессов, поэтому в процессе его развития выработаны типовые формы представления результатов анализа и правила его проведения. Он позволяет снизить затраты и

уменьшить риск возникновения дефектов. Кроме того, позволяет выявить именно те дефекты, которые обуславливают наибольший риск потребителя, определить их потенциальные причины и выработать корректирующие действия по их устранению еще до того, как эти дефекты проявятся и, таким образом, предупредить затраты на их исправление.

FMEA-анализ процессов может проводиться для:

- процесса производства продукции;
- процесса эксплуатации изделия потребителем.

Проведение FMEA-анализа процесса производства начинается на стадии технической подготовки производства и заканчивается своевременно до монтажа производственного оборудования.

Этапы проведения FMEA-анализа:

1. Построение компонентной, структурной, функциональной и потоковой моделей объекта анализа;
2. Исследование моделей.

В ходе исследования моделей определяются потенциальные дефекты для каждого из элементов компонентной модели объекта. Такие дефекты обычно связаны или с отказом функционального элемента (его разрушением, поломкой и т.д.), с неправильным выполнением элементом его полезных функций (отказом по точности, производительности и т.д.) или с вредными функциями элемента. В качестве первого шага рекомендуется перепроверка предыдущего FMEA-анализа или анализ проблем, возникших за время гаран-

тийного срока. Необходимо также рассматривать потенциальные дефекты, которые могут возникнуть при транспортировке, хранении, а также при изменении внешних условий (влажность, давление, температура). Для выявления потенциальных причин дефектов могут быть использованы диаграммы Исикавы, которые строятся для каждой из функций объекта, связанных с появлением дефектов [2].

Рассмотрим потенциальные последствия дефектов для потребителя. Поскольку каждый из рассматриваемых дефектов может вызвать цепочку отказов в объекте, при анализе последствий используются структурная и потоковая модели объекта. По данным исследовательского отдела фирмы Дженерал Моторс при разработке и производстве изделия действует правило десятикратных затрат — если на одной из стадий круга качества изделия допущена ошибка, которая выявлена на следующей стадии, то для ее исправления потребуется затратить в 10 раз больше средств, чем если бы она была обнаружена вовремя. Если она была обнаружена через одну стадию — то уже в 100 раз больше, через две стадии — в 1000 раз и т.д. Концепция всеобщего менеджмента качества требует изменения подхода к разработке новой продукции, поскольку ставится вопрос не просто поддержания определенного, пусть и достаточно высокого, уровня качества, а удовлетворенность потребителя.

С помощью экспертных оценок определяют следующие параметры [3]:

а) параметр тяжести последствий для потребителя (проставляется обычно по 10-ти балльной шкале; наивысший балл проставляется для случаев, когда последствия дефекта влекут юридическую ответственность);

б) параметр частоты возникновения дефекта (проставляется по 10-ти балльной шкале; наивысший балл проставляется, когда оценка частоты возникновения составляет 1/4 и выше);

в) параметр вероятности не обнаружения дефекта (является 10-ти балльной экспертной оценкой; наивысший балл проставляется для “скрытых” дефектов, которые не могут быть выявлены до наступления послед-

ствий);

г) параметр риска потребителя (показывает, в каких отношениях друг к другу в настоящее время находятся причины возникновения дефектов; дефекты с наибольшим коэффициентом приоритета риска подлежат устранению в первую очередь).

Результаты анализа заносятся в специальную таблицу. Выявленные “узкие места” подвергаются изменениям, то есть разрабатываются корректирующие мероприятия с использованием, например, экспертной системы.

Методы экспертных оценок применяются в тех случаях, когда задача полностью или частично не поддается формализации и не может быть решена известными математическими методами. Экспертные исследования представляет собой методы решения сложных специальных вопросов лицами, обладающими специальными знаниями, опытом с целью получения выводов, мнений, рекомендаций, оценок. В ходе экспертных исследований используются новейшие достижения науки и техники по специальности эксперта.

Задача эксперта состоит в том, чтобы, используя специальные знания в той или иной области, прошлый опыт и интуицию, применить общие законы и частные закономерности для разработки конкретных управленческих решений и обеспечить этим их оптимальность. Экспертное заключение оформляется в форме документа, в котором фиксируются ход исследования и его итоги. Введение содержит данные: кто, где, когда, в связи с чем организует и проводит экспертизу. Далее фиксируется объект экспертизы, указываются методы, примененные для его исследования, и полученные в результате исследования данные. В заключительной части содержатся выводы, рекомендации, практические меры, предлагаемые экспертами. Выводы могут иметь категорическую формулировку (“да”, “нет”) и вероятностную (предположение). В роли экспертов, как правило, выступают опытные руководители, специалисты, приглашаемые со стороны, имеющие опыт и специальные знания в узкой области, владеющие методами исследо-

вания. Эксперт должен быть способен синтезировать информацию, объединить специальные знания и опыт, методы исследования со знанием особенностей исследуемого объекта и дать объективные квалифицированные рекомендации.

Наиболее эффективно применение методов экспертных оценок в решении следующих задач управления производством:

1. Анализ сложных процессов, систем, явлений, ситуаций, характеризующихся в основном качественными, неформализуемыми характеристиками.

2. Прогнозирование тенденций развития производственной системы и взаимодействия с ней внешней среды.

3. Определение и ранжирование по заданному критерию наиболее существенных факторов, влияющих на функционирование и развитие производственной системы.

4. Повышение эффективности математико-статистических и других формальных методов за счет более точного определения и оценки некоторых качественных аспектов, факторов, не поддающихся формализации.

5. Повышение надежности оценки целевых функций, имеющих качественный или количественный характер, путем усреднения мнений высококвалифицированных специалистов.

6. Выявление и оценка качественных и количественных критериев, необходимых для выбора управленческого решения.

7. Оценка альтернативных вариантов решения и выделение некоторых наиболее предпочтительных вариантов.

Надежность и достоверность решений, принимаемых на основе суждений группы экспертов, в значительной мере зависят от организации процедуры сбора, анализа и статистической обработки этих суждений. При традиционном групповом обсуждении проблем на заседаниях комиссий или советов результирующая оценка получается от всей группы в целом. Однако мнение самых авторитетных и эмоциональные воздействия наиболее “напористых” участников часто оказывают значительное влияние на суждения остальных. Кроме того, члены комиссии, оказавшиеся в меньшинстве, чувствуют себя

неуверенно и часто присоединяются к мнению большинства. Поэтому для уменьшения психологического влияния экспертов друг на друга и получения более достоверных оценок прямые дискуссии следует заменять программами согласования индивидуальных мнений. Простейший способ использования группы - индивидуальный - заключается в том, что каждый эксперт дает оценку независимо от других, а затем эти оценки обрабатываются и обобщаются в одну общую.

Указанный метод основан на индивидуальной и тайной оценке рассматриваемых объектов путем заполнения индивидуальных бланков. Перед первым заседанием экспертной комиссии руководитель группы проводит инструктаж. Каждому эксперту присваивается коэффициент компетентности, который назначается руководителем или вычисляется с помощью метода экспертных оценок самими экспертами. Если эксперты близки по своей квалификации в рассматриваемой области, то присваивают всем одинаковые коэффициенты компетентности, равные  $1/m$ , где  $m$  – количество экспертов. Затем раздаются индивидуальные бланки для ранжирования объектов по некоторым признакам. Далее полученные оценки обрабатываются, производится ранжирование объектов, на их основе определяется уровень согласованности мнений экспертов.

Оценка согласованности мнений экспертов основана на результатах вычисления коэффициента конкордации [3]. Если вычисленный коэффициент конкордации свидетельствует, что мнения экспертов по данному вопросу расходятся, то предпринимаются меры по улучшению согласованности мнений. Например, определяют членов комиссии, оказывающих наибольшее влияние на результат, затем их оценки последовательно исключают из расчета коэффициент конкордации. Возможны другие варианты. Например, собирают заседание экспертной комиссии и предлагают экспертам обосновать свою точку зрения. Затем проводят повторный сбор оценок, рассчитывают коэффициент конкордации.

Нами разработана методика поиска скрытых дефектов в устройствах и техноло-

гиях технических объектов с использованием компьютерной системы. Созданный пакет прикладных программ является компьютерной поддержкой принятия решений при поиске скрытых дефектов. Компьютерная разработка основывается на материалах [1-9]. В известный FMEA-анализ введены разделы: функционально-ресурсный анализ, метод решения исследовательских задач, экспертные оценки (расчет коэффициента конкордации, степени важности мнения эксперта при решении конкретной производственной задачи, выявление причинно-следственных связей).

Программа предоставляет удобный интерфейс для проведения процедуры поиска скрытых дефектов в устройствах и технологиях. Первоначально происходит в диалоге с компьютером формирование рабочей группы FMEA. Предоставляются возможности проведения FMEA по упрощенной программе, а также по проведению углубленного анализа скрытых дефектов.

На первоначальном этапе работ по FMEA ответственный за его проведение готовит приказ или распоряжение по соответствующему подразделению о привлечении к работе по FMEA-конструкции необходимых специалистов. В отобранной группе, ответственный за проведение FMEA проводит семинары по методу экспертных оценок и оценивает степень согласованности мнений экспертов (вычисляются коэффициенты компетентности и конкордации).

Для того, чтобы правильно оценить общее мнение при формировании экспертной группы каждому специалисту присваивается определенный коэффициент компетентности  $C_j$ . При этом должно быть выполнено условие:

$$\sum_{j=1}^m C_j = 1$$

$$0 < C_j < 1$$

где  $m$  – число экспертов, входящих в группу.

Случаи, когда  $C_j = 0$  и  $C_j = 1$ , из рассмотрения исключаются.

Существуют два основных варианта оценивания коэффициентов компетентности  $C_j$ :

– коэффициенты  $C_j$  задаются руководи-

телем группы FMEA;

· коэффициенты  $C_j$  определяются методом экспертных оценок (если руководитель затрудняется в их оценке).

Для определения компетентности  $C_j$  методом экспертных оценок члены экспертной группы выполняют оценку компетентности по соответствующей проблеме путем заполнения бланков, аналогичных показанному на рис. 1.

Таким образом, экспертные оценки образуют некоторую матрицу  $A = \{a_{i,j}\}$ . Коэффициенты компетентности получают путем решения системы уравнений

$$C_i = \sum_{j=1}^m a_{i,j} C_j,$$

$$\sum_{j=1}^m C_j = 1$$

Полученные коэффициенты  $C_j$  экспертам не сообщают и используют при обработке оценок определяемых свойств объектов [3].

Процедура вычисления коэффициентов методом экспертных оценок выполняется в следующей последовательности. Каждый эксперт оценивает свою компетентность и других членов группы так, чтобы сумма оценок была равна единице (рис. 2).

После нажатия кнопки “Вычислить коэффициенты компетентности” в исходный список вносятся окончательные коэффициенты компетентности, которые будут использоваться для оценки общего мнения. Сумма коэффициентов равна единице (рис. 3).

Уровень согласия определяется путем вычисления коэффициента конкордации, который определяется выражением:

$$w = \frac{12 * S}{N^2 (n^3 - n)},$$

N	Ф.И.О. эксперта	Оценка
1	Иванов И.И.	$a_{i,j}$
...	...	...

Рис.1. Бланк оценки компетентности

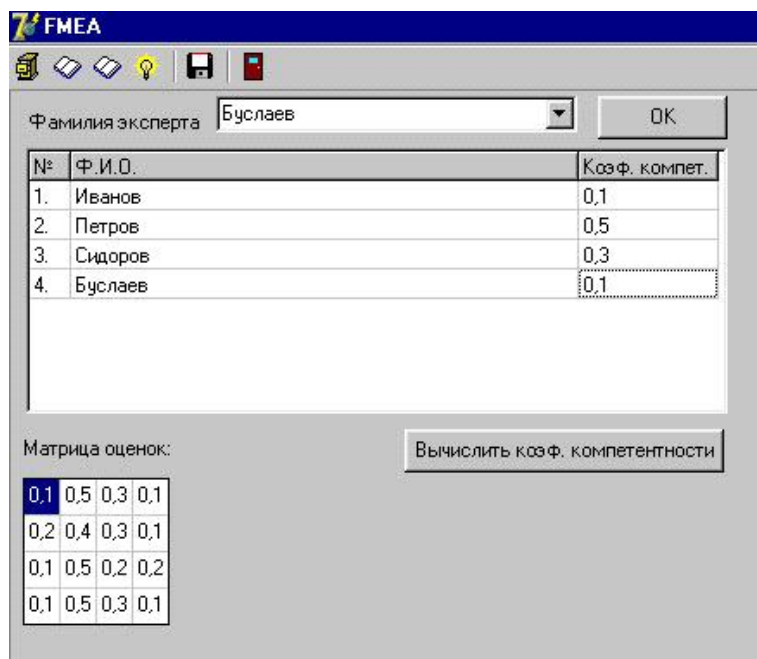


Рис. 2. Окно программы при введении оценок

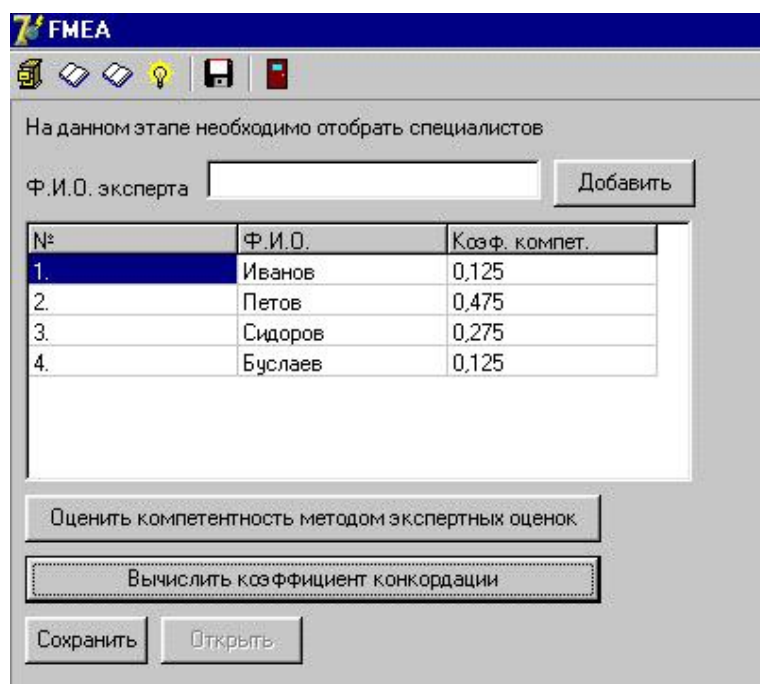


Рис. 3. Окончательные коэффициенты компетентности

$$\text{где } S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2, \Delta_i = \sum_{j=1}^N a_{i,j} - T, T = N\left(\frac{n+1}{2}\right),$$

$a_{i,j}$  – ранг  $i$ -го показателя у  $j$ -го эксперта;  $N$  – количество экспертов;  $n$  – количество показателей.

Оценка значимости коэффициента конкордации производится по величине статистического критерия:

$$\chi_{\text{расчет}}^2 = N(n-1)w$$

Для 1%-го уровня значимости при  $n$  степенях свободы ( $\nu = n - 1$ )  $\chi_{\text{табл}}^2 < \chi_{\text{расчет}}^2$

В этом случае говорят о высокой вероятности неслучайной согласованности экспертов.

Для перехода к расчету коэффициента конкордации нужно нажать кнопку “Вычислить коэффициент конкордации”. Далее необходимо установить число показателей ( $v$

примере - 4) и заполнить таблицу, показанную ниже (рис. 4).

Нажав кнопку “Рассчитать коэффициент конкордации w” на экране высвечивается зна-

чение коэффициента конкордации и статистического критерия  $\chi^2_{табл}$ .

Кнопка “hi\_kvadr” выводит на экран таб-

№ Эксп\Ранг				
1	3	1	2	4
2	2	1	3	4
3	2	1	3	4
4	1	2	3	4
A	8	5	11	16
B	2	5	1	6
C	4	25	1	36

A - Сумма рангов  
 B - Отклонение от средней суммы рангов  
 C - Квадраты отклонений

Рассчитать коэффициент конкордации w

Коэффициент конкордации:  
 $w = 0,825$   
 $\chi^2 = 9,9$

hi\_kvadr

Рис. 4. Расчет коэффициентов конкордации

Название изделия:

Функция:

Причины-следственная цепь:
 

- Быстрый разряд аккумуляторной батареи
- Неисправность топливного генератора
  - Обрыв ремня передачи крутящего момента генератора
- Низкий уровень содержания электролита
- Уровень давления электролита не соответствует норме
  - Не выполнены вовремя профилактические работы
  - Срок годности изделия истек
- Утечка топлива
- растрескивание топливного шланга

Выберите из списка или добавьте самостоятельно исходя из параметров нормального функционирования изделия вредные эффекты и физические явления, приводящие к их возникновению

Далее необходимо выделить уязвимые места в конструкции и оценить возможность возникновения в них вредных эффектов (зоны концентрации усилий, вибрации, трения, высоких температур и т. д.)

Вредный эффект:  Причина/Механизм:

Физические явления (Возможная конечная причина):

система зажигания

Рис. 5. Информация об изделии

лицу значений критерия  $t$  для различных уровней значимости и чисел степеней свободы. В данном случае берется уровень значимости 0,01 и число степеней свободы –  $\nu = n - 1$ , где  $n$  - количество показателей.

Для начала исследования нужно перейти к одному из разделов – FMEA конструкции или FMEA технологии изготовления с помощью соответствующих кнопок на панели инструментов.

При проведении FMEA конструкции необходимо заполнить информацию об изделии – название, функции, а так же возможные вредные эффекты и физические явления, которые могут привести к проявлению вредных эффектов (рис. 5).

Вредные эффекты и явления, а также

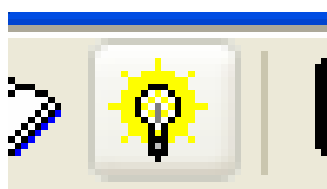


Рис. 6. Кнопка перехода в режим оценки риска

приводящие к ним факторы, выстраиваются в иерархическую структуру, в корне которой стоят основные проблемы, а далее следуют промежуточные причины и т.д. Первичные причины находятся в наивысших узлах сформированного дерева.

Далее определяются уязвимые места в конструкции, т.е. те узлы, которые могут быть подвержены выявленным основным проблемам, стоящим в корне дерева, и оценивается возможность возникновения в них вредных эффектов. Для перехода в режим оценки риска нужно нажать на кнопку (рис. 6).

На этом шаге (рис.7) необходимо выбрать основную проблему из автоматически сформированного списка и одну из конкретных первичных причин этой проблемы (так же из автоматически сформированного списка, содержащего наивысшие узлы дерева причинно-следственных связей, построенного на предыдущем шаге). Для этой причины указать и оценить численно последствия и действующие меры управления по контролю и устранению вредного эффекта, после чего нажать на кнопку “ok”. В поле “ПЧР =” высвечивается приоритетное число риска, нахо-

Узел "система зажигания"  
Изделия "Автомобиль"

Оценка риска

**Отказ:**  
Быстрый разряд аккумуляторной батареи

**Причина отказа:**  
Низкий уровень содержания электролита

**Последствия потенциального отказа**

ПЧР =

Степень возможности возникновения (O)

Степень значимости (S)

Возможность обнаружения (D)  
(В результате предпринятых мер управления)

Рис. 7. Окно программы в режиме оценки риска

дящееся в интервале от 0 до 1000. Если оно окажется достаточно высоким (больше 100) имеет смысл пересмотреть предполагаемые меры управления с целью понижения приоритетного числа риска.

В случае затруднения в оценке того или иного параметра можно воспользоваться подсказкой, нажав на вопросительный знак рядом с полем соответствующей оценки.

Усовершенствование FMEA-анализа позволило существенно расширить область применения технологии поиска скрытых дефектов. Этот анализ может быть использован при поиске скрытых дефектов и явлений в различных устройствах и технологиях – начиная с простейших устройств и технологий (например, мясорубок, контакторов), заканчивая сложными промышленными объектами (например, роботы, автомобили и др.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ видов и последствий потенциальных отказов (FMEA). Справочное руководство. Крайслер Корпорэйшн, Форд мотор компании, Дженерал Моторс корпорейшнз. Перевод на русский язык СМЦ “Приоритет”, АО “НИЦ КД”, 1997.
2. Злотин Б.Л., Зусман А.В. Решение исследовательских задач. Кишинев. 1991.
3. Воронов А.А., Кондратьев Г.А., Чистяков Ю.В. Теоретические основы построения автоматических систем управления. М.: Изд-во “Наука”, 1977.
4. <http://www.standard.ru/iso9000/iso9000-txt17.phtml>
5. <http://prioritet.tripod.com/books/1007.html>
6. [http://www.iso9000.ru/Technol\\_qual/analis.html](http://www.iso9000.ru/Technol_qual/analis.html)
7. <http://md-marketing.ru/articles/html/article10275.html>
8. Радомский В.М., Михелькевич В.Н., Захарова Е.В. Использование эвристических методов творчества для повышения надежности технических устройств // Сб. трудов Международной конференции Proceedings of the conference. Самара, 1999.
9. Михелькевич В.Н., Радомский В.М. Основы научно-технического творчества./Серия “Высшее профессиональное образование”. Ростов-н/Д: Феникс, 2004.

#### DETECTION OF LATENT DEFECTS AND PREDICTION OF UNDESIRABLE PHENOMENA IN ENGINEERING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

© 2005 V.M. Radomsky

Samara State Technical University

The investigation is concerned with the detection of latent defects and predication of undesirable phenomena in engineering systems and technologies based on the FMEA-analysis, theory of research problem solving, function-resource analysis and expertise.