

ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН

Рассмотрено применение методов эвристического программирования при проектировании машин. Даны рекомендации по применению различных методов на каждом конкретном этапе проектирования. Разработана методология проектирования машин, интегрирующая эвристические методы, применение CAD/CAE систем и рекомендации по конструированию.

Ключевые слова: *Эвристическое программирование — Методология проектирования — Эвристические методы — CAD/CAE системы.*

Эвристическим программированием называют методы поиска оптимальных решений, основу которых составляют формализованные эвристики, причем под эвристикой понимаются методы отыскания нового. Под эвристическим приемом, эвристическим методом принято понимать прием, метод, представляющие стратегию принятия решения, найденные проектировщиком на основе своего опыта, имеющихся знаний и интуиции, позволяющие наиболее эффективно решать некоторый класс слабоструктурированных задач.

Схема разработки методов эвристического программирования в обобщенном виде может быть представлена следующей последовательностью процедур:

- изучение содержания соответствующего класса задач;
- изучение приемов решения задач данного класса проектировщиком;
- выявление закономерностей в решении человеком задач рассматриваемого класса;
- формализация выявленных стратегий и приемов и построение, на этой основе, модели решения задач данного класса;
- алгоритмическая реализация построенной модели.

Методы эвристического программирования вовсе не гарантируют получения оптимальных решений. Более того, не исключены даже случаи, когда полученное на основе эвристической модели решение, будет далеким от оптимального. Единственное, что гарантируют эти методы — это, во-первых, то, что решение непременно будет найдено, и, во-вторых,

¹ © В.В.Иванов, к.т.н., доцент, кафедра «ТМиМ», ОНПУ

² © А.М. Харсун, ст.викл., кафедра «ТМиМ», ОНПУ

то, что найденное решение будет лучшим среди решений, получаемых без

использования эвристик. В процессе решения задачи строго формальными методами поле поиска (область допустимых решений) остается неизменным. Сам процесс решения заключается в прямом, направленном или случайном переборе возможных вариантов решений.

Из конкретных методологий, реализующих данное представление об эвристиках, наибольшее распространение получили так называемые лабиринтные эвристики [1]. Согласно лабиринтной модели задача перед решением представляется человеку в виде лабиринта возможных путей поиска решения, ведущих от начальной схемы, характеризующей условия задачи, к конечной схеме, характеризующей условия завершения решения задачи. Предполагается, что благодаря своим природным механизмам мышления, проектировщик способен быстро произвести отсекание всех неперспективных вариантов и оставить то поле возможных вариантов, которое с большой вероятностью содержит путь, ведущий к окончательному варианту конструкции.

С этой точки зрения суть эвристик проектировщика состоит в том, что они являются приемами, сокращающими число возможных выборов путей в лабиринте, то есть число возможных вариантов решения.

Данные экспериментальной психологии мышления показывают: решение задачи состоит отнюдь не только в выборе одного варианта из нескольких возможных. Более того - такая форма принятия решения не является типичной для человека. Решение творческой задачи по- существу представляет собою экстраполяцию в неопределенную область поиска. Для этого интеллектуального процесса характерны периоды отсутствия какого бы то ни было варианта решения. Как правило, проектировщик не старается уменьшить количество возможных вариантов - их у него нет. Наоборот, вся деятельность его направлена именно на увеличение числа таких вариантов [2]. Следовательно, проектировщик, решающий творческую задачу, нуждается не в тех эвристиках, которые сокращают число вариантов, а в тех, которые увеличивают это число.

Поэтому основной проблемой эвристического программирования должен стать поиск варианта решения, на основе расширения поля поиска, за счет генерирования новых вариантов конструктивных решений. Реализовать стратегию, подобную мышлению проектировщика призваны концептуальные эвристики.

Основным механизмом поиска решения в концептуальных эвристиках считается генерирование множества таких путей решения задачи, среди которых с большой вероятностью содержится и результативный путь. При анализе исходной ситуации и соотнесении ее с результирующей, проектировщик не просто собирает информацию, необходимую для решения задачи, а строит (даже не осознавая этого) структурированную модель проблемной ситуации, вычлняя в исходной информации важные элементы и формируя, на их основе, обобщенные

элементы, а также, отношения между ними.

Такие обобщенные элементы и отношения названы концептами, откуда получила название и сама рассматриваемая теория [2]. Концепты играют основную роль в осмысливании исходной ситуации, создании ее модели и мысленной работе с моделью. Согласно концептуальной теории набор концептов универсален, и ему соответствуют имеющиеся у человека механизмы вычисления, трансформации и формирования отношений

Наряду с концептуальными эвристиками поиск новых вариантов, экстраполяция ситуаций в неопределенную область поиска обеспечивают эволюционное моделирование, эволюционное и генетическое программирование.

Эволюционное моделирование представляет из себя расширенную модификацию статистического моделирования, причем расширение заключается в том, что в процессе моделирования статистически совершенствуется (прогрессивно эволюционирует) сам алгоритм, в соответствии с которым имитируются процессы функционирования моделируемых систем [1].

В кибернетической составляющей основы исследования является метод метасистемных переходов. Каждый метасистемный переход можно рассматривать как объединение ряда подсистем нижнего уровня и формирование системы высокого уровня, которая может быть включена как подсистема в следующий метасистемный переход [2].

Примеры метасистемных переходов:

различные типы шпоночных соединений = шлицевое соединение;

различные типы шлицевых соединений = прессовые соединения.

В генетическом программировании особи (проектируемые объекты) представляют собой программы. Удобно представлять эти программы в виде деревьев, где функции – внутренние узлы, к которым, в качестве входных параметров, присоединены поддеревья. Листьями такого дерева будут константы, входные параметры задачи или директивные команды программы [3].

Над особями (проектируемыми объектами) могут совершаться две операции:

а) кроссинговер - подмена одного из поддеревьев первого родителя на какое-либо поддерево второго родителя;

б) мутация - случайное изменение одного из узлов дерева (например, смена функции или константы).

Отличительной особенностью эволюционного программирования является отсутствие операции кроссинговера.

Для задач машиностроения проектируемые объекты могут представлять собой модели, не обязательно представляемые в виде программ, а реализованные в виде расчетной схемы, подготовленной для исследований, посредством программ инженерного анализа САЕ.

Например, твердотельная модель детали подготовлена для расчетов с использованием методов конечных элементов. Мутации подвержены

координаты области, в которой исследуются напряжения, шаг конечных элементов во всей детали и координаты узлов конечных элементов в исследуемой области. Полученные решения сравниваются с тестовыми и результатом поиска являются рекомендации по конечно-элементному разбиению модели в наибольшей степени отражающие специфику данной задачи.

В соответствии с классификацией, предложенной Дж.К.Джонсом, процесс проектирования может быть разделен на три этапа: дивергенция, трансформация и конвергенция [4]. На этапе дивергенции изучают и уточняют техническое задание, систематизируют ограничения, собирают сведения о аналогах. На этапе трансформации решаются главные творческие задачи: выбор двигателя машины, создание кинематической схемы механизма, выбор типа передаточного механизма. Последняя из трех стадий - конвергенция, предусматривает решения шаг за шагом всех проблем возникающих при разработке окончательного варианта конструкции.

На начальном этапе проектирования никаких вариантов решения не существует, поэтому необходимым является генерирование вариантов конструктивных решений. Проще всего это сделать на основе анализа литературы и патентного поиска, причем особенно продуктивным может быть поиск в смежных отраслях машиностроения. Найденные конструкции, элементы конструкций, технологии, методы управления являются базой для разработки вариантов решений. Для интерпретации и адаптации найденных решений целесообразно использовать эвристики направленные на расширение границ поиска, таким, например, являются метод морфологических карт. После того как найдены варианты решения – аналоги, необходимо произвести выбор лучшего варианта – прототипа. Для этого можно использовать лабиринтную эвристику, например метода поиска границ. При наличии прототипа можно перейти к следующему этапу проектирования – этапу трансформации (Рис.1). Для трансформации конструкции прототипа вновь необходимо воспользоваться эвристиками направленными на расширение границ поиска, обычно это методы исследования структуры проблемы. Степень детализации полученного решения позволяет перейти к разделению задачи на подзадачи – проектирование узлов. Для совершенствования конструкции узлов возможно использование методов эволюционного и генетического программирования. Выбор окончательной конструкции узлов и компоновка узлов в общей конструкции проектируемой машины требует анализа найденных вариантов решения и принятие решения о выборе наилучшего варианта – эскизного проекта. Для выборе наилучшего варианта целесообразно использовать эвристики основанные на методах проектирования - стоимостной анализ и фундаментальный метод проектирования Мэтчетта. Наличие эскизного проекта позволяет перейти к третьему этапу проектирования - конвергенции. На этом этапе целесообразно использовать лабиринтную эвристику, например метод

ранжирования либо метод индекса надежности.

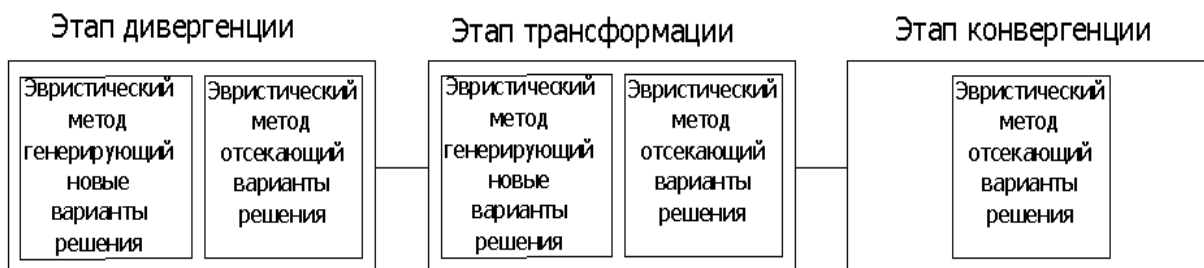


Рис.1 - Схема процесса проектирования, с использованием различных типов эвристических методов

Наряду с эвристическими методами отличительной особенностью современного процесса проектирования является использование CAD/CAM/CAE систем. Если программные комплексы реализующие CAD обеспечивают повышение производительности труда проектировщика не внося изменений в процесс проектирования, то использование модулей CAE вносит существенные изменения в процесс проектирования. Стало возможным провести инженерные расчеты, при необходимости, всех деталей и узлов до формирования эскизного проекта на этапе трансформации (Рис.2). У проектировщика появилась возможность решать научно-исследовательские задачи: динамики механизмов, теплообмена, напряженно-деформированного состояния. Использование соответствующих модулей CAE целесообразно на этапе конвергенции. На начальной стадии этапа конвергенция проектировщик может создать математическую модель проектируемой машины, наиболее важных узлов и деталей и провести исследование с использованием модулей CAE. Зачастую остается без внимания еще одна возможность предоставляемая CAD/CAM/CAE системами – библиотеки стандартных: конструкционных материалов, деталей, технологических элементов. Третьей составляющей процесса проектирования являются методы конструирования. Методам конструирования уделялось большое внимание в советской инженерной школе. Однако отсутствуют четкие указания о последовательности применения тех или иных методов проектирования и привязке их к соответствующим этапам проектирования.

Весь процесс проектирования можно представить как множество процедур обработки информации. Каждая процедура это действия производимые самим проектировщиком, либо расчеты проводимые с использованием соответствующих программ, с дальнейшей оценкой их проектировщиком. Множество процедур выполняемых проектировщиком будет различно при проектировании подъемного крана или металлорежущего станка. Но существует некое инвариантное к объекту проектирования множество процедур, которое выполняется всегда (Табл.).

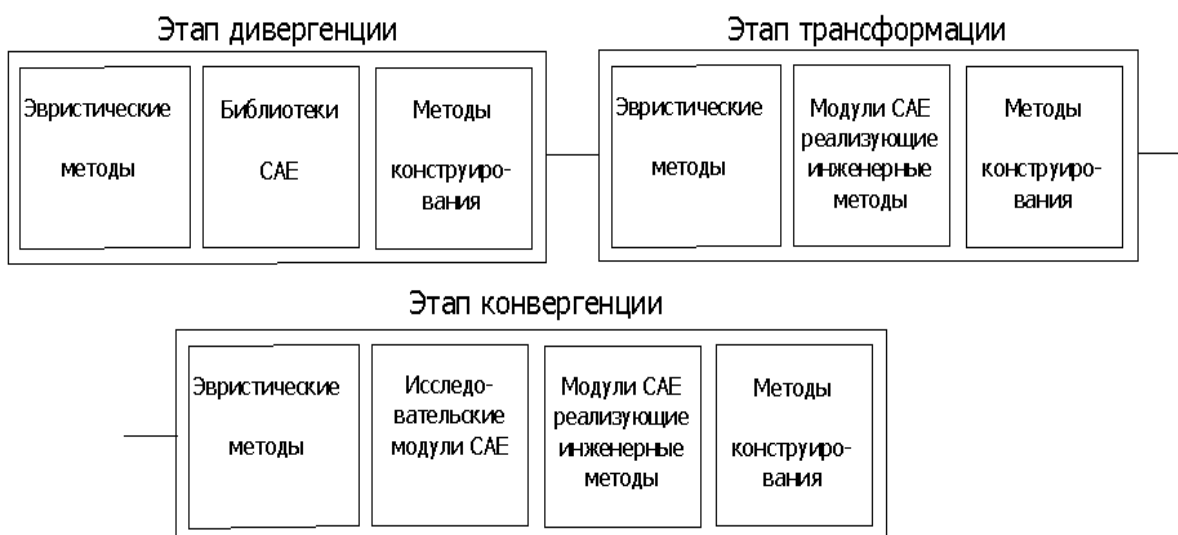


Рис.2 - Схема процесса проектирования, с использованием эвристических методов, модулей САЕ, методов конструирования

№	Содержание процедуры	Обозначение процедуры
1	Изучение и уточнение технического задания	P ¹
2	Изучение и уточнение ограничений	P ²
3	Поиск и выбор аналогов	P ³
4	Расширение границ поиска с использованием морфологических карт	P ⁴
5	Сужение границ поиска с использованием метода поиска границ	P ⁵
6	Использование принципа унификации и методов секционирования, базового агрегата, конвертирования, компаудирования, модифицирования, параметрических рядов	P ⁶
7	Использование метода сети взаимодействий либо метода анализа взаимосвязанных решений (AIDA)	P ⁷
8	Использование принципа стандартизации и принципа технологичности. Использование библиотек модулей САЕ	P ⁸
9	Использование принципа оптимального подбора материала и принципа местного качества. Использование библиотек модуля САЕ	P ⁹
10	Расчеты с использованием инженерных методов, соответствующих стандартам, реализованные в модуля САЕ	P ¹⁰
11	Создание и уточнение эскизного проекта	P ¹¹
12	Разделение задачи на подзадачи – проектирование узлов	P ¹²

13	Проектирование узлов с использованием принципов равной прочности, увеличения жесткости конструкции, а также методов инверсии и многопоточности	P¹³
14	Использование методов стоимостного анализа либо фундаментального метода проектирования Мэтчетта	P¹⁴
15	Создание математической модели с использованием модулей САЕ.	P¹⁵
16	Исследование математической модели с использованием модулей САЕ: исследование кинематики и динамики рычажных мех-ов; конечно-элементный анализ; термоупругость, тепловые поля, контактные задачи	P¹⁶
17	Проектирование узлов с использованием принципов: равномерного распределения нагрузки; выбора оптимальной формы детали; устранения концентраторов напряжений; самоустанавливаемости; равной износостойкости; принцип оптимального теплоотвода	P¹⁷
18	Проектирование узлов с использованием методов: предварительного нагружения; увеличения передаваемой нагрузки за счет изменения формы поверхности трения; замены трения скольжения на трение качения; совмещения функций использования компенсационного звена	P¹⁸
19	Использование метода ранжирования либо метода индекса надежности	P¹⁹
20	Детализирование	P²⁰

Проектировщик для решения поставленной задачи выполняет процедуры в определенной последовательности. Некая последовательность действий обычно называется алгоритмом. Однако данный алгоритм не может быть реализован в виде программы, так как после каждой процедуры требуется оценивание проектировщиком. Поэтому точнее такое множество процедур назвать эвристикой.

Введем обозначения для этапов проектирования: дивергенция – E_1 ; трансформация – E_2 ; конвергенция – E_3 . На этапе дивергенции целесообразна следующая последовательность: изучение и уточнение технического задания (**P¹**); изучение и уточнение ограничений (**P²**); поиск и выбор аналогов (**P³**). Затем необходимо использование эвристики позволяющей расширить границы поиска и усовершенствовать конструкцию аналогов (**P⁴**); Рекомендуем использование метода морфологических карт. Затем вновь уточняется техническое задание (**P¹**). Для отбора вариантов усовершенствования конструкции и выбора прототипа необходимо использование эвристики позволяющей сузить

границы поиска (P^5). Рекомендуем использование метода поиска границ. Далее необходимо использование методов конструирования. На этапе дивергенции наиболее целесообразно использование принципов унификации и методов секционирования, базового агрегата, конвертирования, компаудирования, модифицирования, параметрических рядов (P^6). Завершается этап дивергенции еще одним уточнением технического задания (P^1). Данная последовательность может быть записана в виде $E_1 (P_1^1, P_1^2, P_1^3, P_1^4, P_1^1, P_1^5, P_1^6, P_1^1)$. Аналогичным образом записываем последовательности для этапов трансформации и конвергенции. Выполнение эвристик для всех трех этапов представляет собой эвристический метод S .

$$S = [E_1 (P_1^1, P_1^2, P_1^3, P_1^4, P_1^1, P_1^5, P_1^6, P_1^1), \\ E_2 (P_2^7, P_2^8, P_2^9, P_2^{10}, P_2^{11}, P_2^{12}, P_2^{13}, P_2^{11}, P_2^{14}, P_2^{11}), \\ E_3 (P_3^{15}, P_3^{16}, P_3^{11}, P_3^{12}, P_3^{13}, P_3^{17}, P_3^{18}, P_3^{10}, P_3^{11}, \\ P_3^{19}, P_3^{11}, P_3^{10}, P_3^{20}, P_3^8, P_3^{20}, P_3^{11})]$$

Для решения специфических задач проектирования данное инвариантное множество может быть объединено с дополнительным множеством S^* процедур обработки информации и создан специализированный эвристический метод.

$$S_{special} = S \cup S^*$$

В результате проведенных исследований сделаны следующие **выводы**.

1. Разработана методология проектирования машин, интегрирующая эвристические методы, применение CAD/CAE систем и рекомендации по конструированию.
2. Методология реализована в виде инвариантного множества процедур обработки информации.
3. Процесс проектирования представлен в виде трех этапов. Даны рекомендации по использованию эвристических методов на каждом из этапов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курейчик В.М., Родзин С.И. Эволюционные алгоритмы: генетическое программирование. Обзор // Известия РАН. ТиСУ. 2002. №1. С. 127-137.
2. Fogel D.V. Evolutionary Computation. Toward a New Philosophy of Machine Intelligence. — N.Y.: IEEE Press, 1995. — 225p.
3. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы // Известия РАН. ТиСУ. 1999. №1. С. 144-160.
4. Джонс Дж.К. Методы проектирования. — Москва: Мир, 1986. — 326с.

5. **Иванов, В.В.** Автоматизация проектирования механических приводов: Монография / В.В. Иванов, Б.В. Мотулько, А.М. Харсун. – Одесса: АО Бахва, 2003. – 135 с.
6. **Иванов, В.В.** Сравнительный анализ изгибной прочности зубьев нарезанных рейкой и долбяком / В.В. Иванов, А.И. Ливинский, Д.А. Калинин // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса. – 2004. – Вып. 1(21). – С.28–30
7. **Иванов, В.В.** Анализ изгибной прочности зубьев с цевочным профилем / В.В. Иванов, И.А. Чумаченко // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса. – 2005. – Вып. 1(23). – С. 29–32.
8. **Иванов, В.В.** Сравнительный анализ изгибной прочности циклоидальных и эвольвентных зубьев / В.В. Иванов, Н.В. Андросюк // Труды Одесского политехнического университета. – 2008. – № 2(30). – С. 16–19.
9. **Ivanov V.** Study of the geometry of rack train of a shearer loader's haulage system / V. Ivanov, D. Karaivanov, I. Chumachenko // The International Conference Mechanical Engineering in XXI Century PROCEEDINGS 25–26 November 2010 / University of Nis Faculty of Mechanical Engineering Nis, Serbia, 2010. – P. 137 – 140.
10. **Ivanov V.** Improvement of hollow gear wheel design / V. Ivanov, D. Karaivanov, D. Krugnuj // Machines, technologies, materials 2011 8th International Congress PROCEEDINGS 19–21 September 2011. – Varna, Bulgaria, 2011. – P. 88–91.
11. **Иванов, В.В.** Проектування деталей машин з використанням **AutoCAD** / В.В. Иванов, Б.В. Мотулько, А.М. Харсун; МОН України. – Одеса: – Наука и техника, 2004. – 125 с.
12. **Ivanov, V. V., Chumachenko, I. A.** (2009) Contact Ratio in Involute-Pin Meshing. Proceedings of the 5th Int. Conf. Quality Strategy in Manufacturing and Education. Varna, Bulgaria, pp. 183-185. (in Russian)
13. **Ivanov, V., Karaivanov, D., Chumak, N.** (2009) Comparative Analysis of the Bending Strength of Cycloid and Involute Teeth. Proceedings of the 3rd International Conference Power Transmissions'09, 1 – 2 October 2009, Chalkidiki, Greece, pp. 105-112.
14. **Дащенко, А.Ф.** Трансформация конструкции машин с использованием метода графов / А.Ф. Дащенко, В.В. Иванов // Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення. – 2008. – Вип. 13. – С. 34–43.
15. **Ivanov, V.** Methodological basic design of machine / V. Ivanov // Сборник приклада вот втора конференция с международно участие «Машинознание и машински элементы» 23–25 ноября 2005 / Под. ред. Л. Димитров. – София, Болгария. – София 2005. – С. 305 – 312.