

# Системная модель инженерных знаний в области автоматизированного проектирования

А. А. Горячев<sup>1</sup>, Н. Е. Новакова<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>avgoryachev@gmail.com, <sup>2</sup>nenovakova@gmail.com

**Аннотация.** Выполнена систематизация инженерных знаний в области автоматизированного проектирования. Предложена и теоретически обоснована методика системного анализа процесса автоматизированного проектирования. Приведена классификация типовых операционных компонентов процесса на различных иерархических уровнях.

**Ключевые слова:** знания; автоматизированное проектирование; таксономия; представление знаний

## I. ВВЕДЕНИЕ

Особенность современного этапа развития автоматизированного проектирования (АП) определяется такими факторами, как усложнение проектируемых объектов, стремительное развитие информационных технологий и изменение условий (организации) проектирования. Для эффективной разработки систем проектирования необходимо разработать системную модель процесса автоматизированного проектирования.

В настоящее время понятие «система» в науке до конца не определено. В многочисленной литературе по системному анализу и системотехнике [1] отмечаются следующие основные свойства сложных систем: целостность и членимость, наличие существенных устойчивых связей (отношений) между элементами, организация, структура, интегративные качества, функциональность [1]. Сложные системы как объект моделирования имеют следующие характерные особенности: уникальность, слабая структурированность, разнородность подсистем и элементов, составляющих систему, изменчивость во времени, случайность и неопределенность факторов, действующих в системе, многокритериальность оценок процессов, протекающих в системе. Для решения системотехнических задач наибольший интерес представляют системные модели с достаточно высоким уровнем абстрагирования, позволяющие описывать широкий спектр систем. Основу технического объекта составляют инженерные знания в определенной предметной области, определяемой, прежде всего, особенностями объекта проектирования (ОП). Инженерные знания  $K$  – это система абстрактных понятий профессионального содержания, порождающих семиотические структуры, которые позволяют однозначно описать, распознать и дифференцировать реальные объекты предметной области и их свойства.

## II. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Модель предметной области автоматизированного проектирования (АП) должна содержать описание

проектируемого изделия, ресурсов и процесса проектирования. Определим знания предметной области АП технических и информационных объектов как четверку  $K = \langle G, Re, P, R \rangle$ , где  $G$  – множество объектов проектируемого изделия;  $Re$  – множество реализаций отношений между объектами множества  $G$ ;  $P$  – множество действий, которые можно выполнять с элементами множеств  $G$  и  $Re$  для решения задач проектирования;  $R$  – ресурсы, необходимые для выполнения проектирования. В модели должны учитываться функциональный, информационный, структурный и поведенческий (процессный) аспекты [2].

Знания любой предметной области имеют две составляющие: декларативную и процедурную (табл. 1). Для декларативного представления знаний используются таксономия понятий предметной области и языки описаний. Процедурные знания можно разделить на операционные и управляющие. К операционным знаниям относятся методы, процессы и процедуры, а к управляющим – стратегии, способы реализации стратегий и условия выбора проектных процедур. В качестве функционально замкнутой единицы декларативных знаний предметной области автоматизированного проектирования выделены понятия и отношения предметной области, свойства объектов, проектные описания и проектные ситуации. В совокупности они образуют единую систему абстрактных понятий, взаимосвязанных между собой. Проводя общую систематизацию знаний, можно выделить следующие уровни процедурных и декларативных компонентов знаний, различающихся степенью их общности: метазнания  $K_m$ , знания об автоматизированном проектировании  $K_a$  и знания о проектной ситуации  $K_s$ .

ТАБЛИЦА I. Декларативные и процедурные знания

К	Декларативные		Процедурные	
	Таксономи- ческие	Описатель- ные	Операцион- ные	Управляю- щие
$K_m$	$S_i$	$O_i$	$M$	$\Psi$
$K_a$	$S_a$	$O_a$	$P$	$U$
$K_s$	$S_s$	$O_s$	$\omega$	$\psi$

В таблице использованы следующие обозначения:  $S_i$  – структура понятий окружающего мира;  $S_a$  – структура понятий автоматизированного проектирования;  $S_s$  – структура понятий проектной ситуации;  $O_i$  – описание окружающего мира;  $O_a$  – описание области автоматизированного проектирования;  $O_s$  – описание проектной ситуации;  $M$  – методы;  $P$  – процессы;  $\omega$  – процедуры;  $\Psi$  – стратегии;  $U$  – способы реализации стратегий;  $\psi$  – условия выбора процедуры (тактики).

Метазнания или знания общего назначения справедливы в любых областях человеческой деятельности и характеризуют универсальные понятия и методы решения задач. Знания второго уровня – это собственно профессиональные знания об автоматизированном проектировании, представленные в базе знаний. Знания нижнего уровня представляют информацию о текущей проектной ситуации, включающую понятия, отношения и процедуры, с которыми разработчик имеет дело непосредственно в процессе проектирования, и являются конкретным выражением знаний второго уровня.

Декларативные знания метауровня – это метаонтология окружающего мира. Метаонтология оперирует общими понятиями и отношениями, которые не зависят от предметной области. Концептами этого уровня являются такие понятия, как «объект», «свойство», «значение». В этом случае на верхнем уровне получается интенциональное описание свойств предметной онтологии и онтологии задач. *Предметная онтология* содержит понятия, описывающие конкретную предметную область, отношения, семантически значимые именно для этой предметной области, и множество интерпретаций этих понятий и отношений (декларативных и процедурных). Основу предметной онтологии в САПР составляют знания об АП. *Онтология задач* в качестве понятий содержит типы решаемых задач, а отношения этой онтологии, как правило, определяют декомпозицию задач на подзадачи. Декларативные знания о проектной ситуации – это онтология задач в области автоматизированного проектирования.

### III. ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ЗНАНИЙ

Под формальной моделью онтологий  $\Omega$  будем понимать упорядоченную тройку вида:  $\Omega = \langle C, R, F \rangle$ , где  $C$  – конечное непустое множество концептов предметной области, которую представляет онтология;  $R$  – конечное множество отношений между концептами заданной предметной области;  $F$  – конечное множество функций интерпретации (аксиоматизация), заданных на концептах и/или отношениях онтологии. Важным аспектом создания модели предметной области является формирование таксономии понятий. Таксономия – частный случай онтологии, а именно  $\Omega = T = \langle C, \{R^T\}, \{ \} \rangle$ , где  $R^T$  – теоретико-множественные отношения. Таксономия используется для смыслового разделения лексики предметной области. В таксономии различают свойства и их значения. Свойства указывают точки смыслового дробления лексики, а их значения определяют области, получаемые в результате такого дробления. Формально таксономия свойств, как алгебраическая система, – это четверка  $T = \langle D, Z, R_1, R_2 \rangle$ , где  $D$  – множество свойств,  $Z$  – множество их значений,  $R_1$  – отношение на  $D \times Z$ ,  $R_2$  – отношение на  $Z \times D$ . Отношения  $R_1$  и  $R_2$  имеют следующие характеристики:

$$1. \quad \forall d_i \in D \exists z_i \in Z:$$

$\forall z \in Z_i \rightarrow (d_i R_1, z) \in R_1 \equiv d_i R_1 z \wedge |Z| > 1$ , то есть отношение  $R_1$  определяет принадлежность значений из множества  $Z$  конкретным свойствам множества  $D$ .

2.  $\forall z \in Z \exists! d \in D: d R_1 z$ . В соответствии с этим утверждением во множестве  $D$  не существует значений,

несвязанных с отношением  $R_1$  ни с одним свойством, и каждое значение связано только с одним свойством.

3.  $\exists! d_0 \in D \rightarrow \neg z \in Z: z R_2 d_0$ . Это означает, что множество  $D$  имеет единственный корневой элемент, несвязанный ни с одним значением отношением  $R_2$ .

4. Всякое некорневое свойство связано отношением  $R_2$  с единственным элементом из  $Z: \forall d \neq d_0 \in D \exists! z \in Z: z R_2 d$

5. Любая пара (свойство, значение) не может находиться одновременно в отношении  $R_1$  и  $R_2$ :  
 $\forall d, z: (d, z) \in R_1 \rightarrow (z, d) \notin R_2$  и  
 $\forall z, d: (z, d) \in R_2 \rightarrow (d, z) \notin R_1$ .

Кроме таксономических отношений при описании модели предметной области используется широкий спектр других семантических отношений. К базовым типам семантических отношений относятся: характеристические, каузальные, инструментальные, квантифицирующие, временные, пространственные, арифметические, логические, теоретико-множественные и многие другие. Указанные типы отношений в трактовке теории четких отношений могут быть использованы при качественном анализе взаимосвязей между элементами определяемой системы объектов, свойств, процессов и состояний, когда взаимосвязи носят дихотомический характер. Этому недостатка лишены методы анализа данных, основанные на теории нечетких отношений, которые позволяют проводить качественный анализ систем с учетом различия в силе связей между объектами системы.

Из теоремы Заде [3] следует, что основные типы обычных отношений и их свойства могут быть обобщены и на случай нечетких отношений. Кроме того, основные типы нечетких отношений могут быть представлены как иерархия обычных отношений такого же типа, что позволяет получить сразу целый ансамбль необходимых обычных отношений и, таким образом, учитывать неоднозначность решений, присущих практическим проектным ситуациям.

Одно из важнейших свойств нечетких отношений заключается в том, что они могут быть представлены в виде совокупности обычных отношений, причем эти отношения могут быть упорядочены по включению, представляя их иерархическую совокупность. Разложение нечетких отношений на совокупность обыкновенных отношений основано на понятии  $\alpha$ -уровня нечеткого отношения  $Re$  между элементами множества. Так называется обычное отношение  $Re_\alpha$ , определяемое для всех  $\alpha > 0$  следующим образом:  $Re_\alpha = \{(x, y) \in X \times Y \mid Re(x, y) \geq \alpha\}$ .  $\alpha$ -уровни нечеткого отношения удовлетворяют соотношению из  $\alpha \leq \beta$  следует  $Re_\alpha \supseteq Re_\beta$  и представляют совокупность вложенных друг в друга отношений.

Нечеткое отношение  $Re$  обладает свойствами рефлексивности, слабой рефлексивности, антирефлексивности, асимметричности, полной транзитивности тогда и только тогда, когда соответствующими свойствами обладают все  $Re_\alpha$ .

Из теоремы следует, что любой  $\alpha$ -уровень нечеткого отношения эквивалентности является важным свойством транзитивного отношения сходства:  $S: S(X, Z) \geq S(X, H) \wedge S(Y, Z)$ . Это выражение является

обобщением обычного отношения эквивалентности и, следовательно, определяется разбиение множества объектов на непересекающиеся классы эквивалентности. Из вложенности  $\alpha$ -уровней нечеткого отношения следует и вложенность разбиений множества  $X$ , соответствующих различным  $\alpha$ -уровням причем с уменьшением  $\alpha$  происходит укрупнение классов эквивалентности  $\alpha$ -уровней. Таким образом, нечеткое отношение эквивалентности задает иерархическую совокупность разбиений множества  $X$  на непересекающиеся классы эквивалентности. Отсюда нетрудно установить связь, существующую между нечеткими отношениями эквивалентности и иерархическими процедурами кластеризации. Рассмотренные абстрактные понятия и отношения между ними являются семантической основой для детализации иерархических структур декларативных и процедурных компонентов знаний (табл. 1). Важнейшей категорией в структуре декларативных знаний является категория свойств объектов. При этом нас должны интересовать не только структурные аспекты объекта, но и его качество. Качество ОП есть фиксируемая определенность этого объекта, которая не отделима от факта его существования. Качество непосредственно выступает как бесконечное многообразие свойств рассматриваемого объекта. Поэтому попытки определить качество как полную совокупность свойств уводят в бесконечность. В силу сказанного, чисто качественная характеристика объекта не вскрывает ни сущности, ни причин, ни внутренних противоположностей в структуре объекта. Здесь фиксируется и выражается в понятиях и отношениях между ними лишь границы, различия, сходства и другие характеристики. В практике САПР применяются разные способы формирования понятийной основы и оценки свойств проектируемых объектов. Обычно они базируются на методах распознавания образов – статистических, кластерного анализа и других, основу которых составляет «класс объектов». Известен ряд подходов на основе построения математических моделей критерия качества. При этом многие свойства объектов объективны по своей природе, т. е. для них существуют общепризнанные шкалы оценок, например, длина, масса и т. п. В то же время часть свойств несет субъективный характер, например, регулярность, равномерность.

Содержательный аспект оценки свойств в конечном итоге сводится к организации модели объекта в виде совокупности проектных описаний. Независимо от формы их физического представления и целей практического применения, проектные описания предназначены для выбора состава и композиции свойств и нахождения их значений, образующих пространственно-временные границы и структуры объекта. Проектное описание объекта  $o_i \in O, i = \overline{1, n}$  представляет собой логическую комбинацию  $L$  элементов конечного множества его свойств:  $Q = \{qki\}$ .  $O_i = L(qki)$ , где  $k$  – уровень декомпозиции свойств объекта  $i$   $O_i = L(q_k^i)$ . Именно проектное описание несет структурные, параметрические, функциональные и поведенческие характеристики объекта в виде значений его свойств. В ОП для каждого класса объектов существует априорно заданное пространство свойств, которое в общем случае должно обеспечивать:

- возможность отображения характерных и существенных логических отношений между значениями отдельных свойств;
- достаточность условий различия с помощью определенных правил распознавания объектов описания;
- различимость классов проектных ситуаций в заданном пространстве свойств;
- возможность сопоставления обобщенных описаний ситуаций между собой.

Информация, представленная значениями свойств объекта в проектных описаниях, формирует проектные ситуации  $S$  как качественную категорию.

Топологическое пространство  $N$  нормально тогда и только тогда, когда оно удовлетворяет следующим требованиям: для каждой пары взаимно несвязанных, замкнутых подмножеств  $\alpha \in N, \beta \in N$  существует непрерывная функция  $f: N \rightarrow [0,1]$  такая, что

1.  $f(x) = 0$  для  $\forall x \in \alpha$  и  $f(x) = 1$  для  $\forall x \in \beta$ .
2.  $\forall x \in N 0 \leq f(x) \leq 1$ .

Учитывая это свойство, можно утверждать следующее: реальные знания, т. е. знания, имеющие физические ограничения на емкость памяти и операционную скорость, есть нормальное пространство.

В нормальном пространстве два описания  $O1$  и  $O2$ , включающие идентичные множества свойств  $Q$ , будут эквивалентны только тогда, когда установлено отношение эквивалентности между парами значений каждого свойства  $q_i \in O$ . В противном случае, на основании свойства существования непрерывного отображения можно утверждать, что между двумя ее эквивалентными наборами  $n$  значений свойств  $z_1$  и  $z_2$  проектных описаний  $O1$  и  $O2$  всегда существует некоторое расстояние  $d$  в заданной метрике  $(d, Q)$ , т. е.  $d(Z_1, Z_2) = |f(Z_1)| - |f(Z_2)|$ .

На этом основании можно сформулировать базовое правило идентификации и дифференциации объектов проектирования и проектных ситуаций. Два проектных описания объекта различаются в заданной метрике пространства свойств  $(d, Q)$  тогда и только тогда, когда не выполняется условие эквивалентности значений хотя бы по одному свойству  $q \in Q$ .

Использование понятий проектного описания и класса объектов проектирования позволяет сформулировать ряд важных практических результатов при построении формальной системы понятий предметной области:

1. Конкретизация описаний объектов заданного класса  $X$   $Q_x = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ . Выделим в множестве  $Q_x$  свойство  $q_k$ , по которому необходимо конкретизировать заданное описание  $Q_x = \{q_k^1, Q_x^1\}$ ,  $Q_x^1 = Q_x \setminus q_k^1$ . В результате отображения свойства  $q_k$  в множество его значений  $\phi^1: q_k^1 \rightarrow Z^1$ ,  $Z^1 = \{z_i^1(q_k^1)\}, i = \overline{1, n_1}$ , где  $n_1$  – возможное количество значений, т. е. квантифицируемых уровней  $q_k^1$ . Получаем множество

конкретизированных описаний  $Q_x(q_k^1)$  класса  $X$  по свойству  $q_k^1$ . Здесь  $Q_x^1$  является обобщенным описанием каждого из полученных классов объекта.

Выделяя последовательно в  $Q_x^j$  очередное конкретизирующее свойство  $q_k^j$  и осуществляя отображение  $\phi^j: q_{k_j} \rightarrow Z^j_j, Z^j = \{z_i^j(q_k^j)\}, i = \overline{1, n_j}$ , где  $n_j$  – количество уровней квантификации значений  $q_k^j$ , получим  $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_j$  конкретизированных описаний класса объектов  $X$  по свойствам  $q_k^1, q_k^2, \dots, q_k^j$ .

## 2. Идентификация объектов.

Пусть задано описание  $Q_n(q_k^1, \dots, q_k^n)$  объекта  $X_i$ , который необходимо идентифицировать с одним из существующих классов объектов проектирования  $X_\alpha$ , характеризуемого описанием  $Q_\alpha(q_k^1, \dots, q_k^m)$ . Основываясь на базовом правиле идентификации, можно утверждать, что объект  $X_i$  относится к классу объектов  $X_\alpha$  в том и только в том случае, если совпадают  $n$  первых элементов кортежей классовообразующих свойств описаний проектируемых объектов.

Дифференциация объектов, задаваемых проектными описаниями, основана на близости между ними в  $n$ -мерном пространстве свойств, имеющих конкретные значения. Оценочные параметры пространства свойств  $q_k \in Q$  представляются тремя основными разновидностями: метрическими, лингвистическими и бессистемными.

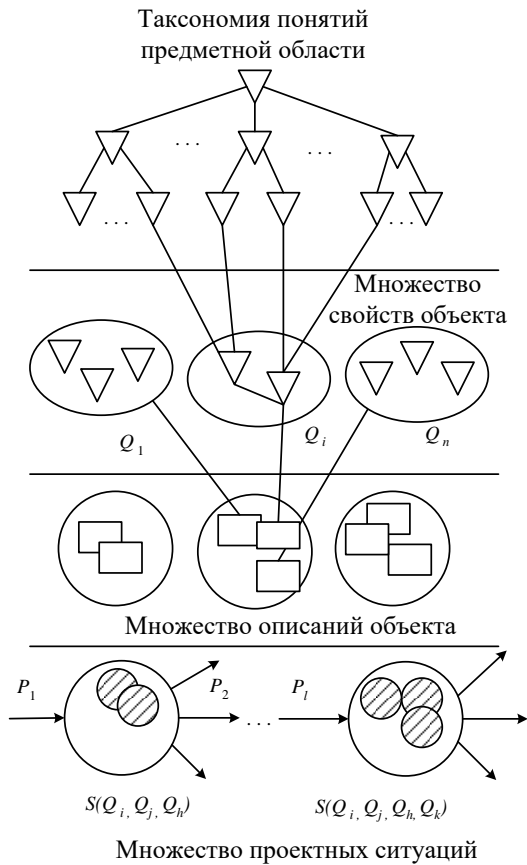


Рис. 1. Модель представления знаний

Метрические параметры позволяют дать количественную оценку тому или иному значению, а также проводить полное количественное сравнение различных значений свойств между собой, основанное на измеримой базовой переменной. В этой трактовке множество  $S$  проектных ситуаций отображается в  $n$ -мерном пространстве свойств  $Q$ . Связывая с каждой парой элементов из  $Q$  некоторое вещественное неотрицательное число  $d$ , можно определить расстояние или метрику  $Q$ , если для  $\forall x, y, z \in Q$  оно удовлетворяет следующим свойствам:

$d(x, y) = 0$  тогда, когда  $x = y$  – аксиома идентичности,

$d(x, y) = d(y, x)$  – аксиома симметрии,

$\forall x, y, z \in Q: \exists d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$  – аксиома треугольника.

Характеризация метрического пространства свойств может быть выполнена, например, с использованием евклидовой метрики  $d(x, y) = \{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2\}^{1/2}$  или хэмминговой метрики  $d(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$ , для которых свойства  $a, b$  и  $c$  очевидны.

б) Лингвистические, которые могут иметь качественный характер, но при этом упорядочены друг относительно друга, образуя ранговую или порядковую шкалу с неизмеримой ординатой базовой переменной.

в) Бессистемные, т.е. не наделенные никакой структурой, а составляющие их значения имеют вид качественных описаний, никак не связанных между собой.

Мерой близости  $\mu_{xy}$  объектов  $x$  и  $y$  называется такая величина, которая удовлетворяет следующим аксиомам:

$\mu_{xy}$  непрерывна;  $\mu_{xy} = \mu_{yx}$ ;  $\mu_{xy} \in [0, 1]$ ,  $\mu_{xy} = 1$ ,

следовательно  $x = y$ . Наиболее распространенными

являются меры близости Хэмминга  $\eta_{xy}^H = P_{xy}/r$  и Рао

$\mu_{xy}^P = P_{xy}'/r$ , где  $P_{xy}$  – число совпадающих значений

свойств, а  $P_{xy}'$  – число совпадающих свойств.

Основываясь на приведенных выше теоретических положениях, базирующихся на физических законах, логике и опыте АП можно сделать практические выводы и заключения по организации декларативных знаний.

В качестве функционально замкнутых единиц декларативных знаний предметной области автоматизированного проектирования выделены (рис. 1) понятия и отношения предметной области, свойства объектов, проектные описания и проектные ситуации.

В совокупности они образуют единую систему абстрактных понятий, взаимосвязанных между собой. Онтология обеспечивает необходимые и достаточные условия для манипулирования знаниями в целях описания, сравнения и композиции ресурсных, процедурных и информационных компонентов САПР и управления знаниями в проектной деятельности.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной идеей приведенных в данной статье теоретического обобщения и характеристики процесса проектирования с системных позиций является выявление свойств и способов структуризации инженерных знаний, обоснование, разработка и исследование обобщенной модели процесса автоматизированного проектирования, предназначенной для объективного представления исходного описания новых системных решений. Модель является основой рабочих имитационных программ для исследования процесса проектирования [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горячев А. В., Новакова Н. Е. Модели и методы принятия проектных решений в распределённых САПР. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019.
- [2] Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
- [3] Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.