



Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений

© 2023, В.А. Семенова ✉, С.В. Смирнов

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

Аннотация

Исследуется потенциал и демонстрируется эффективность применения некоторых моделей и методов онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений. В качестве рабочей методологии структурного проектирования рассматривается морфологический анализ и синтез компоновочных схем артефактов. Строится теоретико-множественная модель морфологического пространства решений для классической версии методологии, включающая функционально-структурные подсистемы проектируемого артефакта, варианты реализации этих подсистем и собственно потенциальные технические решения. Впервые в отличие от существующих версий такой формализации детально описываются отношения между сущностями предметной области морфологического анализа. Несовместимость вариантов реализации отдельно взятой функционально-структурной подсистемы проектируемого артефакта и ограниченную сочетаемость вариантов реализации различных функционально-структурных подсистем предлагается описывать в рамках единой модели, известной в онтологическом инжиниринге как «ограничения существования». Анализ одной из закономерностей, присущей этой модели, позволил строго обосновать распространенный в структурном проектировании подход к описанию ограниченной сочетаемости вариантов реализации различных функционально-структурных подсистем в форме запретов. Показываются преимущества использования ограничений существования для описания пространства решений, и строится «скелет» формальной онтологии предметной области морфологического анализа. Структурный синтез технического решения сопоставляется с методом семантической идентификации объекта, разработанным в рамках онтологического анализа данных для обработки неполной и противоречивой эмпирической информации о результатах измерения свойств объекта. Делается вывод о пригодности этого метода для решения задачи структурного синтеза при уточнении понятия «нормального» подмножества свойств и сведений об издержках и/или выгодах включения каждого отдельно взятого варианта реализации функционально-структурных подсистем проектируемого артефакта.

Ключевые слова: онтологический анализ данных, семантическая идентификация объекта, анализ и синтез технических решений, морфологическое пространство, ограничения существования, комбинаторная оптимизация.

Цитирование: Семенова В.А., Смирнов С.В. Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений // Онтология проектирования. 2023. Т. 13, №4(50). С. 531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, код научной темы FMRW-2022-0030.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Онтологический анализ данных (ОАД; см., в частности, [1]) – ветвь инженерии знаний, формирующая научные основы одной из технологий искусственного интеллекта, направленных на обобщение объектно-признаковых данных (о фундаментальной роли таких данных см. в [2, 3]) об интересующей субъекта предметной области (ПрО) с целью получения их сжатого, но содержащего полезную информацию представления.

Важное место в ОАД занимает задача *семантической идентификации объекта* ПрО [4, 5], состоящая в получении однозначных оценок истинности – **True** или **False** – суждений вида «объекту g присуще свойство t » на основе неполных и противоречивых эмпирических данных, а также учета априорных *ограничений существования* [6, 7], сужающих комбинаторное множество возможных наборов свойств идентифицируемого объекта. Опыт показывает, что эта задача имеет самостоятельный интерес. Например, в [8] модели и методы ОАД, предложенные для решения этой задачи, использованы для поддержки формирования когнитивных карт при их коллективной разработке. В данной статье указанные модели получают применение и развитие для *структурного анализа и синтеза технических решений*.

1 Базовая модель методологии структурного анализа и синтеза технических решений

В часто цитируемой статье [9] отмечается, что большая часть работ по теории автоматизированного проектирования посвящена вопросам параметрического синтеза и геометрического моделирования технических систем, а структурному синтезу технических решений (ТР) уделяется несопоставимо меньшее внимание. Вместе с тем, нельзя сказать, что соответствующий этап проектирования, задачей которого является построение некоторой упрощенной функционально-структурной модели будущего артефакта, формирование его *облика* (*компоновочной схемы, эскиза* и т.п.), с позиций инженерии знаний «слабоструктурирован» или «слабодокументирован» [10]. Напротив, эти действия признаются актуальными для инженерного творчества в целом, и существует апробированный формализованный подход для их поддержки – *морфологический анализ и синтез* ТР.

Разъяснению, развитию и применению морфологического анализа и синтеза ТР посвящена обширная литература, и пионером подхода единодушно признается Ф. Цвикки [11]. Известными советскими протагонистами этой методологии стали В.М. Одрин [12], А.Д. Закревский [13], А.И. Половинкин [14]; позднее она в многочисленных публикациях А.В. и О.И. Андрейчиковых получила расширенную интерпретацию как специальный способ принятия решений в различных ПрО [15, 16].

В сжатом изложении *морфологический анализ* области, где предстоит выбрать решение, состоит в формировании таблицы, описывающей «*морфологическое пространство*» [17] выбора ТР как множество дискретных точек, каждая из которых определяет комбинацию *трансверсаль* [18] *вариантов реализаций* (ВР) каждой из функций (шире – *функциональных подсистем, функционально-структурных подсистем* – далее ФСП) проектируемого артефакта. А *морфологический синтез* ТР сводится к выполнению некоторой *процедуры рационального выбора* определённой точки морфологического пространства (рисунок 1).

Можно предложить следующее формальное описание морфологического пространства:

- множество ФСП $W = \{w_i\}_{i=1, \dots, n}$, где $n \geq 1$;
- множество ВР ФСП V такое, что $V = \cup_{i=1, \dots, n} V_i$, $V_i = \{v_{ij}\}_{j=1, 2, \dots, k_i}$, $k_i \geq 1$, и $\forall i, j, i \neq j$:
 $V_i \cap V_j = \emptyset$ (пример подхода к моделированию морфологического пространства, когда $\exists i, j, i = j: V_i \cap V_j \neq \emptyset$, есть в [17]);
- множество потенциальных ТР (т.е. множество точек-трансверселей морфологического пространства) T , у которого $|T| = \prod_{i=1, 2, \dots, n} k_i$;
- бинарное отношение *взаимобусловленности*, которое полно на множестве W – МС: $W \times W \rightarrow \mathbf{True}$. В морфологическом анализе и синтезе обычно это отношение явно не фиксируется, но фактически предполагается, что ТР существует тогда и только тогда, когда реализованы все ФСП проектируемого артефакта. Взаимобусловленность ин-

дуцируется бинарным отношением *обусловленности* C [7] – здесь оно является полным $C: W \times W \rightarrow \mathbf{True}$, – и объект любой природы самообусловлен, точнее, формально «взаимообусловлен» (в рисунках далее это не отмечается);

- бинарное отношение *несовместимости* (попарной несовместимости) $E: V \times V \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, – которое здесь конфигурируется так, что

$$\forall i \forall x \in V_i: E(x) = V_i \setminus \{x\}. \tag{1}$$

Именно такая несовместимость ВР каждой отдельно взятой ФСП характерна для классической версии морфологического анализа и синтеза ТР;

- бинарное отношение «*является вариантом реализации*» $R: V \times W \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, – характерная особенность которого состоит в том, что $\forall i \forall x \in V_i: R(x) = w_i$ (т.е. R – отношение между каждым ВР некоторой ФСП и этой ФСП);
- бинарное отношение «*ТР включает ВР ФСП*» $S: T \times V \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, – причем $\forall x \in T, \forall i: (|S(x)| = n) \wedge (|S(x) \cap V_i|) = 1$.



Рисунок 1 – Табличное описание морфологического пространства решений

Пример, представленный таблицей 1, упрощенно определяет возможные компоновки холодильной машины¹. Строка «Испаритель» свидетельствует о потенциальной полезности введения *многоуровневого описания* морфологического пространства: на нулевом (базовом) уровне (морфологической таблице холодильного устройства) в строке «Испаритель» можно оставить варианты его формы; на первом уровне описать одномерное в данном случае морфологическое пространство материалов, пригодных для изготовления испарителя.

Таблица 1 – Морфологическое пространство компоновок холодильной машины

Функциональная подсистема	Возможные способы реализации подсистемы					
1. <i>Хладагент</i>	1.1 Аммиак	1.2 Пропан	1.3 Пропилен	1.4 Изобутан	1.5 Тетрафторэтан	
2. <i>Компрессор</i>	2.1 Поршневой	2.2 Ротационный	2.3 Центробежный	2.4 Тепловой (абсорбер)		
3. <i>Конденсатор</i>	3.1 Жидкостного испарения		3.2 Воздушного испарения	3.3 Испарительного охлаждения		
4. <i>Дроссель</i>	4.1 Капиллярная трубка	4.2 Автоматический клапан	4.3 Терморегулируемый вентиль		4.4 Электронно-управляемый вентиль	
5. <i>Испаритель</i>	5.1 Трубчатый медный	5.2 Трубчатый стальной	5.3 Пластинчатый медный	5.4 Пластинчатый стальной	5.5 Ребристый медный	5.6 Ребристый стальной

Развитие морфологического анализа, осуществляющее идею многоуровневых морфологических описаний, достигается путём введения бинарного отношения между множеством

¹ https://eti.su/articles/over/over_1534.html; <https://studfile.net/preview/5125548/page:11/>

ВР ФСП, описанным на уровне q , и множеством ФСП на уровне $q + 1$, $q \geq 0$. Это отношение «содержит подсистему» $P: V^{(q)} \times W^{(q+1)} \rightarrow \{\text{True, False}\}$, которое отличается тем, что $\forall x, y \in V^{(q)}: P(x) \neq P(y)$, и $\forall x \in W^{(q+1)}: |P(x)| = 1$. В совокупности с ранее введёнными формализмами получаем представление морфологического пространства в виде широко известной математической модели И/ИЛИ-дерева (графа) [14, 19, 20]. Подобная модель для холодильной машины приведена на рисунке 2 с явной графической нотацией всех определенных выше элементов морфологического анализа (но без представления точек-трансверсали).

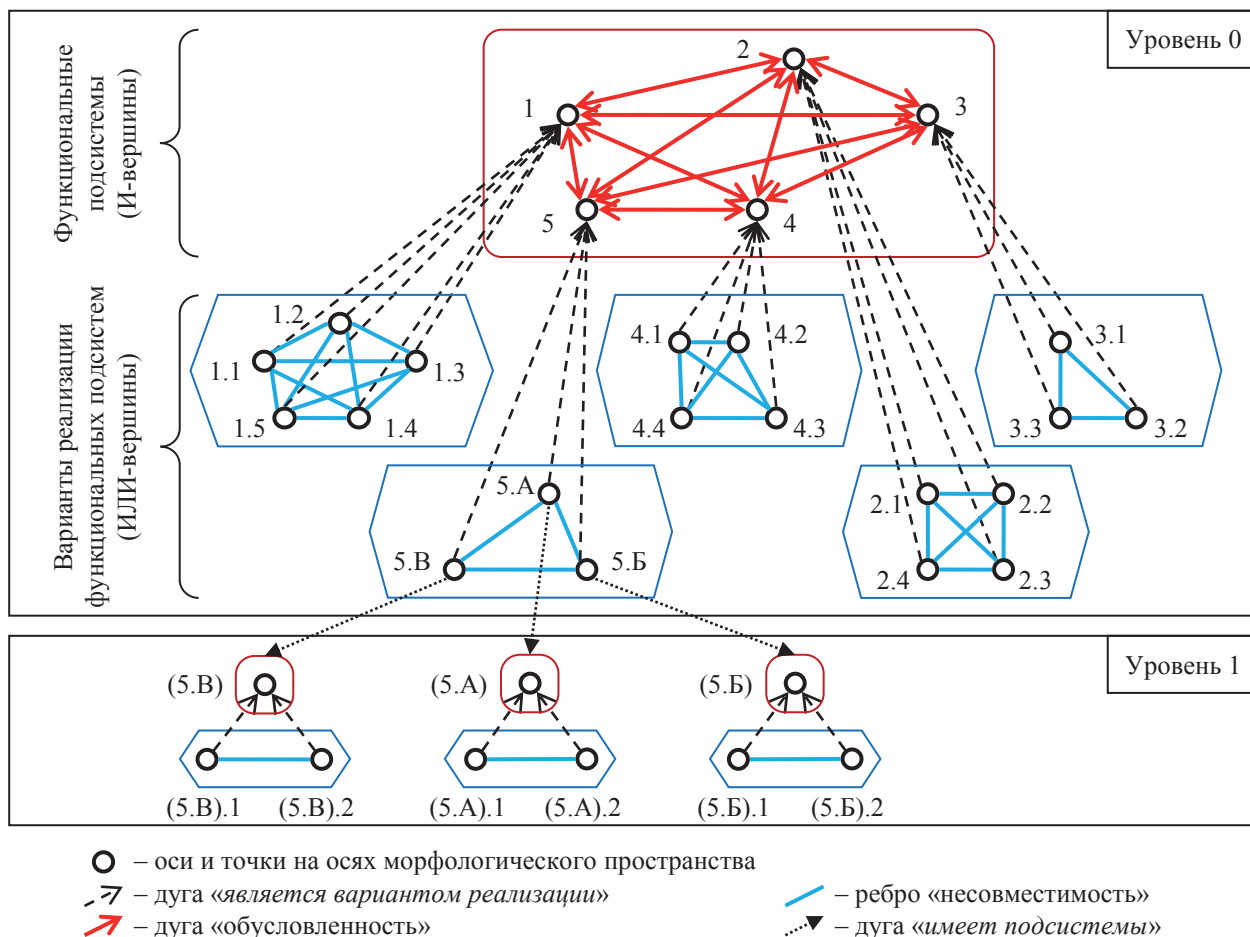


Рисунок 2 – Многоуровневая морфологическая модель холодильной машины в форме И/ИЛИ графа с детализацией отношений между элементами морфологического пространства (см. таблицу 1; здесь: 5.А , 5.Б ,5.В – соответственно трубчатая, пластинчатая и ребристая конструкции испарителя; (5.*) – материал, пригодный для изготовления испарителя «*»; (5.*).1 – медь; (5.*).2 – сталь)

2 Ограничения существования вариантов реализации функционально-структурных подсистем технического решения

2.1 Ограниченная сочетаемость вариантов реализации различных функционально-структурных подсистем

Обычно на ВР ФСП накладываются различные – физические, технические, технологические, гуманитарные и др. – ограничения. В морфологическом плане они могут выражаться в том, что некоторые точки-трансверсали морфологического пространства определяют ТР, которые в разных смыслах нежизненны, утопичны или, например, охраняются авторскими пра-

вами. Подобные обстоятельства в большинстве практических случаев могут быть интерпретированы как *ограниченная сочетаемость ВР различных ФСП в одном ТР*, которая проявляется либо как предусловие, либо как постусловие выбора ВР одной ФСП – $x \in V_i$, – на выбор ВР другой ФСП – $y \in V_j, j \neq i$ [9]:

- *принуждение*, когда выбор x влечет, *обуславливает* выбор y , т.е. $C(x, y)$;
- *необходимость*, когда условием выбора x служит выбор y , т.е. выбор x обусловлен выбором y , что означает $C(y, x)$;
- *запрет на сочетание*, когда x и y не могут входить в одно ТР, т.е. x и y несовместимы – $E(x, y)$;
- *двойное принуждение*, когда x и y могут входить в ТР лишь одновременно, т.е. x и y взаимнообусловлены – $C(x, y) \wedge C(y, x) = MC(x, y)$.

Рисунки 3а и 3б демонстрируют две версии описания ограниченной сочетаемости ВР ФСП холодильной машины.

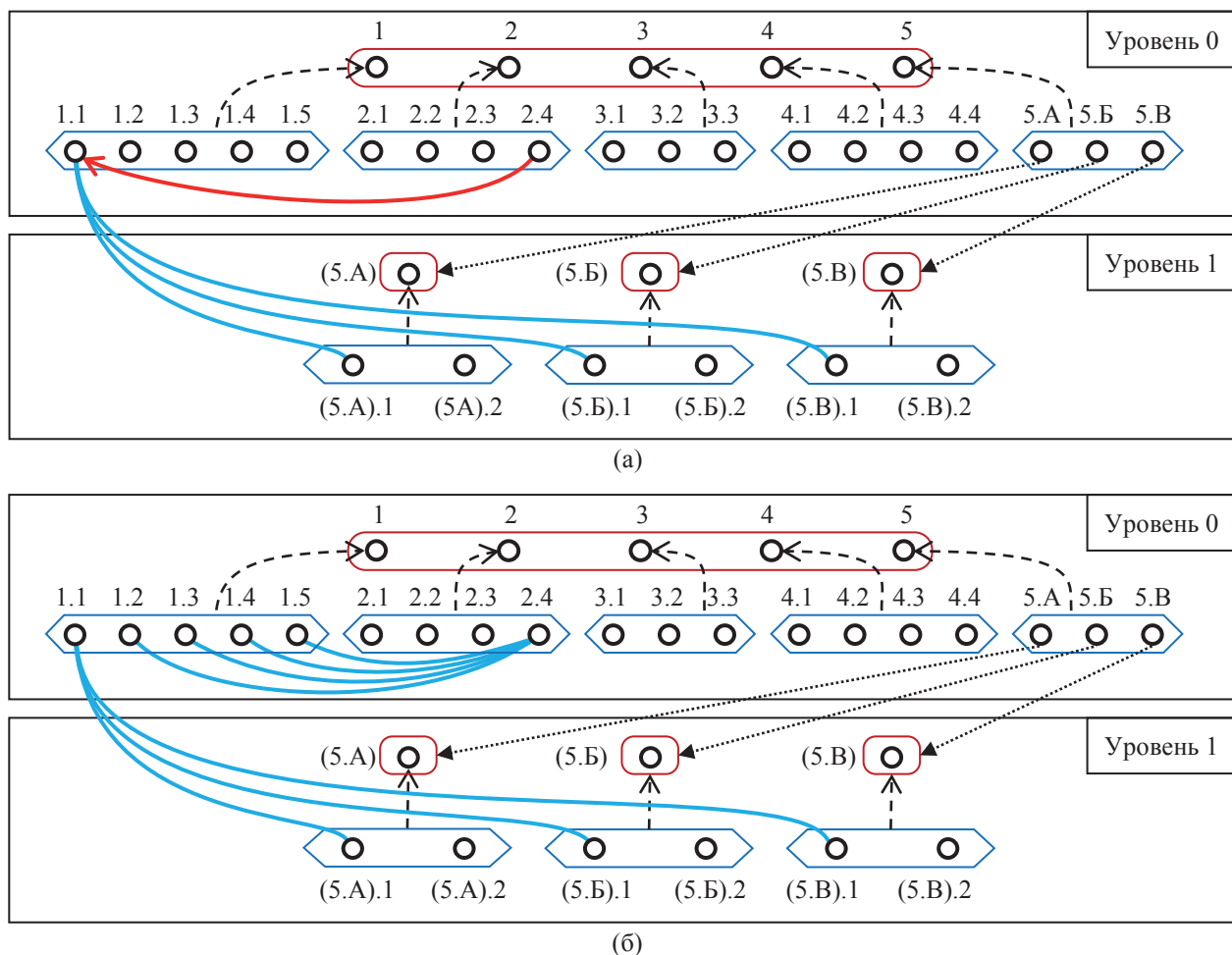


Рисунок 3 – Две версии многоуровневой морфологической модели холодильной машины при ограниченной сочетаемости вариантов реализации её различных функционально-структурных подсистем

Каждая версия одинаково учитывает знание о разрушительном действии аммиака на медную арматуру², но по-разному описывает то, что из хладагентов, указанных в таблице 1, только аммиак пригоден для постройки абсорбционного холодильника³. Для упрощения вос-

² <https://wihometals.com/ru/why-ammonia-is-not-compatible-with-copper>

³ <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/749776/>

приятия на этих рисунках взаимообусловленность ФСП отражена лишь охватывающим их контуром – скругленным прямоугольником. Аналогично – но шестиугольным контуром – показывается несовместимость вариантов реализации каждой ФСП, а связь этих вариантов с ФСП заменена соответствующей единичной связью контура и ФСП.

Обобщение формальной модели морфологического пространства, предложенной в разделе 1, для возможности описания ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП заключается в следующем.

Во-первых, для отражения возможной несовместимости ВР различных ФСП уточняется условие (1):

$$\forall i \forall x \in V_i: E(x) = V_i \setminus \{x\} \cup Y, \quad (2)$$

где $Y \subseteq V \setminus V_i$, т.е. в морфологическом пространстве ВР некоторой ФСП несовместим не только другими ВР этой ФСП, но, возможно, и с некоторыми ВР других ФСП.

Во-вторых, для описания потенциальной обусловленности ВР различных ФСП в модель вводится соответствующее отношение – $C: V \times V \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$. Это знаковый акт, т.к. определение на одной основе и отношения E , и отношения C устанавливает *ограничения существования* элементов этой основы – именно так описываются ограничения существования свойств у объектов исследуемой ПрО в инжиниринге онтологий [1, 6, 7].

Сосуществование «экзистенциальных» отношений E и C на единой основе (в рассматриваемом случае это множество ВР, или точек-трансверселей морфологического пространства, V) регулируется следующими двумя законами:

- естественный *запрет* одновременного включения в E и C любой пары элементов множества-основы:

$$\forall x, y \in V, x \neq y: \neg((E(x, y) = C(x, y)) \vee (E(x, y) = C(y, x)))$$

(в морфологическом пространстве этот запрет адресуется к любым двум ВР разных ФСП: $\forall i, j, i \neq j, x \in V_i, y \in V_j$, – поскольку обусловленность ВР может существовать лишь как вид ограниченной сочетаемости двух ВР разных ФСП);

- несовместимость характеризуется «*транзитивностью относительно обусловленности*» (рисунок 4):

$$\forall x, y, z \in V, x \neq z, y \neq z: C(x, y) \wedge E(y, z) \rightarrow E(x, z). \quad (3)$$

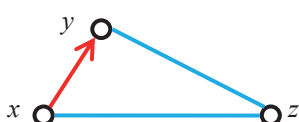


Рисунок 4 – Пример экзистенциальных зависимостей между вариантами реализации x, y, z функциональных подсистем проектируемого артефакта

На основании (3) следует констатировать, что пример на рисунке 3а некорректен. Формально верная морфологическая модель холодильной машины, учитывающая обнаруженную ограниченную сочетаемость ВР её ФСП – хладагента, компрессора и материала, из которого изготовлен испаритель, – получится при *совмещении* рисунков 3а и 3б.

Математически корректна в этом смысле морфологическая модель, показанная на рисунке 5. Используя введенную выше графическую нотацию, рисунок 5, информационно подерживаемый таблицей 2, демонстрирует морфологическое пространство с ограничениями существования ВР ФСП, сформированное для выбора облика реактивного самолёта. Пример построен по материалам [21], где описание морфологического пространства выбора ТР, сделанное в значительной степени неформально, уточнено введением варианта 232а для схемы донной части фюзеляжа самолёта. В [21] достоверность этого описания подтверждается, в частности, идентификацией на его основе облика реального выпускавшегося самолёта-истребителя (см. рисунки 5 и 6).

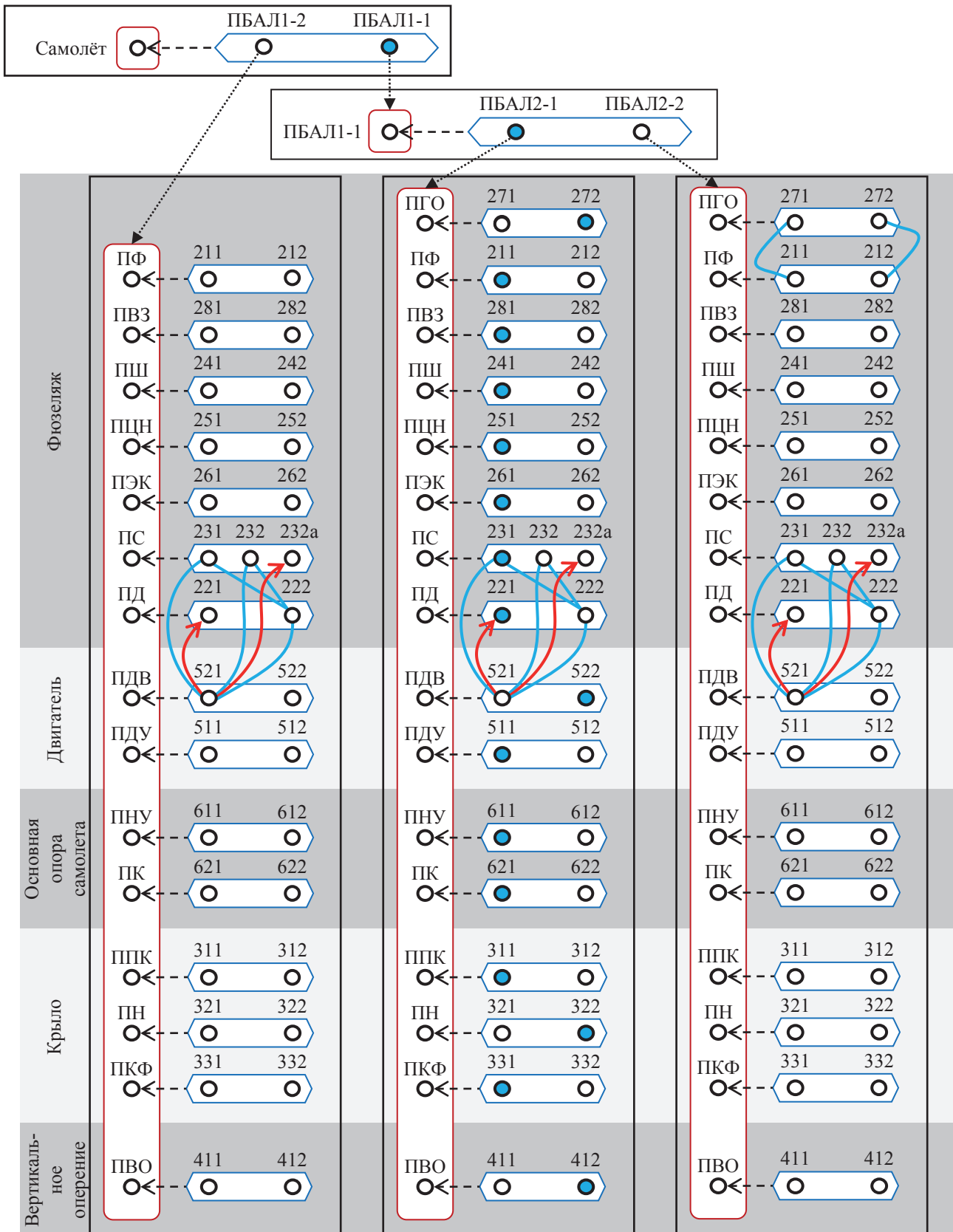
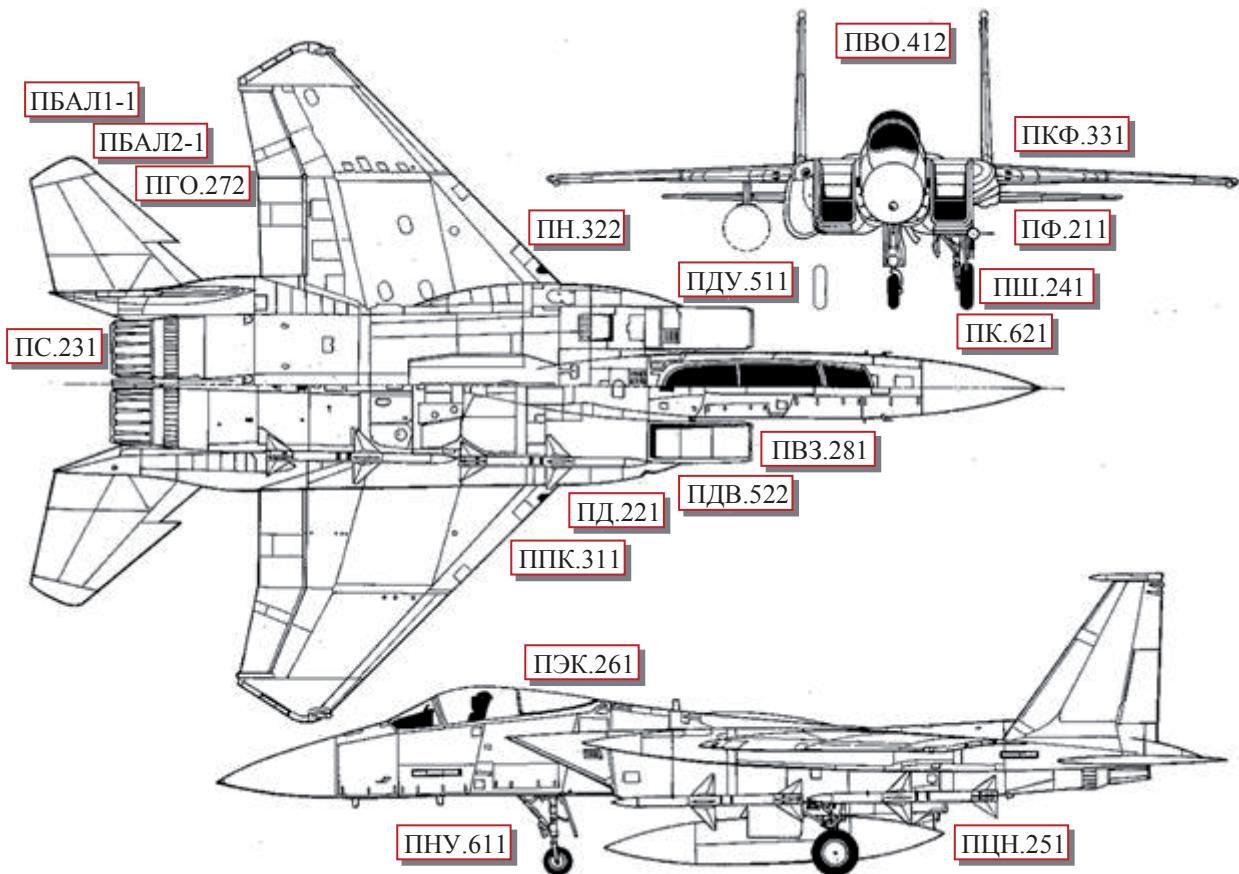


Рисунок 5 – Морфологическая модель признаков компоновочной схемы самолёта (по [21]; расшифровка оригинальных аббревиатур и цифровых кодов признаков представлена в таблице 2);
 ● - признаки компоновочной схемы истребителя F-15А (см. рисунок 6)

Таблица 2 – Признаки компоновочной схемы самолёта согласно [21]

Аббревиатура, код	Расшифровка
ПБАЛ1-1	Горизонтальное оперение имеется
ПБАЛ1-2	Горизонтальное оперение отсутствует
ПБАЛ2-1	Горизонтальное оперение располагается по оси X позади крыла
ПБАЛ2-2	Горизонтальное оперение располагается по оси X впереди крыла
ПГО	Размещение горизонтального оперения
271	На фюзеляже
272	На агрегатах, примыкающих к фюзеляжу
ПФ	Расположение воздухозаборников (ВЗ)
211	Сбоку фюзеляжа
212	Под фюзеляжем
ПВЗ	Схема воздухозаборников
281	Плоский воздухозаборник с горизонтальным клином торможения
282	Плоский воздухозаборник с вертикальным клином торможения
ПШ	Размещение колеса главной опоры относительно канала подвода воздуха к двигателю
241	Снизу-сбоку канала подвода воздуха к двигателю
242	Сверху-сбоку канала подвода воздуха к двигателю
ПЦН	Схема фюзеляжа по размещению целевой нагрузки
251	Наружная подвеска целевой нагрузки
252	Конформная подвеска целевой нагрузки
ПЭК	Размещение экипажа
261	Тандем
262	Рядом
ПС	Схема донной части фюзеляжа
231	Сопла двигателей разнесены
232	Сопла двигателей сомкнуты
232a	Сопло одного двигателя
ПД	Размещение двигателей
221	В едином отсеке фюзеляжа
222	В изолированных отсеках фюзеляжа
ПДВ	Число двигателей
521	Один
522	Два
ПДУ	Тип двигателей
511	ДТРДФ
512	ТРДФ
ПНУ	Направление уборки основной опоры самолёта
611	Вперёд (против полёта)
612	Назад (по полёту)
ПК	Число колёс
621	Одно
622	Два
ППК	Стреловидность передней кромки крыла
311	Прямая стреловидность
312	Обратная стреловидность
ПН	Конфигурация передней кромки крыла
321	С наплывом
322	Без наплыва
ПКФ	Расположение крыла относительно строительной горизонтали фюзеляжа
331	Высокоплан
332	Низкоплан
ПВО	Число килей вертикального оперения
411	Один
412	Два

Рисунок 6 – Компоновочная схема истребителя F-15A Eagle (корпорация «Макдоннел-Дуглас», США)⁴

2.2 Апология запретов и преимущества ограничений существования

При необходимости введения в морфологическую модель ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП проектируемого артефакта стараются обойтись «запретами на сочетания», т.е. ограничиться расширением (2) базовой модели морфологического пространства. Это объясняется тем, что в этом случае морфологический синтез ТР получает хорошую теоретическую поддержку, связанную с моделированием и анализом *многодольных* графов, а также методами и алгоритмами решения задачи о *независимом множестве* вершин графа [22]. Аргументация такого подхода, как правило, ограничивается экспертным мнением, что «запреты на сочетания» *чаще всего* встречаются в проектной практике инженеров различного профиля [9], что *во многих случаях* с помощью одних только запретов можно обосновывать различные закономерности в природе и технике [23, 24].

Покажем, что моделирование ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП с помощью *ограничений существования* – используемой в ОАД фундаментальной модели сосуществования элементов некоего целого – позволяет строго обосновать *апологию запретов* в морфологическом анализе и синтезе ТР.

Прежде всего следует отметить, что за исключением запретов *все виды* ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП описываются в рамках бинарного отношения обусловленности *C* (см. подраздел 2.1). Поэтому достаточно установить, что на этапе синтеза ТР обусловленность одного отдельно взятого ВР *x* некоторой ФСП отдельно взятым ВР *y* другой ФСП *неизбежно* при включении в ТР *y* приведёт к включению в ТР *x* независимо от того, есть или

⁴ <http://www.airwar.ru/image/idop/fighter/f15a/f15a-1.gif>

отсутствует информация о рассматриваемой обусловленности (т.е. включение x будет осуществлено *независимо от знания* об этой в действительности существующей обусловленности благодаря другому механизму, и, забегая вперёд, его реализуют запреты).

Пусть $x \in V_i, y \in V_j, i \neq j$ и $C(y, x)$. Тогда согласно (3) $E(y) \supseteq V_i \setminus \{x\}$, т.е. в морфологической модели по меньшей мере имеют место несовместимости (запреты) вида

$$\forall z \in V_i \setminus \{x\}: E(y, z). \quad (4)$$

Следовательно, при включении в ТР y для реализации i -й ФСП для реализации j -й ФСП не остаётся никакого другого ВР кроме x . Если обусловленность $C(y, x)$ отсутствует (явно не зафиксирована), а несовместимости (4) всё-таки *определены*, произойдет то же самое. Поэтому *принципиально возможно* при описании ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП заместить обусловленность запретами.

В этом смысле морфологическая модель холодильной машины на рисунке 3б также корректна, как и модель, возникающая при совмещении схем на рисунках 3а и 3б.

Тем не менее описание морфологического пространства в задаче структурного анализа и синтеза ТР с использованием *ограничений существования* имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- *естественность* отображения всех разновидностей ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП, в частности, непосредственное описание 3-х из 4-х их видов с помощью отношения обусловленности;
- «автоматизм» *вскрытия закономерностей* ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП в форме запретов при фиксации в модели обусловленности некоторых таких ВР, который возникает при формировании морфологического пространства благодаря транзитивности несовместимости относительно обусловленности (3);
- возможность эффективной *редукции ограничений существования* [25, 26], которая здесь означает выявление классов эквивалентности во множестве точек-трансверселей морфологического пространства, что снижает размерность задачи синтеза ТР.

Таким образом, модель ограничений существования, получившая важное применение и развитие в ОАД, следует признать пригодной и предпочтительной для описания ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП в задаче структурного анализа и синтеза ТР.

Модель ограничений существования в смысловом отношении «замыкает» базовое теоретико-множественное описание морфологического пространства выбора ТР, завершая определение остова *формальной онтологии* ПрО морфологического анализа ТР – соответствующая диаграмма «сущность-связь» приведена на рисунке 7.

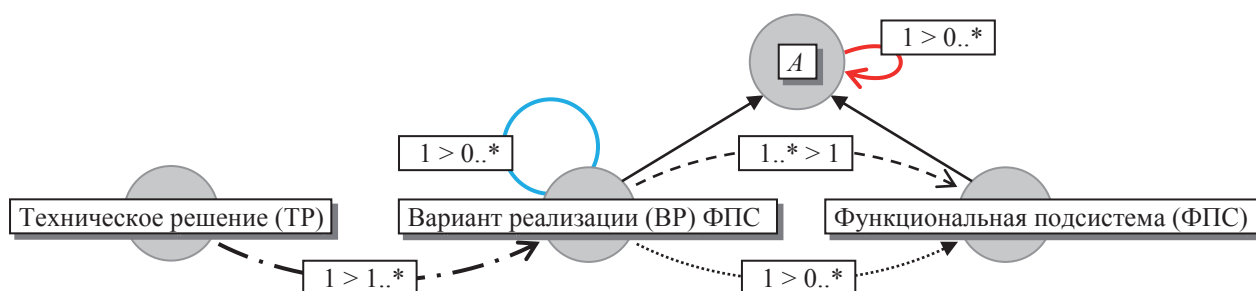


Рисунок 7 – Диаграмма «сущность-связь» онтологии предметной области морфологического анализа технических решений:

A – понятие о предметах, существование которых может и обуславливать существование, и обуславливаться существованием других таких же предметов;

\dashrightarrow – дуга отношения «ТР включает ВР ФСП»; \longrightarrow – дуга отношения «обобщает» между сущностями; легенды других отношений см. на рисунке 2

3 Структурный синтез технического решения как семантическая идентификация объекта проектирования

Преимущества использования ограничений существования в задаче структурного анализа и синтеза ТР будут состоятельны, если при этом способе описания в морфологическом пространстве можно осуществить эффективный поиск оптимальной точки-трансверсали (далее для определенности – *максимальной* по «весу» ВР ФСП, «включаемых» в ТР).

Поскольку, во-первых, задача поиска максимального по весу независимого множества вершин в графе, где вершины – компоненты решения, а ребра – свидетельства их несовместимости, является *NP*-полной [27], а, во-вторых, в подразделе 2.2 показана возможность *приведения* к такой постановке рассматриваемой поисковой задачи, где связи вершин описываются ограничениями существования, то последняя также *NP*-полна. Это означает, что трудоемкость решения задачи структурного синтеза ТР независимо от способа описания морфологического пространства (с помощью запретов или ограничений существования) экспоненциально зависит от параметров размерности исходных данных, и улучшить это положение можно лишь за счет эвристик и/или организации поиска приближенных решений.

Для задачи семантической идентификации объекта [4], к которой далее приводится задача структурного синтеза ТР, такой эффективный эвристический метод предложен в [5]. В его основу положены:

- понятие о *нормальном множестве свойств объекта* [6, 7]. Если на множестве всех измеряемых у объекта свойств M заданы ограничения существования, то лучшее признаковое описание объекта ищется лишь среди подмножеств $X \subseteq M$, которые замкнуты и совместимы, или *нормальны*, т.е. $\forall x \in X: (\exists y \in M: C(x, y) \rightarrow y \in X$ и $\forall x \in X: (\exists y \in M, x \neq y: E(x, y)) \rightarrow y \notin X$;
- эвристика, состоящая в том, что удовлетворить ограничения существования можно путем отказа от части эмпирической информации, имеющей *меньшую достоверность* при том, что эта информация состоит из эмпирических оценок истинности *базовых семантических суждений* (БСС) вида «объекту g присуще свойство m ».

В ОАД истинность БСС оценивается в рамках векторной логики V^{TF} [28], т.е. векторами $\langle True, False \rangle: \langle b_{gm}^+, b_{gm}^- \rangle, b_{gm}^+, b_{gm}^- \in [0, 1]$, где компонент истинности b_{gm}^+ формируется свидетельствами, подтверждающими истинность суждения, а компонент b_{gm}^- – его отрицающими. Достоверность БСС определяется величиной $(b_{gm}^+ - b_{gm}^-) \in [-1, 1]$ [28], которой в привычном диапазоне изоморфна величина $(b_{gm}^+ - b_{gm}^- + 1)/2 \in [0, 1]$.

Так как для выделения каждого нормального подмножества измеряемых у объекта g свойств требуется отбросить в общем случае некоторую группу свойств $M^\bullet \subseteq M$, то в качестве основного подлежащего минимизации критерия «весомости» анализируемого нормального множества выступает *агрегированный показатель достоверности* (АПД) эмпирических оценок истинности БСС о принадлежности объекту g свойств из M^\bullet .

Вспомогательным критерием качества рассматриваемого нормального множества служит его мощность: при прочих равных условиях желательно уменьшить отклонение от эмпирического признакового описания объекта и, следовательно, сохранить в этом описании как можно больше свойств, эмпирические свидетельства о наличии которых признаны в исходной постановке задачи достаточными. Явно выраженная разница важности частных критериев оправдывает применение для многокритериальной оптимизации *лексикографического метода* [29].

В качестве АПД в ОАД принят вектор

$$\langle \max_{m \in M^\bullet} \{b_{gm}^+\}, \min_{m \in M^\bullet} \{b_{gm}^-\} \rangle, \quad (5)$$

который *неубывает* с ростом количества аргументов $|M^*|$. В конечном итоге именно эта монотонность определяет преимущество разработанного эвристического метода, т.к. обеспечивает возможность отсеечения бесперспективных ветвей конечного дерева решений, формируемого для каждого набора связанных клик [22] в M , или, другими словами, для каждой связанной группы попарно несовместимых свойств объекта g .

Соответствие элементов задачи семантической идентификации объекта и задачи структурного синтеза ТР состоит в следующем:

- объект \leftrightarrow ТР;
- измеряемое свойство объекта \leftrightarrow отдельно взятый ВР некоторой ФСП проектируемого артефакта;
- нормальное подмножество свойств объекта \leftrightarrow допустимое ТР;
- оценка истинности БСС «объекту g присуще свойство m » $\langle b_{gm}^+, b_{gm}^- \rangle \leftrightarrow$ оценка эффекта включения в ТР отдельно взятого ВР $x \in V$ некоторой ФСП, которая на практике часто имеет векторный вид $\langle b_x^+, b_x^- \rangle$, где b_x^+ – выгода, а b_x^- – издержки решения о включении x в ТР [16]. Величины выгод и издержек можно нормировать после их выявления для всех ВР из V , поэтому $b_x^+, b_x^- \in [0, 1]$. В случае нормированной скалярной оценки b_x эффекта включения ВР x в ТР (например, в [16] такой эффект оценивается величиной $b_x = b_x^+ / b_x^-$) можно оперировать векторной оценкой $\langle b_x, 0 \rangle$;
- достоверность БСС \leftrightarrow абсолютный «выигрыш» $(b_x^+ - b_x^-) \in [-1, 1]$ от включения в ТР отдельно взятого ВР $x \in V$ некоторой ФСП, который аналогично достоверности БСС может быть трансформирован в «приведенный выигрыш» в диапазоне $[0, 1]$;
- АПД (5) \leftrightarrow аналогично вычисляемый критерий эффективности ТР. Физический смысл этого критерия состоит в указании верхней оценки приведенного выигрыша, «теряемого» (как плата за корректность решения) с каждым отдельно взятым ВР, исключенным из ТР.

Вспомогательный критерий качества нормального подмножества свойств объекта, используемый в задаче семантической идентификации объекта, в задаче структурного синтеза ТР не имеет смысла, т.к. каждое допустимое ТР, если таковое найдётся, есть множество ВР по одному для каждой ФСП, которое всегда имеет мощность $n = |W|$.

То, что при заданных ограничениях существования решение задачи синтеза ТР *может не существовать* отличает её от задачи семантической идентификации свойств объекта, решение которой всегда существует [4]. Содержательно это объясняется тем, что в первой задаче не допускается исключение из ТР всех ВР некоторой ФСП. Формально же отличие заключается лишь в том, считается ли *пустое* множество нормальным. Опционный запрет квалифицировать пустое множество как нормальное делает метод семантической идентификации объекта более гибким и пригодным для решения задачи структурного синтеза ТР.

Рисунок 8 иллюстрирует решение задачи синтеза ТР на примере холодильной машины. Слева представлены ВР ФСП и ограничения существования: «линейная» форма морфологической таблицы 1 устанавливает несовместимость ВР каждой ФСП, а дуга и ребра описывают ограниченную сочетаемость ВР разных ФСП. В средней части рисунка 8 приведены нормированные значения выгод и издержек, связанных с включением в ТР отдельных ВР ФСП (в процентах), справа демонстрируются ВР ФСП – компоненты ТР, найденного методом семантической идентификации объекта при запрете считать пустое множество нормальным.

Заключение

В работе применительно к задаче структурного анализа и синтеза технических решений показана пригодность и преимущества использования фундаментальной модели, применяе-

мой в онтологическом инжиниринге и известной как «ограничения существования», для описания морфологического пространства всех возможных вариантов реализации функционально-структурных подсистем у проектируемого артефакта.

Предложенная с использованием ограничений существования теоретико-множественная модель морфологического пространства позволила объяснить широкое распространение и корректность подхода к описанию ограниченной сочетаемости вариантов реализации функционально-структурных подсистем артефакта на основе запретов, а также построить «скелет» онтологии предметной области морфологического анализа.

Установлено, что совместно модель ограничений существования и метод семантической идентификации объектов, разработанный как внутренняя процедура онтологического анализа данных, способны обеспечить эффективную методологическую поддержку морфологического анализа и синтеза технических решений.

Исследование потенциала применения моделей и методов онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений показало возможность определенного обобщения метода семантической идентификации объекта и позволило увидеть связь этого метода с классическими задачами теории графов.

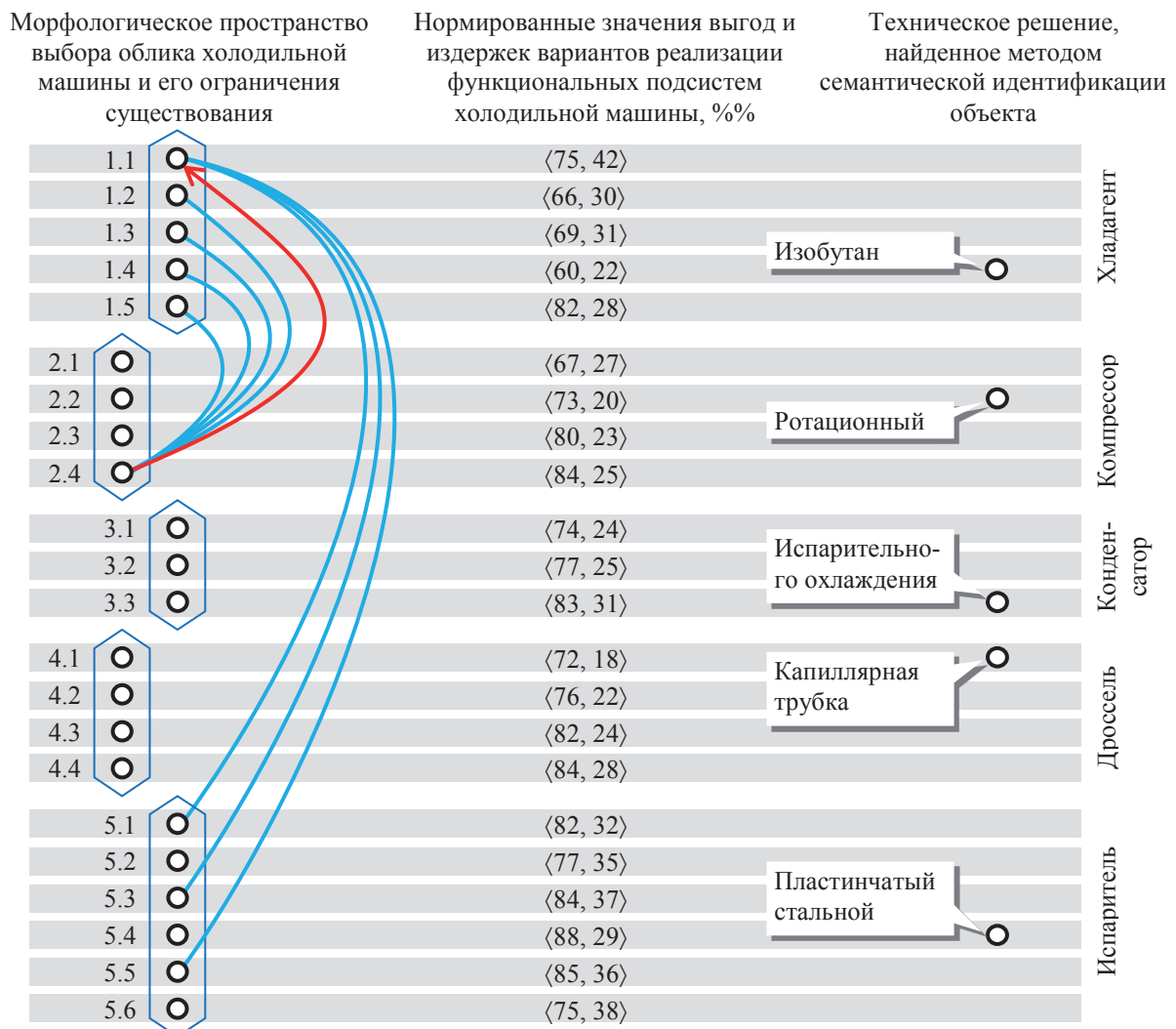


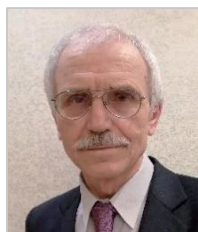
Рисунок 8 – Пример решения задачи синтеза облика артефакта, полученного методом семантической идентификации объекта на основе учета ограниченной сочетаемости вариантов реализации функционально-структурных подсистем в форме ограничений существования

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Самойлов Д.Е., Семенова В.А., Смирнов С.В.** Анализ неполных данных в задачах построения формальных онтологий // Онтология проектирования. 2016. Т. 6, №3(21). С. 317-339. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-317-339.
- [2] **Загоруйко Н.Г.** Когнитивный анализ данных. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2013. 186 с.
- [3] **Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холод И.И., Тесс М.Д., Елизаров С.И.** Анализ данных и процессов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
- [4] **Смирнов С.В.** О семантической идентификации объекта по эмпирическим данным // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (2-6 октября 2017 г., Новосибирск, Россия). Т. 2. Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2017. С. 125-133.
- [5] **Seменова V., Smirnov S.** Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data // VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology ITNT-2022 (May 23-27, 2022, Samara, Russia). IEEE Xplore. 2022. P. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848601.
- [6] **Lammari N., Metals E.** Building and maintaining ontologies: a set of algorithms // Data & Knowledge Engineering. 2004. Vol. 48(2). P. 155-176.
- [7] **Пронина В.А., Шипилина Л.Б.** Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области // Проблемы управления. 2009. №1. С. 27-32.
- [8] **Смирнов С.В.** Онтологический анализ экспертных данных в задаче формирования нечетких когнитивных карт // Труды ИСА РАН. 2019. Т.69. Вып. 4. С. 79-86. DOI: 10.14357/20790279190410.
- [9] **Божко А.Н., Толпаров А.Ч.** Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. №5. <http://technomag.edu.ru/doc/44191.html>
- [10] **Гаврилова Т. А., Кудряцев Д. В., Муромцев Д. И.** Инженерия знаний. Модели и методы. СПб.: Лань, 2016. 324 с.
- [11] **Zwicky F.** Discovery Invention, Research Through the Morphological Approach. McMillan, 1969. 276 p.
- [12] **Одрин В.М.** Метод морфологического анализа технических систем. М.: ВНИИПИ, 1989. 312 с.
- [13] **Закревский А.Д.** Алгоритмы синтеза дискретных автоматов. М.: Наука, 1971. 512 с.
- [14] **Половинкин А.И.** Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.
- [15] **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2000. 368 с.
- [16] **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Наука и искусство принятия решений. Кн. 3: Подходы к решению задач коллективного выбора. Методы генерации решений. М.: Ленанд, 2021. 248 с.
- [17] **Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н.** Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. М.: Наука, 1986. 296 с.
- [18] **Каазик Ю.А.** Математический словарь. М.: Физматлит, 2007. 334 с.
- [19] **Райнишке К., Ушаков И.А.** Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
- [20] **Люгер Дж.Ф.** Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Вильямс, 2003. 864 с.
- [21] **Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С.** Основы автоматизированного проектирования самолетов. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
- [22] **Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И.** Лекции по теории графов. М.: Наука, Физматлит, 1990. 384 с.
- [23] **Закревский А.Д.** Логика распознавания. Мн.: Наука и техника, 1988. 118 с.
- [24] **Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д.** Логические основы проектирования дискретных устройств. М.: Физматлит, 2007. 592 с.
- [25] **Семенова В.А., Смирнов С.В.** Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограниченного существования свойств предметной области // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, №3(37). - С. 361-379. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-361-379.
- [26] **Смирнов С.В., Семенова В.А.** Эффективность редукции ограничений существования свойств в задаче идентификации признаков объекта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. №2(30). С. 5-13. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001.
- [27] **Клейнберг Дж., Тардос Е.** Алгоритмы: разработка и применение. Классика Computers Science. - СПб.: Питер, 2016. 800 с.
- [28] **Аршинский Л.В.** Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 2007. 228 с.
- [29] **Лотов А.В., Поспелова И.И.** Многокритериальные задачи принятия решений. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.

Сведения об авторах

Семенова Валентина Андреевна, 1994 г. рождения. Бакалавр прикладной математики и информатики (Самарский государственный аэрокосмический университет, 2015), магистр механики и математического моделирования (Самарский университет, 2017), аспирант информатики и вычислительной техники (Самарский государственный технический университет, 2022). Младший научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН. Автор и соавтор 27 научных трудов в области интеллектуального анализа данных и проектирования программных систем. ORCID: 0000-0002-0557-3890; Author ID (Scopus): 57204366624. queenbfjr@gmail.com ✉



Смирнов Сергей Викторович, 1952 г. рождения. Выпускник Куйбышевского авиационного института (1975), д.т.н. (2002). Главный научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН, профессор Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Член РАИИ, ИАОА. В списке научных трудов более 200 работ в области прикладной математики, компьютерного моделирования, создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (РИНЦ): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. smirnov@iccs.ru

Поступила в редакцию 05.10.2023, после рецензирования 28.11.2023. Принята к публикации 01.12.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547

Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions

© 2023, V.A. Semenova ✉, S.V. Smirnov

*Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Science,
Institute for the Control of Complex Systems of the Russian Academy of Science, Samara, Russia*

Abstract

The article explores the potential and demonstrates the effectiveness of using some models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions. Morphological analysis and synthesis of layout diagrams of artifacts are considered as a working methodology for structural design. A set-theoretic model of the morphological decision space is constructed for the classical version of the methodology. The model includes the functional subsystems of the designed artifact, implementation options for these subsystems, and potential technical decisions themselves. Moreover, in contrast to existing versions of such formalization, the emphasis is on the description of binary relationships between the entities of the knowledge domain of morphological analysis. It is proposed to describe the incompatibility of implementation options for a single functional subsystem of a designed artifact and the restricted compatibility of implementation options for various functional subsystems within the framework of a single model, known in ontological engineering and, in particular in ontological data analysis as “existence constraints”. Analysis of one of the regularities inherent in this model made it possible to strictly substantiate the approach common in structural design to describing the restricted compatibility of implementation options for various functional subsystems in the form of prohibitions. The advantages of using existence constraints to describe the morphological decision space are shown, and the frame of a formal ontology for the knowledge domain of morphological analysis is constructed. The structural synthesis of a technical decision is compared with the method of semantic identification of an object, developed within the framework of ontological data analysis for processing incomplete and inconsistent empirical information about the results of measuring object properties. A conclusion is made about the suitability of the latter for solving the problem of structural synthesis when correcting the concept of a “normal” subset of properties and information about the costs and/or benefits of including each individual implementation option for the functional subsystems of the designed artifact.

Key words: ontological data analysis, semantic identification of an object, analysis and synthesis of technical decisions, morphological space, existence constraints, combinatorial optimization.

For citation: Semenova VA, Smirnov SV. Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547.

Financial Support: The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research theme code FMRW-2022-0030.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 - Tabular description of the morphological decision space
- Figure 2 - Multi-level morphological model of a refrigeration device in the form of an AND/OR graph detailing the relationships between the elements of the morphological space (see Table 1; here: 5.A, 5.B, 5.B – tubular, plate and finned implementations of the evaporator, respectively; 5.*.1 – material suitable for the manufacture of evaporator “*”; 5.*.1.1 – copper; 5.*.1.2 – steel)
- Figure 3 - Two versions of a multi-level morphological model of a refrigeration machine with restricted compatibility of options for implementing its various functional and structural subsystems
- Figure 4 - An example of existential dependencies between implementation options x, y, z of the functional subsystems of the designed artifact (self-conditionality of x, y, z is omitted)
- Figure 5 - Morphological model of aircraft layout features (according to [21]; decoding of original abbreviations and digital feature codes is presented in Table 2); ● - signs of the layout of the F-15A fighter (see Figure 6)
- Figure 6 - F-15A Eagle fighter layout (McDonnell-Douglas Aircraft Co., USA)
- Figure 7 - Entity-relationship ontology diagram of knowledge domain of morphological analysis of technical solutions: A – the concept of objects, the existence of which can both condition the existence and be conditioned by the existence of other similar objects; $\text{---} \cdot \text{---}$ – arc of the relationship “technical decision includes implementation option for functional subsystem”; $\text{---} \rightarrow$ – the arc of the relationship “generalizes” between entities; for legends of other relations, see Figure 2
- Figure 8 - An example of solving the problem of synthesizing the appearance of an artifact obtained by the method of semantic identification of an object based on a description of the morphological space for choosing decisions and taking into account the restricted compatibility of options for implementing functional subsystems in the form of existence constraints
- Table 1 - Morphological space of refrigeration device layouts
- Table 2 - Aircraft layout features according to [21]

References

- [1] **Samoilov DE, Semenova VA, Smirnov SV.** Incomplete data analysis of for building formal ontologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(3): 317-339. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-317-339.
- [2] **Zagoruyko NG.** Cognitive data analysis [In Russian]. Novosibirsk: Geo publ.; 2013. 186 p.
- [3] **Barsegyan AA, Kupriyanov MS, Holod II, Tess MD, Elizarov SI.** Data and Process Analysis [In Russian]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009. 512 p.
- [4] **Smirnov SV.** On semantic identification of an object based on empirical data [In Russian]. In: *Knowledge – Ontologies – Theories: Proc. of the all-Russian conf. with int. part. (October 2-6, 2017, Novosibirsk, Russia)*. T. 2. Novosibirsk: Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the RAS, 2017: 125-133.
- [5] **Semenova V, Smirnov S.** Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data. In: *Proc. VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology ITNT-2022 (May 23-27, 2022, Samara, Russia)*. IEEE Xplore. 2022: 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848601.
- [6] **Lammari N, Metais E.** Building and maintaining ontologies: a set of algorithms. *Data & Knowledge Engineering*. 2004; 48(2): 155-176.
- [7] **Pronina VA, Shipilina LB.** Using the relationships between attributes to build domain ontology [In Russian]. *Control Science*. 2009; 1: 27-32.
- [8] **Smirnov SV.** Ontological analysis of expert data in the problem of forming fuzzy cognitive maps [In Russian]. *Proc. of ISA RAS*. 2019; 69(4): 79-86. DOI: 10.14357/20790279190410.

- [9] **Bozhko AN, Tolparov ACh.** Structural synthesis on elements with restricted compatibility [In Russian]. Science and education: scientific publication of BMSTU. 2004; 5. <http://technomag.edu.ru/doc/44191.html>
- [10] **Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI.** Knowledge Engineering. Models and methods [In Russian]. St. Petersburg: Lan publ.; 2016. 324 p.
- [11] **Zwicky F.** Discovery Invention, Research Through the Morphological Approach. McMillan; 1969. 276 p.
- [12] **Odrin VM.** Method of morphological analysis of technical systems [In Russian]. Moscow: VNIPI; 1989. 312 p.
- [13] **Zakrevsky AD.** Algorithms for the synthesis of discrete automata [In Russian]. Moscow: Science; 1971. 512 p.
- [14] **Polovinkin AI.** Fundamentals of engineering creativity [In Russian]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1988. 368 p.
- [15] **Andreichikov AV, Andreichikova ON.** Analysis, synthesis, planning decisions in economics [In Russian]. Moscow: Finance and Statistics publ.; 2000. 368 p.
- [16] **Andreichikov AV, Andreichikova ON.** The Science and Art of Decision Making. V. 3: Approaches to solving collective choice problems. Methods for generating decisions [In Russian]. Moscow: Lenand publ.; 2021. 248 p.
- [17] **Dubov YuA, Travkin SI, Yakimets VN.** Multicriteria models for the formation and selection of system options [In Russian]. Moscow: Science publ.; 1986. 296 p.
- [18] **Kaazik YuA.** Mathematical dictionary [In Russian]. Moscow: Fizmatlit publ.; 2007. 334 p.
- [19] **Reinschke K, Ushakov IA.** Graphs using in systems reliability estimation [In Russian]. Moscow: Radio and Communication publ.; 1988. 208 p.
- [20] **Luger GF.** Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving, 6th Edition. Pearson Education publ.; 2011. 784 p.
- [21] **Eger SM, Liseyev NK, Samoilovich OS.** Basics of computer-aided aircraft design [In Russian]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1986. 232 p.
- [22] **Emelichev VA, Melnikov OI, Sarvanov VI, Tyshkevich RI.** Lectures on graph theory [In Russian]. Moscow: Science, Fizmatlit publ.; 1990. 384 p.
- [23] **Zakrevsky AD.** The logic of recognition [In Russian]. Minsk: Science and Technology publ.; 1988. 118 p.
- [24] **Zakrevsky AD, Pottosin YuV, Cheremisinova LD.** Logical foundations of discrete device design [In Russian]. Moscow: Fizmatlit publ.; 2007. 592 p.
- [25] **Semenova VA, Smirnov SV.** Algorithms for the formation and pragmatic transformation of Existence Constraints [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(3): 361-379. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-361-379.
- [26] **Smirnov SV, Semenova VA.** Efficiency of properties existence constraints reduction in the problem of object attributive identification [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2023; 2(30): 5-13. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001.
- [27] **Kleinberg J, Tardos E.** Algorithm design. Pearson Education publ.; 2005. 864 p.
- [28] **Arshinsky LV.** Vector logics: foundations, concepts, models. [In Russian]. Irkutsk: Irkutsk State university publ.; 2007. 228 p.
- [29] **Lotov AV, Pospelova II.** Multicriteria decision-making problems. [In Russian]. Moscow: MAX Press; 2008. 197 p.

About the authors

Semenova Valentina Andreevna (b. 1994). Bachelor in Applied Mathematics and Computer Science (Samara State Aerospace University, 2015), master in Mechanics and Mathematical Modeling (Samara University, 2017), postgraduate student in Computer science and Engineering (Samara State Technical University, 2022). Junior researcher at Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences. Author and co-author of 27 scientific papers in the field of data mining and software engineering. ORCID: 0000-0002-0557-3890; Author ID (Scopus): 57204366624. queenbfjr@gmail.com ✉

Sergey Victorovich Smirnov (b. 1952) graduated from the Korolyov aerospace Institute (Kuibyshev-city) in 1975, D. Sc. Eng. (2002). Chief Researcher at Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, professor at Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics. Hi is member of Russian Association of Artificial Intelligence and International Association for Ontology and its Applications. His list of scientific works includes more than 200 publications in the field of applied mathematics, complex systems simulation and development knowledge based decision support systems in control and management. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (RSCI): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287; Researcher ID (WoS): AAB-2013-2021. smirnov@iccs.ru

Received October 5, 2023. Revised November 28, 2023. Accepted December 1, 2023.