



УДК 621.31

© С. И. Клепиков, И. Г. Румановский, Г. И. Пяткова, 2010

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Клепиков С. И. – д-р техн. наук, проф. завкафедрой «Компьютерное проектирование и сертификация машин», тел.: (4212) 37-52-29, e-mail: klepikovsi@mail.ru; *Румановский И. Г.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Компьютерное проектирование и сертификация машин», тел.: (4212)73-40-12, e-mail: igorrum1970@mail.ru; *Пяткова Г. И.* – асп. кафедры «Компьютерное проектирование и сертификация машин», e-mail: galcha86@inbox.ru (ТОГУ)

В настоящее время хорошо развиты экспертные (анализ видов и последствий отказов, анализ дерева отказов), аналитические и численные методы анализа надежности на стадиях жизненного цикла изделия: рабочего проекта, натурных испытаний опытного образца и эксплуатации. Установлено, что имеет место дефицит систем для анализа надежности на ранней стадии проектирования. Однако, по данным отечественных и зарубежных исследований, причиной 80 % всех отказов изделия являются дефекты, заложенные на стадии проектирования. В данной статье описывается метод оценки надежности на стадии концептуального проектирования на примере компрессоров K250-61-5 и ЦНВ 800/1.6, выпускаемых ОАО «Дальэнергомаш».

Expert (Failure Modes and Effects Analysis, and Fault Tree analysis), analytical and numerical methods of reliability analysis at various stages of the product's life cycle including design, full-scale tests of pre-production models, and Field Data Analysis, have been well developed. It is known that there is a lack in systems for the analysis of reliability at early stages of the design. However, according to domestic and foreign researches, 80 % of all failures are caused by defects made at early design stages. This paper, on the basis of K250-61-5 and CHB 800/1.6 compressors as an example produced by JSC "Dalenergomash", describes a method for reliability estimation at the stage of conceptual design.

Ключевые слова: надежность, отказ, матрица «компонент-отказ», матрица «функция-отказ», функциональная модель.

На основе анализа опыта эксплуатации аналогичных отечественных и зарубежных компрессоров была сформирована база характерных видов отказов для типовых деталей и узлов компрессоров. Метод функции-отказа основан на анализе связей между компонентами, их отказами и функциями. В

этой работе метод функции-отказа представлен как инженерный инструментарий, который используется для оценки надежности на стадии проектирования [1, 2, 3, 4].

Предварительные матричные вычисления

Компрессор можно разделить на компоненты. Получим вектор С компонентов и вектор F видов отказов, которые были обнаружены. Векторы F и С представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Вектор F – отказы			
Отказ			
F1	Разрушение	F6	Заклинивание и задиры
F2	Коррозия	F7	Человеческий фактор
F3	Усталость	F8	Разрушение вследствие напряжённого состояния
F4	Трещина	F9	Термический шок
F5	Фреттинг	F10	Износ

Таблица 2

Вектор С – компоненты					
Компонент					
C1	Подшипник опорный	C8	Ротор	C15	Фундаментные стяжки
C2	Уплотнение масляное	C9	Диффузор	C16	Фундаментные рамы
C3	Корпус компрессора	C10	Обратный направляющий аппарат	C17	Фундаментные рамы
C4	Воздушные лабиринтные уплотнения	C11	Думмис	C18	Колесо компрессора
C5	Подшипник опорно – упорный	C12	Стыковая часть компрессор – редуктор	C19	Вал
C6	Редуктор	C13	Маслонасос главный	C20	Крепеж
C7	Стыковая часть редуктор – двигатель	C14	Анкерные плиты		

Информация о видах отказов, функциональном назначении и компонентах отображается в виде матрицы. В матрице CF «компонент–отказ» в строках записаны компоненты, в столбцах – виды отказов. Матрица CF показана в табл. 3 в бинарной форме. Цифра «1» соответствует наличию отказа для компонента и «0» - отсутствию отказа. Визуальное представление данных по компонентам и их отказам показано на гистограмме, представленной на рис. 1. Для построения гистограммы была использована матрица, представленная табл. 3.



Таблица 3

Матрица CF «компонент–отказ»

Показатель	Разрушение	Коррозия	Усталость	Трещина	Фреттинг	Заклинивание и задиры	Человеческий фактор	Разрушение вследствие напряжённого состояния	Термический шок	Износ
Компонент/Отказ	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
C1	Подшипник опорный	0	0	1	0	0	1	0	1	1
C2	Уплотнение масляное	0	0	0	0	0	0	0	0	1
C3	Корпус компрессора	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C4	Воздушные лабиринтные уплотнения	0	0	0	0	0	0	0	0	1
C5	Подшипник опорно – упорный	0	0	1	0	0	1	0	1	1
C6	Редуктор	0	0	1	1	0	0	0	0	1
C7	Стыковая часть редуктор – двигатель	0	0	1	0	0	0	0	0	1
C8	Ротор	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C9	Диффузор	0	0	1	0	0	0	0	0	0
C10	Обратный направляющий аппарат	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C11	Думмис	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C12	Стыковая часть компрессор – редуктор	0	1	0	0	0	0	0	1	0
C13	Маслонасос главный	0	0	0	0	0	0	0	0	1
C14	Анкерные плиты	0	0	0	1	0	1	0	0	0
C15	Фундаментные стяжки	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	Фундаментные рамы	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	Колесо компрессора	0	0	1	0	0	0	1	1	0
C18	Вал	1	1	0	0	0	0	0	1	0
C19	Крепеж	0	0	1	0	1	0	0	0	0

Гистограмма "Компонент - отказ"

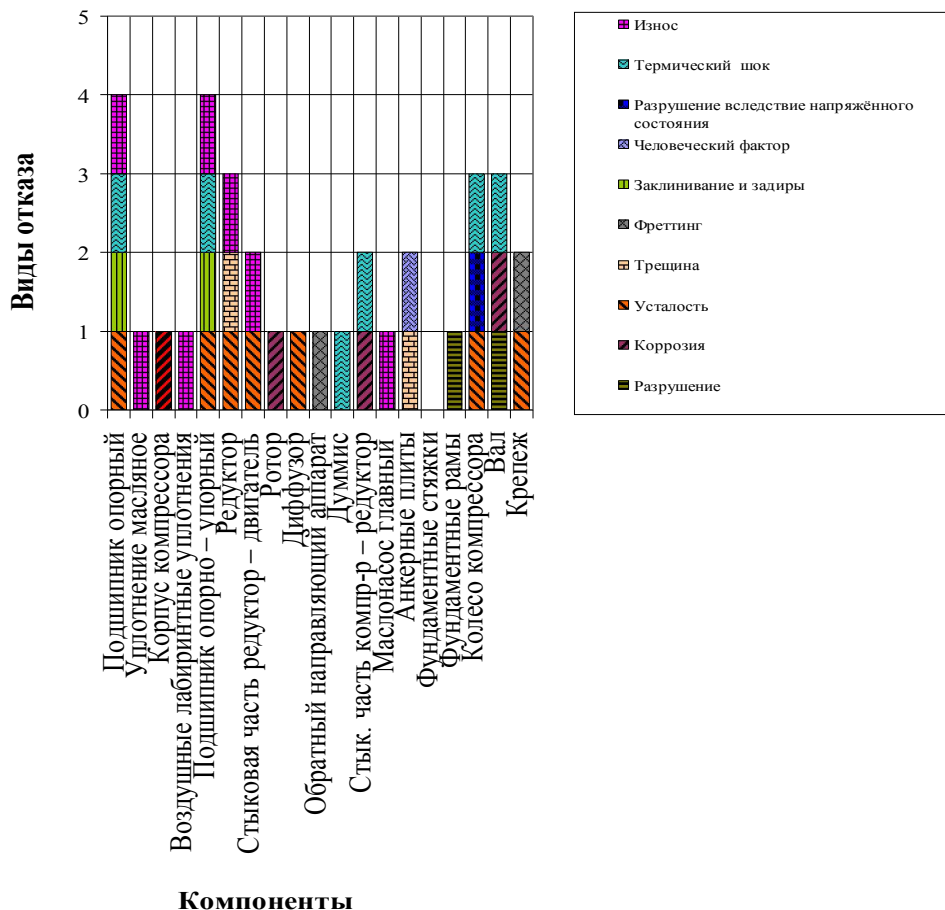


Рис. 1. Гистограмма «Компонент–отказ»

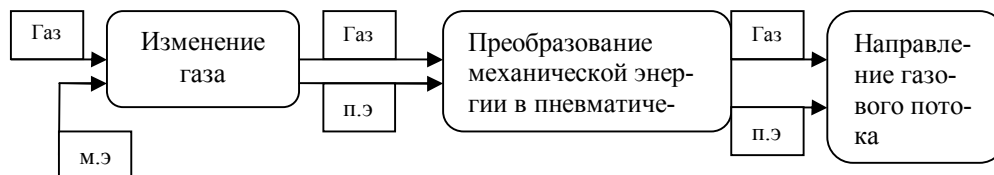


Рис. 2. Функции колеса компрессора

Следующий шаг – построение функциональной модели для компонентов компрессора. На рис. 2 показан пример построения функциональной цепи для колеса компрессора. Колесо компрессора выполняет три функции: изме-



няет скорость, преобразует механическую энергию в пневматическую энергию, проводит газ [3]. Получаем вектор E, содержащий элементарные функции. Вектор E представлен в табл. 4. Сформируем матрицу EC, в ней функции записаны в строчках, компоненты – в столбцах. Матрица «функция–компонент» EC показана в табл. 5. Для строк матрицы энергетические потоки функций, составляющие механическую энергию, обозначаются – м.э, термическую энергию – т.э, пневматическую энергию – п.э. Элементы матрицы показывают, какую функцию каждый компонент выполняет. Матрица представлена в «бинарной» форме. Цифра "1" означает, что компонент выполняет данную функцию, "0" – нет.

Таблица 4

Вектор E – функции компонентов

Функция	
E1	Изменяет скорость (газ)
E2	Изменяет термическую энергию (т.э.)
E3	Преобразование механической энергии (м.э.) в пневматическую (п.э.)
E4	Преобразование термической энергии (т.э.) в п.э.
E5	Соединение м.э.
E6	Соединение поверхности (деталей)
E7	Распределение газа
E8	Экспорт газа
E9	Направляет газ
E10	Направляет деталь (поверхность)
E11	Импорт газа

После генерации матрицы «компонент–отказ» и матрицы «функция–компонент» получаем матрицу «функция–отказ» EF:

$$EF = EC \times CF .$$

Матрица «функция–отказ» EF показана в табл. 6. Элементы матрицы EF характеризуют виды отказов для элементарных функций. Каждый элемент EF_{ij} показывает количество компонентов, реализующих функцию i-й строки и генерирующие отказы j-го столбца.



Таблица 5

Матрица «функция – компонент»

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	Функция/компонент	Подшипник опорный	Уплотнение масляное	Корпус компрессора	Воздушные лабиринтные уплотнения	Подшипник опорно-упорный	Редуктор	Стыковая часть редуктор – двигатель	Ротор	Диффузор	Обратный направляющий аппарат	Думмис	Стыковая часть компрессор – редуктор	Маслонасос главный	Анкерные плиты	Фундаментные стяжки	Фундаментные рамы	Колесо компрессора	Вал	Крепеж
E1	Изменяет скорость (газ)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
E2	Изменяет термическую энергию	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	Преобразование механической энергии в пневматическую	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
E4	Преобразование термической энергии в пневматическую	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E5	Соединение м.э.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
E6	Соединение поверхности (твердых тел)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
E7	Остановка газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
E8	Экспорт газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E9	Направляет газ	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
E10	Направляет поверхность	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E11	Импорт газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Окончание табл. 5

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	Функция/компонент	Подшипник опорный	Уплотнение масляное	Корпус компрессора	Воздушные лабиринтные уплотнения	Подшипник опорно-упорный	Редуктор	Стыковая часть редуктор – двигатель	Ротор	Диффузор	Обратный направляющий аппарат	Думмис	Стыковая часть компрессор – редуктор	Маслонасос главный	Анкерные плиты	Фундаментные стяжки	Фундаментные рамы	Колесо компрессора	Вал	Крепеж
E12	Регулирование жидкости	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
E13	Регулирование те	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E14	Сохранение (защита) поверхности	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E15	Остановка жидкости	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E16	Остановка те	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
E17	Остановка смешивания	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E18	Остановка твердого тела	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E19	Остановка т.э.	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E20	Передача газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E21	Передача те	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0



Таблица 6

Матрица «функция – отказ»

		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
	Функция/отказ	Разрушение	Коррозия	Усталость	Трещина	Фреттинг	Заклинивание и задиры	Человеческий фактор	Разрушение вследствие напряжённого состояния	Термический шок	Износ
E1	Изменяет скорость (газ)	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
E2	Изменяет термическую энергию	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
E3	Преобразование механической энергии в пневматическую	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
E4	Преобразование термической энергии в пневматическую	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E5	Соединение м.э.	0	0	2	1	0	0	0	1	1	1
E6	Соединение поверхности (твёрдых тел)	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1
E7	Остановка газа	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
E8	Экспорт газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E9	Направляет газ	0	0	2	0	1	0	0	1	1	0
E10	Направляет поверхность	0	0	2	0	0	2	0	0	2	2
E11	Импорт газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E12	Регулирование жидкости	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
E13	Регулирование м.э.	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
E14	Сохранение (защита) поверхности	0	1	2	0	0	2	0	0	2	2
E15	Остановка жидкости	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
E16	Остановка м.э.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
E17	Остановка смешивания	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E18	Остановка твёрдого тела	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E19	Остановка т.э.	0	0	2	0	0	2	0	0	2	2
E20	Передача газа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E21	Передача те	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0



Для визуализации гистограмма матрицы «функция–отказ» EF показана на рис. 3.

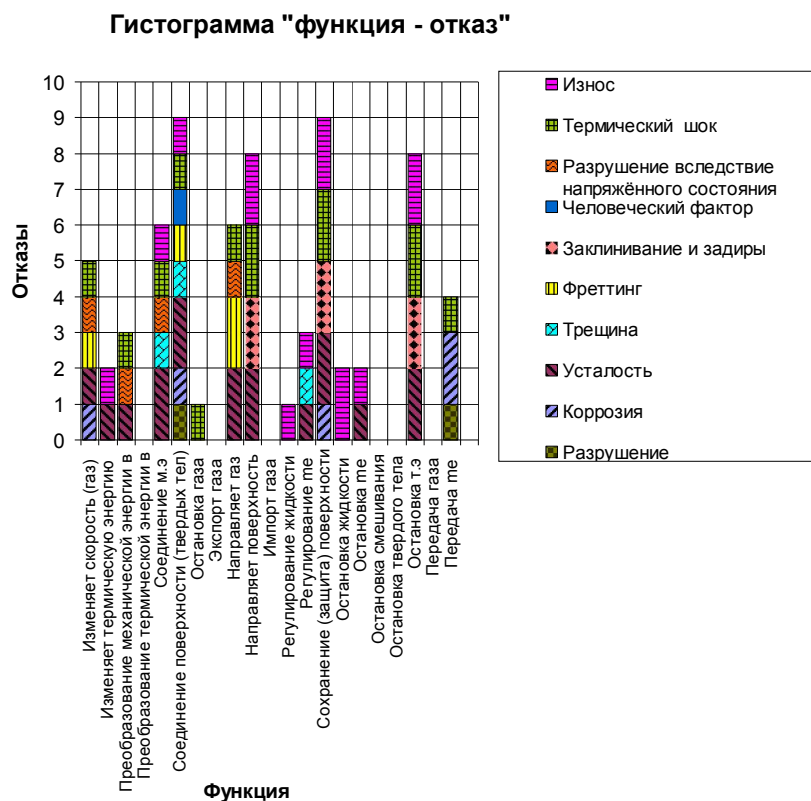


Рис. 3. Гистограмма «функция–отказ»

Для проектирования нового изделия в нашем случае нового компрессора ЦНВ800/1,6, показанного на рис. 4, инженеры составляют для проекта матрицу «функция–компонент» EC^н.

Матрицу «компонент–отказ» для нового изделия получаем посредством умножения матрицы «функция–отказ» EF, содержащую данные, полученные из существующих проектов, на транспонированную матрицу EC^н «компонент–функция» нового изделия:

$$CF = EC^{HT} \times EF.$$

Матрица «компонент–отказ» CF показывает отказы, которые могут случиться с компонентами нового проекта (табл. 7), соответствующая гистограмма показана на рис. 5. Это позволяет проектировщикам выбирать и исследовать виды отказов, оптимизировать конструкцию для устранения или уменьшения количества отказов изделия, сокращая таким образом время выработки окончательного проекта и повышая надежность изделия уже на ранней стадии проектирования.

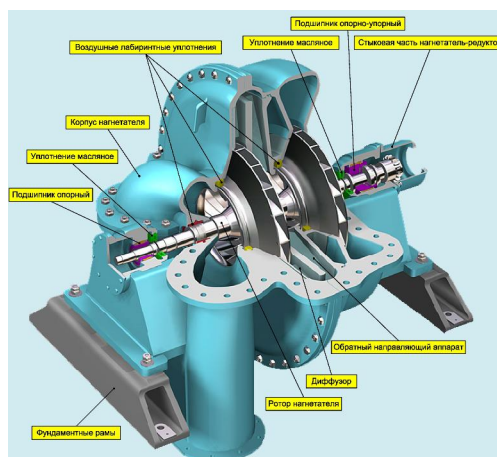


Рис. 4. Компрессор ЦНВ800/1,6

Таблица 7

Матрица CF «компонент–отказ» для нового проекта

		Разрушение	Коррозия	Усталость	Трещина	Фреттинг	Заклинивание и задиры	Человеческий фактор	Разрушение вследствие напряжённого состояния	Термический шок	Износ
	Компонент/Отказ	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
C1	Подшипник опорный	0	1	6	0	0	6	0	0	6	6
C2	Уплотнение масляное	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
C3	Корпус компрессора	0	1	2	0	0	2	0	0	2	2
C4	Воздушные лабиринтные уплотнения	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
C5	Подшипник опорно-упорный	0	1	6	0	0	6	0	0	6	6
C6	Ротор	1	3	1	0	1	0	0	1	2	0
C7	Диффузор	0	0	2	0	1	0	0	1	1	0
C8	Обратный направляющий аппарат	0	1	3	0	2	0	0	2	2	0
C9	Стыковая часть компрессор-редуктор	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1
C10	Фундаментные рамы	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1
C11	Колесо компрессора	0	1	6	1	2	0	0	4	4	1
C12	Вал	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0
C13	Крепеж	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1

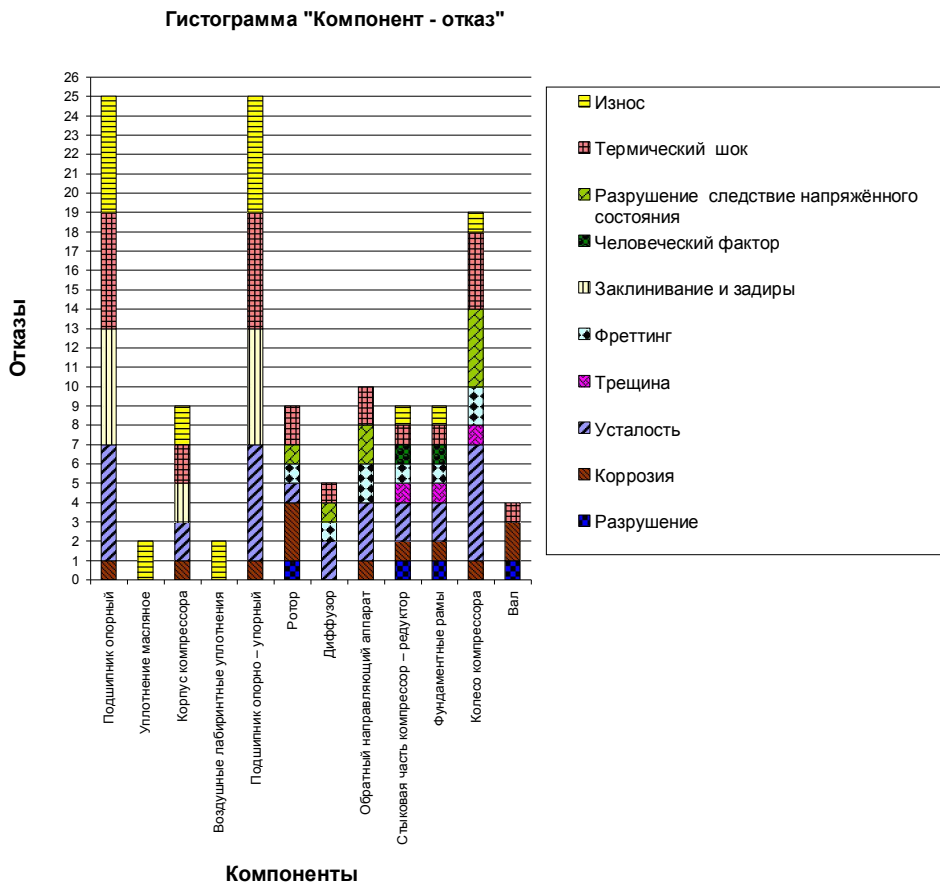


Рис. 5. Гистограмма «компонент–отказ»

Таким образом, мы получили инструментарий для анализа потенциальных видов отказов нового изделия на стадии концептуального проектирования, используя базу видов отказов уже существующих изделий. С целью повышения оперативности конструирования ведется работа по созданию:

1. Экспертной системы конструктивных исполнений проектов с выявленными в результате эксплуатации видами отказов компонентов.
2. Алгоритма автоматической генерации из CAD системы матрицы функция-отказ существующего проекта.
3. Автоматической генерации конструктивного исполнения нового изделия по заданным заказчиком требованиям по надежности изделия.

Создание системы управления надежностью изделия на ранней стадии проектирования значительно повысит качество проектно-конструкторских работ.



Библиографические ссылки

1. Румановский И. Г. Разработка интеллектуальной системы для прогнозирования потенциальных отказов механических систем на стадии концептуального проектирования // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2008. № 1.
2. Stone, R.B., K.L. Wood, and R.H. Crawford. Using quantitative functional models to develop product architectures. *Design Studies*, 2000. **21**(3).
3. Stone, R.B. and K.L. Wood. Development of a Functional Basis for Design. *Journal of Mechanical Design*, 2000. 122 (December).
4. Roberts, R. A., Stone, R. B. and Tumer, I. Y. (2002). Deriving Function-Failure Information for Failure-Free Rotorcraft Component Design. *Proceedings of the 2002 ASME Design Engineering Technical Conferences, Design for Manufacturing Conference, DETC2002/DFM-34166*, Montreal, Canada.