

COMPUTER-AIDED ENGINEERING

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 658.512.22:004.896

А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков, И.В. Горбачев

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ КЛАССА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНО АДАПТИРОВАННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПРОЦЕДУР

Похилько Александр Федорович, кандидат технических наук, доцент, окончил факультет технической кибернетики Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. Профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи в области принятия решений и интегрированных процессов в системах автоматизированного проектирования. [e-mail: afp@ulstu.ru].

Цыганков Денис Эдуардович, окончил радиотехнический факультет УлГТУ, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика» УлГТУ. Имеет статьи в области системного анализа и автоматизации процессов проектной деятельности. [e-mail: d.tsyg@mail.ru].

Горбачев Иван Владимирович, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Доцент кафедры «Радиотехника» УлГТУ. Имеет статьи в области описания, формализации и автоматизации процессов проектной деятельности. [e-mail: giv.uln@gmail.com].

Аннотация

Проектирование современных изделий, относящихся к различным предметным областям и состоящих из огромного числа компонент, отличается предъявлением технического задания непосредственно к самому изделию, без отдельных требований к компонентам. Результатами проектной деятельности являются комплект конструкторской документации и сборочная 3D-модель изделия, формирование которой включает в себя добавление 3D-моделей деталей-компонент и установление сопряжений между ними. Для формирования, исправления и поддержания актуальности – постоянного обновления (модификации) 3D-сборки, необходимо ее перестраивание. Как правило, это осуществляется оперированием параметрами деталей и сопряжений вручную, что требует дополнительной траты временных и трудовых ресурсов. Предлагается решение указанной проблемы, заключаемое в установлении структурно-логических взаимосвязей между компонентами сборочной 3D-модели изделия на уровне атрибутов, позволяющих связывать компоненты со структурными объектами друг друга. Взаимосвязи между компонентами позволяют не только определять их расположение и привязывать друг к другу, оперируя значениями атрибутов – проектных параметров, но и модифицировать проектное решение, не нарушая его целостности, что не обеспечивалось ни одной из современных CAD-систем.

Ключевые слова: CAD-система, автоматизация, САх, проектное решение, проектная деятельность, функционал, 3D-модель, процесс, информационный образ, проектная процедура, функциональная адаптация, формальное описание, сборочная модель.

STRUCTURAL AND LOGICAL DESIGN SOLUTION CLASS GENERALIZATION WITH THE USE OF DESIGN PROCEDURES REPRESENTATION ADAPTED FUNCTIONALLY

Aleksandr Fedorovich Pokhilko, Candidate of Engineering, Associate Professor; graduated from Kalinin Polytechnic Institute; Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles in the field of design solution making and integrated processes of CAD-systems. e-mail: afp@ulstu.ru.

Denis Eduardovich Tsygankov, Postgraduate Student at the Department of Applied Mathematics and Informatics of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Radioengineering of UlSTU; an author of articles in the field of system analysis and design process automation. e-mail: d.tsyg@mail.ru.

Ivan Vladimirovich Gorbachev, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Radioengineering of UlSTU; an author of articles in the field of design process description, formalization and automation. e-mail: giv.uln@gmail.com.

Abstract

Design of modern products relating to different subject areas and consisting of a large number of components differs by the presence of the technical requirements to the entire product without separate requirements to its components. The design activity results include complete design documentation and product assembly 3D-model. The process of assembly 3D-model formation includes adding 3D-models of components and establishing conjugations between them. In order to construct, correct, and maintain (update or modify) a 3D-assembly, rebuilding should be provided. Typically, the process is carried out through manually handling of parts parameters and conjugations. That requires additional time and labor expenses. The authors propose the solution of the problem in establishing the structural and logical relationships between the components of the assembly 3D-model on the attribute level allowing to link the components and structural objects. Interrelations between the components allow not only to determine their location and link to each other operating with design parameter values but also to modify the design solution without violating its integrity that is not ensured by any modern CAD-system.

Key words: CAD, automation, CAx, design solution, design activity, functional, 3D-model, process, information image, design procedure, functional adaptation, formal description, assembly model.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отчетливо прослеживается динамика возрастания роли в проектной деятельности конструкторской документации (КД), представленной в электронном виде – 3D-моделями [1]. Положительные аспекты (главные из которых – это простота выпуска и чтения КД) не могут, однако, нивелировать уже новые трудности, связанные, прежде всего, со спецификой работы систем автоматизации проектирования (САПР) [2].

Как правило, в производстве КД постоянно подлежат изменению – проектные решения модифицируются, корректируются, исправляются, удаляются. Следовательно, необходимо перестраивание соответствующих информационных 3D-образов для поддержания актуальной проектной информации [3]. В работе [4] выделены требования к современным САПР касательно обеспечения модифицируемости 3D-моделей. Стандартный подход к модификации сборочных единиц – редактирование в контексте сборки – не может быть в полной мере осуществим, так как отдельные детали не взаимосвязаны и описывающие их атрибуты не ассоциативны. Следовательно, необходимо перестраивать 3D-модели вручную, меняя параметры проектных процедур, что по трудоемкости намного объемнее, чем построение исходного решения в виде 3D-модели [5].

Представление проектных решений в функционально адаптивной форме, а также их программная реализация в виде функционально адаптированных САПР является подходом, который позволяет не только автоматизировать перестраивание сборочных 3D-моделей, но и достичь сохранения структурно-логической целостности проектных решений [6].

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование – комплексный процесс, результатом которого является совокупность проектных решений, удовлетворяющих исходным данным [7], как правило, техническому заданию (ТЗ), описываемому множеством Rs_{in} входных проектных параметров [8]:

$$Rs_{in} \in Rp = \left\{ (dp_1^N, dp_2^N \dots dp_n^N), (dp_1^O, dp_2^O \dots dp_m^O), (dl_{1,2}^i \dots dl_{p,u}^i) \right\}, \quad (1)$$

где R_p – множество проектных параметров, описывающих проектируемый объект в рамках включающей его предметной области;

– проектные параметры, принимающие числовые и нечисловые (качественные) значения соответственно;

$dl_{k,j}^i$ – взаимосвязи между k -м и j -м проектными параметрами.

Значения исходных параметров dp_i^N и dp_i^O интерактивно задаются изначально как «свободные» значения, или же как нормализованные значения, в зависимости от того, какие на них накладываются условия. Так, значения параметров dp_i^N могут принимать целый интервал значений $[dp_{i_{min}}^N \dots dp_{i_{max}}^N]$, в то время как dp_i^O – лишь дискретные значения $[dp_{i1}^O, dp_{i2}^O \dots dp_{in}^O]$. Принимаемые значения параметров обоих типов предварительно задаются в соответствии с алгоритмом проектирования и другими стандартами (ГОСТ, ОСТ, СТП и пр.).

Формирование проектного решения происходит на основании выходных проектных параметров – набора атрибутов проектного решения, получаемого путем преобразования исходных данных [9]:

$$Rd_{out} = \left\{ (dp_1^A, dp_2^A \dots dp_n^A), (dp_1^C, dp_2^C \dots dp_m^C), (dl_{1,2}^O \dots dl_{p,u}^O) \right\}, \quad (2)$$

где Rd_{out} – множество выходных проектных параметров; dp_i^A и dp_i^C – проектные параметры, значения которых определяются автоматически и интерактивно задаются пользователем соответственно;

$dl_{k,j}^O$ – взаимосвязи между k -м и j -м выходными проектными параметрами.

Каждый проектный параметр оказывает влияние на формируемое решение, делая его уникальным (в плане выходной совокупности описывающих решение атрибутов).

Определение значений выходных параметров dp_i^A происходит по заданному алгоритму проектирования либо на основании данных о взаимосвязях с другими параметрами $dl_{k,j}^i$. На принимаемое проектное решение влияет не только конкретное значение i -го параметра, но и система их значений, что используется при выборе оптимальной структуры решения. В зависимости от исходных параметров ряд выходных решений dp_i^C может иметь несколько альтернативных значений, удовлетворяющих ТЗ, тогда пользователю нужно «вручную» выбрать предпочтительный (оптимальный) вариант.

Общий случай определения значений выходных проектных параметров Rd_{out} имеет вид:

$$Rd_{out} = f(Rs_{in}, Rs_{md}, dl^O, Com_n^f), \quad (3)$$

где Rs_{md} – набор промежуточных проектных параметров;

Com_n^f – набор проектных параметров n компонент, входящих в состав проектируемого устройства.

Множество параметров Com_n полностью определяет трехмерные информационные образы (3D-модели) всех компонент проектируемого изделия.

Составное изделие (узел, блок, агрегат), с точки зрения процесса его проектирования, – это система взаимос-

вязанных компонент – рассматриваемое исключительно в комплексе, а следовательно, формально оно может быть представлено в следующем виде:

$$RtD_{Form} = \left\{ Com_1^f, Int_1^f, Com_2^f, Int_2^f \dots Com_n^f, Int_n^f \right\}, \quad (4)$$

где RtD_{Form} – формальное представление изделия;

Int_i^f – множество взаимосвязей проектных параметров i -го компонента с другими компонентами.

В соответствии с (4) проектируемое изделие удобно рассматривать как систему параметров (Com_i^f, Int_i^f) отдельного компонента с взаимосвязями, что позволяет представить ассоциативно структуру изделия.

Множество проектных параметров (Com_i^f) компонента имеет вид, аналогичный (1):

$$Com_i^f = \left\{ (dpc_1^N, dpc_2^N \dots dpc_n^N), (dpc_1^O, dpc_2^O \dots dpc_m^O), (dl_{1,2}^i \dots, dl_{p,u}^i) \right\}. \quad (5)$$

Множество Int_i^f включает в себя три подмножества: взаимосвязей с входными и выходными проектными параметрами $f(Rs_{in})$ и $f(Rd_{out})$ соответственно, а также взаимосвязей с параметрами других компонент $f(Com_i^f)$:

$$Int_i^f = \left\{ f(Rs_{in}), f(Rd_{out}), f(Com_1^f \dots Com_n^f) \right\}. \quad (6)$$

Взаимосвязи с входными параметрами $f(Rs_{in})$ определяют каждый из компонент, формируя из них выходную систему, удовлетворяющую ТЗ. Взаимосвязи с выходными параметрами $f(Rd_{out})$ описывают проектное решение и обеспечивают модификацию для построения класса проектных решений. Взаимосвязи с параметрами других компонент $f(Com_i^f)$ позволяют сопрягать компоненты друг с другом, обеспечивая целостность системы.

Процесс проектирования, в рамках процессного подхода, – это упорядоченная последовательность проектных процедур, обладающих физическим смыслом. При проектировании комплексных изделий выделяются: проектная процедура построения 3D-образа i -го компонента dP_i^{3D} и проектная процедура установления взаимосвязей между i -м и n -м компонентами $dP_{i,n}^{Int}$. Тогда процесс проектирования Des_{Form}^P формализованно представляется [8] в следующем виде:

$$Des_{Form}^P = \left\{ (dn_1, da_1, dP_1^{3D}), \dots (dn_n, da_n, dP_n^{3D}), (dP_{1,2}^{Int} \dots dP_{(n-1),n}^{Int}, n) \right\}, \quad (7)$$

где dn_i – порядковый номер выполнения i -й проектной процедуры (dP_i^{3D});

da_i – номер ветви альтернативы, к которой принадлежит эта проектная процедура.

Номер ветви альтернативы определяет проектный маршрут в соответствии с заданными проектными параметрами, делающими результат выполнения уникальным.

На основе формализации процесса проектирования составного изделия формируется его обобщенная процедурная модель, представляющая собой последовательность проектных процедур, процесс построения которой, а также ее применение детально рассмотрены в работе [6].

ФУНКЦИОНАЛЬНО АДАПТИВНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Функционально адаптированные системы автоматизированного проектирования (ФА САПР) – это системы проектирования технического изделия (либо целого класса изделий), набор функциональности которых позволяет осуществлять проектирование, не требуя выхода за рамки имеющейся функциональности, при этом обеспечивая модифицируемость (адаптивность) решения в данных рамках [10].

В процессе построения ФА САПР проводится анализ проектируемых технических изделий, формируются их формализованное представление и процедурная модель.

Анализ проектируемых изделий проводится с целью выделения ряда проектных параметров – обладающих физическим смыслом в заданной предметной области и полностью определяющих их трехмерные информационные образы [11]. Данные параметры формируют атрибуты проектных процедур, обеспечивая вариативность проектных решений.

Формализованное представление отображает принцип работы ФА САПР и является, по сути, описанием процесса проектирования изделия в рамках методологии IDEFO с выделением до требуемого уровня декомпозиции, исходных данных, результата, а также механизма и управления [4].

Процедурная модель проектируемого изделия – это «шаблон» для последующей программной реализации ФА САПР, представляющий собой последовательность проектных процедур и входящих в их состав проектных операций с ассоциативными связями между их атрибутами. При кодировании для каждой проектной операции формируется функция с теми же параметрами, что позволяет в коде ФА САПР четко отслеживать связь с предметной областью и физическим смыслом переменных – обеспечить семантику проектирования.

КЛАСС СЕМАНТИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В качестве примера проектируемых изделий рассматривается класс, семантически описываемый как «Антенны рупорные волноводные», который включает в себя пять структурно подобных компонент: открытый конец волновода, рупоры E - и H -секториальные, а также клиновидный и пирамидальный рупоры (рис. 1).

Объединение компонент в единый класс, имеющий единое семантическое описание, позволяет выделять атрибуты

входящих компонент – проектные параметры, часть которых являются общими для всех антенн, а также уникальные, обеспечивающие структурно-семантическую особенность каждого объекта [9]. Для рупорных волноводных антенн атрибутами являются высота и ширина сечения волновода ($a \times b$), тип фланца (T_f), длина участка волновода (L_w), толщина стенок волновода (t_w), материал (m), тип напыления (s_m) и другие, не рассматриваемые в данном примере. Уникальными атрибутами являются: для секториальных и клиновидного рупоров – это ширина рупора в E - и H -плоскости (r_E, r_H), а также длина рупора в соответствующей плоскости (l_E, l_H). Для рупора пирамидального это те же параметры (r_E, r_H), но вместо длины рупора в конкретной плоскости имеется параметр длины рупора в обеих плоскостях (l_E, l_H соответственно).

После выделения описывающих атрибутов ставится вопрос о принимаемых ими значениях: одни параметры могут принимать целые интервалы значений, а другие – лишь дискретные значения. Свободные значения интерактивно вводятся пользователем, при условии попадания задаваемого значения в диапазон $[P_{min} \dots P_{max}]$ (отличие двух ближайших значений зависит от введенного шага дискретизации); а дискретные значения интерактивно выбираются пользователем из предварительно заданных «нормализованных» значений, условие для них – строгое соответствие выбранного варианта предлагаемым.

Нормализованные значения определяются по стандартам, справочной и научно-технической литературе, применимой к проектируемому техническому объекту. Рупорные антенны входят в состав волноводного тракта сверхвысокой частоты (СВЧ), а следовательно, значения нормализованных проектных параметров определяются в соответствии с ГОСТ 20900-75 и ГОСТ 13317-89.

В таблице 1 представлены выделенные атрибуты – проектные параметры класса «Антенны рупорные волноводные», их уровень, буквенное обозначение, а также тип ввода их значений.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КЛАССА ИЗДЕЛИЙ

Результатом выделения и анализа исходных атрибутов класса является формирование формализованного представления процесса проектирования входящих в него компонент. Такое представление, являясь последовательностью проектных процедур, имеет следующий вид:



Рис. 1. Класс изделий «Антенны рупорные волноводные»

Таблица 1

Проектные параметры класса «Антенны рупорные волноводные»

Проектный параметр	Уровень	Обозначение	Тип ввода
Высота и ширина сечения волновода	Общий	$a \times b$	Выбор нормализованных значений проектных параметров
Тип фланца		T_f	
Материал		m	
Тип напыления		s_m	
Толщина стенок волновода		t_w	
Длина участка волновода	Уникальный	L_w	Интерактивный ввод значений проектных параметров
Ширина рупора в E -плоскости		r_E	
Ширина рупора в H -плоскости		r_H	
Длина рупора в E -плоскости		l_E	
Длина рупора в H -плоскости		l_H	
Длина рупора в обеих плоскостях		l	

$$FrMd_{Horn}^{Ant.} = \left\{ (di_1, dv_1, Dpc_1^{a \times b}), (di_2, dv_2, Dpc_2^{T_f}), \right. \\ (di_3, dv_3, Dpc_3^m), (di_4, dv_4, Dpc_4^{s_m}), (di_5, dv_5, Dpc_5^{t_w}), \\ (di_6, dv_6, Dpe_6^{L_w}), (di_7, dv_7, Dpe_7^{r_E}), (di_8, dv_8, Dpe_8^{r_H}), \\ (di_9, dv_9, Dpe_9^{l_E}), (di_{10}, dv_{10}, Dpe_{10}^{l_H}), \\ (di_{11}, dv_{11}, Dpe_{11}^l), (di_{12}, dv_{12}, Dpb_{12}^{Oew}), \\ (di_{13}, dv_{13}, Dpb_{13}^{Hes}), (di_{14}, dv_{14}, Dpb_{14}^{Hhs}), \\ \left. (di_{15}, dv_{15}, Dpb_{15}^{Hp}), (di_{16}, dv_{16}, Dpb_{16}^{Hw}) \right\},$$

(8)

где $FrMd_{Horn}^{Ant.}$ – последовательность процедур проектирования компонентов класса «Антенны рупорные волноводные»;

di_i – порядковый номер выполнения i -й проектной процедуры ($i = 1 \dots 16$);

dv_i – номер ветви альтернативы, к которой принадлежит i -я проектная процедура;

Dpc_i – проектная процедура выбора нормализованных значений входных проектных параметров $a \times b$, T_f , m , s_m , t_w , при $i = 1 \dots 5$ соответственно;

Dpe_i – проектная процедура интерактивного ввода значений входных проектных параметров L_w , r_E , r_H , l_E , l_H , l , при $i = 6 \dots 11$ соответственно;

Dpb_i – проектная процедура построения трехмерного информационного образа структурно уникального компонента класса «Антенны рупорные волноводные»: открытого конца волновода (при $i = 12$), рупоров E - и H -секториального (при $i = 13, 14$ соответственно), рупоров клиновидного и пирамидального (при $i = 15, 16$ соответственно).

Номер ветви альтернативы (dv_i) уникален для каждого компонента класса; он определяет проектный маршрут. Для проектных процедур, являющихся общими, $dv_i = 0$.

Проектная процедура выбора нормализованных значений параметров (Dpc_i) представляет собой функцию, на выходе которой могут быть лишь дискретные значения проектных параметров. Например, при интерактивном вводе значения длины волны (λ) данная процедура подбирает соответствующие высоту и ширину сечения волновода ($a \times b$), что представлено на рисунке 2. При этом число возможных дискретных значений ($S_i^{a \times b}$), соответствующих отдельным проектным маршрутам, на выходе процедуры ограничено.

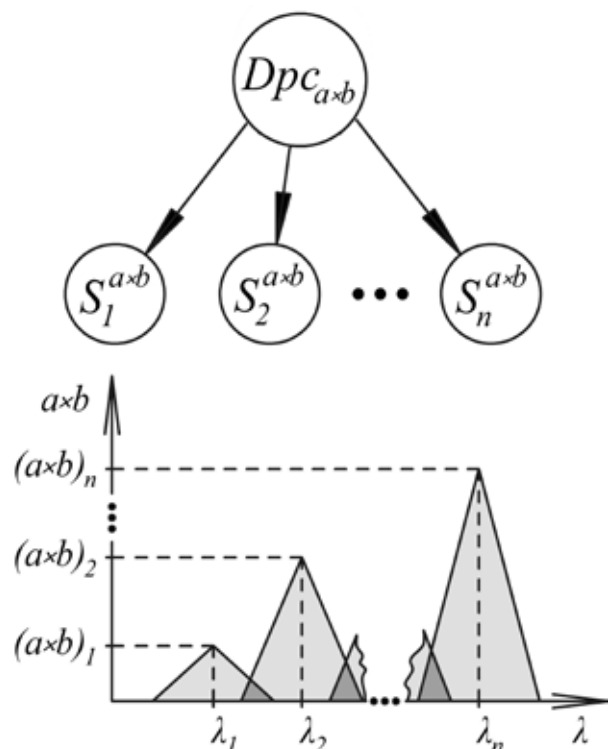


Рис. 2. Структура проектной процедуры выбора нормализованных значений параметров

Проектная процедура интерактивного ввода значений параметров (Dpe_i) – это функция, на выходе которой может быть получено множество значений параметров, при этом их число контролируется шагом дискретизации – количественной мерой, отличающей два ближайших значения. Например, при задании длины участка волновода (t_w) пользователь может ввести значения от 0 (равноценно отсутствию участка волновода) до $t_{w\max}$. При этом все значения, получаемые на выходе процедуры, относятся к единому проектному маршруту, но делают уникальным итоговое проектное решение. На рисунке 3 представлены проектные решения, соответствующие одному проектному маршруту (в рамках единого структурного подобия) и отличающиеся только значением атрибутов – ширины раскрыва рупора в H -плоскости (rH).



Рис. 3. Проектные решения, соответствующие одной ветви проектного маршрута

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ

Проектная процедура построения трехмерных информационных образов (3D-моделей) Dpb_i является основной при программной реализации ФА САПР [6], так как она отображает принцип функционирования, что более детально рассмотрено в работе [10]. IDEFO-модель данной процедуры представлена на рисунке 4.

Данная процедура представляет собой упорядоченную последовательность базовых операций (предоставляемых используемой САПР) – функций от значения входных (или промежуточных) проектных параметров. Каждая операция имеет порядковый номер выполнения и номер ветви альтернативы.

Выделение базовых операций, входящих в состав процедуры построения 3D-образа, происходит на основании структурного анализа всех компонент класса, цель которого – выделение общих и уникальных структурных объектов, обладающих строго определенной семантикой [12].

У компонент рассматриваемого класса выделяют пять структурных объектов. Общие части – фланец и участок волновода; уникальные – секториальный рупор, пирамидальный рупор и клиновидный рупор. Разделение рупоров объясняется различным набором входных параметров и необходимых для их построения проектных операций. После структурных объектов проектируемых

устройств формируется их процедурная модель.

Процедурная модель построения трехмерных информационных образов компонент класса «Антенны рупорные волноводные» имеет следующий вид:

$$PrcMd_{Horn}^{Ant.} = \{(di_1, dv_1, Dpf_{Fl}), (di_2, dv_2, Dpf_{Wg}), (di_3, dv_3, Dpf_{Sh}), (di_4, dv_4, Dpf_{Ph}), (di_5, dv_5, Dpf_{Wh})\}, \quad (9)$$

где $PrcMd_{Horn}^{Ant.}$ – множество проектных процедур, участвующих в построении трехмерных информационных образов компонент класса «Антенны рупорные волноводные»;

Dpf_{Fl} – проектная процедура построения фланца;

Dpf_{Wg} – проектная процедура построения участка волновода;

$Dpf_{Sh}, Dpf_{Ph}, Dpf_{Wh}$ – проектные процедуры построения секториального, пирамидального и клиновидного рупоров соответственно.

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОЕ СВЯЗЫВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПРОЦЕДУР

Для каждого структурного объекта формируется собственная функция, аргументами которой является определенный набор проектных параметров, определяющих его 3D-образ [9]. Так происходит распределение атрибутов ТЗ на процедуры, для выполнения которых они необходимы. При этом, проектные параметры могут быть исходными как для всех, так и для единичных процедур.

На основе процедурной модели (9) строится структура формирования проектного решения. В зависимости от выбранного компонента, проектное решение $DSol_{Horn}^{3D}$ формируется по следующей формуле:



Рис. 4. Проектная процедура построения информационных 3D-образов

$$DSol_{Horn}^{3D} = \{(1, 0, Dpf_{Fl}) \cup (2, 0, Dpf_{Wg}) \cup \\ \cup ((3, 1, Dpf_{Sh}) \cap (3, 2, Dpf_{Sh}) \cap \\ \cap (3, 3, Dpf_{Ph}) \cap (3, 4, Dpf_{Wh}))\}. \quad (10)$$

Как видно, в результате проектирования на выходе может быть получено пять структурно типовых проектных решений, соответствующих числу компонентов класса, представленных на рисунке 1. При этом в ряде случаев решения на различных проектных маршрутах могут быть идентичны. Например, представленная на рисунке 5 трехмерная модель соответствует одновременно клиновидному рупору с условием $l_E = l_H$ и пирамидальному рупору с условием $l = l_H = l_E$.



Рис. 5. Проектное решение, соответствующее двум различным ветвям проектных маршрутов

Несмотря на то, что трехмерные информационные образы одинаковы, решения относятся к различным ветвям проектных маршрутов, при этом значения выходных проектных параметров (таких как ширина диаграммы направленности, коэффициент усиления и др.) будут совпадать, подтверждая эквивалентность геометрий этих решений.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве ядра ФА САПР используется платформа Open CASACDE Technology (ОССТ) – набор библиотек твердотельного 3D-моделирования, включающих в свой состав функции и операции для разработки специализированных программных средств целого ряда областей, основной из которых являются САД-системы. Полученная на базе языка программирования С++ библиотека ОССТ включает в себя шесть модулей, каждый из которых имеет функционал для решения определенного круга задач (визуализация 3D-объектов, конвертация в требуемый формат и др.) [13].

При программной реализации каждой проектной процедуре из (9) разрабатывается соответствующая функция, атрибутами которой является набор переменных, представленных в таблице 1, сгруппированный по (8), после чего эти функции автоматизированно выстраиваются в нужном порядке выполнения в соответствии с (10) в зависимости от формируемого проектного решения.

На основе формального представления и библиотек МФС программным путем разрабатывается окно отображения компонентов класса, в котором после выбора компонента выводится панель задания значений проектных параметров, на основании которых формируется проектное решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология структурно-логического обобщения проектных процедур, рассмотренная в данной работе, позволяет осуществлять проектирование класса сложных изделий, оставаясь в строгих рамках правил и алгоритмов, определяемых стандартами и техническими требованиями. Следовательно, достаточно задать исходные данные – ТЗ, чтобы получить на выходе решение, удовлетворяющее как ему, так и заложенным условиям и ограничениям.

Полученные в результате функционирования разработанной ФА САПР 3D-модели могут быть сохранены в международном формате ISO 10303 STEP, обеспечивающем их дальнейшее открытие, обработку и сохранение в любых современных САД-системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евгеньев Г.Б., Кокорев А.А., Пиримяшкин М.В. Метод создания геометрических баз знаний // Инженерный вестник. – 2016. – № 1. – С. 1201–1218.
2. Гамильтон П. Азбука технологий моделирования в MCAD-системах. Ч. III. Как технологии MCAD влияют на процесс разработки изделия // CAD/CAM/CAE Observer. – 2008. – № 2 (38). – С. 34–36.
3. Лезин И.А., Маркелов Д.Е. Автоматизированная система классификации конструкторско-технологических элементов деталей с использованием баз знаний // Главный механик. – 2014. – № 5. – С. 38–41.
4. Евгеньев Г.Б., Кокорев А.А., Пиримяшкин М.В. Метод генерации 3D-моделей в производственных базах знаний // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 38–48.
5. Блинова А.А., Гаврилова Н.Ю., Пащенко О.Б. Методы контроля твердотельных электронных моделей машиностроительного изделия на всех этапах его жизненного цикла // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 1. – С. 80–84.
6. Горбачев И.В., Похилько А.Ф. Технология представления модели в функционально адаптированной САПР // Автоматизация процессов управления. – 2008. – № 3. – С. 39–43.
7. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
8. Формализация и анализ процессов проектирования технических объектов / А.Ф. Похилько, А.А. Масляцын, А.В. Удовиченко, А.А. Куприянов // Автоматизация процессов управления. – 2006. – № 2. – С. 132–140.
9. Tsygankov D., et al., The Design Process Structural & Logical Representation in the Concurrent Engineering Infocommunication Environment, R. Curran et al. (eds.)

Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems, IOS Press. – Amsterdam : 2015. – pp. 595–602.

10. Горбачев И.В., Похилько А.Ф. Структура формального представления процесса проектирования в функционально адаптированной САПР // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 75–78.

11. Носов К.Г. Когнитивный подход к решению задач моделирования и проектирования в САПР // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 1. – С. 73–85.

12. Цыганков Д.Э., Похилько А.Ф. Представление процесса проектирования на базе обобщения элементарных операций до уровня семантических единиц // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 3(41). – С. 81–88.

13. Бычков И., Прусенко В., Мазурин А. Инструмент для разработки корпоративной САПР // САПР и графика. – 2001. – № 8. – URL: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7725&iid=314> (дата обращения: 27.07.2016).

REFERENCES

1. Eugenev G.B., Kokorev A.A., Pirimiashkin M.V. Metod sozdaniia geometricheskikh baz znaniia [The Method of Creating Geometric Knowledge Bases]. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering Bulletin], 2016, no. 1, pp. 1201–1218.

2. Hamilton P. Azbuka tekhnologii modelirovaniia v MCAD-sistemakh. Chast III. Kak tekhnologii MCAD vliiaiat na protsess razrabotki izdeliia [A Primer on MCAD Modeling Technology. Part. III. How MCAD Technology Impacts the Product Development Process]. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2008, no. 2 (38), pp. 34–36.

3. Lyozin I.A., Markelov D.E. Avtomatizirovannaia sistema klassifikatsii konstruktorsko-tekhnologicheskikh elementov detalei s ispolzovaniem baz znaniia [Automated Classification System of Design a Technological Elements by Using Knowledge Bases]. *Glavnyi mekhanik* [Chief Mechanical Engineer], 2014, no. 5, pp. 38–41.

4. Eugenev G.B., Kokorev A.A., Pirimyashkin M.V. Metod generatsii 3D-modelei v produktsionnykh bazakh znaniia [The Method of 3D-Model Generation in Knowledge Bases]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proc. of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2015, no. 4, pp. 38–48.

5. Blinova A.A., Gavrilova N.Iu., Pashchenko O.B. Metody kontroliia tverdotelnykh elektronnykh modelei mashinostroitel'nogo izdeliia na vsekhn etapakh ego zhiznennogo tsikla [Methods for Checking of Solid-State

Electronic Models of Machine-Building Products at All Stages of Its Lifecycle]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 1, pp. 80–84.

6. Gorbachev I.V., Pokhilko A.F. Tekhnologiya predstavleniia modeli v funktsionalno adaptirovannoi SAPR [Technology of Model Presentation in Functionally Adapted CAD-System]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2008, no. 3 (13), pp. 39–43.

7. Maliukh V.N. Vvedenie v sovremennye SAPR: Kurs lektsii [Introduction to CAD-System. Series of Lectures]. Moscow, DMK Press Publ, 2010. 192 p.

8. Pokhilko A.F., Masliantcyn A.A., Udovichenko A.V., Kupriianov A.A. Formalizatsiia i analiz protsessov proektirovaniia tekhnicheskikh obektov [Formalization and Analysis of Technical Object Designing]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2006, no. 2, pp. 132–140

9. Tsygankov D. et al. The Design Process Structural & Logical Representation in the Concurrent Engineering Infocommunication Environment, R. Curran et al. (eds.) *Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems*, IOS Press, Amsterdam, 2015, pp. 595–602.

10. Gorbachev I.V., Pokhilko A.F. Struktura formal'nogo predstavleniia protsessa proektirovaniia v funktsionalno adaptirovannoi SAPR [The Structure of a Formal Design Process Representation]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Infokommunikatsionnye Tehnologii], 2010, vol. 8, no. 1, pp. 75–78.

11. Nosov K.G. Kognitivnyi podkhod k resheniiu zadach modelirovaniia i proektirovaniia v SAPR [Cognitive Approach to the Solution of the Problem Modeling and Design in CAD]. *Prikladnaia matematika i voprosy upravleniia* [Journal of Applied Mathematics and Control Sciences], 2015, no. 1, pp. 73–85.

12. Tsygankov D.E., Pokhilko A.F. Predstavlenie protsessa proektirovaniia na baze obobshcheniia elementarnykh operatsii do urovnia semanticheskikh edinits [Representing Design Process by Generalizing Elementary Operations to Semantic Unit Level]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 3(41), pp. 81–88.

13. Bychkov I., Prusenko V., Mazurin A. Instrument dlia razrabotki korporativnoi SAPR [Tools for Enterprise CAD-System Development]. *SAPR i grafika* [CAD and Graphics], 2001, no. 8. Available at: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7725&iid=314> (accessed 27.07.2016).