УДК 658.512.22:004.896

ОТОБРАЖЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОЕКТИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ В ДЕРЕВЕ ПОСТРОЕНИЯ ЕГО 3D-МОДЕЛИ

© 2017 А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков

Ульяновский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 23.03.2017

В работе рассматривается подход к достижению наибольшей информативности электронной 3D-модели на этапе конструкторского проектирования, заключающийся в отображении деревом ее построения информации о функциональной структуре проектируемого изделия. Такой подход основан на биекции между деревом построения 3D-модели и набором функциональных элементов, составляющих структуру изделия, несущих фиксированный и строго заданный смысл в рассматриваемой предметной области.

Ключевые слова: *CAx-технологии, 3D-модель, проектирование, CSG, макет, CAD-система, конструирование, CAПР, структурно-функциональная декомпозиция*

Непрекращающееся развитие САх-систем упрочнило положение 3D-моделей в жизненном цикле изделия (ЖЦИ) [1, 2], прежде всего, на стадии опытно-конструкторских работ (ОКР) [3], вследствие чего последние являются отображением изделия как в процессе его изготовления – при моделировании в САМ-системах, принципах функционирования, что обеспечивается функционалом САЕсистем, так и собственно конструкции, формируемой в САD-системах. Очевидно, что для этапа конструкторского (технического) проектирования важнейшей проектной информацией является именно конструкция изделия, отображаемая современными САD-системами следующим образом:

$$CAD$$
: Констр.(Изд.) \rightarrow Мод. $^{3D}_{II_{3D}}$, (1)

где $Mo\partial_{M_{3O}}^{3D}$, Koнстр.(Изд.) – 3D-модель изделия и его конструкция соответственно.

Непосредственно сама 3D-модель является лишь *«следствием»* выполнения базовых операций *(БО)* САD-системы [4], иерархически упорядоченных в т.н. *«дереве построения»* 3D-модели [5] – линейной последовательностью взаимосвязанных БО, тогда:

$$CAD: \bigcup_{i=1}^{n} FO_{i} \to Mo\partial^{3D}_{\mathcal{H}_{3\partial}},$$
 (2)

где символ конъюнкции означает последовательность выполнения БО, формируя проектный маршрут – упорядоченный набор БО, формирующий 3D-модель изделия.

Информативность 3D-модели заключается в отображении ею требуемых для текущего этапа ЖЦИ проектных данных об изделии [6]. Отображение его конструкции – основной функционал CAD-системы: проектное решение в виде 3D-модели обладает

Похилько Александр Федорович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика». E-mail: paf_54@mail.ru

Цыганков Денис Эдуардович, аспирант. E-mail: d.tsyg@mail.ru

законченностью конструкции, т.е. $Mo\partial_{\mathcal{H}_{30}}^{3D} = Koncmp.(\mathcal{H}_{30}.)$. При этом, проектные данные об изделии, отображаемые 3D-моделью, содержится именно в базовых операциях [2 ,4], составляющих его структуру – дерево построения 3D-модели:

$$\mathcal{L}ep^{3D}_{H_{3\partial}}: Koнcmp.(Изд.) \to \bigcup_{i=1}^{n} EO_{i}.$$
(3)

где $\mathcal{L}ep._{\mathit{Hid}.}^{\mathit{3D}}$ – дерево построения электронной 3D-модели проектируемого изделия.

Наибольшая информативность трехмерной модели обеспечивается отображением функциональной структуры изделия, такая 3D-модель уже в полной мере является компонентой **цифрового макета** изделия [7]. Национальный стандарт Российской Федерации [8] определяет **функциональную структуру** как «структуру, состоящую из элементов, описывающих функции — функциональных элементов (ФЭ), и связей между ними, не содержащую подробностей их реализации (обычно представляющуюся отображающим иерархию функций графом)». К ФЭ, подходящим под данное выше определение, согласно [9] относятся:

- *Рабочие элементы (РЭ)*, непосредственно выполняющие регламентированные функции изделия;
- *Базовые элементы (БЭ)*, обеспечивающие координацию изделия относительно других изделий в процессе сопряжения;
- Соединительные элементы (СЭ), служащие для материальной связи рабочих и базовых элементов друг с другом;
- Технологические элементы (ТЭ), служащие для реализации технологического процесса изготовления изделия и его последующей сборки.

Одни и те же ФЭ могут играть роль как РЭ, так и БЭ и СЭ; наиболее благоприятный вариант – это объединение в конструкции РЭ и БЭ при минимизации СЭ [9]. В качестве примера (рис. 1) рассматривается гайка накидная из состава коаксиального соединителя (вилки) типа IV по ГОСТ 20265-83 и ГОСТ РВ 51914-2002, обеспечивающая резьбовое соединение с ответной частью (розеткой) [10].

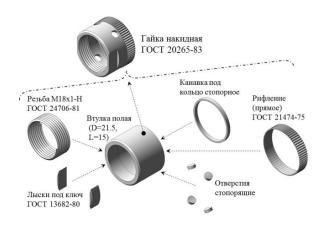


Рис. 1. Структурно-функциональный анализ (СФА) проектируемого изделия

Каждый ФЭ имеет однозначно верно воспринимаемую семантическую наполненность (резьба. рифление и др.), актуальную в предметной области изделия - соединителя коаксиального [11], а также проектируемого финального изделия уровня «Сборочная единица», куда входит рассматриваемая деталь [12]. На основе физического смысла выделяются атрибуты ФЭ [13], качественно и количественно определяющие его итоговый геометрический 3Dобраз [14] (диаметр отверстий, количество лысок, тип рифления и др.). Значения данных атрибутов являются характеристикой конкретного экземпляра ФЭ. С учётом структурно-функциональной декомпозиции (СФД) изделия на ФЭ, проводимой в процессе СФА, и состава структуры 3D-модели из набора БО в соответствии с формулой (2), отображение дерева построения вида $\{EO_i\}_n \to \{\Phi \ni_i\}_m$ в CADсистеме может быть реализовано двумя, на первый взгляд, сходными методами:

Метод сюръективного отображения. Данный метод основан на объектно-ориентированном упорядочивании (но не объединении) БО САОсистемы в дереве построения 3D-модели [15]. Согласно ему, требуемое отображение может быть достигнуто вполне очевидным образом, представленным на рис. 2 и формулой (4):

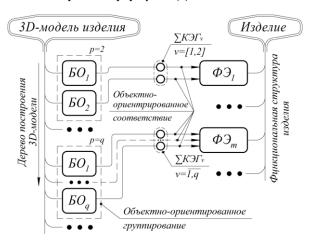


Рис. 2. Сюръективное отображение структуры проектируемого изделия

$$\mathcal{A}ep._{Mso.}^{3D} = \{ EO_i \middle| \bigcup_{j=1}^p EO_j \to \Phi \mathcal{F}_k \},$$

$$npu \ i = \overline{i,n}, \ k = \overline{I,m}, \ p \ge k ,$$

$$(4)$$

т.е. каждый $\Phi \ni$ строится упорядоченным набором $\{ EO_k \}$, $npu \ k = [1...n]$, предоставляя соответствующие проектные параметры для определения его геометрического 3D-образа [15], то есть, является, по своей сути шаблоном [16]. При этом конкретный состав и количество БО выбирается инженером.

Достоинство такого описания процесса построения 3D-модели заключается в максимально возможно подробной (в рамках функционала САДсистемы) визуализации информации о структуре проектного решения, четко и понятно воспринимаемой, а также в удобстве редактирования и модификации. То есть, при изменении СФЭ, модификация его 3D-образа будет осуществляться внесением изменений в соответствующие БО (уровня как 2D и как 3D). Недостатком является высокая сложность процесса построения 3D-модели, в том числе и ее параметризация и обеспечение ассоциативности, а кроме того, необходимость в познании устройства проектируемого изделия (этой информацией конструктора владеют не всегда, в отличие от расчетчиков и схемотехников). Очевидно, что такое построение 3D-модели затруднительно как в плане затрачиваемых трудовых и временных ресурсов, так и в плане высокой интеллектуальной нагрузки на пользователя, поэтому на практике чаще применяется другой подход.

Метод минимума проектных действий. Его суть заключается в быстрейшем и, соответственно, легчайшем процессе построения 3D-модели в плане минимального числа БО САD-системы [17]. Отображение структуры проектируемого изделия 3D-моделью в соответствии с данным методом имеет вид, представленным на рис. 3 и формулой (5):

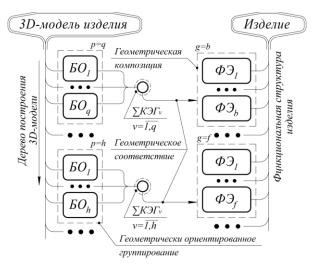


Рис. 3. Отображение структуры проектируемого изделия по методу минимума проектных действия

$$\mathcal{A}ep._{H_{30}}^{3D} = \{ EO_i \middle| \bigcup_{j=1}^p EO_j \to \sum_{k=0}^m \Phi \mathcal{I}_k \},$$

$$npu \ i = \overline{1,n}, \ p \le m , \tag{5}$$

т.е. набор $\{ EO_i \}$, npu~i=[1...n] может отображать какой-либо фиксированный набор $\{ \Phi \mathcal{P}_k \}$, npu~k=[0...m] или же их частей (npu~k=0), **без четкого соответствия** вида $EO_i \to \Phi \mathcal{P}_K$. Такой вариант удобнее для инженеров, т.к. требует минимума проектных действий — количества EO0 и дает возможность построить требуемую геометрию выбранным на свое усмотрение способом, оперируя знакомыми методами построения трехмерных тел.

<u>Достоинства</u> такого описания 3D-модели – это, прежде всего, легкость построения результирующего 3D-образа с низкой интеллектуальной нагрузкой на пользователя, временными и трудовыми затратами, а также более легкая параметризация. <u>Недостатками</u> являются как отсутствие отображения изначально заложенной информационносмысловой наполненности проектного решения (в плане его структуры), так и трудность внесения изменений с сохранением корректности структуры проектного решения. При таком подходе крайне затруднительно повторное использование проектных данных.

Сравнивая и анализируя представленные выше методы, становится очевидным, что оптимален синтез их ключевых преимуществ, а именно:

- 1. Фиксация и отображение подробной информации о структуре проектируемого изделия, актуальной в его предметной области, в рамках 3D-модели;
- 2. Легкость и удобство процесса построения 3D-модели в CAD-системе, обеспечивающего простоту процессов редактирования и модифицирования.

Реализация указанного набора признаков предлагается в следующем методе:

Метод структурного соответствия. Этот метод является, по своей сути, биективным отображением структуры проектируемого изделия (набора ФЭ) деревом построения 3D-модели, что представлено на рис. 4 и формулой (6):

$$\mathcal{L}ep._{H_3\partial.}^{3D} = \{M\kappa\Phi_i \mid M\kappa\Phi_g \to \Phi \mathcal{F}_g \}, g = \overline{I,n}, \tag{6}$$

где n – количество $\Phi \ni$ в проектируемом изделии, $M \kappa \Phi$ – семантическая макрофункция построения 3D-образа соответствующего $\Phi \ni$ изделия, определяемая как:

$$M\kappa\Phi_i = \bigcup_{j=1}^m EO_j, \tag{7}$$

т.е. $M\kappa\Phi$ – это последовательность упорядоченно выполняющихся БО, формирующих на основе операций САD-системы результирующий 3D-образ Φ 9.

Основная идея метода структурного соответствия заключается в *информационно-смысловом* обобщении базовых операций CAD-системы в

соответствии с формулой (7) до уровня семантической макрофункции (Mк Φ) построения 3D-образа Φ Э [18], с четким смысловым соответствием Mк $\Phi \to \Phi$ Э. Функциональная структура изделия Cmp.(U3 Φ .) и дерево построения 3D-модели D4E9. Как множества, являются равномощными, т.е.

$$\left| Cmp.(U3\partial.) \right| = \left| \mathcal{A}ep._{U3\partial}^{3D} \right|. \tag{8}$$

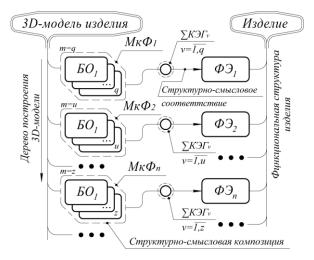


Рис. 4. Биективное отображение структуры изделия в дереве построения 3D-модели

Выводы: достоинства метода сюръективного отображения реализованы в четком и строгом соответствии между $M \kappa \Phi$ и Φ 3, а достоинства метода минимума проектных действий отражены в оперировании непосредственно параметрами макрофункций, набор которых определяется функциональной структурой изделия.

Исследование проводится в рамках гранта № 16-47-732138 «Разработка моделей, методов и средств информационной поддержки технологий Concurrent Engineering на основе интегрированного представления процесса в интеллектуальной базе знаний САПР», поддержанного Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Ахтулов, А.Л. Задачи геометрического моделирования в создании систем автоматизации конструирования обводообразующих поверхностей сложных объектов / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2011. № 22. С. 43-47.
- Tsygankov, D. et al. The Design Process Structural & Logical Representation in the Concurrent Engineering Infocommunication Environment / D. Tsygankov et al. // Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems Proceedings of the 22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering, July 20-23, 2015, IOS Press, Amsterdam, 2015. P. 595-602.
- Антипин, А.В. Интеграция сапр при конструировании электронной аппаратуры / А.В. Антипин, Е.Е. Носкова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1. №9. С. 192.

- Цыганков, Д.Э. Представление процесса проектирования на базе обобщения элементарных операций до уровня семантических единиц / Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько // Автоматизация процессов управления. 2015. № 3 (41). С. 81-88.
- Hamilton, P. Азбука технологий моделирования в МСАD-системах. Ч. III. Как технологии МСАD влияют на процесс разработки изделия // CAD/CAM/CAE Observer. 2008. №2. С. 34-36.
- Вичугова, А.А. Формальная модель структуры взаимосвязей разнотипных объектов проектирования / А.А. Вичугова, В.Н. Вичугов, Г.П. Цапко // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. №5. С. 164-169.
- Лихачев, М.В. Применение технологии функционального цифрового макета изделия на этапе предконтрактного проектирования космического аппарата / М.В. Лихачев, Е.А. Шангина // Решетневские чтения. 2013. Т. 1, №17. С. 24-26.
- ГОСТ Р 53394-2009. Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. 24 с.
- Латыев, С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2007. 579 с.
- ГОСТ 20265-83. Соединители радиочастотные коаксиальные. Присоединительные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1984. 14 с.
- Калашников, А.В. Наиболее распространенные коаксиальные радиочастотные соединители [Электронный ресурс] – URL: http://hamradio.online.ru/ftp2/hfvhf.pdf (дата обращения 13.03.2017 г.).
- Толкачева, Е.В. Автоматизация синтеза технологических решений и их документирования на основе

- извлечения инженерных знаний / *Е.В. Толкачева, И.И. Семенова* // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, №4. С. 76-80.
- Цыганков, Д.Э. Выделение структурно-функциональных элементов электронной цифровой модели изделия / Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: мат-лы Междун. науч.-техн. конф. «INTERMATIC-2016» – М.: Галлея-Принт, 2016. Ч.4. – С. 118-120.
- Цыганков, Д.Э. Представление проектируемого изделия системой структурно-функциональных элементов / Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ. С. 250-252.
- 14. Евгенев, Г.Б. Метод генерации 3D-моделей в продукционных базах знаний / Г.Б. Евгенев, А.А. Кокорев, М.В. Пиримяшкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. №4 (661). С. 38-48.
- Калинцев, В.И. Применение шаблонов Knowledge based Engineering в САПР САТІА V5 для моделирования сотовых панелей / В.И. Калинцев, М.В. Лихачев // Решетневские чтения. 2015. Т. 2, №19. С. 220-222.
- Кидрук, М.И. Компас-3D V10 на 100%. М.: Питер, 2009. 500 с.
- Tsygankov, D. The Design Process Data Representation Based on Semantic Features Generalization / D. Tsygankov et al. // Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries – Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, October 3-7, 2016, IOS Press, Amsterdam, 2016. P. 127-132.

THE DESIGNED PRODUCT FUNCTIONAL STRUCTURE REPRESENTATION IN THE ITS 3D-MODEL CREATION TREE

© 2017 A.F. Pokhilko, D.E. Tsygankov

Ulyanovsk State Technical University

This paper deals with the approach to the electronic 3D-models most informative achieving on the construction engineering stage. This approach is information about the designed product functional structure representation in the 3D-model creation tree. This approach is based on a bijection between the 3D-model creation tree and the functional elements set. These functional elements make up the designed product structure and carry a fixed and strictly specified meaning in the product subject area.

Key words: CAx technologies, projecting, CSG, model, CAD-system, designing, SAPR, structural-functioning decomposition

Alexander Pokhilko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department "Applied Mathematics and Informatics". E-mail: paf_54@mail.ru
Denis Tsygankov, Post-graduate Student. E-mail: d.tsyg@mail.ru