



УДК 621.31

© И. Г. Румановский, 2008

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА СТАДИИ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Румановский И. Г. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Компьютерное проектирование и сертификация машин» (ТОГУ)

В настоящее время для определения потенциальных отказов при проектировании новых изделий используются такие процедуры, как анализ видов, последствий и критичности отказов; анализ дерева отказов; построение блок-схем надежности сложных систем; марковский анализ; построение нейронных сетей; статистический кластерный анализ; планирование эксперимента. В данной работе описывается метод идентификации отказов на основе моделирования функционального взаимодействия компонентов в механических системах, предложены экспертные базы, содержащие информацию о потенциальных видах отказов, которые помогут проектировщику более эффективно использовать такие программные средства, как анализ видов, последствий и критичности отказов, анализ дерева отказов.

Such procedures as Failure Mean and Effect Analysis, Fault Tree Analysis, Reliability Block Diagram, Markov Analysis, Neurons Networks, Statistic Clustering Analysis, Planning of Experiment are used to pinpoint potential failures in designing new products. A technique for failure identification with the use of simulation of a functional interplay between components in mechanical systems is described. Experts bases are given that should help use such software as Failure Mean and Effect Analysis, Fault Tree Analysis in a more effective way.

Знания о потенциальных видах отказов при проектировании новой техники являются ключевыми для их предотвращения. Исследования показывают, что около 80 % потенциальных проблем в области обеспечения параметрической надежности нового продукта закладываются на стадии его концептуального проектирования. В настоящее время для определения потенциальных отказов и соответственно метрик на-

дежности изделия на стадии концептуального проектирования используются такие процедуры, как анализ видов, последствий и критичности отказов [1]; анализ дерева отказов; построение блок-схем надежности сложных систем; марковский анализ; построение нейронных сетей; статистический кластерный анализ; планирование эксперимента, а также накопленные знания и опыт. При проектировании новой продукции разработчики часто испытывают недостаток знаний о потенциальных видах отказов нового изделия и недостаток опыта для идентификации всех возможных отказов. Это создает много ситуаций, когда проектировщик не может извлечь максимальной пользы из предложенных выше процедур. Таким образом, предложенные средства не дают конструктору информацию о преобладающих видах отказов, на которые он должен обратить внимание при проектировании нового изделия.

В данной работе на основе анализа работ [2,3,4,5] описывается метод идентификации отказов на основе моделирования функционального взаимодействия компонентов изделия, предложены базы знаний, содержащие информацию о потенциальных видах отказов, которые помогут проектировщику более эффективно использовать такие средства, как анализ видов, последствий и критичности отказов, анализ дерева отказов. Проблеме классификации и категоризации отказов механических систем, а также изучению физического механизма отказов посвящено много исследований. Наиболее полной и функциональной можно считать классификацию, предложенную Коллинзом [3], она представлена в табл. 1.

Таблица 1

Категоризация отказов

Категория	Подкатегория
Вид отказа	
Упругая деформация	
Пластическая деформация	
Разрушение или излом	
Изменение свойств материала	Металлургическое
	Химическое
	Радиоактивное
Факторы, вызывающие отказ	
Нагрузка	Постоянная
	Переменная
	Циклическая
	Стохастическая



Окончание табл. 1

Категория	Подкатегория
Время	Очень короткое
	Короткое
	Длинное
Температура	Низкая
	Комнатная
	Повышенная
	Постоянная/Переменная
	Циклическая
Окружающая среда	Стохастическая
	Химическая
	Радиоактивная
Человек	
Расположение отказа	
Деталь	
Поверхность	

Используя представленную выше табл. 1, можно предложить следующую классификацию, описывающую 23 наиболее распространенных вида отказов механических систем (см. табл. 2).

Таблица 2

Классификация видов отказов

Категория	Подкатегория	Категория	Подкатегория
Деформация под действием силы / температуры		Удар	Ударное разрушение
	Текучесть		Ударная деформация
Пластическое разрушение			Ударный износ
	Хрупкое разрушение		Ударная усталость
Усталость	Высокоциклическая усталость	Фреттинг	Фреттинг усталость
	Низкоциклическая усталость		Фреттинг износ

*Окончание табл.2*

Категория	Подкатегория	Категория	Подкатегория
	Тепловая усталость		Фреттинг - коррозия
	Поверхностная усталость	Ползучесть	
	Ударная усталость	Тепловое расширение	
		Разрушение	
	Коррозионная усталость	Тепловой удар	
	Фреттинг усталость	Задир и заклинивание	
Коррозия	Непосредственная химическая атака	Растрескивание	
	Гальваническая коррозия	Ущерб от радиоактивности	
	Crevis коррозия	Коробление (осевой изгиб)	
	Коррозия на границах зерен	Ползучесть с короблением	
	Питтинг коррозия	Коррозионный износ	
	Выборочное выщелачивание	Коррозионная усталость	
	Эрозия	Комбинация ползучести и усталости	
	Гидрогенная коррозия		
	Биологическая коррозия		
Износ	Адгезивный износ		
	Абразивный износ		
	Коррозионный износ		
	Усталостный износ поверхности		
	Деформационный износ		
	Ударный износ		



Предложенные выше классификации позволяют описать физическую природу любого отказа в механических системах. Поясним это на следующем примере:

Отказ «Абразивный износ»; Вид отказа: разрушение или излом; факторы, вызвавшие отказ: циклическая нагрузка, длительное время эксплуатации, расположение отказа: поверхность.

Перейдем к рассмотрению процедуры формирования матрицы функция-отказ. Матрица функция-компонент формируется из компонент вектора, полученного из сборочного чертежа и вектора функции, полученного из функциональной модели. Матрица компонент-отказ формируется из компонент вектора и вектора отказов. Матрица функция-отказ формируется посредством умножения двух матриц: функция-компонента и компонент-отказа. Таким образом, процедура построения матрицы функция-отказ реализуется посредством вышеперечисленных четырех шагов (см. рис.1).

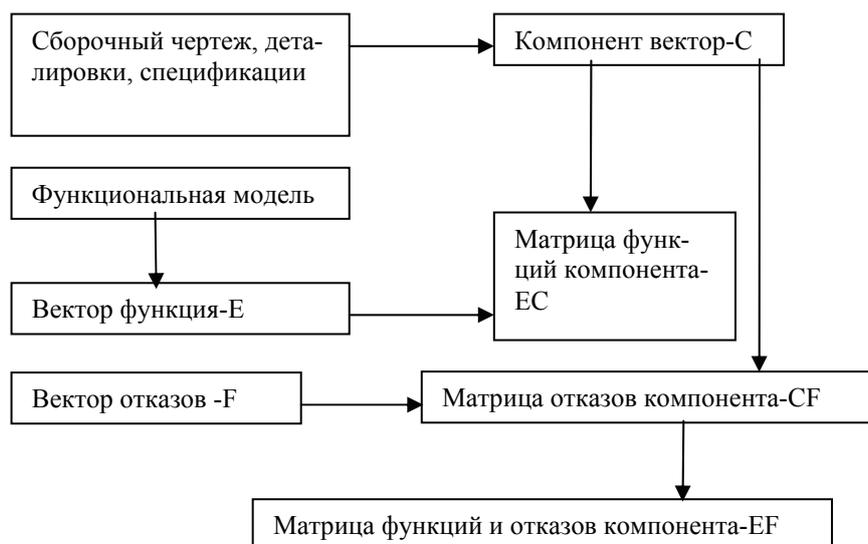


Рис. 1. Процедура построения матрицы функция-отказ

Рассмотрим подробнее метод получения функциональной модели системы. Функциональная модель – это описание продукта или процесса в виде элементарных функций, которые требуются для обеспечения его служебного назначения. Функциональная модель реализуется в виде блок-схемы, отображающей различные функции изделия и их взаимосвязи посредством преобразования энергетических, материальных и информационных потоков. Представление функций изделия посредством вербально-объектного (пара функция - поток) формата применимо для описания процесса проектирования механических систем.

В табл. 3,4 показаны функциональные классы и потоки классов соответственно.

Таблица 3

Функциональные классы и их базовые категории

Класс	Материал	Сигнал	Энергия		
Базовый	человек	статус	человеческая	электрическая	механическая
	газ	сигнал	акустическая	электромагнитная	пневматическая
	жидкость		биологическая	гидравлическая	радиоактивная
	Твердое тело		химическая	магнитная	тепловая
	Плазма				
	Смесь				

Таблица 4

Потоки классов и их базовые категории

Класс	Базовый	Класс	Базовый	Класс	Базовый
Ветвь	разделение	Контрольная величина	активация	Сигнал	чувствительность
	представление		регулирование		индикация
Канал	импорт		изменение		Обеспечение
	экспорт	остановка	стабилизация		
	передача	Преобразование	Преобразование	безопасность	
	направление	Провизия	сохранение	позиция	
Соединение	Связь		поставка		
	Смешивание				

Далее с помощью сборочного чертежа и функциональной модели формируется матрица функция-компонент. В этой матрице компоненты представлены в виде n -столбцов, а функции – в виде m -строк. В ячейке ставится 1, если компонент выполняет данную функцию и 0, если не выполняет. Назовем эту $m \times n$ матрицу ЕС матрицей (см. табл.5).



Таблица 5

ЕС-матрица

Функция-компонент	Компонент-1	Компонент-2	-	-	-	Компонент-n
Функция-1	0	1	0	0	0	0
Функция-2	1	0	0	0	0	0
-	0	0	0	0	1	0
-	0	0	1	0	0	0
-	0	0	0	0	0	0
Функция-m	0	1	0	0	0	1

Теперь переходим к третьему этапу – документированию данных об отказах. Лучше всего это делать в табличной форме, где столбцы несут информацию о названии деталей и функциях, ими выполняемых, к этому добавляется информация о видах отказов, их причинах и эффектах, также необходимо указать степень риска (severity) и частоту отказов.

Для описания видов отказов мы предлагаем использовать базу знаний, в которой для удобства работы наряду с полным перечнем видов отказов добавлены идентификаторы, с помощью которых значительно упрощается процедура формирования комплекта возможных отказов для компонента. Первичный идентификатор содержит информацию о типе приложенной нагрузки, её физической природе, типе материала, из которого изготовлен компонент, а также характеристики окружающей среды. Вторичный идентификатор содержит информацию о материале компонента, характеристики отказа или наличие других факторов и средств. Фрагмент предлагаемой базы знаний представлен в табл. 6.

Таблица 6

Идентификация видов отказов

Первичный идентификатор	Вторичный идентификатор	Вид отказа
Упругая деформация		Деформация, обусловленная силовым воздействием или изменением температуры
Пластическая деформация	Эластичный материал	

*Продолжение табл.6*

Первичный идентификатор	Вторичный идентификатор	Вид отказа
Статическая нагрузка. Криволинейные поверхности	1. Часто встречающаяся неоднородность поверхности 2. Слипание частиц материала	Бринеллинг
Пластическая деформация Упругий материал	1. Разделение на две части 2. Волокнистая поверхность	Упругий излом
Пластическая деформация Хрупкий материал	1. Разделение на две части 2. Гранулированная многогранная поверхность излома	Хрупкое разрушение
Переменная нагрузка/деформация	1. Быстрое разделение на части 2. Циклическая нагрузка более 10000 циклов	Высокоциклическая усталость
Переменная нагрузка/деформация	1. Быстрое разделение на 2 части 2. Циклическая нагрузка менее 10000 циклов	Низкоциклическая усталость
Переменная нагрузка/деформация	Вызывается изменением температуры	Термическая усталость
Переменная нагрузка/деформация	1. Взаимное перемещение контактирующих поверхностей 2. Образование вмятин, трещин, изменение размеров	Поверхностная усталость, износ поверхностей
Переменная нагрузка/деформация Ударная деформация Упругая деформация	Разрушение происходит путем радиоактивного распада или растрескивания	Ударная усталость, износ от ударов
Массовое появление вмятин или отверстий	Наличие коррозионной среды	Pitting-коррозия



Продолжение табл.6

Первичный идентификатор	Вторичный идентификатор	Вид отказа
	Коррозия вызывает рост напряжений в детали, повышение напряжений ускоряет процесс усталостного разрушения, а это в свою очередь приводит к росту коррозии.	Коррозионная усталость
Переменная нагрузка/деформация	1. Взаимодействие двух твердых тел 2. Нормальная сила 3. Кинематические соединения не двигаются	Фреттинг-усталость
Электрохимическая коррозия	Два разнородных металла в электрическом контакте, наличие коррозионной среды	Гальваническая коррозия
Локализации в раковинах, трещинах и соединениях	Наличие коррозионной среды	Crevis-коррозия
По границам зерен Cu, Ch, Ni, Al, Mg, Zn сплавов	Неправильная термическая обработка	Коррозия на границах зёрен
Присутствие потока абразивного/вязкого металла	Коррозионная среда	Эрозия, коррозионный износ
Разница в давлении пара		Кавитационная эрозия
Пластическая деформация	Ударная нагрузка	Деформационный износ

*Окончание табл. 6*

Первичный идентификатор	Вторичный идентификатор	Вид отказа
Наличие напряжений	Коррозионная среда	Коррозия
Непредусмотренное изменение размеров	Высокое давление Пластическая деформация Излом острых краев	Адгезивный износ
Соединение поверхностей	Вырывание частиц более твердой поверхностью или энтропией	Абразивный износ
Изменение размеров	1. Соединение частей 2. Нормальная сила 3. Кинематические соединения не двигаются	Фреттинг-износ
Ударная нагрузка	Разделение на 2 и более частей	Разрушение от ударного воздействия
Пластичная/упругая деформация	Ударная нагрузка	Ударная деформация
Пластическая деформация	1. Воздействие температуры или давления 2. Разрушения, вызванные следующими факторами: давлением, временем и температурой	Разрушение в результате ползучести материалов
Деталь под предварительным нагружением	Изменение размеров	Термическая релаксация
Температурные градиенты	Разность напряжений	Термический шок



После того как данные о возможных отказах компонентов записаны, можно приступить к четвертому шагу – формированию матрицы компонент-отказа, столбцы которой представляют собой комплект видов отказов, а строки – наименования компонентов. Полученную таким образом $n \times p$ матрицу назовём компонент-отказ матрицей и обозначим – CF. В ячейки матрицы заносим 1, если для данного компонента наблюдается данный вид отказа, и 0, если нет. Фрагмент сформированной таким образом матрицы CF показан в табл. 7.

Таблица 7

Фрагмент матрицы компонент-отказ

Компонент-вид отказа	Вид отказа-1	Вид отказа-2	-	-	-	Вид отказа-р
Компонент-1	0	1	0	0	0	0
Компонент-2	1	0	0	0	0	0
-	0	0	0	0	1	0
-	0	0	1	0	0	0
-	0	0	0	0	0	0
Компонент-n	0	1	0	0	0	1

Наконец, переходим к формированию матрицы функция-отказ, эта матрица получается перемножением матрицы функция-компонент (EC) и матрицы компонент - отказ (CF), т.е. $EF = EC \times CF$. Результирующая $m \times p$ матрица называется EF матрицей. Ячейки этой матрицы содержат информацию о частоте проявления какого-либо отказа для данной функции. Таким образом, мы полностью описали методику идентификации отказов механических систем. В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию интеллектуальной экспертной системы, которая включает в себя:

- полную интеграция в CAD среду Компас и SolidWorks с использованием технологии Built-in;
- автоматизацию процедуры построения функциональной модели механической системы на базе так называемого виртуального прототипа;
- комплект баз знаний о потенциальных типах отказов, их причинах и эффектах;
- автоматизированную процедуру анализа видов, последствий и критичности отказов и построения дерева отказов;
- математический аппарат для моделирования случайного характера нагрузки и физико-механических свойств материала;
- математический аппарат для расчета метрик надежности механических и электронных компонентов и систем, таких как

- среднее время наработки на отказ, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы;
- библиотеку типовых механических компонентов с методиками расчета метрик надежности;
 - интеграцию с промышленными пакетами МКЭ и кинематического анализа;
 - математический аппарат для оптимизации плана предупредительных ремонтов и техобслуживания на основе минимизации стоимости жизненного цикла изделия;
 - методику статистического кластерного анализа, которая дает возможность получения на стадии концептуального проектирования комплекта преобладающих отказов нового изделия.

Таким образом, разрабатываемая экспертная система позволяет разработчику уже на стадии концептуального проектирования выявить все возможные типы потенциальных отказов нового изделия, оценить его надежность и таким образом значительно повысить качество проектно-конструкторских разработок.

Библиографические ссылки

1. *MIL-P-1629A*, Procedures for performing a failure modes, effects, and criticality analysis. 1980.
2. *Tumer, I.Y. and R.B. Stone*. Analytical method for mapping function to failure during high-risk component development. in Proceedings of the Design Engineering Technical Conferences. 2001. Pittsburgh, PA: ASME.
3. *Collins, J.A., B.T. Hagan, and H.M. Bratt*, The failure-experience matrix: A useful design tool. Journal of Engineering for Industry, 1976. August.
4. *Stone, R.B. and K.L. Wood*, Development of a Functional Basis for Design. Journal of Mechanical Design, 2000. 122(December).
5. *Hirtz, J.*, et al., A functional basis for engineering design: reconciling and evolving previous efforts. Research in Engineering Design (accepted for publication), 2001.