

**С.А. НАЗАРЕНКО**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАШИН**

Розглядаються проблемні питання, що виникають при розробці системного підходу до оптимізації моделей машин з високим ступенем геометричної і фізичної інформативності; які орієнтовані на великі розмірності векторів перемінних стану і проектування. Досліджено обчислювальні етапи. Розглянуто застосування розробленого математичного апарату.

The complex of theoretical, calculable and applied questions of new approach for the optimization of complicated technical systems are studied. The basic requirements were stated. The design principles were developed. Structural elements was distinguished. The common scheme of interaction between structural elements was elaborated. New schemes for solving formulated problems are proposed. Computational stages are investigated.

**Введение.** Постановка большинства рассматриваемых в литературе по механике модельных задач оптимизации конструкций подразумевает управление вибрационными или прочностными характеристиками без учета последствий для рабочего процесса и возможностей технологии изготовления [1-4]. Решая практические задачи, невозможно оставаться в рамках механики деформируемого тела, поэтому необходимо вводить в постановку задач комплексные мультифизические модели функционирования изделия и критерии качества рабочих и эксплуатационных характеристик [5]. Прочностные характеристики при этом носят второстепенный характер и выступают или в качестве ограничений, или служат признаком отбраковки на этапе проверочных расчетов и испытаний. При разработке системного подхода к оптимизации машин необходимо учитывать все этапы жизненного цикла – от проектирования до утилизации; эффективно сочетать принципы композиции, декомпозиции и иерархичности; обеспечить взаимодействие многообразных методов (математических, эвристических, экспериментальных) и специалистов различных профилей. Помимо компромиссного мультидисциплинарного и многокритериального характера предложенная методика решения оптимизационной проблемы отличается от канонизированной формы прежде всего более высокой сложностью (большим числом различных моделей и разнохарактерных переменных).

**Постановка проблемы оптимизации.** Задача оптимизации конструкций заключается в нахождении варьируемых параметров, принадлежащих допустимой области  $U$  и минимизирующих (максимизирующих) целевую функцию (функционал качества)  $J_0$ . Целевая функция представляет собой суперпозицию критериев качества, при этом в качестве весовой функции используются неопределенные множители Лагранжа. На проектные перемен-

ные могут накладываться как явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических соображений, так и функциональные ограничения типа равенств и неравенств, наложенные на функционалы  $J_j$ , неявным образом сужающие область варьирования. При этом значения функционалов определяются из решения задач анализа, описываемых уравнениями состояния [5]. Структуру уравнений, характеризующих математические связи между заданными  $h$  и искомыми  $u$  величинами, определяет тип исследуемого процесса, состав системы, граничные условия, нагрузки и условия сопряжения. Вектор (функция)  $u$  переменных состояния, образующих пространство решений, может определять перемещения, температуры, потенциалы электрического поля и другое. При решении задач оптимизации конструкций в качестве варьируемых переменных  $h$  рассматриваются параметры распределения толщины; физико-механических свойств материалов, управляющих нагрузок; формы срединной поверхности, граничного контура, вырезов, количества, места приложения и величины сосредоточенных масс и жесткостей (стрингеры, шпангоуты и другое). Выбор класса проектных переменных (непрерывные функции, кусочно-непрерывные функции, вектор дискретных параметров) во многом определяет метод оптимизации и оптимальное решение.

Целью данной работы было создание концепции подхода к мультидисциплинарной оптимизации машин на основе сложных математических моделей с высокой степенью геометрической и физической информативности.

**Основные этапы оптимизации.** Сложность задачи, противоречивость критериев, большое число разнохарактерных конструктивных переменных, неформализуемость некоторых ограничений, различная точность и детерминированность моделей, требования унификации не позволяют решать математически строго задачу оптимизации конструктивных параметров непосредственно для полной модели. Учитывая ее сложность, существенные различия в значимости конструктивных параметров и неформализуемость некоторых ограничений, основной концепцией оптимального проектирования таких сложных систем является многоуровневый иерархический подход. Проектирование выполняется сверху вниз. При этом результаты решения задачи предыдущего уровня используются в качестве исходных данных для решения задач оптимального проектирования последующего уровня. Процесс декомпозиции физико-механической модели на компоненты является плохо формализуемым творческим процессом. Поэтому построение системы уровней осуществляется обычно методом экспертных оценок. На нижнем уровне проектирования решаются задачи оптимизации основных деталей. Характер критериев зависит от уровня проектирования. На верхних уровнях это, как правило, стоимостные критерии. На нижних - это разнородные специфические технические критерии, которые отображают особенности рабочего процесса, силового нагружения, температурного режима, технологии изготовле-

ния и т.д.

Сложные современные машины создаются как комбинация множества взаимодействующих между собой и с внешней средой конструктивных элементов, которая описывается достаточно сложной математической моделью. При анализе составных конструкций объем и сложность вычислений настолько велики, что необходимо сегментирование системы. На базе использования методов и принципов системного и объектно-ориентированного анализа можно осуществить декомпозицию абстрактной модели на составляющие и связи между ними, а также реализовать их формальное описание. От правильности выбранной стратегии зависит эффективность и точность решения. Полная конструкция представляется в виде совокупности иерархически соподчиненных подсистем различных уровней с сохранением структур и принадлежности. Исследование всей конструкции следует базировать на независимом анализе, естественно заданных субструктур, а затем связывать эти подконструкции в единую систему. Изложенный подход делает возможным изъятие из полной расчетной модели некоторой ее части, перестроение сетки и более подробный анализ для выделенной области. Это может повысить эффективность численного моделирования, так как сначала делается анализ для грубой сетки, а затем для интересующей области - подсистемы - измельчается сетка и уточняется расчет.

Процесс оптимального проектирования основных узлов машин раскладывается на этапы и, соответственно, конструктивные параметры искусственно разделяются на группы, варьируемые на каждом этапе с целью оптимизации соответствующих функционалов. Параметры  $h_0$  определяются из решения задачи более высокого уровня. Предварительный анализ распределения коэффициентов чувствительностей [6] позволяет разделить параметры по степени соизмеримости влияния на величины целевых функций. На первом этапе решается задача оптимизации параметров  $h_1$  по критериям и функциональным ограничениям, характеризующим рабочий процесс. На втором этапе производится оптимизация параметров  $h_2$ , в значительной мере определяющих прочностные и вибрационные характеристики. На третьем этапе варьируются конструктивные параметры «смешанного» типа  $h_{12}$ , влияние которых на рабочие и прочностные характеристики существенно и соизмеримо, с целью построения семейства Парето-решений. При этом конструктор может выбрать несколько решений для экспериментальной апробации. Участие на этом этапе конструктора с его субъективным выбором вариантов проекта объясняется необходимостью учета стоимостных, эксплуатационных, технологических и других критериев, что характерно для задач мультидисциплинарной оптимизации.

Разбиение на подпункты носит условный методологический смысл, поскольку физический процесс может иметь комплексный и взаимовлияющий характер. Предполагается, что связь между подмоделями однозначна, алгоритмируема и корректна. Такая трактовка дает возможность формализо-

вать процесс и распространить традиционный инструментальный анализ и синтеза. Моделирование структурными уравнениями, ориентированными на конкретный класс объектов, может включать большое количество методов из различных областей с применением различных CAD/CAM/CAE-систем. Это может быть осуществлено как в ручном режиме, так и путем создания специализированных автоматизированных систем.

Введем на основе анализа структуры и типов связей между отдельными этапами общей проблемы следующие категории задач мультидисциплинарной оптимизации: последовательная (при независимом рассмотрении 1 и 2 этапов); полная (при наличии только 3 этапа и увеличении размерности и ширины ленты системы разрешающих уравнений весь набор оптимальных параметров достигается за одну итерацию); слабосвязанная (при этом выполняются итерации между различными этапами до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень сходимости). Классификация может служить основой последующей унификации и стандартизации подходов. После сборки, состоящей в преобразовании модели, реализующей поставленную цель из заданных или определяемых подмоделей (структурно связанных и устойчивых), возможно построение многоуровневых иерархических систем.

Численная реализация задач мультидисциплинарной оптимизации требует значительных ресурсов памяти и больших затрат машинного времени. При решении задач оптимизации необходимо использовать ресурсы нескольких компьютеров параллельно, то есть реализовать кластерный подход и взаимодействие через высокоскоростные Интернет соединения. Причем модули сетевого взаимодействия, как и большинство остальных модулей комплекса, должны быть заменяемыми.

**Методы оптимизации.** В качестве метода глобальной оптимизации будем использовать генетические алгоритмы, реализующие случайный поиск с централизованным управлением с использованием отбора и генетических механизмов воспроизводства. Опираясь совокупностью возможных решений, обрабатывается набор параметров, структурированный в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов отбора, кроссовера и мутации [4]. В качестве метода локальной оптимизации при решении практических задач, характеризующихся высокими размерностью вектора варьируемых параметров и числом функциональных ограничений, в настоящее время наиболее предпочтительным представляется метод последовательной линейаризации. На каждом шаге метода последовательной линейаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных или градиентов критериев целей и функциональных ограничений по варьируемым переменным [6]; построение области линейаризации; решение задачи линейного программирования. Конструктивная форма условий оптимальности первого порядка име-

ет вид

$$\min \delta \bar{h}^T \bar{\nabla}_h J_0; \quad J_j + \delta \bar{h}^T \bar{\nabla}_h J_j = 0; \quad \bar{h} + \delta \bar{h} \in \delta U \cap U.$$

Область линеаризации должна удовлетворять целому ряду условий. Она должна быть достаточно малой, чтобы формулы первого порядка с приемлемой точностью описывали приращения функционалов, и в то же время достаточно большой, чтобы процесс оптимизации не был слишком медленным. Область должна быть построена так, чтобы она целиком содержалась в глобальной области геометрических ограничений, при этом должна быть обеспечена возможность изменения ее конфигурации по любому возможному направлению в  $n$ -мерном пространстве варьируемых параметров.

**Практическое применение.** Возможности разработанного математического аппарата продемонстрируем на примере последовательной задачи. Необходимость подавления колебаний плат обусловлена возможной потерей электрического контакта как внутри платы, так и контакта платы с периферией, при больших амплитудах колебаний, что может привести к аварийной ситуации. Поэтому при проектировании необходимо решать задачи отстройки собственных частот плат бортовых компьютеров, элементы которых (процессор, микросхемы и т.п.) расположены на стеклотекстолитовой пластине. На рис. 1 и 2 приведены соответственно АЧХ платы до и после оптимизации. Как видно из графиков, удалось изменить геометрию конструкции таким образом, что первая собственная частота была выведена из зоны опасных вынужденных частот колебаний, за счет увеличения рассеяния энергии в конструкции была снижена максимальная амплитуда колебаний.

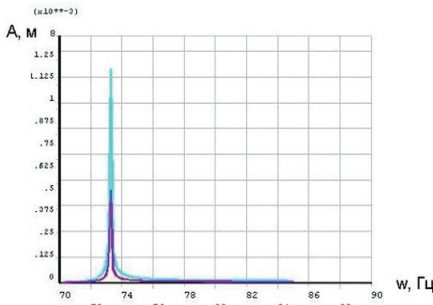


Рисунок 1

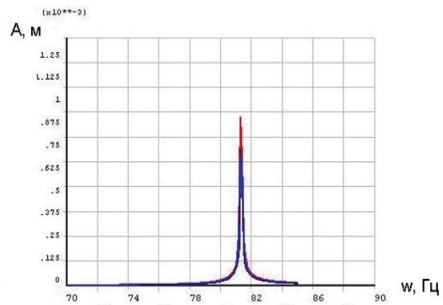


Рисунок 2

**Заключение.** Создана концепция нового подхода к решению комплексной многоуровневой задачи мультидисциплинарной оптимизации машин с использованием блочно-иерархического процесса. В построенной общей схеме приведены базовые принципы, которые будут использованы при его дальнейшей разработке. Введены на основе анализа структуры и типов свя-

зей между отдельными этапами общей проблемы категории задач мультидисциплинарной оптимизации. Дальнейшим направлением исследований является применение математического аппарата при исследовании жизненного цикла ряда современных конструкций.

**Список литературы:** 1. *Fridman M.M., Zyczkowski M.* Structural optimization of elastic columns under stress corrosion conditions // *Structural Optimization*. – 2001. – Vol. 21(3). – P. 218-228. 2. *Harscher P., Amari S., Vahldieck R. etc.* Analytical gradient evaluation of cost functions in general field solvers // A novel approach for optimization of microwave structures. IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium MTT-S, Boston, June 2000. 3. *Жовдак В.А., Иглин С.П., Смирнова Л.М., Солюшенко В.А.* Оптимизация лопатки рабочего колеса турбокомпрессора по критерию собственной частоты колебаний // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2003. – № 12, т. 1. – С. 71-78. 4. *P.G.Alotto, C.Eranda, B.Brandstatter et al.* Stochastic algorithms in electromagnetic optimization // *IEEE Trans. on Magnetics*. – 1998. – V. 34, № 5. – PP. 3674-3684. 5. *Назаренко С.А* Математические модели мультифизического анализа конструкций для CALS технологий // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2008. – № 47. – С. 125-132. 6. *Назаренко С.А* Анализ чувствительности конструкций при воздействии физических полей различной природы // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2006. – № 32. – С. 119-122.

*Поступила в редколлегию 05.06.2009*