

8. Кажаров А.А., Курейчик В.М. Бионспирированные алгоритмы решение оптимизационных задач // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG – 2011.
9. Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В. Генетические алгоритмы. – Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2004 г.
10. Starkweather T., S. McDaniel, K. Mathias, C. Whitley, and Whitley D. A Comparison of Genetic Sequencing Operators // Proceedings on the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, edited by Belew R. and Booker L., Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, CA, 1991, – P. 69-76.
11. Boese K.D., Kahng A.B., Muddu S. A new adaptive multi-start technique for combinatorial global optimizations // Oper. Res. Lett. – 1994. – Vol. 16, No. 2. – P. 101-114.

УДК 004

А.Н. Афанасьев¹, Н.Н. Войт², С.Ю. Кириллов³, С.И. Бригаднов⁴

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБУЧЕНИЯ

Разработано математическое обеспечение комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика: метод структурно-параметрического анализа проектных решений, ассоциативно-ориентированная модель компетенций проектировщика, алгоритм формирования траектории обучения автоматизированному проектированию.

САПР КОМПАС, анализ проектных решений, операции твердотельного моделирования, рекомендации.

A.N. Afanasiev, N.N. Voit, S.Yu. Kirillov, S.I. Brigadnov

INFORMATION SUPPORT OF THE INTELLECTUAL ENVIRONMENT OF DESIGN AND TRAINING

The mathematical support of the complex system of the analysis of design decisions and training of the designer is developed: a method of the structural-parametric analysis of design decisions, associative-oriented model of competences of the designer, algorithm of formation of a trajectory of training to the automated design.

CAD KOMPAS, analysis of design solutions, solid modeling operations, recommendations.

¹ УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; a.afanasiev@ulstu.ru; 88422778846; д.т.н.; профессор.

² УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; n.voit@ulstu.ru; 88422778846; к.т.н.; доцент.

³ УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; kirillovsyu@gmail.com; 88422778846; начальник НИО ИДДО УлГТУ.

⁴ УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; sergbrig@yandex.ru; 88422778846; аспирант.

Введение

В системах автоматизированного проектирования представлены различные подсистемы анализа, например: прочностной анализ, включающий статический расчёт, расчёт устойчивости, расчёт собственных частот и формы собственных колебаний, расчёт стационарной теплопроводности и термоупругости; анализ динамического поведения машин и механизмов; проверку на соответствие стандартам оформления в подсистеме КОМПАС-Эксперт (расстояние между размерными линиями, размещение текста, наличие пересечений у размерной линии, стили линий и засечек и т. п.), соответствие ограничительным перечням предприятия (разрешенное значение шероховатости, качества, резьб и т. п.), соответствие правилам работы в КОМПАС (ручной ввод размеров, привязка обозначения позиции к спецификации, использование объекта осевая, а не линии со стилем осевая и т. п.); расчёт размерных цепей и пружин; оптимизация зубчатого зацепления; подбор электродвигателей, редукторов и муфт.

Следует отметить, что в современных САПР отсутствует анализ действий проектировщика в процессе проектирования трехмерных твердотельных изделий.

В практике проектной деятельности по разработке 3D-моделей машиностроительных объектов достаточно часто встречается ситуация, связанная с выполнением операций проектировщиком, являющихся «лишними» и которых можно избежать. В результате усложняется дерево проектных решений, а при автоматизированной разработке программы для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) увеличивается ее сложность.

Таким образом, актуальной задачей в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов является структурно-параметрический анализ проектного решения с целью выявления неоптимальных последовательностей проектных операций, автоматического перестроения и классификации 3D-моделей машиностроительных объектов для повторного использования в процессах проектирования, а также формирования соответствующих рекомендаций проектировщику.

Разрабатываемые методы и алгоритмы должны обеспечить приобретение необходимых компетенций проектировщику для успешной проектной деятельности в области автоматизированного проектирования, повышение эффективности обучения. Система анализа проектных решений должна повысить качество проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, за счет уменьшения сложности получаемых программ для станков с ЧПУ.

1. Разработка математического обеспечения автоматизированной системы анализа проектных решений

Разработан новый метод структурно-параметрического анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС.

Сущность метода заключается в поиске неоптимально выполненных проектировщиком проектных операций на основе анализа дерева модели проектного решения и анализа операций объектов трехмерного моделирования, построенных в среде САПР КОМПАС-3D. Метод позволяет перестроить дерево модели проектного решения и классифицировать изделия машиностроительных объектов для повторного использования трехмерных моделей при конструировании твердотельных изделий в САПР КОМПАС-3D.

Под моделью в САПР КОМПАС-3D понимается совокупность геометрических объектов, таких как: эскизы, пространственные кривые и точки, поверхности и тела. В свою очередь, геометрические объекты состоят из следующих компонентов: вершина, грань, ребро.

При этом под трехмерной деталью будем понимать однородную непрерывную область пространства определенной формы, а под трехмерной сборкой – трехмерную модель, объединяющую модели деталей, подборок и стандартных элементов. Таким образом, под термином «проектное решение» будем понимать описание в заданной форме объекта проектирования или его части, необходимое и достаточное для определения дальнейшего направления проектирования.

В дереве модели проектного решения отображается деталь (сборка) в виде списка объектов в том порядке, в котором они были созданы. Сборка в дереве модели проектного решения отображается в режиме «История построения». Данный режим служит для представления последовательности проектных операций и применяется для редактирования операций, в которых результат предыдущих действий проектировщика влияет на последующие. Каждый элемент дерева модели имеет определенные свойства и параметры: внешние параметры, покрытие, материал изготовления и т.д.

Анализ последовательности проектных операций объектов трехмерного моделирования, выполненных в среде САПР КОМПАС-3D, осуществляется на основе правил. Правило для анализа проектных операций состоит из следующих компонентов: тип операции, текстовое описание правила, условие срабатывания правила. Если для последовательности проектных операций найдено правило, формируется соответствующая рекомендация проектировщику [1].

Разработан ряд моделей, составляющих научную основу метода структурно-параметрического анализа.

Исходными данными для анализа проектных решений САПР КОМПАС является последовательность выполняемых проектных операций проектировщиком, модель которой имеет следующий вид:

$$P_PrO = (Operations, TypesOperation, ParamsOp, F_list),$$

где $Operations = \{opi | i = 1..k\}$ – множество проектных операций,

$TypesOperation = \{o3d | i = 0..159\}$ – множество типов операций в САПР КОМПАС (например, $o3d_fillet = 34$ – операция «скругление»; $o3d_chamfer = 33$ – операция «фаска»),

$ParamsOp = \{pri | i = 1..PR\}$ – множество параметров операций со значением,

$F_list = Operations \times TypesOperation \times ParamsOp \rightarrow I_op$ – функция формирования последовательности проектных операций проектировщика при работе с САПР КОМПАС-3D.

Модель операции имеет следующий вид:

$$Operation = (id, type, params, F_xml),$$

где id – номер операции в последовательности операций,

$type \in TypesOperation$ – тип операции,

$params \in ParamsOp$ – список параметров операции со значением,

$F_xml = number \times type \times params \rightarrow I_xml$ – функция формирования XML-описания проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D.

На основе предложенной модели операций генерируется XML-описание проектного решения, содержащее историю построения трехмерного твердотельного машиностроительного изделия в виде взаимосвязанных проектных операций проектирования в САПР КОМПАС-3D и их параметров со значением.

Модель исходных данных для автоматизированного перестроения объекта трехмерного моделирования имеет следующий вид:

$$RebuildModel = (Details, I_op, I_xml, Rules, F_opN, F_opt, F_rxml, F_robj3D),$$

где $Details = \{dti | i = 1..k\}$ – множество деталей, входящих в трехмерную модель изделия САПР КОМПАС,

I_op – последовательность проектных операций,

I_xml – XML-описание проектного решения САПР КОМПАС-3D,

$Rules = \{ri | i = 1..k\}$ – множество правил для поиска неоптимальных проектных операций и их замены на операции с меньшим количеством действий.

$F_opN = Details \times I_op \times I_xml \rightarrow op_N \subset Operation$ – функция формирования множества неоптимальных проектных операций, выполненных проектировщиком, для каждой трехмерной модели, входящей в сборку машиностроительного изделия,

$F_{opt} = op_N \times Rules \rightarrow l_opOpt$ – функция формирования оптимальной последовательности проектных операций,

$F_{gxml} = Details \times l_opOpt \rightarrow l_gxml$ – функция формирования XML-описания для перестроения трехмерного машиностроительного объекта в САПР КОМПАС-3,

$F_{robj3D} = l_opOpt \times l_gxml \rightarrow g_project$ – функция перестроения дерева модели проектного решения САПР КОМПАС-3D на основе оптимальной последовательности проектных операций и их XML-описания.

Такие преобразования модели на основе множества неоптимальных проектных операций и правил для поиска и замены их на последовательность с меньшим количеством действий позволяют сформировать оптимальную последовательность проектных операций трехмерной твердотельной модели машиностроительного объекта в САПР КОМПАС-3D.

Модель деталей, входящих в трехмерную модель изделия САПР КОМПАС, имеет следующий вид:

$$Details = (id, l_op, attribute, material, F_class),$$

где id – множество уникальных идентификаторов детали,

l_op – последовательность проектных операций проектировщика для построения детали в САПР КОМПАС-3D,

$attribute$ – множество переменных и параметров трехмерной модели,

$material$ – множество материалов для изготовления детали (например, «Сталь 10 ГОСТ 1050-88»),

$F_class = l_op \times attribute \rightarrow class$ – функция определения класса изделия машиностроительного объекта, выполненного в САПР КОМПАС-3D (например, «Кольцо», «Втулка», «Фланец» и т. д.).

Такое представление модели позволяет классифицировать трехмерный твердотельный машиностроительный объект, выполненный в САПР КОМПАС-3D, с целью повторного использования в процессе конструирования.

Модель переменных и параметров трехмерной модели имеет следующий вид:

$$attribute = (name, value, note, F_aList),$$

где $name$ – множество обозначений переменной или параметра трехмерной модели,

$value$ – множество значений переменной или параметра трехмерной модели,

$note$ – множество текстовых описаний переменной или параметра трехмерной модели (например, « $d = 24$ – диаметр посадочной поверхности корпуса»),

$F_aList = name \times value \times note \rightarrow I_param$ – функция формирования списка параметров 3D-объекта, спроектированного в САПР КОМПАС-3D.

На основе предложенной модели формируется список параметров трехмерного твердотельного машиностроительного объекта, выполненного в САПР КОМПАС-3D, для определения класса изделия.

Модель правила [2] имеет следующий вид:

$$Rules = (template, result),$$

где $template = \{tplij | i=1..k\}$ – формула логики первого порядка для поиска неоптимальных операций в последовательности проектных операций,

$result = \{resij | i=1..n\}$, $res = (type, params)$ – множество оптимальных проектных операций (тип операции, параметр операции со значением), где тип операции – константа, а параметр операции со значением – формула логики первого порядка.

Шаблон правила в общем виде имеет следующую структуру:

$$TPL = (id, type, txt, action),$$

где id – множество идентификаторов правил,

$type \in TypesOperation$ – множество типов проектных операций,

txt – множество описаний правил,

$action$ – множество условий срабатывания правил.

Модель исходных данных для классификации изделий машиностроительных объектов имеет следующий вид:

$$ClassDetails = (detail, I_op, ClassTemplates, F_class),$$

где $detail \in Details$ – множество деталей, входящих в трехмерную модель изделия (сборку) САПР КОМПАС,

I_op – последовательность проектных операций проектировщика для построения детали в САПР КОМПАС-3D,

$ClassTemplates = \{ctplij | i=1..k\}$ – множество шаблонов построения дерева модели проектных решений для определенного класса изделия,

$F_class = detail \times I_op \times ClassTemplates \rightarrow class$ – функция определения класса изделия машиностроительного.

Предложенная модель позволяет классифицировать трехмерный машиностроительный объект на основе имеющегося множества шаблонов построения трехмерных моделей, присущих определенным классам изделий [3].

Повышение качества проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, и эффективности работы проектировщика изделий машиностроения осуществляется за счёт поиска неоптимальной последовательности проектных операций и замены их на последовательность проектных операций с меньшим количеством действий [4].

Алгоритм формирования последовательности оптимальных проектных операций состоит из следующих пунктов.

1. Начало работы проектировщика с проектом.
2. Генерация проектных операций (исходные данные – текстовое XML-описание проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС).
3. Формирование последовательности проектных операций.
4. Поиск правила в базе правил (которому соответствует последовательность проектных операций). Если правило не найдено, переход к пункту 9.
5. Формирование оптимальной последовательности проектных операций.
6. Формирование рекомендации проектировщику по замене неоптимальных операций на основе последовательностей оптимальных и неоптимальных проектных операций.
7. Замена множества неоптимальных проектных операций на последовательность с меньшим количеством действий.
8. Перестроение дерева модели проектного решения на основе последовательности из пункта 7.
9. Сохранение проектного решения и отображение его в САПР КОМПАС.
10. Завершение работы проектировщика с проектом.

Алгоритм классификации изделий машиностроительных объектов и состоит из следующих пунктов.

1. Начало работы проектировщика.
2. Поиск проектного решения в базе изделий, если такое проектное решение уже существует, тогда переход к пункту 8.
3. Генерация проектных операций (исходные данные – текстовое XML-описание проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС).
4. Формирование последовательности проектных операций.
5. Формирование списка переменных и параметров изделия.
6. Поиск шаблона построения дерева модели, который соответствует последовательности проектных операций. Если найден шаблон, переход к пункту 8.
7. Анализ структуры проектного решения. Использование модулей анализа классов изделий на основе последовательности проектных операций для построения дерева трехмерной модели проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС, и списка параметров для присвоения класса машиностроительному объекту.
8. Присвоение класса изделия машиностроительному объекту.
9. Завершение работы проектировщика.

Метод структурно-параметрического анализа проектных решений также позволяет автоматически перестроить дерево трехмерной твердотельной модели, выполненной в САПР КОМПАС-3D.

Алгоритм перестроения дерева модели состоит из следующих шагов, представленных ниже:

- 1) формирование последовательности проектных операций для построения трехмерной модели;
- 2) определение связей между проектными операциями;
- 3) определение исходных и производных объектов проектных операций;
- 4) анализ полученной последовательности проектных операций с использованием морфологических правил, а также правил формирования рекомендаций проектировщику;
- 5) формирование оптимальной последовательности проектных операций;
- 6) замена последовательности из шага 1 на последовательность из шага 5;
- 7) определение новых связей между проектными операциями;
- 8) повторное определение исходных и производных объектов проектных операций;
- 9) формирование перестроенного проектного решения и отображение его в САПР КОМПАС-3D.

Разработан новый метод автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений. Сущность метода заключается в автоматическом заполнении шаблонов правил анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, на основе определения зависимостей между проектными операциями проектировщика. Метод позволяет автоматизировано формировать новые правила для анализа проектных решений на основе уже имеющихся фактов и правил. Полученные правила пополняют базу правил анализа проектных решений и используются в методе структурно-параметрического анализа.

Шаблоны правил заполняются в результате поэтапного анализа последовательности проектных операций при построении трехмерного объекта в САПР КОМПАС-3D.

Разработан ряд моделей, составляющих научную основу метода автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений.

Модель шаблона имеет следующую структуру:

$$TMP = (id, type, initial, derivatives, pararms, Fc, Fa),$$

где id – множество идентификаторов правил;

$type \in TypesOperation$ – множество типов операций;

$initial$ – множество исходных объектов для выполнения проектной операции;

$derivatives$ – множество производных объектов после выполнения проектной операции;

$params \in ParamsOp$ – множество параметров операции со значением;

$Fc = initial \times derivatives \rightarrow condition$ – функция формирования условия выполнения правила анализа проектного решения;

$Fa = condition \times type \rightarrow action$ – функция, определяющая действия при срабатывании правила.

Модель сформированного нового правила для анализа проектных решений имеет следующий вид:

$$NR = (id, type, txt_c, txt_a),$$

где id – множество идентификаторов правил;

$type \in TypesOperation$ – множество типов операций;

txt_c – множество описаний условий срабатывания правил;

txt_a – множество рекомендуемых действий при срабатывании правил, например: замена неоптимальных действий проектировщика на оптимальную последовательность проектных операций.

Алгоритм автоматизированной генерации правил состоит из 11 пунктов и представлен ниже.

1. Запуск проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС, на анализ.
2. Анализ истории построения трехмерного машиностроительного объекта. Формируется последовательность проектных операций построения трехмерной модели – XML-описание истории построения.
3. Формирование шаблона правила для анализа, содержащего следующие компоненты:
 - ♦ объект анализа;
 - ♦ тип проектной операции ($type$);
 - ♦ исходные объекты проектной операции ($initial$);
 - ♦ производные объекты проектной операции ($derivatives$);
 - ♦ параметры проектной операции ($params$).
4. Автоматическое определение взаимосвязей между проектными операциями в результате использования метода структурно-параметрического анализа.
5. Автоматическое извлечение параметров проектных операций.
6. Автоматическое заполнение компонентов шаблона правила для анализа.
7. Анализ исходных ($initial$) и производных ($derivatives$) объектов проектных операций. Формирование условия для срабатывания правила ($condition$).

8. Анализ сформированного условия (condition) и типа проектных операций для формирования действий (action) при срабатывании правила.

9. Формирование шаблона нового правила для анализа на основе шагов 7 и 8.

10. Проверка сгенерированного нового правила на корректность экспертом.

11. Занесение нового правила в базу правил анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D.

2. Разработка математического обеспечения автоматизированной системы обучения проектировщика

Разработано математическое обеспечение автоматизированной системы обучения: модель компетенций, модель предметной области, алгоритм формирования персонализированной траектории обучения [5].

В разработанной модели компетенций было выделено 3 блока (класса) основных компетенций в области автоматизированного проектирования трехмерных объектов (компетенции проектировщика): K1 – знание теории, K2 – умения проектировщика в области САПР; K3 – навыки проектировщика в области САПР.

Выделены следующие категории проектировщика трехмерных твердотельных машиностроительных изделий, выполненных в САПР КОМПАС-3D:

- ◆ без категории (молодой специалист);
- ◆ инженер-конструктор 3 категории;
- ◆ инженер-конструктор 2 категории;
- ◆ инженер-конструктор 1 категории;
- ◆ ведущий инженер-конструктор.

Модель компетенций представляется в виде графа $G(V, D)$, в котором V – множество вершин, D – множество дуг.

Множество V состоит из множеств вершин V^F присваивания, V^R распараллеливания и V^L соединения. Множество D состоит из множеств дуг D^P разветвления, D^R распараллеливания и D^L соединения, т.е. $D = D^P \cup D^R \cup D^L$ [6]. Выделены следующие типы вершин:

- ◆ распараллеливания;
- ◆ соединения;
- ◆ присваивания.

Вершины распараллеливания позволяют осваивать обучаемому проектировщику несколько компетенций одновременно. Освоение компетенций происходит независимо друг от друга с различным интервалом времени. Вершины соединения позволяют осваивать обучаемому проектиров-

щику новую компетенцию только тогда, когда были освоены все предшествующие компетенции. Вершины присваивания позволяют обучаемому проектировщику последовательно осваивать компетенции одну за другой.

В предметной области выделены следующие классы:

- ◆ дидактическая единица (ДЕ);
- ◆ учебный материал (УМ) – набор сгруппированных по какому-либо признаку дидактических единиц;
- ◆ тестовые задания (ТЗ) – группирует теоретические вопросы для отдельно выбранной ДЕ;
- ◆ контрольное задание (КЗ) – группирует знания, умения и навыки по ряду ДЕ.

◆ тема изучения – группирует набор УМ, ТЗ и КЗ.

Алгоритм формирования персонафицированной траектории обучения автоматизированному проектированию состоит из следующих шагов.

1. Формирование входных контрольных заданий (КЗ): теоретический тест, практические задачи.

2. Выполнение проектировщиком входных КЗ.

3. Анализ текущего уровня освоения обучаемым проектировщиком компетенций (группы компетенций).

4. Формирование цели обучения.

5. Формирование учебного материала (УМ).

6. Изучение УМ проектировщиком.

7. Формирование выходных КЗ.

8. Выполнение проектировщиком практического задания.

9. Анализ степени освоения проектировщиком предложенного УМ. Если цель обучения достигнута, переход к шагу 15

10. Выбор дидактических единиц (ДЕ), необходимых для дальнейшего изучения.

11. Формирование вспомогательного УМ и контрольных КЗ.

12. Изучение проектировщиком вспомогательного УМ.

13. Выполнение проектировщиком контрольных КЗ.

14. Анализ контрольных КЗ. Если компетенции проектировщика не удовлетворяют цели обучения, переход к шагу 10.

15. Завершение обучения проектировщика. Корректировка цели обучения.

Заключение

Предложены модели последовательности проектных операций, исходных данных для автоматизированного перестроения объекта трехмерного моделирования, деталей, переменных и параметров трехмерной модели.

На основе предложенных моделей разработан метод структурно-параметрического анализа проектных решений на основе потока действий проектировщика в САПР, позволяющий повысить эффективность работы проектировщика, а также повысить качество и уменьшить сложность проектных решений САПР.

Разработано информационное обеспечение интеллектуальной среды проектирования и обучения (модель компетенций, модель предметной области, алгоритм формирования персонализированной траектории обучения), позволяющее формировать индивидуальную траекторию обучения с целью привить обучаемому проектировщику необходимые знания, умения и навыки в области автоматизированного проектирования трехмерных машиностроительных объектов.

Исследования поддержаны грантом Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2.1615.2017/4.6. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732152.

Библиографический список

1. **Бригаднов С.И., Афанасьев А.Н.** Рекомендательная система для САПР КОМПАС // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2016): тр. XVI-й междунар. молодежной конф. – М.: Аналитик, 2016. – С. 33-36.
2. **Пинков А.П., Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Канев Д.С.** Development of methods and means of computer systems for machine objects CAD training // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 1 (47). – С. 75-84.
3. **Бригаднов С.И., Уханова М.Е., ИONOва И.С., Игонин А.Г.** Разработка базы проектных решений машиностроительных объектов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 12. – С. 79-85.
4. **Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И., Канев Д.С.** Разработка автоматизированной системы анализа проектных решений в САПР КОМПАС-3D // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 1 (51). – С. 108-117.
5. **Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И.** Методы и средства комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2(52). – С. 50-57.
6. **Афанасьев А.Н., Гужавин А.А., Кокаев О.Г.** Ассоциативное микропрограммирование. – Саратов: СГУ, 1991. – 116 с.