

## МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 004.89+519.1

**Минц А.Ю.**кандидат экономических наук, доцент  
Приазовского государственного технического университета

### МЕТОДЫ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В статье выделены общие методологические подходы к синтезу сложных информационных систем. Рассмотрены условия применения и обоснован выбор комбинаторных методов синтеза для решения поставленной задачи. Рассмотрена морфологическая группа методов синтеза. Выделены недостатки классического варианта морфологического синтеза. Предложено использование инструментария теории графов для сокращения анализируемых вариантов и учета ограничений на сочетаемость элементов системы.

Предложен метод синтеза интеллектуальных систем принятия решений, в котором с использованием многодольных гиперграфов производится синтез системы из таких элементов, как «модуль», «кластер», «условие» и «метод». Рассмотрен пример использования этого метода.

**Ключевые слова:** синтез, структура, принятие решений, ограниченная сочетаемость, многодольный граф, интеллектуальная система, гиперграф.

У статті виділено загальнометодологічні підходи до синтезу складних інформаційних систем. Розглянуто умови застосування і обґрунтовано вибір комбінаторних методів синтезу для вирішення поставленого завдання. Розглянуто морфологічну групу методів синтезу. Виділено недоліки класичного варіанту морфологічного синтезу. Запропоновано використання інструментарію теорії графів для скорочення аналізованих варіантів і врахування обмежень на сполучуваність елементів системи.

Запропоновано метод синтезу інтелектуальних систем прийняття рішень, в якому з використанням багатодольних гіперграфів проводиться синтез системи з таких елементів, як «модуль», «кластер», «умова» і «метод». Розглянуто приклад використання цього методу.

**Ключові слова:** синтез, структура, прийняття рішень, обмежена сполучуваність, інтелектуальна система, багатодольний граф, гіперграф.

**Постановка проблемы.** Интеллектуальные вычисления в настоящее время находят широкое применение в задачах, связанных с принятием решений различного уровня. В результате совершенствования алгоритмов и аппаратного обеспечения во многих традиционно человеческих задач, программные системы демонстрируют лучшие результаты, чем люди [1]. Это позволяет говорить о появлении интеллектуальных систем принятия решений (ИСПР), в которых анализ данных и выработка воздействий осуществляются с использованием инструментария искусственного интеллекта. Вместе с тем, создание комплексных ИСПР сопряжено с рядом трудностей, в частности, с недостаточной проработкой вопросов сочетаемости методов интеллектуальных вычислений и синтеза систем на их основе. Это обуславливает актуальность данного исследования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Формально, задача синтеза структуры

ИСПР в отечественной литературе не рассматривалась. С методологической точки зрения к ней близка теория систем автоматизированного проектирования [2; 3; 4], которая аккумулирует значительный объем разработок в области синтеза электронных и информационных систем, которые по структуре информационных потоков и методам их преобразования близки к системам принятия решений. Однако для использования в задачах синтеза ИСПР методы и приемы автоматического проектирования требуют существенной адаптации.

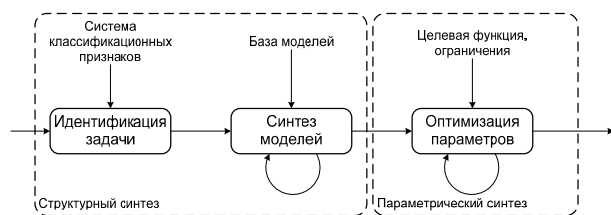
**Целью статьи** является формализация методов синтеза интеллектуальных систем принятия решений, с учетом ограничений на сочетаемость элементов.

**Изложение основного материала исследования.** Основными методологическими подходами к синтезу сложных информационных систем являются *структурный* и *параметрический*.

В рамках *структурного* підходу розглядаються методи вибору і оптимізації структури інформаційної системи. Іменно структура несе в собі основну інформацію про функціональне призначення об'єкта і визначає його основні характеристики [3].

При *параметричному* підході синтез рішення задачі зводиться до оптимізації параметрів моделі з заданою структурою, тобто до її налаштування на задані умови зовнішнього середовища.

При синтезі ІСПР використовується структурно-параметричний підхід, забезпечуючий не тільки вибір оптимальних методів рішення задач, і їх взаємозв'язки, але й оптимізацію елементів системи [3; 4]. В загальному вигляді основні етапи можна представити наступним чином (рис. 1)



**Рис. 1. Основні етапи структурно-параметричного синтезу**

На першому етапі (рис. 1) відбувається ідентифікація належності економічної задачі до одного, або декількох типів, що дозволяє обмежити кількість розглядаваних моделей [5]. Оптимальна структура вибирається відповідно до заданими критеріями ефективності, ризикованості, надійності і іншими. Після формування структури ІСПР здійснюється оптимізація параметрів системи і її налаштування на розв'язувану задачу (навчання).

Зупинимося на методах рішення задач структурного синтезу. Згідно [3], для цього можуть використовуватися наступні методи:

*формальний* – синтез здійснюється шляхом механічного перекладу постановки задачі в структуру моделі за попередньо заданими правилами;

*евристичний* – основні етапи здійснюються людиною з використанням її знань, навичок і інтуїції;

*комбінаторний* – оснований на переборі різних комбінацій в просторі рішень серед аналогічних, або схожих задач;

*спеціалізовані методи* – розробляються під конкретні задачі в тому випадку, якщо ні один з вищеперерахованих не підходить.

Найбільший інтерес з позицій даного дослідження представляють комбінаторні

методи синтезу. Їх використання потенційно дозволяє досягти високого рівня автоматизації процесу синтезу ІСПР, забезпечивши в той же час достатню гнучкість отримуваних рішень.

Більшість методів комбінаторного синтезу можуть бути розглянуті, як розширення і уточнення морфологічного синтезу [6]. В його класичному варіанті виділяється чотири етапи. Пояснимо їх суть, применливо до синтезу ІСПР.

1. Визначається мета задачі.

2. Виділяються *вузлові точки*, що характеризують систему з позицій раніше поставленої мети. В якості вузлових точок можуть розглядатися окремі частини розв'язуваної задачі.

3. Для кожної вузлової точки формується набір *елементів*, що представляють собою варіанти її реалізації.

4. Здійснюється перебір всіх можливих варіантів комбінацій елементів. Заведомо неможливі варіанти відсіюються. Решта перевіряються на реалізованість і відповідність умовам задачі.

Результатом морфологічного синтезу є деякий набір потенційно-реалізованих варіантів, який може бути додатково проаналізований з метою вибору найкращого.

В класичному вигляді задача морфологічного синтезу швидко ускладнюється з збільшенням кількості вузлів і елементів в них. Тому розвиток методу відбувається, в першу чергу, в напрямку скорочення варіантів структури, за рахунок відкидання заведомо неможливих, або неефективних комбінацій вже на етапі синтезу. Отримали розвиток дві основні концепції формування множини альтернатив.

Перша концепція передбачає представлення альтернатив в просторі класифікаційних ознак і їх значень. При цьому формується морфологічне множество, в якому присутні тільки допустимі рішення. Вибір альтернативи здійснюється шляхом порівняння значень класифікаційних ознак розв'язуваної задачі з елементами морфологічного множини.

Друга концепція передбачає представлення альтернатив в просторі елементів і зв'язів між ними. Множина альтернатив в цьому випадку представляє собою граф, фактично являючийся універсальним множинством, тобто що містить всі допустимі рішення. Пошук структурних рішень здійснюється методом занурення розв'язуваної задачі в універсальне множество [7].

Обидві концепції є взаємно-еквівалентними, тобто від представлення альтер-

натив в пространстве классификационных признаков и их значений можно перейти к представлению в пространстве элементов и связей между ними и наоборот. Это позволяет выбрать наиболее удобный разработчику вариант. Покажем, как осуществляется переход от первой концепции представления альтернатив ко второй.

Пусть морфологическая таблица, задающая пространство альтернатив выглядит следующим образом (табл. 1):

Таблица 1.  
Морфологическая таблица синтеза структуры системы

Узловая точка	Элементы реализации функции узловой точки			
n1	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>
n2	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	
n3	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	e <sub>11</sub>
n4	e <sub>12</sub>	e <sub>13</sub>		

Одним из способов задания графа является матрица инцидентности, в которой указываются связи между вершинами графа (строки матрицы) и его ребрами (столбцы). Нулевое значение указывает на отсутствие связи ребра и вершины, а 1 – на её наличие [8]. Аналогичным образом может быть задана инцидентность элементов реализации узловым точкам.

Пусть  $n$  – количество узлов, а  $e$  – количество элементов в морфологической таблице. Матрица инцидентности в этом случае будет иметь  $n$  строк и  $e$  столбцов. На принадлежность элемента  $e_i$  к узловой точке  $n_j$  указывает «1» стоящая на пересечении  $j$  строки и  $i$  столбца (табл. 2).

Таблица 2.  
Матрица инцидентности элементов реализации узловым точкам

	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	e <sub>11</sub>	e <sub>12</sub>	e <sub>13</sub>
n <sub>1</sub>	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n <sub>2</sub>	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
n <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
n <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Синтез системы сводится к выбору  $n$  элементов матрицы инцидентности, для которых выполняются следующие условия:

- 1) элемент равен «1»
- 2) в каждой строке матрицы инцидентности расположен один и только один выбранный элемент.

Полученный набор элементов, упорядоченный по номерам, представляет собой вариант

структуры, где каждая узловая точка реализуется одним из возможных элементов. Если для каждого варианта возможно аналитически определить уровень эффективности, дальнейший синтез структуры сводится к решению задачи оптимизации.

Матрица инцидентности, заданная в табл. 2, в графическом представлении, образует полный  $n$ -дольный граф, показанный на рис. 2. Любая структура, синтезированная на его основе, будет представлять собой подграф со связными долями [8].

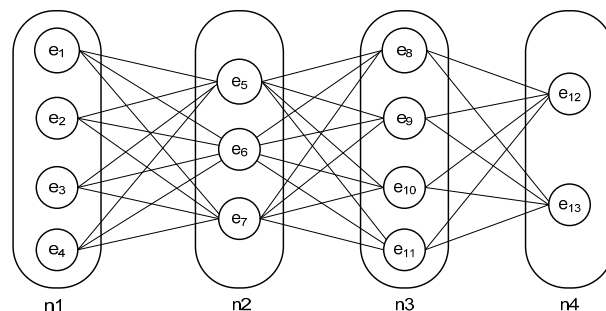


Рис. 2. Пространство синтеза системы в виде  $n$ -дольного графа

Недостатком приведенного алгоритма синтеза является избыточность сочетаний элементов, что затрудняет и замедляет выбор оптимальной структуры. Поскольку обычно имеется возможность заранее определить заведомо нежизнеспособные сочетания, целесообразно обеспечить синтез структуры с учетом этих ограничений. Выделяют следующие виды условий, определяющих возможные сочетания элементов  $x$  и  $y$  [3]:

1. Принуждение. Выбор  $x$  влечет за собой выбор  $y$ .
2. Необходимость. Для выбора  $y$  нужно выбрать  $x$ .
3. Бинарный запрет на сочетание:  $x$  и  $y$  не могут входить в одно решение.
4. Двойное принуждение:  $x$  и  $y$  должны входить в решение одновременно.

Из перечисленного наиболее часто встречается бинарный запрет на сочетания, то есть невозможность использования метода  $y$  для решения задачи  $x$ . Очевидно, что задача определения бинарных запретов эквивалентна определению допустимых связей между элементами графа.

Сформулируем задачу синтеза ИСПР с учетом заранее заданных допустимых связей между элементами. Для этого воспользуемся терминологией и математическим аппаратом анализа гиперграфов, то есть таких графов, в которых каждое ребро может соединять более двух вершин.

Введем следующие определения:

*Модуль* – группа методов, используемых для решения задач определенного класса. Например, разведывательный анализ, анализ данных, обработка данных, оптимизация, принятие решения. Для каждого модуля строится свой гиперграф.

*Кластер* – набор условий, характеризующих предметную область по определенному признаку. Например, представление данных, объем данных, разновидность задачи.

*Условие* – составная часть кластера, представляющая собой вариант параметра, характеризующего предметную область. Например, кластеру «представление данных» соответствует множество условий {четкое, нечеткое}. Условия являются *ребрами* гиперграфа.

*Методы* – способы решения задач, допустимые в рамках данного модуля. Методы являются *вершинами* гиперграфа. Условием допустимости метода является инцидентность ему хотя бы одного ребра из каждого кластера.

При синтезе структуры ИСПР задача разбивается на основные этапы, *модули*, в рамках которых необходимо найти допустимые наборы *методов*, подходящих для её решения.

Поясним предлагаемый подход. Обозначим множество кластеров  $L$ , множество условий  $C$ , множество методов  $M$ . Очевидно, что количество условий должно быть не меньше количества выделенных кластеров  $|C| \geq |L|$ .

Дальнейший ход синтеза рассмотрим на примере. Предположим, в рамках синтеза структуры необходимо найти допустимые методы для модуля «анализ данных», в который входят такие методы, как деревья принятия решений, экспертные системы и искусственные нейронные сети.

Поле параметров синтеза задано в виде трех кластеров:

*представление данных* {четкое, нечеткое};  
*количество данных* {мало, средне, много};  
*стационарность данных* {высокая, средняя, низкая}.

Для сокращения объемов дальнейших выкладок установим следующие биективные отображения:

Для множества вершин графа: {деревья принятия решений, экспертные системы, ИНС} = {m1, m2, m3}.

Для кластера «представление данных»: {четкое, нечеткое} = {c1, c2}.

Для кластера «количество данных»: {мало, средне, много} = {c3, c4, c5}.

Для кластера «стационарность данных»: {высокая, средняя, низкая} = {c6, c7, c8}.

Для модуля «анализ данных»: {представление данных, количество данных, стационарность данных} = {I1, I2, I3}.

Пространство допустимых альтернатив может быть задано либо через набор множеств, либо через матрицу инцидентности. Рассмотрим оба варианта.

Через множества пространство допустимых альтернатив описываются выражениями (1)-(3).

$$I1 \begin{cases} c1 \{m1, m2, m3\}; \\ c2 \{m2, m3\}. \end{cases} \quad (1)$$

$$I2 \begin{cases} c3 \{m1, m2\}; \\ c4 \{m1, m2, m3\}; \\ c5 \{m2, m3\}. \end{cases} \quad (2)$$

$$I3 \begin{cases} c6 \{m1, m2\}; \\ c7 \{m1, m3\}; \\ c8 \{m3\}. \end{cases} \quad (3)$$

Матрица инцидентности, соответствующая выражениям (1)-(3) имеет следующий вид (табл. 3).

Таблица 3

**Матрица инцидентности ребер и вершин гиперграфа, описывающего пространство допустимых альтернатив.**

	I1		I2			I3		
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
m1	1	0	1	1	0	1	1	0
m2	1	1	1	1	1	1	0	0
m3	1	1	0	1	1	0	1	1

Легко показать, что между набором выражений (1)-(3) и матрицей инцидентности (табл. 3) существует взаимно-однозначное соответствие, что обеспечивает возможность перехода от одной формы представления к другой. При этом набор множеств удобнее для первоначального ввода условий, а матрица инцидентности – для дальнейшего анализа.

При синтезе ИСПР строится подграф, множество ребер которого соответствует условиям задачи и является подмножеством ребер гиперграфа пространства допустимых альтернатив.

Предположим, в рамках ИСПР необходимо анализировать небольшую выборку, содержащую нечеткие данные. Условия внешней среды являются стабильными, что обеспечивает стационарность данных. Таким образом, условиям задачи соответствует подграф, состоящий из ребер c2, c3, c6. На основании табл. 3. построим матрицу инцидентности этого графа (табл. 4).



Таблица 4  
Матрица инцидентности подграфа,  
соответствующего условиям задачи

	c2	c3	c6
m1	0	1	1
m2	1	1	1
m3	1	0	0

Допустимые решения задачи образует такой набор вершин, который является *трансверсалью* гиперграфа, то есть имеет непустое пересечение с каждым ребром. Из табл. 4. следует, что задача имеет единственное решение – вершину m2, что означает соответствие условиям задачи только инструментария экспертных систем.

Предлагаемый метод также позволяет обрабатывать ситуации, когда допустимое решение не найдено, либо не удовлетворяет дополнительным критериям, пропущенным при формализации условий.

Предположим, предварительный анализ показал, что входные данные являются квазистационарными, то есть характеристики их распределения имеют тенденцию к постепенному изменению. В этом случае матрица инцидентности подграфа решения примет следующий вид (табл. 5):

Таблица 5  
Матрица инцидентности подграфа,  
соответствующего условиям задачи

	c2	c3	c7
m1	0	1	1
m2	1	1	0
m3	1	0	1

Как видно из табл. 5, ни один из методов не обеспечивает выполнения всех условий задачи. Но при этом анализ матрицы инцидентности позволяет сформировать требования, обеспечивающие возможность использования того, или иного метода. Так, из анализа табл. 5. видно, что для использования деревьев

решений необходимо перейти от нечеткого представления данных к четкому. Для использования экспертных систем необходимо обеспечить стационарность данных в период работы системы (либо периодическую перенастройку её параметров). Для использования ИНС необходимо обеспечить доступ к большей выборке данных.

Отметим следующие ключевые компоненты рассматриваемого метода:

1. Определение общей структуры модулей системы, что определяет последовательность синтеза. Можно предложить такие варианты основных модулей: предварительный анализ данных, обработка данных, анализ данных, оптимизация вариантов.

2. Определение набора кластеров, входящих в модули. Решение этой задачи соответствует определению узловых точек в методе морфологического синтеза. Для ИСПР множество возможных кластеров сравнительно невелико и также может быть задано аналитически.

3. Формализация ограничений на сочетаемость элементов структуры. Рассмотренный метод обеспечивает возможность детализации условий, а также дополнения и уточнения базы методов «на лету». Например, вместо фигурирующего в рассмотренном выше примере метода «деревья решений» могут быть введены различные алгоритмы синтеза этих деревьев, отличающиеся возможностью решения задач регрессии. Новые методы будут наследовать все признаки предыдущих, за исключением ключевых отличий, что сокращает трудоемкость синтеза.

**Выводы.** Проведенный анализ характеристик процесса синтеза сложных систем, а также их логической и временной структуры позволил предложить и обосновать формализованный метод синтеза, основанный на использовании графового представления информации об элементах синтезируемой системы и возможных связях между ними. Особенности предложенного подхода является возможность учета бинарных запретов на сочетание элементов, а также гибкость получаемой структурной модели.

#### Список использованных источников:

1. Kemelmacher-Shlizerman I., Seitz S. M., Miller D., Brossard E. The MegaFace Benchmark: 1 Million Faces for Recognition at Scale. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://megaface.cs.washington.edu/KemelmacherMegaFaceCVPR16.pdf>.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П.Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.
3. Божко А.Н., Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью / А.Н. Божко, А.Ч. Толпаров // Электронное научно-техническое издание «Наука и Образование», 2004, № 5. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.metodolog.ru/00562/00562.html>.
4. Акимов С.В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза / С.В. Акимов // Доклады ТУСУР. – Томск, 2011. – № 2-2 (24), 2011. – С.204-211.

5. Минц А.Ю. Общие вопросы постановки задач в нейросетевом моделировании / А.Ю. Минц // Нейро-нечіткі технології моделювання в економіці, наук.-аналіт. журн. – Київ: КНЕУ, 2012. № 1. – 2012. С. 189-206.
6. Zwicky F., *Discovery, Invention, Research through the morphological approach*. McMillan, NY, 1969. – 276 p.
7. Акимов С.В. Два способа задания множества альтернатив при формализации задачи структурно-параметрического синтеза / С.В. Акимов // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: материалы VI межд. науч.-практ. конф. Ч. 1 / Новочеркасск, 2006, – С. 11–12.
8. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М. «Мир», 1984. – 454 с.

Mints O.Y.

## METHODS OF SYNTHESIS THE STRUCTURE OF INTELLECTUAL DECISION-MAKING SYSTEMS

The main approaches to the synthesis of complex information systems are structural, parametric and structural-parametric. At the same time, it is the structure that determines the main characteristics of the system. It's known formal, heuristic and combinatorial methods of structural synthesis. The most universal are combinatorial methods, which are considered in the article. The main method of combinatorial synthesis is the morphological method of F. Zwicky. But it have some disadvantages, like a necessity to analyze a large number of variants of the structure, most of which have not sense.

Based on the morphological method, in the article is proposed a method that allows considering the limitations on the compatibility of the elements of the structure. It grounded on the mathematical apparatus of multipartite hypergraphs. For each module of the structure is created a hypergraph, in which methods are vertices, and the conditions of the domain knowledge are edges. Proposed the way to choose methods that are best suited for solving problem in given conditions.

An example of synthesis the structure of intellectual decision-making system is considered in the article. A case when no one method does not satisfy all the conditions is described. Also considered the way of its solution, by choosing the weakest restriction.

The proposed method makes it possible to formalize the synthesis of the structure of intellectual decision-making systems and, at the same time, to provide flexibility in its correction if external conditions are changed.

**Keywords:** synthesis, structure, decision-making, intellectual system, multipartite graph, hypergraph, limited compatibility