

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗИНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Чижик Е.Ф., «ПОЛИМЕТ», Украина

Такой подход в общем случае представляет собой процесс реализации некоторой системы принципов, выполнение которых в заданной последовательности позволяет создавать оптимальную конструкцию резиновой детали с учетом предъявляемых к ней требований. Система принципов должна обладать полнотой и обеспечивать весь процесс создания детали от математической модели до готового изделия. Рассмотрим наиболее важные принципы [1].

1. **Экологические принципы:** создаваемая деталь должна быть экологически чистой и не нарушать свойства окружающей среды.

2. **Принципы экономической эффективности:** затраты труда на создание детали должны быть меньше прибыли, получаемой при ее использовании.

3. **Принципы физической реализуемости:** конструкция резиновой детали и выбранный материал (резиновая смесь) должны допускать их выполнение существующими технологическими средствами или средствами, создание которых возможно.

4. **Принципы обеспечения работоспособности:** расчет резиновых деталей должен быть проведен по максимальным нагрузкам, соответствующим экстремальным случаям нагружения; усилия и деформации должны быть в рамках, определяемых функциональным назначением детали; резиновая деталь должна сохранять работоспособность в определенных пределах изменения ее свойств.

5. **Принцип оптимальности:** конструкция резиновой детали должна быть унифицированной и допускать совмещение нескольких функций; резиновая деталь должна быть по воз-

возможности равнонадежной по отношению к другим деталям машины; затраты на монтаж и демонтаж должны быть минимальными.

**6. Принцип минимизации стоимости массового производства:** форма детали должна быть предельно простой, допускающей изготовление при минимальных затратах на простом оборудовании.

Приведенная система принципов внутренне противоречива, что приводит к многовариантности методологических подходов к проблеме создания резиновых деталей. Существенную помощь при этом оказывает база экспериментальных данных, инженерный опыт, союз механики и технологии, компьютерная техника, получившая широкое распространение при проектировании, чему в немалой степени способствует современное программное обеспечение.

Вместе с тем в механике эластомерных конструкций имеется ряд задач по проектированию технических систем, например, системы виброизоляции тяжелых машин и сооружений, системы защиты барабанных мельниц с помощью резиновой футеровки, системы сейсмоизоляции зданий и др., в которых проектирование отдельных элементов системы в целом (здесь система понимается в смысле терминологии В.Губки [2]) выходит за рамки обычного проектирования и приближается в некотором смысле к инженерному искусству. Действительно, используя принципы дизайна, нужно создать не только оригинальную конструкцию с наперед заданными свойствами, но и создать или выбрать из существующих оригинальный материал со специфической технологией. При этом на определенном уровне решения задач успехи проектирования нередко обуславливаются именно выбором материала и технологий.

Работа является продолжением идей, высказанных на ICED'88 в Будапеште [3], где излагался математический подход к созданию резиновых деталей (РД) для экстремальных условий эксплуатации. При создании таких РД с наперед за-

данными свойствами необходимо решить ряд задач, связанных с их проектированием, выбором подходящего материала и технологии изготовления. Задачи эти взаимосвязаны, и каждая из них обладает достаточной сложностью. Конечной целью является выбор оптимальных параметров и форм РД и определение ее долговечности с учетом старения материала, условий эксплуатации, влияния среды и т.д.

### **Формально-логический подход к проектированию.**

При решении задач проектирования резиновых деталей необходимо описывать временные, пространственные, причинно-следственные и другие отношения, носящие в целом понятийный характер. Поэтому такие задачи наиболее удобно рассматривать на содержательном уровне, раскрывая при этом сущность логического следования плана проектирования и анализируя характер задачи с точки зрения ее формализации [3]. Для этой цели следует использовать математический аппарат, оперирующий как с качественными ограничениями на значения управляемых переменных, так и с ограничениями, описываемыми понятийными категориями. Такая постановка задачи возможна при использовании формально-логического метода, позволяющего оперативно изменять правила принятия решения и обеспечить диалоговый режим работы конструктора с компьютером.

Математически задача сводится к минимизации некоторой скалярной компоненты  $\varphi(\bar{x})$  целевой функции  $F(\bar{x})/\varphi(\bar{x})$  на множестве

$$x = \{x, q_i(\bar{x}) \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad Z_n(\bar{x}), \quad n = 1, 2, \dots, m \},$$

где  $F(\bar{x})$  - формула, описывающая целевое состояние с помощью понятийных категорий;  $\varphi(\bar{x})$  - скалярная функция, подлежащая оптимизации при достижении целевого состояния;  $q_i(\bar{x})$  - скалярные функции;  $Z_n(\bar{x})$  - формулы, описывающие ограничения содержательного (понятийного) характера.

При этом возникает необходимость в решении ряда задач, имеющих самостоятельное значение. К ним относятся: разработка формальной теории; выбор или разработка программы; построение алгоритма управления автоматизацией технологии проектирования, выбор локальных критериев, учитывающих основные закономерности формирования и функционирования объекта и др. Рассмотрим эти задачи более подробно.

При разработке формальной теории следует выделять теоретическую основу и эмпирику. Теоретическую основу составляет описание напряженно-деформированного состояния РД, решение связанной задачи термовязкоупругости, задачи механики разрушения с учетом эффектов старения материала, диссипации энергии, влияния внешней агрессивной среды и др. Эмпирическая основа включает в себя всю совокупность доступной экспериментальной информации о физико-механическом и химическом состоянии РД.

При выборе алгоритма следует учитывать: формализованное представление понятий и отношений между рассматриваемыми частями объекта, например, между резиной и металлом; описание свойств объекта; возможностей управления технологией проектирования и т.д.

Алгоритм управления автоматизацией технологии проектирования при решении задач должен удовлетворять следующим требованиям:

- возможности работы конструктора в диалоговом режиме с компьютером;
- способность к накоплению наиболее ценной информации;
- возможность оперативного изменения принятых решений, вывода новых технических рекомендаций и т.д.

Что касается выбора локальных критериев и оценки их весомости, то задача, как правило, сводится к построению многокритериальной модели принятия решений, адекватно описывающих реальные процессы проектирования. Формаль-

ная постановка задачи сводится к следующему. Пусть задано множество решений и каждое решение характеризуется множеством локальных критериев

$$x_j \rightarrow \{F_i(x_j), i = \overline{1, j}\}, \quad j = \overline{1, J}.$$

Для пар решений установлены отношения предпочтения

$$x_q > x_j; \quad q, j = \overline{1, J}; \quad q \neq j,$$

т.е. решение  $x_q$  предпочтительнее решения  $x_j$ .

Необходимо определить весовые коэффициенты локальных критериев  $i = \overline{1, j}$ , для которых выполняются следующие условия

$$\sum_{i=1}^J \alpha_i = 1; \quad 0 \leq \alpha_i = 1; \quad i = \overline{1, J}.$$

В этом случае задача определения чебышевской точки сводится к эквивалентной задаче линейного программирования.

**Проектирование резиновых деталей** несколько отличается от проектирования машинных систем. По мнению [1], 90% всего промышленного проектирования основано на известных концепциях. Используя каталоги, справочные таблицы, накопленный эмпирический опыт, различные варианты технических решений и др. конструктор машинных систем озабочен в первую очередь выбором оптимальной модели, взаимосвязью отдельных структур и увязкой их в единую техническую систему. При этом, как правило, теоретическая основа достаточно апробирована и доведена до инженерного алгоритма. Конструктор старается по возможности избегать непроверенных на практике решений и малоизученных явлений, способных привести к непредсказуемым последствиям.

С проектированием РД дело обстоит несколько иначе. Отсутствие каталогов, недостаточный опыт их эксплуатации в экстремальных условиях, отсутствие банка данных о долговечности и надежности, не всегда хорошо разработанный математический аппарат и др. предопределили и особенности

подхода. Следует подчеркнуть исключительно важную роль теоретического подхода, который при отсутствии эмпирических данных позволяет моделировать отдельные задачи и тем самым заполнять пробелы, сохраняя целостность системы проектирования. Существенное значение, естественно, имеет инженерная интуиция и опыт экспериментальных исследований в лаборатории и натуральных условиях.

Применение компьютерной техники не всегда дает желаемый эффект и, прежде всего, вследствие отсутствия экспериментальной информации для всей структурной цепочки задачи «форма и размеры изделия – материал – технология – условия нагружения». В такой многопараметрической системе изменение одного параметра может привести либо к неустойчивости системы в целом, т.е. к отсутствию решения, либо к проектированию изделия, не отвечающего функциональным требованиям. Поэтому использование компьютера при проектировании РД может дать хорошие результаты лишь в случае достаточного методологического, теоретического и эмпирического опыта для конкретных систем.

Использование компьютера состоит в геометрическом изображении предварительно разработанных технических решений с учетом выполнения следующих основных фаз: постановка задачи, определение концепции функциональной структуры, разработка структуры изделий, чертеж изделия. Используя классификацию, изложенную в [1], проектирование РД можно отнести к типу А, т.е. к проектированию с ориентацией на изделие.

Ниже излагаются примеры оптимального проектирования резиновых деталей с учетом выбора материала и технологии изготовления. Некоторые элементы науки проектирования заимствованы из [2,5].

**Пример 1.** Рассмотрим проектирование резиновой футеровки (РФ) барабанной мельницы мокрого самоизмельчения (ММС). Футеровка выполнена в виде резиновых плит, прикрепляемых к барабану резиновыми лифтерами с металличе-

ской арматурой. В процессе эксплуатации футеровка подвергается ударным нагрузкам и износу от перерабатываемого материала и измельчающей среды. Требования, предъявляемые к футеровке: соответствие конструкции технологическому процессу, высокая надежность и долговечность, экологическая чистота, простота монтажа и демонтажа; унификация форм и взаимозаменяемость.

## ФАЗА КОНСТРУИРОВАНИЯ

### 1. Постановка задачи

- 1.1. Расположение РФ в схеме мельницы.
- 1.2. Функциональные требования.
- 1.3. Эксплуатационные требования.
- 1.4. Стоимость. Экономические требования.
- 1.5. Требования поставки заказчику.

### 2. Выбор формы конструкции

- 2.1. Требования к форме и профилю лифтеров.
- 2.2. Требования к креплению РФ к барабану.
- 2.3. Требования к геометрическим размерам РФ.

### 3. Определение параметров

- 3.1. Предварительный выбор материалов.
- 3.2. Расчет требуемой толщины РФ.
- 3.3. Выбор количества слоев РФ.
- 3.4. Прогнозирование срока службы.

### 4. Выбор материала

- 4.1. Требование к исходному материалу.
- 4.2. Требования к основным ингредиентам:  
защитная группа, группа вулканизации и т.д.

### 5. Технология изготовления

- 5.1. Выбор технологии изготовления РФ.
- 5.2. Проектирование пресс-форм.
- 5.3. Расчет режима вулканизации.
- 5.4. Проектирование металлической арматуры.

### 6. Конструкция узла установки РФ в барабане мельницы

- 6.1. Геометрическое расположение РФ в барабане.
- 6.2. Способ крепления РФ к барабану.
- 6.3. Способы монтажа и демонтажа.

**Пример 2.** Рассмотрим проектирование резиновой детали, представляющей собой сплошной цилиндр с чередующимися слоями резины и металла, причем резина привулканизована к металлу по всей поверхности. Такие РД используются для виброизоляции мостов, тяжелых вибрационных машин типа мельниц, дробилок, смесителей и др., а также в качестве сейсмоизоляторов зданий и сооружений, находящихся в районах землетрясения. Геометрические размеры таких РД могут быть достаточно большими: диаметр 1,5 м, высота 1,0 м, а масса достигать одной тонны и более. В процессе эксплуатации РД испытывают постоянные циклические нагрузки, действие повышенных и пониженных температур, диссипативный саморазогрев, действие агрессивной окружающей среды и др. Помимо этого резина в процессе длительной эксплуатации стареет, т.е. ее физические свойства изменяются со временем. Поэтому к таким РД применимы жесткие требования по надежности, сроку службы, устойчивости к окружающей среде и стабильности функциональных характеристик. Все это налагает особые требования к выбору необходимого материала и технологии изготовления.

## ФАЗА КОНСТРУИРОВАНИЯ

### 1. Постановка задачи

- 1.1. Расположение РД в общей технической системе.
- 1.2. Функциональные требования; описание динамики.
- 1.3. Эксплуатационные требования.
- 1.4. Требования окружающей среды.
- 1.5. Стоимость. Экономические требования.
- 1.6. Требования поставки заказчику.

### 2. Выбор формы конструкции



- 2.1. Требования к форме.
- 2.2. Требования к соединению «резина-металл».
- 2.3. Свободная поверхность: геометрические размеры.
- 2.4. Требования к характеристике «сила-перемещения».
- 2.5. Присоединение РД к машине.

### **3. Определение параметров**

- 3.1. Предварительный выбор материала.
- 3.2. Расчет напряженно-деформированного состояния.
- 3.3. Решение связанной задачи термовязкоупругости.
- 3.4. Выбор критериев разрушения.
- 3.5. Прогнозирование срока службы.

### **4. Выбор материала**

- 4.1. Требование к исходному материалу.
- 4.2. Требования к основным ингредиентам: защитная группа, группа вулканизации и т.д.

### **5. Технология изготовления**

- 5.1. Выбор технологии изготовления РД.
- 5.2. Проектирование пресс-форм.
- 5.3. Расчет режима вулканизации.
- 5.4. Проектирование металлической арматуры.
- 5.5. Способ крепления резины к металлу.

### **6. Конструкция узла установки РД в общей технической системе**

- 6.1. Геометрическое расположение упругого узла в машине.
- 6.2. Способ крепления РД.
- 6.3. Система защиты РД от действия среды.
- 6.4. Способы монтажа и демонтажа.

Как видно, практически каждое конструктивное решение влияет на все остальные фазы: постановку задачи, функциональную структуру, структуру изделия и чертеж РД. Т.е. отдельные фазы проектирования неоднозначны по отношению к теоретическим фазам. Так, например, для резкого повышения жесткости на сжатие РД конструктор принимает решение существенно уменьшить толщину резинового слоя. Это реше-

ние приведет к появлению в резиновом массиве эффекта объемного сжатия, что повлияет в целом и на структуру изделия, и на алгоритм его расчета. В этом случае в программу математического обеспечения должны быть внесены соответствующие изменения.

Если программу изменить невозможно в связи с отсутствием апробированного математического аппарата, конструктор может воспользоваться эмпирическим подходом, используя практические фазы конструирования, например:

- выбор формы изделия;
- выбор материала;
- расчет основных размеров изделия;
- выбор технологии изготовления;
- размещение РД в технической системе;
- чертеж изделия.

И в том и другом случаях весьма важным является расчленение объекта конструирования на составные элементы, т.е. на отдельные функциональные структуры. На первом этапе необходимо разработать конструкцию в целом. После этого следуют математические расчеты ее основных свойств: жесткости, прочности соединения «резина-металл», долговечности, старения и др. В дальнейшем рассматривается вопрос технологии изготовления. При невыполнении требований по одному из определяющих параметров, например, по жесткости, процесс проектирования повторяется с учетом внесения соответствующих изменений геометрических размеров, свойств материала, технологии и т.д.

Как видно, даже в случае простого примера задачи проектирования являются комплексными и охватывают довольно широкий круг вопросов: от инженерного дизайна и технологии до весьма сложных математических расчетов. Поэтому при создании оригинальных конструкций квалификации одного специалиста недостаточно, и для успешного решения задачи необходимо создавать группу специалистов, включающих конструктора, расчетчика и технолога.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andreason M. Design Methodology in the Framework of Integrated Product Development // ICED'88, Budapest, 23-25 August, 1988.
2. Hubka V. Teoria tehnikeskikh sistem. – Moscow: “Mir Publishers”, 1987. – P. 208.
3. Dyrda V.I. Projektierungstheorie und Anwendung von experimentellen Information bei der Projektierung der hochbelasteten dauerhaften Maschinenteil // ICED'88, Budapest, 23-25 August, 1988.
4. Рось А.А. Принципы синтеза программ для систем реального времени на основе формально-логического подхода к описанию проблемной среды. – М.: Кибернетика, 1985. - № 5. – С. 31—36.
5. Ferreirinha, V. Hubka, M. Andreason, R. Rosenberg. Rechnerunterstutztes Entwerfen und Detaillieren // ICED'88, Budapest, 23-25 August, 1988.