

УДК 621.833.061

DOI 10.22213/2410-9304-2017-3-22-33

О. В. Малина, доктор технических наук  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ОБЗОР МЕТОДОВ СИНТЕЗА МОДЕЛИ КЛАССА СПИРОИДНЫХ РЕДУКТОРОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ САПР. ЧАСТЬ 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ СИНТЕЗА ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ

*Необходимым условием создания интеллектуальной системы автоматизации конструкторской деятельности, позволяющей не только выполнять графические работы, отдельные инженерные расчеты или документирование, является создание обобщенной модели класса конструируемых объектов, сохраняющей конструкторский опыт в виде отдельных технических решений конструкций изделий, их узлов, сборок, подсборок и деталей.*

*Чем сложнее объект, тем больше возможных модификаций его конструкции может быть реализовано. Использование в качестве базового алгоритма функционирования системы автоматизированного конструирования алгоритма комбинаторного перебора требует формирования исходного множества конструктивных элементов и особенностей их исполнения, на котором будет осуществлен перебор.*

*Формирование указанного множества может быть реализовано различными методами, отличающимися по уровню наглядности, защищенности от ошибок, избыточности. Базовым, безусловно, является графовый метод, описанный в первой части статьи, на котором исходно был разработан алгоритм построения классификатора класса спироидных редукторов. Сложность формализации данного метода натолкнула автора на его модификацию. Так были разработаны табличный, графово-табличный и матричный методы построения модели класса спироидных редукторов.*

*Особенность первого метода состоит в том, что иерархическая структура конструкции объекта представляется двумерной таблицей, с помощью которой обобщение информации идет корректнее, поскольку очевиднее выделение необязательных компонентов конструкции. Графово-табличный метод является симбиозом графового и табличного метода, сохраняет наглядность структур и обеспечивает корректность описания функциональных элементов. В силу сочетания наглядности и простоты реализации графово-табличный метод максимально исключает потерю информации. Матричный метод особенно актуален, когда структура исходных конструкций более сложная, поскольку данный метод позволяет корректно обработать необязательные вершины групповой принадлежности и фантомы.*

**Ключевые слова:** методы построения обобщенной модели: табличный, графово-табличный, матричный; необязательные вершины групповой принадлежности, фантомы.

### Введение

Создание обобщенной модели класса объектов является необходимым условием разработки системы автоматизированного проектирования и конструирования, функционирование которой реализовано посредством выбора корректных вариантов конструкций из множества, полученного путем комбинаторного перебора на множестве данных об исходном классе объектов.

Множество данных об исходном классе формируется в классификаторе, представляющем собой набор классификационных признаков, описывающих редукторы и их возможные значения. Получение исходного множества признаков выполняется путем обобщения данных об отдельных конструктивных решениях. Рассмотрим методы реализации указанного обобщения.

### Табличный метод построения обобщенной модели

Табличный метод позволяет обобщить характеристики функциональных вершин, описанных в декомпозициях экземпляров объектов. Обобщенная модель в данном случае представлена в табличном виде, куда заносятся все вершины обобщенной графовой модели и связанные с ними характеристики. Причем полный набор характеристик каждой вершины «собирается» в результате знаний об обобщении этой вершины в графовой модели и обобщения наборов характеристик всех декомпозиций [1, 2].

Результирующая таблица может быть получена в ходе выполнения следующих действий:

1. Формируется множество уникальных функциональных вершин класса объектов путем объединения множеств функциональных вершин отдельных вариантов конструкций (декомпозиций).

2. Каждая вершина множества рассматривается отдельно, предварительно будучи добавленной в множество уникальных функциональных вершин, а затем в множестве осуществляется поиск всех копий этой вершины, возможно имевшихся в других декомпозициях, согласно метке сопоставимости, наименованию или функциональному назначению; далее найденная вершина и вершина, по которой осуществлялся поиск, помечаются как рассмотренные в рамках данного анализа.

3. Каждой строке таблицы сопоставляется номер-идентификатор и наименование функциональной вершины множества, а каждому столбцу таблицы сопоставляется

декомпозиция объекта в виде его номера-идентификатора.

4. В каждой ячейке таблицы фиксируется номер-идентификатор и значение характеристики, соответствующие варианту конструкции (декомпозиции) и рассматриваемой функциональной вершине. Номер-идентификатор характеристики представлен строкой вида «X.Y.Z», где X – номер-идентификатор функциональной вершины; Y – номер-идентификатор варианта конструкции (декомпозиции); Z – номер группы альтернативных (сопоставляемых) характеристик. Выбор альтернативных характеристик производится путем сравнения категорий.

5. В случае отсутствия для вершины X какого-либо из графов Y характеристики группы Z под номером «X.Y.Z» должно быть записано значение NULL.

Конкретное значение признака выбирается аналогично правилам построения графовой обобщенной модели.

Рассмотрим реализацию табличного метода на ранее предложенном примере (табл. 1).

В результате обработки полученной таблицы получим следующий набор признаков (табл. 2).

Множество признаков, сформированных табличным методом. Сравнительный анализ показывает, что в результате использования табличного метода из множества признаков исключены 7, 10, 14 и 15-й признаки.

Исчезновение 14-го признака благоприятно сказывается на обобщенной модели: потери данных не произошло. Исчезновение 7-го, 10-го и 15-го признаков усложняет процесс исследования обязательности вершин.

Таблица 1. Сводная таблица описания вариантов исполнения спироидных редукторов (фрагмент)

№	Функциональная вершина		1-й граф		2-й граф		3-й граф
1	Редуктор	1.1.1	Передаточное отношение – 40	1.2.1	Передаточное отношение – 60	1.3.1	Передаточное отношение – 65
		1.1.2	Габаритный размер – 100	1.2.2	Габаритный размер – 150	1.3.2	Габаритный размер – 150
2	Узел колеса	2.1.1		2.2.1		2.3.1	
3	Опора 1 узла колеса	3.1.1	Количество подшипников – 2	3.2.1	Количество подшипников – 2	3.3.1	Количество подшипников – 2
4	Подшипник 1 опоры 1	4.1.1	Вид подшипников – N	4.2.1	Вид подшипников – В	4.3.1	Вид подшипника – N
5	Подшипник 2 опоры 1	5.1.1	Вид подшипников – М	5.2.1	Вид подшипников – С	5.3.1	Вид подшипников – С
6	Опора 2 узла колеса	6.1.1	Количество подшипников – 1	6.2.1	Количество подшипников – 1	6.3.1	Количество подшипников – 1
7	Подшипник 1 опоры 2	7.1.1		7.2.1		7.3.1	
8	Опора 3 узла колеса		NILL	8.2.1	Количество подшипников – 1		NILL
9	Подшипник 1 опоры 3			9.2.1			
10	Сборка вала с колесом	10.1.1	Способ сборки – не указан	10.2.1	Способ сборки – в натяг	10.3.1	Способ сборки – в натяг
11	Вал	11.1.1	L	11.2.1	L	11.3.1	L
12	Шпонка	12.1.1					
13	Колесо	13.1.1	Вид колеса – цельное	13.2.1	Вид колеса – цельное	13.3.1	Вид колеса – сборное
14	Колесо в сборе					14.3.1	
15	Винты					15.3.1	
16	Венец	16.1.1		16.2.1		16.3.1	
17	Ступица	17.1.1	Диаметр – D1	17.2.1	Диаметр – D2	17.3.1	Диаметр – D3

Таблица 2

Функциональная вершина	Признак		Значения	
Редуктор	Передаточное отношение	p1	60	a11
			40	a12
			65	a13
			Иное	...
	Габаритный размер	p2	100	a21
			150	a22
Иное			...	
Опора 1	Количество подшипников	p3	2	a31
			Иное	...
Подшипник 1	Вид подшипника	p4	N	a41
			B	a42
			Иное	...
Подшипник 2	Вид подшипника	p5	M	a51
			C	a52
			Иное	...
Опора 2	Количество подшипников	p6	1	a61
			Иное	...
Опора3	Количество подшипников	p8	1	a81
			Иное	...
			NILL	a82
Сборка вала с колесом	Способ соединения вала с колесом	p9	внатяг	a91
			шпонкой	a92
			Иное	...
Вал узла колеса	Длина	p11	L	a111
			Иное	a112
Колесо	Вид колеса	p12	Цельное	a121
			Сборное	a122
Ступица колеса	Диаметр	p13	D1	a131
			D2	a132

### **Графово-табличный метод построения обобщенной модели**

При анализе графового и табличного методов в сравнении становятся явными их достоинства и недостатки. Графовый метод осложняется необходимостью анализа и учета причастности каждой вершины обобщенной модели к каждой отдельно взятой декомпозиции для выявления необязательности вершины и расстановки метки Nill. Табличный метод позволяет легко выявлять необходимость расстановки меток необязательности Nill, но с ее помощью тяжело отслеживать иерархические связи между элементами обобщенного графа для формирования признака «наличие обязательной вершины».

С учетом достоинств и недостатков обоих методов был разработан гибридный графово-табличный метод построения обобщенной модели [3, 4]. Применение графа в рамках метода обусловлено наглядностью представления структуры объекта с учетом всех иерархических связей между его вершинами, выявление компоненты связности, обязательной составляющей графа, вершин, альтернативных друг другу. Табличный метод удобен для обработки характеристик объектов и выявления необходимости расстановки метки необязательности Nill, характер которой уточняется с помощью графа. Табличный метод не требует анализа присутствия функциональной вершины в каждой рассматриваемой декомпозиции.

Алгоритм построения обобщенной модели с помощью графово-табличного метода приведен ниже.

Объединяем графы отдельных вариантов исполнений, получая при этом граф, имеющий все вершины и все связи исходных графов.

Удаляем из полученного графа все вершины, соответствующие характеристикам и, соответственно, связи к этим вершинам.

Проверяем каждую вершину на присутствие во всех исходных графах. Если вершина не присутствует во всех исходных графах, то у материнской вершины формируем признак (вершину ИЛИ) с формулировкой «наличие дочерней вершины» и два значения «да» и «нет», а саму дочернюю вершину помечаем атрибутом «необязательная – А». Если материнских вершин несколько – признак «наличие...» характеризуется у каждой материнской вершины. Также поступаем, если вершина, присутствующая во всех исходных графах, признается экспертом необязательной.

Для каждой вершины строится своя таблица согласно табличному принципу формирования модели.

Указанный подход позволяет не потерять признаки «наличие», то есть упрощает процесс наследования необязательности, и упрощает формирование иных признаков из-за простоты табличного сопоставления.

### **Матричный метод построения обобщенной модели**

Графово-табличный метод позволяет построить обобщенную модель класса объектов, однако является достаточно громоздким с точки зрения процесса обобщения: графы нуждаются в визуальном сопоставлении и при больших количествах декомпозиций требуют значительных усилий при обобщении. Табличный метод также достаточно громоздок и без связки с графом невизуален.

Предложенный матричный подход существенно упрощает процесс обобщения декомпозиций в единую модель, выявление псевдообязательной, необязательной компонент обобщенного графа и расстановку меток необязательности NILL [5].

Для описания каждого отдельного экземпляра класса объекта используется матрица

смежности – «прямоугольная матрица, каждая строка которой соответствует соседнему узлу сети, а каждый столбец – приписанному к нему ресурсу. Запись, расположенная на пересечении столбца и строки, указывает тип доступа к ресурсу, обеспечиваемому данным узлом». В нашем случае строка соответствует материнской вершине, столбец – дочерней, а на пересечении указывается коэффициент «1», т. е. наличие связи между ними.

Для формирования матриц воспользуемся ранее рассмотренным примером, в котором уже были выявлены и пронумерованы все функциональные вершины (табл. 3).

На основании полученных матриц (рис. 1–3) строится итоговая матрица (рис. 4) путем наложения исходных матриц.

Таблица 3. Перечень функциональных вершин

№ вершин	Функциональная вершина
1	Редуктор
2	Узел колеса
3	Опора 1 узла колеса
4	Подшипник 1 опоры 1
5	Подшипник 2 опоры 1
6	Опора 2 узла колеса
7	Подшипник 1 опоры 2
8	Опора 3 узла колеса
9	Подшипник 1 опоры 3
10	Сборка вала с колесом
11	Вал
12	Шпонка
13	Колесо
14	Колесо в сборе
15	Винты
16	Венец
17	Ступица
18	Узел червяка
19	Узел колеса

№ вершин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		1																1	1
2			1			1				1									
3				1	1														
4																			
5																			
6							1												
7																			
8																			
9																			
10											1	1	1						
11																			
12																			
13																1	1		
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
Сумма	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1

Рис. 1. Матрица смежности графа 1-го варианта

№ вершин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		1																1	1
2			1			1		1		1									
3				1	1														
4																			
5																			
6							1												
7																			
8									1										
9																			
10											1		1						
11																			
12																			
13																1	1		
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
Сумма	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1

Рис. 2. Матрица смежности графа 2-го варианта

№ вершин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		1																1	1
2			1			1				1									
3				1	1														
4																			
5																			
6							1												
7																			
8																			
9																			
10											1		1						
11																			
12																			
13														1					
14															1	1	1		
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
Сумма	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 3. Матрица смежности графа 3-го варианта

№ вершин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		3																3	3
2			3			3		1		3									
3				3	3														
4																			
5																			
6							3												
7																			
8									1										
9																			
10											3	1	3						
11																			
12																			
13														1		2	2		
14															1	1	1		
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
Сумма	0	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3	1	3	1	1	3	3	3	3

Рис. 4. Сводная матрица

Результат суммирования столбцов позволяет сделать вывод о необязательности части вершин: вершины, сумма соответствующих столбцов у которых менее количества

исходных вариантов, является необязательными.

Таким образом, сформированы следующие признаки (табл. 5).

Таблица 5. Множество признаков, сформированных матричным методом

Функциональная вершина	Признак		Значения	
Редуктор	Передаточное отношение	р1	60	a11
			40	a12
			65	a13
			Иное	...
	Габаритный размер	р2	100	a21
			150	a22
Иное			...	
Опора 1	Количество подшипников	р3	2	a31
			Иное	...
Подшипник 1	Вид подшипника	р4	N	a41
			B	a42
			Иное	...
Подшипник 2	Вид подшипника	р5	M	a51
			C	a52
			Иное	...
Опора 2	Количество подшипников	р6	1	a61
			Иное	...

Окончание табл. 5

Функциональная вершина	Признак		Значения	
Узел колеса	Наличие 3-й опоры	p7	Да	a71
			Нет	a72
Опора3	Количество подшипников	p8	1	a81
			Иное	...
			NILL	a82
	Наличие подшипника	p16	Есть	a161
			Нет	a162
Сборка вала с колесом	Способ соединения вала с колесом	p9	в натяг	a91
			Шпонкой	a92
			Иное	...
	Наличие шпонки	p10	Есть	a101
			Нет	a102
Вал узла колеса	Длина	p11	L	a111
			Иное	a112
Колесо	Вид колеса	p12	Цельное	a121
			Сборное	a122
Ступица колеса	Диаметр	p13	D1	a131
			D2	a132
			NILL	a133
			Иное	...
Ступица колеса в сборе	Диаметр	p14	D3	a141
			NILL	a142
			Иное	...

Принадлежность признаков «наличие» определяется материнской вершиной, в строке которой стоит отличное от 0 значение у соответствующей необязательной вершины.

Матричный способ формирования обобщенной модели в виде множества признаков является самым простым и наглядным.

Исследование данного подхода позволило исследовать нестандартные ситуации. Рассмотрим некоторые из них.

### Необязательные вершины групповой принадлежности

В рассмотренном нами примере в обобщенной модели присутствуют функциональные вершины двойной принадлежности.

Это вершины 16 – венец и 17 – ступица. О двойном подчинении свидетельствуют непустые строки матрицы в соответствующих столбцах.

О необязательности вершины групповой принадлежности свидетельствует наличие нескольких заполненных строк в столбце, суммарное значение которого менее количества исходных вариантов технических решений, попавших в анализ.

### Фантомы

Фантомы – это вершина модели, описывающей единичное техническое решение, имеющая две родительские вершины.

Причиной возникновения фантома является особенность иерархического разложения, когда одна и та же вершина более низкого уровня является компонентом двух разных модулей более высокого уровня.

Так, в двухступенчатом редукторе вал колеса первой ступени фактически является валом червяка второй ступени (рис. 5).

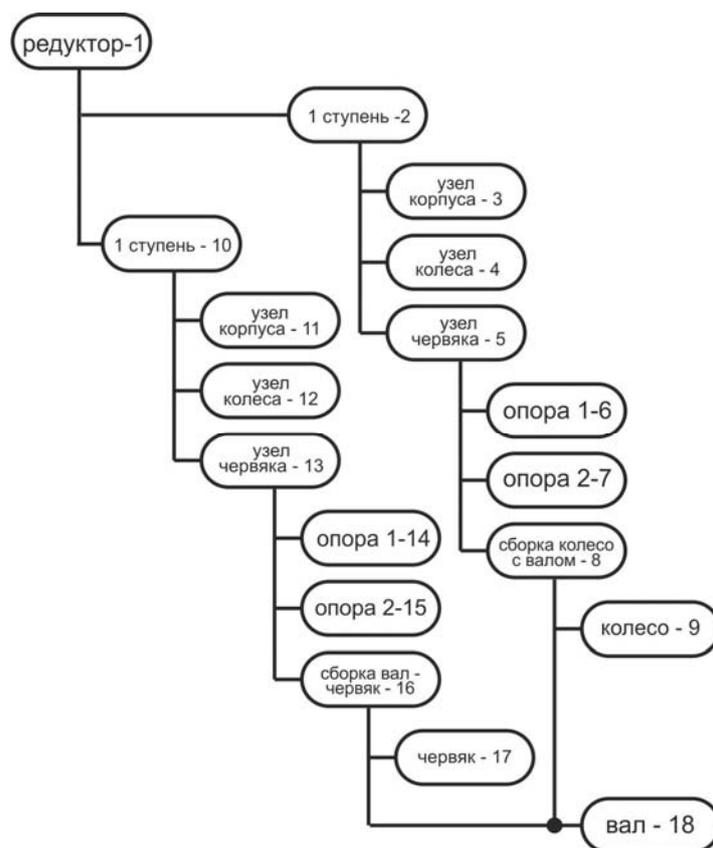


Рис. 5. Графовая модель варианта, содержащего потенциальный фантом

В матрице смежности варианта фантом видно сразу – суммарное значение его столбца более единицы (рис. 6).

Наличие фантомов в исходном варианте, участвующем в синтезе обобщенной модели, модифицирует алгоритм определения необязательных элементов.

№ вершин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1		1								1								
2			1	1	1													
3																		
4																		
5						1	1	1										
6																		
7																		
8									1									1
9																		
10											1	1	1					
11																		
12																		
13													1	1	1			
14																		
15																		
16																	1	1
17																		
18																		
Сумма	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

Рис. 6. Исходная матрица варианта, содержащего потенциальный фантом

После распознавания фантома по матрице и до объединения этой матрицы с другими матрицами в целях синтеза обобщенной модели исходная матрица модифицируется.

Значения единиц в столбце, соответствующем фантому, заменяются на другие положительные значения, отличные от нуля, так, чтобы их сумма была равна единице (рис. 7).

Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1		1								1								
2			1	1	1													
3																		
4																		
5						1	1	1										
6																		
7																		
8									1									0,5
9																		
10											1	1	1					
11																		
12																		
13														1	1	1		
14																		
15																		
16																	1	0,5
17																		
18																		
Sum	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 7. Итоговая матрица варианта, содержащего потенциальный фантом

### Заключение

Рассмотренные проблемы формирования обобщенной модели и методы их преодоления позволяют говорить о формализации этапа подготовки информационного обеспечения системы структурного синтеза сложных объектов.

### Библиографические ссылки

1. Малина О. В., Уржумов Н. А. Математическое и программное обеспечение подсистемы синтеза модели класса объектов // Информационная математика. – 2004. – № 1 (4). – С. 175–185. – ISBN 5-271-03-944-7.
2. Малина О. В., Уржумов Н. А. Принципы организации и этапы функционирования модуля построения классификатора спироидных редукторов // Теория и практика зубчатых передач : тр. Междунар. конф. – Ижевск, 2004. – С. 316–322.
3. Подходы к организации экспертного опроса подсистемы формирования классификатора

системы структурного синтеза конечных объектов, построенных на дискретных структурах / О. В. Малина, О. Ф. Валеев, С. А. Морозов, А. В. Холмогоров // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 1 (53). – С. 126–129.

4. Малина О. В., Зарифуллина Э. Г., Валеев О. Ф. Подход к построению классификатора объектов машиностроения как основы информационного обеспечения САПР // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула : Тульский государственный университет. – 2013. – № 6-1. – С. 220–229. – ISSN: 2071-6168.

5. Зарифуллина Э. Г., Малина О. В. Матричный подход к формированию обобщенной модели класса конструируемых объектов // Инновации в науке и технологиях : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. – Ижевск : Удмуртский университет, 2014. – С. 62–64.

\*\*\*

O. V. Malina, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

**Review of Methods for Synthesis of the Model of Class of Spiroid Gearboxes for Intelligent CAD Systems.  
Part 2. Development of Methodology for Synthesis of the Generalized Model**

*The necessary condition for development of the intelligent system of computer-aided designing activity allowing not only to implement graphic works, individual engineering analysis or documenting, is the development of the generalized model of the class of designed objects keeping the designer's experience as individual technical solutions of layouts for the products, their units, assemblies, sub-assemblies and parts. The more complex the object is, the greater number of possible modifications of its layout can be implemented. Application of the algorithm of combinatorial search as the basic algorithm of functioning of the CAD system requires generation of the initial set of design elements and features of their application to implement the search. Generation of the pointed set can be implemented by various methods differing by the level of demonstration visibility, protection from errors, and redundancy. The graph method described in the first part of the paper is certainly the basic one, for which the algorithm of developing the classifier of the class of spiroid gearboxes was initially created. Complexity of formalization of this method stimulated the author to modify it. Therefore, the table, graph-and-table, matrix methods of developing the model of the class of spiroid gearboxes were created. The feature of the first method is that the hierarchic structure of the layout of the object is represented as a two-dimensional table according to which the generalization of information becomes more correct, since singling of non-obligatory components of the layout becomes more evident. The graph-and-table method is a symbiosis of the graph and table methods; it keeps the demonstrative feature of structures and provides for the correct description of functional elements. Due to combination of its demonstrative features and simplicity of implementation, the graph and table method eliminates the loss of information to the most. The matrix method is especially urgent when the structure of initial layouts is more complex, since this method allows for correct processing the non-obligatory apexes of group belonging and phantoms.*

**Keywords:** Methods for construction of the generalized model: table, graph-and-table, matrix; non-obligatory apexes of group belonging, phantoms.

Получено: 19.04.2017