

*М.С. СТЕПАНОВ*, д-р. техн. наук, *С.А. НАЗАРЕНКО*, канд. техн. наук,  
*Н.С. СКВОРЦОВ*, НТУ «ХПИ», г. Харьков

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЙ  
ОПТИМИЗАЦИИ МЕХАНИКО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

Розглядаються проблемні питання, що виникають при розробці системного підходу до оптимізації моделей машин з високим ступенем геометричної і фізичної інформативності. На основі аналізу структури і типів зв'язків розглянуто категорії задач мультидисциплінарної оптимізації: послідовна; повна; слабозв'язана. Сформульована задача оптимізації енергозбереження в технологічних системах.

The complexes of theoretical, calculable and applied questions of new approach for the optimization of complicated technical systems are studied. The purpose of activity - mathematical models of structurally linked mechanical and technological systems under stipulation of physical fields having different origin. Structural elements were distinguished. The common scheme of interaction between structural elements was elaborated.

**Введение.** В условиях рыночной экономики, когда сама разработка конструкции в силу средств, затрачиваемых на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, технологическую подготовку может оказаться нерентабельной в сравнении с достигаемым эффектом, необходимо интегрирование моделей и критериев качества рабочих характеристик и топливно-энергетической эффективности проектируемых машин - с одной стороны, показателей прочности и надежности - с другой, технологичности - с третьей, в единые критерии качества и рентабельности серийного производства в условиях конкурентного рынка при учете необходимости быстрой проработки проекта для участия в тендерном соревновании. Для создания конкурентоспособных образцов машин необходима интеграция математических моделей с такими поисковыми методами исследования, которые бы давали возможность предоставить конструктору (технологу) для принятия окончательного решения целое множество альтернативных технических решений, неуплучшаемых по всей совокупности показателей эффективности (принцип Парето) [1, 2]. На смену этапа применения локальных технологий пришел период внедрения сквозной интегральной автоматизации процессов конструирования, инженерных расчетов, оптимального проектирования, технологической подготовки, собственно изготовления, проектного управления новыми разработками и сопровождения изделия в течение всего его жизненного цикла класса CAD/CAM/CAE/CAPP/PLM/ERP/PDM/MES [3-5].

При разработке современных машин привлекаются специалисты из различных областей знаний, которые сталкиваются с необходимостью проведения больших объемов расчетных и экспериментальных работ по отработке функ-

ционирования многих модификаций изделий в различных эксплуатационных режимах; развития методов решения междисциплинарных задач моделирования, в том числе разработки и расширения возможностей платформ для интеграции различных CAE-систем при решении междисциплинарных задач [6-8]. Системы компьютерных программ можно разделить на два класса в зависимости от сложности решаемых задач и квалификации пользователя. Большой класс ориентирован на рядового пользователя и позволяет решать отдельные прикладные задачи. Алгоритмы таких программ основаны на простых аналитических зависимостях и эмпирических моделях. CAE-программы высокого уровня (ANSYS, COSMOS, NASTRAN, ACTRAN, Star CD, Fluent и т.д.) ориентированы на высококвалифицированных пользователей – аналитиков и позволяет решать на конечно-элементных сетках комплексные задачи, объединяющие в различных вариантах тепловые, диффузионные, прочностные, электромагнитные, газодинамические проблемы. Такие программы построены, как правило, по модульному принципу.

Таким образом, решая практические задачи, необходимо вводить в постановку задач комплексные мультидисциплинарные модели функционирования изделия и критерии качества рабочих и эксплуатационных характеристик. 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.** Исследования по оптимизации машин начинают с постановки задачи и разработки метода поиска оптимального решения. Постановка задачи включает в себя задачу анализа количественных характеристик качества, критерий цели (функционал качества), варьируемые переменные, ограничения. 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. К основным показателям качества машиностроительных конструкций относятся производительность, энергоемкость, материалоемкость, надежность, долговечность, технологичность, эстетичность, издержки на эксплуатационное обслуживание, удельная стоимость единицы продукции и т.д. На проектные переменные 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. 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 и другое. Выбор класса проектных переменных (непрерывные функции, кусочно-непрерывные функции, вектор дискретных параметров) во многом определяет метод оптимизации и оптимальное решение.

**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 полных моделей машин. 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 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, на верхнем – конструкции в целом. 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 изготовления и т. д. В построенной общей схеме приведены базовые принципы, которые будут использованы при дальнейших разработках.

Процесс оптимального проектирования основных узлов машин раскладывается на этапы. Соответственно, конструктивные параметры искусственно разделяются на группы, варьируемые на каждом этапе с целью оптимизации соответствующих функционалов. Параметры  $h_0$  определяются из реше-

ния задачи более высокого уровня. Предварительный анализ распределения коэффициентов чувствительностей позволяет разделить параметры по степени соизмеримости влияния на величины целевых функций [9, 10]. 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  $h_{1,2}$ , влияние которых на рабочие и прочностные характеристики существенно и соизмеримо, с целью построения семейства Парето-решений. При этом конструктор (технолог) может выбрать несколько решений для экспериментальной апробации. Участие на этом этапе конструктора (технолога) с его субъективным выбором вариантов проекта объясняется необходимостью учета стоимостных, эксплуатационных, технологических и других критериев, что характерно для задач многодисциплинарной оптимизации. Разбиение на подпункты носит условный методологический смысл, поскольку процесс может иметь комплексный и взаимовлияющий характер. Предполагается, что связь между моделями однозначна, алгоритмизируема и корректна. Такая трактовка дает возможность формализовать процесс и распространить традиционный инструментальный анализа и синтеза. Моделирование структурными уравнениями, ориентированными на конкретный класс объектов, может включать большое количество методов из различных областей с применением апробированных CAD/CAM/CAE-систем. Это может быть осуществлено как в ручном режиме, так и путем создания специализированных автоматизированных систем. Основная цель применения данного математического обобщения, реализуемого в едином информационном пространстве жизненного цикла изделий, заключена в повышении точности результатов, минимизации затрат времени на подготовку модели и трансляции промежуточных данных. При этом необходимо или использование единой информационной базы для всех этапов жизненного цикла, или разработка специальных процедур согласования структур данных на различных этапах.

Введем на основе анализа структуры и типов связей между отдельными этапами общей проблемы следующие категории задач многодисциплинарной 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. Операция композиции состоит в объединении нескольких моделей в одну. Метод композиции моделей может быть обобщен

на случай произвольного множества исходных моделей. 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 многодисциплинарной оптимизации требует значительных ресурсов памяти и больших затрат машинного времени. При решении задач оптимизации необходимо использовать ресурсы нескольких компьютеров путем распараллеливания вычислений, то есть реализовать кластерный подход и взаимодействие через высокоскоростные Интернет соединения. Причем модули сетевого взаимодействия, как и большинство остальных модулей комплекса, должны быть заменяемыми. При этом итоговое снижение времени решения задачи оптимизации может достигаться как за счет снижения времени работы математической модели путем распараллеливания вычислений "внутри" модели, так и за счет рациональной организации процесса оптимизации, когда осуществляется параллельный расчет критериев для заданного набора векторов варьируемых переменных. Первый путь предполагает использование (или разработку) математических моделей, приспособленных для расчета с использованием параллельных процессоров. Второй путь вызывает необходимость разработки соответствующих методов оптимизации, позволяющих связать и решать в едином проекте задачи, рассчитываемые различными программными средствами на различных ПК, объединенных в локальную сеть или через Интернет.

**Методы оптимизации.** Методы поиска оптимальных проектов конструкций можно условно разделить на следующие группы: алгоритмы, основанные на априорных физических представлениях о свойствах оптимальной конструкции (например, равнопрочность); методы математического программирования (методы линейного, нелинейного, геометрического, динамического программирования и т.д.); методы, использующие условия оптимальности (методы классического вариационного исчисления, теории оптимального управления). 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. 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 линеаризации. На каждом шаге метода последовательной линеаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных или градиентов критериев целей и функциональ-

ных ограничений по варьируемым переменным; построение области линеаризации; решение задачи линейного программирования. Конструктивная форма условий оптимальности первого порядка имеет вид на примере с функциональными ограничениями типа равенств

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

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. Вычисление градиентов от критерия оптимизации (или критериев в Парето - постановке) и функциональных ограничений включает, во-первых, технику дифференцирования уравнений состояния, во-вторых, способ введения проектных переменных. Выбор способа дискретизации и типов проектных переменных, критерия качества и функциональных ограничений производится в зависимости от назначения конструкции, ее расчетной модели и других факторов. При выборе того или иного варианта введения варьируемых параметров необходимо учитывать требование взаимной независимости, предпочтительно аддитивный и локальный характер зависимости гамильтониана от проектных переменных, согласование дискретизации конструкции со схемой варьирования ее формы при вычислении функциональных производных, проблему учета конструктивных ограничений, сохранение в образующемся допустимом пространстве возможных конструктивных форм справедливости принятых математических моделей, технологическую реализуемость допустимых вариантов и др. Этот комплекс требований в реальных задачах проектирования ставит решение проблемы введения варьируемых параметров в ряд атрибутов плохо формализуемого инженерного конструкторского искусства.

**Практическое применение.** При оптимизации режимов механической обработки чаще всего пользуются экономическими критериями. Однако в настоящее время организационные и экономические условия таковы, что при нормировании режимов обработки задачей оптимизации может стать обеспечение энергосбережения. Причем важнейшей составляющей является энергия перемещения, оптимизация которой дает возможность по-новому взглянуть на построение циклов обработки.

По данным Опитца у универсальных станков в течение 87% срока службы используется лишь 20% установленной мощности, в течение 12% срока службы – до 75% и только в течение одного процента - 100% (рис.1), т. е. универсальное станочное оборудование проектируется заведомо с избыточ-

ными возможностями. Для решения задачи оптимизации на передний план выходит знание функциональных зависимостей энергии перемещения различных узлов станка. Существующие в настоящее время рекомендации по выбору параметров перемещения элементов технологических систем жестко привязаны к режимам механической обработки, носят общий характер и не учитывают энергетический аспект проблемы управления перемещением.

В общем случае энергия перемещения может быть представлена суммой

$$E_n = \sum E_{ni} ,$$

Баланс энергии при перемещении элемента технологической системы выражается уравнением

$$E_n = E_{np} + E_{mp} + E_m ,$$

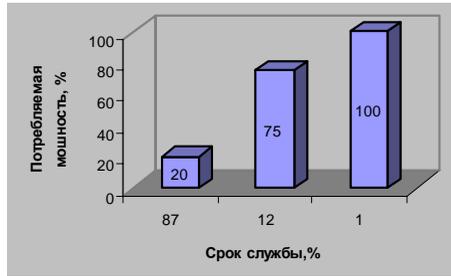


Рис.1. – Потребление мощности универсальным станком в течение срока эксплуатации, где  $E_{np}$  – энергия перемещения (вследствие преодоления силы резания);  $E_{mp}$  – энергия, затрачиваемая на преодоление трения в стыках;  $E_n$  – энергия на перемещение массы узла (бабки) с закрепленным инструментом (деталью), зависящая от силы, которую необходимо приложить для перемещения узла.

В общем случае энергия перемещения (вследствие преодоления силы резания)

$$E_{np} = (P_{r1} \cdot l_1) \cdot n_1 + (P_{r2} \cdot l_2) \cdot n_2 + (P_{r3} \cdot l_3) \cdot n_3 + \dots + (P_m \cdot l_n) \cdot n_n = \sum (P_r l_m) \cdot n_m$$

где  $P_r$  – составляющая силы резания;  $l_m$  – суммарный ход инструмента при обработке всех поверхностей детали;  $n_m$  – количество ходов.

Для шлифования энергия перемещения имеет вид

- для круглого врезного  $E_{np}^e = P_y \cdot Z$ , где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания,  $z$  – припуск на механическую обработку;

- для продольного круглого  $E_{mp} = P_x \cdot l$ , где  $P_x$  – осевая составляющая силы резания,  $l$  – длина обрабатываемой заготовки.

Величина  $E_{mp}$  зависит от мощности, требуемой для преодоления вязкого трения  $N_{mp}^e$  и времени относительного перемещения элементов станка  $t_{on}$ .

Величина  $N_{mp}^e$  определяется по формуле 
$$N_{mp}^e = \mu \cdot A_s \cdot \frac{V_g^2}{h_3} ,$$

где  $A_s$ - площадь, по которой происходит сдвиг слоев смазки направляющих,  $V_g$  – скорость относительного перемещения элементов станка (стола, бабки и т.д.),  $h_3$  – толщина масляного слоя,  $\mu$  – абсолютная вязкость смазки.

Силу, которую необходимо приложить для перемещения шлифовальной бабки можно определить по формуле

$$P_{ш.б.} = \frac{K(Q + 2G) + f_u \cdot Q \cdot r}{R},$$

где  $Q$  – вес шлифовальной бабки;  $G$  – вес роликов;  $R$  – радиус роликов;  $r$  – радиус цапф осей роликов;  $K$  – плечо трения качения;  $f_u$  – приведенный коэффициент трения цапф. Силу, которую следует приложить к столу для его перемещения можно определить по формуле  $P_c = f \cdot Q_c$ , где  $f$  – коэффициент трения скольжения,  $Q_c$  – вес стола.

**Заключение.** На основании изложенного можно сделать вывод, что создана концепция нового подхода к решению комплексной многоуровневой задачи многодисциплинарной оптимизации машин с использованием блочно-иерархического процесса. В построенной общей схеме приведены базовые принципы, которые будут использованы при дальнейших разработках. Введены на основе анализа структуры и типов связей между отдельными этапами общей проблемы категории задач многодисциплинарной оптимизации. Сформулированы функционалы задачи оптимизации энергосбережения в технологических системах.

**Список литературы:** 1. *Piegl L.A.* Ten challenges in computer-aided design // Computer-aided design. 2005. №37. pp. 461-470. 2. *Rehan M.; Olabi A. G.* Parametric Design Optimization By Integrating CAD Systems And Optimization Tools // AIP Conference Proceedings. 11/23/2009. Vol. 1181. Issue 1. pp. 681-692. 3. <http://www.cimdata.com/> 4. *Куневу Ли.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / СПб.: Питер, 2004. – 560с. 5. *Тимофеев Ю.В., Фадеев В.А., Степанов М.С., Назаренко С.А.* Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут». – Харків, НТУ “ХПИ”, 2009. - Вип. 1. С. 86-95. 6. *F Flager, B Welle, P Bansal, G Soremekun, J Haymaker.* Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building // Journal of Information Technology in Construction(ITcon) (2009) Vol. 14, pp. 595-612. 7. *Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М.* и др. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. / Под ред. д-ра техн. наук А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352 с. 8. *Geyer, Philipp* Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design // Advanced Engineering Informatics. Jan2009. Vol. 23. Issue 1. pp. 12-31. 9. *M. Li; J. Hamel; S. Azarm* Optimal uncertainty reduction for multi-disciplinary multi-output systems using sensitivity analysis // Structural & Multidisciplinary Optimization. Jan2010. Vol. 40. Issue 1-6. pp. 77-96. 10. *Назаренко С.А.* Анализ чувствительности конечномерных и континуальных моделей структурно связанных систем // Вестник НТУ «ХПИ». 2007. № 22. С. 127-131.

Поступила в редколлегию 05.06.09