

### 3.5. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Декатов Д.Е., к.т.н., доцент кафедры «Информационные системы в экономике»; Терелянский П.В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информационные системы в экономике»

Волгоградский государственный технический университет

В статье рассматривается комплексный подход к выбору инновационных решений из множества потенциально возможных на основе применения формальных критериев и математических методов теории принятия решений. Различные инновации, в частности, технические решения, могут быть описаны признаками, отражающими свойства, существенно влияющие на результаты их реализации. Рассматриваются критерии оригинальности и сходства с существующими прогрессивными аналогами, основанные на методах кластерного анализа и рассчитываемые на основе описания решений с помощью признаков. Представление множества возможных вариантов решений средствами морфологического метода позволяет рассчитать меры комбинационной и элементной новизны. С помощью данных критериев осуществляется формализованный анализ множества потенциальных решений и локализация варианта, представляющегося наилучшим с точки зрения разработки инновационного конкурентоспособного решения. Оценка конкурентоспособности полученного варианта решения осуществляется по критериям технико-экономической эффективности с помощью метода анализа иерархий. Описанные подходы нашли реализацию в задачах синтеза технических решений по вибрационным системам.

В настоящее время особое значение для обеспечения конкурентоспособности субъекта экономики играют инновации. К важным свойствам инноваций относятся научно-техническая новизна и производственная применимость. Инновации базируются на научных идеях, знаниях, изобретениях и разработках. Научно-технические инновации должны обладать новизной, удовлетворять рыночному спросу и приносить прибыль производителю [4]. Рассматриваемые методики ориентированы на формализацию процедур разработки инноваций и нашли применение в задачах синтеза технических решений для систем защиты от вибрации. Они предполагают применение математических мер для оценки новизны и близости решения к существующим аналогам, а также использование экспертных знаний для оценки его конкурентоспособности.

Существует ряд подходов [1], основывающихся на методах кластерного анализа, которые нашли распространение при проведении научных исследований в таких областях, как биология, экология, география, а также в сфере проектирования технических систем. Они предполагают выполнение классификационных построений для множеств изучаемых объектов, которые описываются списком существенных для научно-исследовательской задачи признаков, путем применения математических мер, в частности меры сходства и включения множеств. В частности, представляется возможным использование для задач синтеза решений метод систематизации объектов на базе меры включения множеств признаков, которыми представлены эти объекты, и метод идентификации объектов по классам на основе вычисления меры сходства ме-

жду исследуемыми объектами и объектами – эталонами, которыми задан класс. Дадим характеристику этих методов.

Пусть задано множество объектов:

$$S = \{S_i\}; i = 1, \dots, N,$$

где  $N$  – число элементов в множестве  $S$ .

Для описания объектов из  $S$  выделяется множество признаков:

$$F = \{f_j\}; j = 1, \dots, M,$$

где  $M$  – число элементов в множестве  $F$ .

В качестве основного требования к этому множеству выступает необходимость достаточно полного и однозначного описания каждого объекта  $S_i$ , который является элементом множества  $S$ . Таким образом, данное описание должно четко отразить общие и специфические свойства каждого элемента из  $S$ . Каждому объекту  $S_i$  ставится в соответствие вектор переменных:

$$X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{Mi}),$$

отражающих включение данным объектом признаков из множества  $F$ . Переменная  $x_{ji} \in \{0, 1\}$  принимает значение единица, если объект  $i$  включает признак  $j$ , и ноль – если не включает.

Данную модель описания множества объектов можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

#### ОБОБЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРИЗНАКАМИ

Признаки	Объекты				
	$S_1$	...	$S_i$	...	$S_N$
$f_1$	$x_{11}$	...	$x_{i1}$	...	$x_{N1}$
...	...	...	...	...	...
$f_j$	$x_{j1}$	...	$x_{ji}$	...	$x_{jN}$
...	...	...	...	...	...
$f_M$	$x_{M1}$	...	$x_{Mi}$	...	$x_{MN}$

Дадим характеристику задачи поиска оригинального объекта на основе меры включения. При сравнении двух объектов тот объект, у которого мера включения больше, считается более оригинальным, то есть его признаки в наименьшей степени включаются в другой объект, участвующий в сравнении. Он обладает большей спецификой. Объекты, обладающие сравнительно малой мерой включения по отношению к остальным объектам множества, обладают иной организацией, что может служить критерием наличия у них новых свойств. С другой стороны, объекты, обладающие сравнительно большой мерой включения, чаще соответствуют типовым решениям, которые могут быть полезны, в частности, в задачах производства товаров при минимальных затратах на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки, переналадку производства и т.д. Расчет меры включения, на основе вычисления которой решается задача поиска наиболее оригинального объекта из множества рассматриваемых, производится по формуле (1).

$$W(S_i, S_j) = \frac{\sum_{k=1}^M x_{ki} * x_{kj}}{\sum_{k=1}^M x_{ki}}, \tag{1}$$

где

$S_i$  и  $S_j$  – описания объектов по признакам;

$M$  – число признаков, составляющих эти описания;

$x_{ki}, x_{kj} \in \{0, 1\}$ , переменные, которые принимают значение единица, если  $i$ -й или  $j$ -й объект соответственно

включают признак из множества признаков  $F$ , которыми описываются все объекты, и ноль – если не включают.

Задача идентификации объектов по классам состоит в отнесении их к тому или иному классу систем по принципу большего числа общих признаков с объектами этого класса. Применительно к задачам анализа технических решений (ТР), идентификацию ТР, можно интерпретировать как отнесение полученного решения к группе устройств, функционирующих в определенных условиях, выпускаемых определенной фирмой, страной и т.д.

Расчет меры сходства между  $i$ -м объектом и множеством объектов-эталонов, на котором основана идентификация объектов по классам, производится по формуле (2):

$$C(S_i, H) = \frac{\sum_{l=1}^{N_H} S_l^H}{N_H} = 2 * \frac{\sum_{k=1}^M x_{ki} * x_{kl}}{\sum_{k=1}^M x_{ki} + \sum_{k=1}^M x_{kl}}, \quad (2)$$

где

$N_H$  – число объектов – эталонов  $S_l^H$ , составляющих множество  $H$ ;

$S_i$  и  $S_l^H$  – описания объектов по признакам;

$M$  – число признаков, составляющих эти описания;

$x_{ki}, x_{kl} \in \{0, 1\}$ , переменные, которые принимают значение единица, если  $S_i$  или  $S_l^H$  соответственно включают признак из множества  $F$ , которыми описываются анализируемые объекты и объекты эталоны, и ноль, если не включают.

Описанные выше методы помогают формальными средствами систематизировать значительные множества объектов.

С учетом изложенных методов рассмотрим подходы к синтезу инновационных технических решений, которые должны обладать высоким уровнем конкурентоспособности в заданном сегменте. В качестве первого этапа, реализующего данные подходы, предлагается формирование вариантов технических решений, которые представляются перспективными с точки зрения их последующего сравнения с конкурирующими техническими системами по технико-экономическим показателям. Множество таких вариантов может быть сгенерировано на основе метода морфологического синтеза [2].

Данный метод предполагает информацию об анализируемом классе объектов представлять в виде морфологической матрицы, столбцами которой являются варианты конструктивной реализации обобщенных функциональных подсистем, выделенных в процессе проведения конструктивно-функционального анализа систем данного класса. Для вариантов конструкций подсистем, представляемых в каждой строке морфологической матрицы, определяется множество конструктивных и функциональных признаков, достаточно полно и однозначно характеризующих каждый вариант ТР. Затем осуществляется построение формализованной модели морфологической матрицы, строкам которой ставится в соответствие множество признаков, характеризующих варианты реализации подсистем, а столбцам данной матрицы соответствует вектор включения решениями признаков, описывающих обобщенную функциональную подсистему. Морфологическая матрица содержит множество как уже реализованных, так и потенциально возможных решений. Каждое решение на морфологической матрице может быть получено путем выбора одного любого элемента

из каждой строки матрицы и последующим сочетанием этих элементов. Для широкого класса технических систем даже сравнительно небольшая матрица может содержать тысячи вариантов решений, что существенно затрудняет или делает невозможным их анализ с точки зрения показателей качества. Для решения данной проблемы предлагается методика выбора на морфологической матрице перспективных для последующего анализа вариантов ТР с использованием методов кластерного анализа и критериев новизны решения. Она предполагает поиск решений на морфологической матрице на основании четырех критериев: критерия комбинационной новизны, критерия элементной новизны, меры включения признаков составляющих описание анализируемого объекта во все остальные объекты класса и меры сходства описания анализируемого объекта и описания рациональных объектов – прототипов.

Дадим характеристику критериев комбинационной и элементной новизны ТР. Критерий комбинационной новизны определяет новизну для рассматриваемого класса объектов сочетаний функциональных подсистем, составляющих целостное устройство. Система обладает максимальной степенью комбинационной новизны, если ни один из составляющих ее элементов не состоит в комбинации с каким-либо другим элементом в рамках представленного в морфологической матрице множества решений. Соответственно, система не обладает комбинационной новизной, если все входящие в нее элементы составляют комбинацию, которая нашла реализацию в рамках анализируемого класса систем. Таким образом, степень комбинационной новизны определяет, насколько новыми являются сочетания, в которых участвует каждый элемент системы и какова, исходя из этого, общая новизна системы.

Элементная новизна определяет, сколько новых для данного класса систем задействовано в реализации функциональных подсистем в данной комбинации.

Дадим характеристику критериев, основанных на мере включения и мере сходства. Мера включения признаков рассматриваемой целостной конструкции в множество признаков остальных синтезированных конструкций характеризует степень ее оригинальности по отношению к другим вариантам. Минимальное значение ее отражает тот факт, что в рамках обобщенной функциональной структуры, данный объект обладает весьма специфической конструктивно-функциональной организацией, что является одним из важных условий его высоких потребительских качеств [3] и соответственно, конкурентоспособности. Мера сходства анализируемого ТР с объектами – прототипами, в качестве которых могут быть выбраны современные высокоэффективные системы, характеризует близость конструктивного исполнения и функций данного ТР к передовым образцам.

В соответствии с данной методикой предполагается построение двух обобщенных критериев перспективности ТР. Один из них основан на критериях комбинационной, элементной новизны и мере включения, а другой вместо меры включения предполагает расчет меры сходства с объектами прототипами. Для построения обобщенных критериев перспективности ТР, предлагаются целевые функции, структура которых должна включать коэффициент значимости (или весомости) каждого фактора, что позволяет лицу, принимающему решение, менять их значения, осуществлять

выбор различных подмножеств на исходном морфологическом множестве для более полной реализации своих субъективных.

Целевая функция, предполагающая использование меры включения признаков анализируемых вариантов решений, имеет вид:

$$d_w^*(\bar{X}_i) = \max_{\bar{X}_i \in E^n} ((1 - W(S_i, S)) * k_w + d_k(\bar{X}_i) * k_k + d_e(\bar{X}_i) * k_e),$$

где  $E^n$  – признаков размерностью  $n$ ;

$X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$  – вектор дискретных переменных, отражающих включение  $i$ -м решением признаков из множества  $F = \{f_1, \dots, f_j, \dots, f_n\}$ ,  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ ;

$M$  – число векторов описаний решений;

$d_w^*(\bar{X}_i)$  – максимальное значение степени перспективности, соответствующее вектору признаков  $X_i$ ;

$W(S_i, S)$  – мера включения признаков, составляющих описание решения  $S_i$  в описания всех решений  $S$ ;

$d_k(\bar{X}_i)$  и  $d_e(X_i)$  – степень комбинационной и элементной новизны соответственно;

$k_w, k_k, k_e$  – коэффициенты учета значимости фактора оригинальности конструктивно-функциональной реализации решения, комбинационной и элементной новизны соответственно.

Целевая функция, предполагающая использование меры сходства с прототипами по признакам анализируемых вариантов решений, имеет вид:

$$d_c^*(\bar{X}_i) = \max_{\bar{X}_i \in E^n} (C(S_i, H) * k_c + d_k(\bar{X}_i) * k_k + d_e(\bar{X}_i) * k_e), \quad (4)$$

где  $E^n$  – пространство признаков размерностью  $n$ ;

$X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$  – вектор дискретных переменных, отражающих включение  $i$ -м решением признаков из множества  $F = \{f_1, \dots, f_j, \dots, f_n\}$ ,  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ ;

$M$  – число векторов описаний решений;

$d_c^*(\bar{X}_i)$  – максимальное значение степени перспективности соответствующее вектору признаков  $X_i$ ;

$C(S_i, H)$  – мера сходства  $i$ -го решения с множеством прототипов  $H = \{\bar{X}_j^H\}$ ;

$d_k(\bar{X}_i)$  и  $d_e(\bar{X}_i)$  – степень комбинационной и элементной новизны соответственно;

$k_c, k_k, k_e$  – коэффициенты учета значимости фактора сходства с прототипами, комбинационной и элементной новизны соответственно.

Определение векторов описаний технических решений производится на этапе разработки морфологической матрицы. При этом каждой альтернативной реализации обобщенной подсистемы или альтернативе  $A_{s,p}$  ставится в соответствие вектор переменных  $X_{s,p}$ , отражающий включение данной альтернативой признаков из множества  $F_s \in F$ , характеризующего рассматриваемую обобщенную функциональную подсистему, где  $s = 1, \dots, N_s$  – номер строки,  $p$  – номер столбца,  $N_s$  – общее число строк в морфологической матрице.

Степень комбинационной новизны, численно характеризующая новые для представленного в морфологической матрице класса устройств сочетания, определяется по формуле:

$$d_k(\bar{X}_i) = 1 - 2 * \frac{\sum_{s=1}^{N-1} \sum_{p=s+1}^N k_{s_i, p_i}^{s,p}}{N * (N - 1)}, \quad (5)$$

где  $N$  – число строк в морфологической матрице;  $s_i$  и  $p_i$  – номера столбцов морфологической матрицы в строках  $s$  и  $p$  соответственно, альтернативы из которых вошли в  $i$ -е техническое решение;

$k_{s_i, p_i}^{s,p}$  – переменная, которая принимает значение единица, если альтернатива из строки  $s$  и столбца  $s_i$  образовывала комбинацию с альтернативой из строки  $p$  и столбца  $p_i$  в пределах рассматриваемого класса технических объектов, и ноль, если нет.

Степень элементной новизны, численно характеризующая новые для представленного в морфологической матрице класса объектов функциональные подсистемы, образующие целостную систему, определяется по формуле:

$$d_e(\bar{X}_i) = 1 - \sum_{s=1}^N e_{s, s_i}, \quad (6)$$

где  $s_i$  – номер столбца морфологической матрицы в строке  $s$ , альтернатива из которой вошла в  $i$ -е техническое решение;

$e_{s, s_i}$  – переменная, принимающая значение единица, если альтернатива из строки  $s$  и столбца  $s_i$  использовалась в пределах рассматриваемого класса технических объектов, и ноль – если нет.

Выражение  $1 - W(S_i, S)$  в целевой функции (3) имеет следующий смысл. Целью выбора в соответствии с описанным принципом является нахождение решения, обладающего максимальной степенью комбинационной и элементной новизны, а так же минимальной мерой включения. Ввиду того, что мера включения является величиной, лежащей в диапазоне  $[0, \dots, 1]$ , можно перейти от выражения  $W(TR_i, TR) \rightarrow \min$  к выражению  $(1 - W(TR_i, TR)) \rightarrow \max$ , что позволяет представить принцип поиска единой формулой.

Проводившиеся исследования, которые состояли в упорядочение множества  $TP$  по виброзащитным системам (ВЗС) в соответствии с мерой включения и мерой сходства позволили установить, что среди вариантов, которым соответствовали минимальные значения меры включения и максимальные значения меры сходства с современными ВЗС, были найдены решения с высокими технико-экономическими показателями. В результате последующего анализа решенных задач, позитивные свойства полученных устройств связывались именно с оригинальностью их конструктивной реализации, то есть наличием специфических признаков, отличающих их от множества других рассматриваемых конструкций, в одном случае, и близостью структуры данных ТР к структуре рациональных прототипов, в другом. Проведенные исследования, таким образом, подтвердили в значительной степени адекватность подходов к описанию и систематизации множеств объектов идее поиска структуры технической системы в соответствии с предлагаемыми критериями [3].

Исходя из конкретной модели проблемной ситуации, лицо, принимающее решение, может установить степень влияния описанных критериев, определяющих перспективность выделяемых на морфологической матрице решений, на содержание результирующего подмножества и определить конкретные значения коэффициентов учета их значимости непосредственно. При этом рекомендуется назначение весовых коэффициентов в соответствии со следующими правилами:

$$k_w + k_k + k_e = 1, k_w \geq 0, k_k \geq 0, k_e \geq 0;$$

$$k_c + k_k + k_e = 1, k_c \geq 0, k_k \geq 0, k_e \geq 0.$$

Таким образом, применение обобщенного критерия, заданного целевыми функциями (3) и (4) для морфологического множества потенциальных решений, можно рассматривать как процедуру формализованного анализа данного множества с целью получения информации о свойствах, характеризующих новизну и степень близости каждого его элемента к объектам рассматриваемого класса, а также локализовать вариант со свойствами, представляющимися лицу, принимающему решения, соответствующими инновационному конкурентоспособному решению.

Дадим характеристику основных этапов поиска перспективных решений на основе расчета меры включения.

**Этап 1**

На этом этапе проводится конструктивно-функциональный анализ ТР. Методика проведения такого анализа описана в источнике [2].

**Этап 2**

На этапе 2 осуществляется построение морфологической матрицы, строкам которой соответствуют обобщенные функциональные подсистемы, выделенные на этапе 1. Столбцам матрицы соответствуют альтернативные реализации обобщенных функциональных подсистем.

В строках морфологической матрицы целесообразно представлять современные варианты ТР, которые имеют широкое применение в соответствующих сферах.

Целесообразно также представлять в морфологической матрице элементы ТР, используемые для аналогичных задач, но относящиеся к другим классам. Особое внимание следует при этом уделять динамично развивающимся сферам (например, при анализе ВЗС локомотивов важным представляется рассмотрение ВЗС автомобилей). Также целесообразным представляется анализ описаний изобретений, не нашедших технической реализации на момент проведения данных исследований.

**Этап 3**

На данном этапе производится выделение признаков, позволяющих достаточно полно и однозначно отразить свойства представленных в морфологической матрице вариантов решений. Перечислим группы признаков, с помощью которых представляется возможным описание ТР:

- функциональные элементы;
- взаимное расположение функциональных элементов в пространстве;
- взаимосвязь элементов, характеризующих способ их совместного функционирования;
- геометрическая форма элементов;
- материал элементов;
- соотношения параметров, отражающее принципиально важные исчисляемые характеристики устройства или их соотношение.

Функциональные признаки, которые используются для описания вариантов реализаций подсистем, позволяют построить целостную модель описания структуры системы, они дополняют и уточняют конструктивное описание, позволяя отразить динамику функционирования устройства. В принципе, используемое на данном этапе функциональное описание является детализированным представлением функциональной структуры объекта, которое позволяет учесть качество

выполняемых системой функций и диапазоны значений, принципиально характеризующие способ функционирования устройства.

Выделенное множество признаков позволяет построить формализованную модель морфологической матрицы, которая содержит  $N$  строк. Каждая ее строка  $i$  может включать  $m_i$  признаков. Для каждого признака  $i$ -й строки  $f_{ij}$  в столбце, соответствующем альтернативной реализации подсистемы  $A_i$ , выставляется оценка его включения альтернативой  $A_{ij}$ :

- единица становится, если данный признак у подсистемы присутствует;
- ноль – если отсутствует.

Иллюстрация приведенного описания дана в табл. 2

**Таблица 2**

**ПРИМЕР ОПИСАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ**

Обобщенные функциональные подсистемы $A_i$	Признаки	Альтернативы $A_{ij}$			
		$0$ $A_{11}$	...	$1$ $A_{1j}$	...
$A_1$	$f_{11}$	$0$ $A_{11}$	...	$1$ $A_{1j}$	...
	...	...	...	...	...
	$f_{1m1}$	$1$	...	$1$	...
...	...	...	...	...	...
$A_N$	$f_{N1}$	$1$ $A_{N1}$	...	$0$ $A_{Nk}$	...
	...	...	...	...	...
	$f_{NmN}$	$0$	...	$1$	...

**Этап 4**

На этапе 4 определяется степень комбинационной и элементной новизны всех решений, которые представлены в морфологической матрице. Для определения степени комбинационной новизны каждого ТР строятся матрицы комбинационных связей альтернатив. Их построение ведется в соответствие со следующими принципами. Если задана морфологическая матрица, содержащая  $N$  строк, то для всех альтернатив  $A_{ij}$  строки  $i$  необходимо формально отразить комбинационные связи со всеми остальными альтернативами всех строк. Эту идею легко представить в виде схемы, приведенной в табл. 3.

**Таблица 3**

**ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ АЛЬТЕРНАТИВАМИ**

Альтернативы					
$A_{ij}$	$A_1$	...	$A_j$	...	$A_N$
$A_1$	-	...	+	...	+
...	...	...	...	...	...
$A_j$	-	...	+	...	+
...	...	...	...	...	...
$A_N$	-	...	-	...	-

На схеме, приведенной в табл. 3, плюсами обозначены взаимосвязи между строками морфологической матрицы, которые необходимо представить формальным образом, а минусами – отсутствие связи. Область связей строк лежит выше главной диагонали матрицы. Это объясняется их сущностью: когда какая-то альтернатива строки  $i$  участвует в комбинации с альтернативой строки  $j$ , то избыточным является представление того, что альтернатива строки  $j$  участвует в комбинации с альтернативой строки  $i$  ( $i < j$ ). Каждым двум сопоставляемым строкам морфологической матрицы  $A_i$  и  $A_j$  можно поставить в соответствие матрицу комбинационных связей:

$$K^{ij} = \{k_{lr}^{ij}\}, l = 1, \dots, n_i;$$

$$r = 1, \dots, n_j;$$

где

$n_i$  – число альтернатив в строке  $i$ ;

$n_j$  – соответственно, число альтернатив в строке  $j$ .

Число матриц

$$K = \{K^{ij}\}$$

может быть вычислено по формуле

$$N_k = N * (N - 1) / 2,$$

где  $N$  – число строк в морфологической матрице.

Для пояснения приведенных рассуждений возьмем небольшую морфологическую матрицу, с помощью которой можно проиллюстрировать процедуры поиска перспективных решений (табл. 4).

Таблица 4

**ПРИМЕР МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ**

Обобщенные функциональные подсистемы	Признаки	Альтернативы		
$A_1$	$f_{11}$	1 $A_{11}$	1 $A_{12}$	-
	$f_{12}$	0	1	-
$A_2$	$f_{21}$	1 $A_{21}$	1 $A_{22}$	-
	$f_{22}$	0	0	-
	$f_{23}$	1	0	-
$A_3$	$f_{31}$	0 $A_{31}$	1 $A_{32}$	1 $A_{33}$
	$f_{32}$	1	0	1

Для установления соответствия между альтернативой  $A_{ij}$  и  $A_{ab}$ , определяется значение элемента матрицы  $K_{jb}^{ia}$ , который равен единице, если данные альтернативы состояли в комбинации, и равен нулю, если нет. Для морфологической матрицы, приведенной в табл. 4, можно построить  $N_k = 3 * (3-1) / 2 = 3$  матриц комбинационных связей. Они представлены в табл. 5, 6, 7.

Таблица 5

**СВЯЗИ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ СТРОКИ МАТРИЦЫ**

Альтернативы первой и второй строки		
$A_{ij}$	$A_{21}$	$A_{22}$
$A_{11}$	1	1
$A_{12}$	0	0

Таблица 6

**СВЯЗИ ПЕРВОЙ И ТРЕТЬЕЙ СТРОКИ МАТРИЦЫ**

Альтернативы первой и третьей строки			
$A_{ij}$	$A_{31}$	$A_{32}$	$A_{33}$
$A_{11}$	1	1	0
$A_{12}$	0	0	0

Таблица 7

**СВЯЗИ ВТОРОЙ И ТРЕТЬЕЙ СТРОКИ МАТРИЦЫ**

Альтернативы второй и третьей строки			
$A_{ij}$	$A_{31}$	$A_{32}$	$A_{33}$
$A_{21}$	1	1	0
$A_{22}$	0	1	0

В табл. 5 отражен тот факт, что альтернатива  $A_{11}$  участвовала в комбинациях с альтернативами  $A_{21}$  и  $A_{22}$ , а  $A_{12}$  не участвовала ни в комбинациях с альтернативой  $A_{21}$ , ни с  $A_{22}$ .

Число комбинационных связей для решений, которые можно синтезировать на рассматриваемой морфологической матрице, рассчитывается следующим образом. Сначала требуется определить комбинационный состав каждого решения  $S_i$ . Применительно к

рассматриваемому примеру эта информация приводится в табл. 8.

Число комбинационных связей, которыми характеризуется альтернатива  $A_{11}$ , включаемая  $S_1 = A_{11}, A_{21}, A_{31}$ , определяется по формуле (7):

$$C^{S_1}(A_{11}) = C(A_{11}, A_{21}) + C(A_{11}, A_{31}), \quad (7)$$

здесь

$C(A_{11}, A_{21})$  и  $C(A_{11}, A_{31})$  – функции связи альтернатив, участвующих в комбинации;

$C^{S_1}(A_{11})$  – функция числа связей альтернативы  $A_{11}$  в рамках технического решения  $S_1$ .

Соответственно, число связей альтернативы  $A_{21}$  можно определить на основании следующего выражения:

$$C^{S_1}(A_{21}) = C(A_{21}, A_{31}). \quad (8)$$

Таблица 8

**СТРУКТУРА ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЙ**

Решение	Комбинация альтернатив, составляющая решение
$S_1$	$A_{11}, A_{21}, A_{31}$
$S_2$	$A_{11}, A_{21}, A_{32}$
$S_3$	$A_{11}, A_{21}, A_{33}$
$S_4$	$A_{11}, A_{22}, A_{31}$
$S_5$	$A_{11}, A_{22}, A_{32}$
$S_6$	$A_{11}, A_{22}, A_{33}$
$S_7$	$A_{12}, A_{21}, A_{31}$
$S_8$	$A_{12}, A_{21}, A_{32}$
$S_9$	$A_{12}, A_{21}, A_{33}$
$S_{10}$	$A_{12}, A_{22}, A_{31}$
$S_{11}$	$A_{12}, A_{22}, A_{32}$
$S_{12}$	$A_{12}, A_{22}, A_{33}$

Общее число комбинационных связей, которыми характеризуется техническое решение  $S_i$ , можно рассчитать следующим образом:

$$C^{S_i} = C^{S_i}(A_{11}) + C^{S_i}(A_{21}). \quad (9)$$

Представим теперь принцип расчета общего числа связей для  $S_i$  в виде общей формулы, компонентами которой будут элементы матриц  $K$ . При этом следует отметить, что подсчет числа комбинационных связей дает абсолютное значение внутренних связей в рамках целостного решения. Однако для последующего включения критерия комбинационной новизны в систему поиска перспективных решений предполагает использование относительного значения. Поэтому представляется целесообразным оперировать отношением числа фактических связей альтернатив к максимально возможному для структуры морфологической матрицы с числом строк  $N$ . Оно равно, так же как и число матриц,  $N * (N - 1) / 2$ .

Формула расчета относительного числа комбинационных связей для  $S_i$ , которому соответствует вектор описания  $\bar{X}_i$ , имеет следующий вид:

$$d_k'(\bar{X}_i) = 2 \cdot \frac{\sum_{s=1}^{N-1} \sum_{p=s+1}^N k_{s_i, p_i}^{s, p}}{N \cdot (N - 1)}, \quad (10)$$

где

$d_k'(\bar{X}_i)$  – относительное число комбинационных связей, соответствующее решению  $S_i$ ;

$N$  – число строк в морфологической матрице;

$s$  – строка матрицы, в которой расположена альтернатива, для которой ведется расчет комплекса связей;

$p$  – строки, в которых размещаются альтернативы, составляющие решение  $S_i$ , с которыми сопоставляется альтернатива из строки  $s$ ;

$s_i$  – номер столбца в морфологической матрице, соответствующего строке  $s$ , содержащаяся в котором альтернатива вошла в решение  $S_i$ ;

$p_i$  – индекс альтернативы в строке  $p$ , входящей в решение  $S_i$ , с которой сравнивается альтернатива из строки  $s$  и столбца  $s_i$ .

Следует отметить, что понятие «относительное число комбинационных связей» является противоположным понятию комбинационная новизна, так как величина  $d_k(X_i)$  учитывает число существующих внутренних связей в рамках целостного решения, а величина  $d_k(\bar{X}_i)$  должна учитывать число возможных свободных связей (несуществующих комбинационных связей из числа  $N * (N - 1) / 2$ . Таким образом, формально они связаны следующим соотношением:

$$d_k(\bar{X}_i) * N(N - 1) / 2 = N(N - 1) / 2 - d_k(X_i) * N(N - 1) / 2. \tag{11}$$

В данной формуле умножение величины  $d_k(X_i)$  и  $d_k(\bar{X}_i)$  на выражение  $N * (N - 1) / 2$  обусловлено необходимостью исчисления, применительно к данным рассуждениям, абсолютного числа связей и абсолютной степени новизны (возможного отсутствия связей). Преобразованное элементарным образом данное выражение может быть сведено к формуле (5).

Приведем таблицу значений относительного числа комбинационных связей для рассматриваемого примера (табл. 9).

Таблица 9

**ЧИСЛО КОМБИНАЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ**

Номер S	Суммируемые значения	Относительное число комбинационных связей
$S_1$	1 + 1 + 1	1
$S_2$	1 + 1 + 1	1
$S_3$	1 + 0 + 0	0,33
$S_4$	1 + 1 + 0	0,67
$S_5$	1 + 1 + 1	1
$S_6$	1 + 0 + 0	0,33
$S_7$	0 + 0 + 1	0,33
$S_8$	0 + 0 + 1	0,33
$S_9$	0 + 0 + 0	0
$S_{10}$	0 + 0 + 0	0
$S_{11}$	0 + 0 + 1	0,33
$S_{12}$	0 + 0 + 0	0

В графе «Суммируемые значения» табл. 9 представлен результат установления необходимых соответствий между альтернативами на множестве матриц  $K$ . Поясним это на примере. Для  $S_1 = A_{11}, A_{21}, A_{31}$  производились следующие операции. В матрице  $K^{11}$  (см. табл. 5) найден элемент на пересечении строки  $A_{11}$  и  $A_{21}$ . Он равен единице. Затем найден элемент матрицы  $K^{12}$  (см. табл. 6) на пересечении строки  $A_{11}$  и  $A_{31}$ . Его значение также равно единице. После этого в матрице  $K^{23}$  (см. табл. 7) определено значение, содержащееся на пересечении строки  $A_{21}$  и  $A_{31}$ . Оно также равно единице. Эти три значения и вошли в строку, соответствующую  $S_1$  табл. 9. Значение относительного числа комбинационных связей ( $d_k(X_i)$ ) получено делением суммы, содержащейся в столбце «Суммируемые значения», на число  $N * (N - 1) / 2$  (при  $N = 3$ ), то есть на три. Таким образом, в результате описанных действий построен вектор относительного числа комбинационных связей.

Рассмотрим процедуру определения элементной новизны синтезируемого решения. Каждой альтернативе

в морфологической матрице можно поставить в соответствие значение, характеризующие ее новизну для данного класса объектов. Представляется целесообразным представлять множество оценок новизны элементов в виде матрицы:

$$e = \{e_{ij}\},$$

где  $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  – число строк в морфологической матрице;

$j = 1, n_i$ , где  $n_i$  – число значений в строке  $i$ .

По структуре матрица  $e$  идентична морфологической матрице, элемент матрицы  $e_{ij} = 1$ , если подсистема в строке  $i$  и столбце  $j$  используется в исследуемом классе, и  $e_{ij} = 0$ , если нет. Приведем пример матрицы элементного состава класса  $S$  для рассматриваемой в предыдущих примерах морфологической матрицы (табл. 10).

Таблица 10

**ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТНОЙ НОВИЗНЫ**

Строки морфологической матрицы	Значения $e_{ij}$		
1	1 $A_{11}$	0 $A_{12}$	-
2	1 $A_{21}$	1 $A_{22}$	-
3	1 $A_{31}$	1 $A_{32}$	0 $A_{33}$

Из приведенной в табл. 10 матрицы видно, что новыми для данного класса являются альтернативы  $A_{12}$  (в строке 1 элемент, соответствующий столбцу 2, равен нулю) и  $A_{33}$  (строка 3, столбец 3,  $e_{33} = 0$ ). Остальные альтернативы не обладают элементной новизной. Максимальное число используемых в данном классе альтернатив, вошедшее в любую комбинацию  $S_i$ , равно  $N$  (для морфологической матрицы, включающей  $N$  строк). Для определения относительного числа ординарных (используемых для систем данного класса) элементов предполагается использовать следующую формулу:

$$d_e'(\bar{X}_i) = \sum_{s=1}^N e_{s,s_i}, \tag{12}$$

где

$d_e'(X_i)$  – относительная ординарность элементного состава комбинации  $S_i$ ,

$s$  – номер строки в матрице  $e$ ,

$s_i$  – номер столбца в строке  $s$ , соответствующего  $S_i$ .

Относительная ординарность является понятием, противоположным по смыслу понятию «элементная новизна». Они формально связаны соотношением:

$$N * d_e(\bar{X}_i) = N - N * d_e'(X_i). \tag{13}$$

Смысл этого выражения состоит в следующем: число новых элементов в комбинации равно разности общего числа элементов и числа ординарных, нашедших применение для систем данного класса элементов. Данная формула путем деления обеих ее частей на  $N$  сводится к выражению (6)

Значение степеней относительной элементной ординарности для рассматриваемого примера приведены в табл. 11.

Для первого технического решения степень относительной элементной ординарности рассчитывалась следующим образом:

$$d_e'(\bar{X}_1) = (e_{11} + e_{21} + e_{31}) / 3 = 3 / 3 = 1.$$

Окончательные результаты процедур, выполненных на этапе 4 (применительно к рассматриваемому примеру) представлены в табл. 12.

Таблица 11

ОРДИНАРНОСТЬ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЙ

Номер решения	Значение степеней относительной элементной ординарности
S <sub>1</sub>	1
S <sub>2</sub>	1
S <sub>3</sub>	0,67
S <sub>4</sub>	1
S <sub>5</sub>	1
S <sub>6</sub>	0,67
S <sub>7</sub>	0,67
S <sub>8</sub>	0,67
S <sub>9</sub>	0,33
S <sub>10</sub>	0,67
S <sub>11</sub>	0,67
S <sub>12</sub>	0,33

Таблица 12

СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ РЕШЕНИЙ

Номер S	Значение степени комбинационной новизны d <sub>k</sub> (X <sub>i</sub> )	Значение степени элементной новизны d <sub>e</sub> (X <sub>i</sub> )
S <sub>1</sub>	0	0
S <sub>2</sub>	0	0
S <sub>3</sub>	0,67	0,33
S <sub>4</sub>	0,33	0
S <sub>5</sub>	0	0
S <sub>6</sub>	0,67	0,33
S <sub>7</sub>	0,67	0,33
S <sub>8</sub>	0,67	0,33
S <sub>9</sub>	1	0,67
S <sub>10</sub>	1	0,33
S <sub>11</sub>	0,67	0,33
S <sub>12</sub>	1	0,67

Этап 5

На этапе 5 осуществляется расчет мер включения множества признаков, которыми описан каждый синтезированный на морфологической матрице вариант решения множества признаков, которыми описаны остальные варианты решений. Расчет ее ведется в соответствии с формулой (1). В общем случае предполагается синтез всех возможных комбинаций на морфологической матрице и построения для них матрицы мер включения. При этом описание каждой альтернативы с помощью признаков объединяется в процессе синтеза целостного решения с другим описанием альтернатив.

Таблица 13

ОПИСАНИЕ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЙ

Номер S	Комбинации альтернатив соответствующие S <sub>i</sub>	Описание решения по признакам
S <sub>1</sub>	A <sub>11</sub> A <sub>21</sub> A <sub>31</sub>	1 0 1 0 1 0 1
S <sub>2</sub>	A <sub>11</sub> A <sub>21</sub> A <sub>32</sub>	1 0 1 0 1 1 0
S <sub>3</sub>	A <sub>11</sub> A <sub>21</sub> A <sub>33</sub>	1 0 1 0 1 1 1
S <sub>4</sub>	A <sub>11</sub> A <sub>22</sub> A <sub>31</sub>	1 0 1 0 0 0 1
S <sub>5</sub>	A <sub>11</sub> A <sub>22</sub> A <sub>32</sub>	1 0 1 0 0 1 0
S <sub>6</sub>	A <sub>11</sub> A <sub>22</sub> A <sub>33</sub>	1 0 1 0 0 1 1
S <sub>7</sub>	A <sub>12</sub> A <sub>21</sub> A <sub>31</sub>	1 1 1 0 1 0 1
S <sub>8</sub>	A <sub>12</sub> A <sub>21</sub> A <sub>32</sub>	1 1 1 0 1 1 0
S <sub>9</sub>	A <sub>12</sub> A <sub>21</sub> A <sub>33</sub>	1 1 1 0 1 1 1
S <sub>10</sub>	A <sub>12</sub> A <sub>22</sub> A <sub>31</sub>	1 1 1 0 0 0 1
S <sub>11</sub>	A <sub>12</sub> A <sub>22</sub> A <sub>32</sub>	1 1 1 0 0 1 0
S <sub>12</sub>	A <sub>12</sub> A <sub>22</sub> A <sub>33</sub>	1 1 1 0 0 1 1

Объединенный список признаков рассматривается как единое целое. Приведем пример синтеза множества решений на базе морфологической матрицы, представленной в табл. 4 (табл. 13).

Поясним принципы построения матрицы мер включения на примере. Значение меры включения для S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub>, а также S<sub>2</sub> и S<sub>1</sub> вычисляются следующим образом:

$$W(S_1, S_2) = (1 * 1 + 0 * 0 + 1 * 1 + 0 * 0 + 1 * 1 + 0 * 1 + 1 * 0) / (1 + 0 + 1 + 0 + 0 + 1) = 3 / 4 = 0,75;$$

$$W(S_2, S_1) = (1 * 1 + 0 * 0 + 1 * 1 + 0 * 0 + 1 * 1 + 0 * 1 + 1 * 0) / (1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 1 + 0) = 0,75.$$

Расчет значений матрицы W(S<sub>i</sub>, S<sub>j</sub>) не производится, так как, согласно свойствам элементов матрицы мер включения W(S<sub>i</sub>, S<sub>j</sub>) = 1.

Матрица мер включения для рассматриваемого примера приводится в табл. 14.

Таблица 14

ЗНАЧЕНИЯ МЕР ВКЛЮЧЕНИЯ

Анализируемые решения												
S <sub>ij</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>
S <sub>1</sub>	1	0,75	1	0,75	0,5	0,75	1	0,75	1	0,75	0,5	0,75
S <sub>2</sub>	0,75	1	1	0,5	0,75	0,75	0,75	1	1	0,5	0,75	0,75
S <sub>3</sub>	0,8	0,8	1	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	0,6	0,6	0,8
S <sub>4</sub>	1	0,67	1	1	0,67	1	1	0,67	1	1	0,67	1
S <sub>5</sub>	0,67	1	1	0,67	1	0,67	1	1	0,67	1	1	1
S <sub>6</sub>	0,75	0,75	1	0,75	0,75	1	0,75	0,75	1	0,75	0,75	1
S <sub>7</sub>	0,8	0,6	0,8	0,6	0,4	0,6	1	0,8	1	0,8	0,6	0,8
S <sub>8</sub>	0,6	0,8	0,8	0,4	0,6	0,6	0,8	1	1	0,6	0,8	0,8
S <sub>9</sub>	0,67	0,67	0,83	0,5	0,5	0,67	0,83	0,83	1	0,67	0,67	0,83
S <sub>10</sub>	0,75	0,5	0,75	0,75	0,5	0,75	1	0,75	1	1	0,75	1
S <sub>11</sub>	0,5	0,75	0,75	0,5	0,75	0,75	0,75	1	1	0,75	1	1
S <sub>12</sub>	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	0,8	0,8	1

После построения матрицы мер включения осуществляется расчет значений мер включения признаков каждого объекта S<sub>i</sub> в множество признаков всех синтезированных решений:

$$\{W(S_i, S_j), i=1, \dots, N,$$

где i – номер технического решения;  
N – число технических решений, синтезированных на морфологической матрице;

S = {S<sub>j</sub>} – множество всех решений.

Расчет производится по следующей формуле:

$$W(S_i, S) = \frac{\sum_{j=1}^N W(S_i, S_j)}{N}. \tag{14}$$

Таблица 15

МЕРЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕШЕНИЙ

Номер решения	Значение $\sum_{j=1}^N W(S_i, S_j)$	Значение W(S <sub>i</sub> , S)
S <sub>1</sub>	9,5	0,791
S <sub>2</sub>	9,5	0,791
S <sub>3</sub>	9,2	0,767
S <sub>4</sub>	10,68	0,890
S <sub>5</sub>	10,68	0,890
S <sub>6</sub>	10	0,832
S <sub>7</sub>	8,8	0,732
S <sub>8</sub>	8,8	0,732
S <sub>9</sub>	8,67	0,722
S <sub>10</sub>	9,5	0,791
S <sub>11</sub>	9,5	0,791
S <sub>12</sub>	9,2	0,767

Результаты расчета значений  $W(S_i, S)$  для рассматриваемого примера приведены в табл. 15.

**Этап 6**

На данном этапе производится расчет степени перспективности синтезированных на морфологической матрице решений. Из них для дальнейшего анализа выбираются те решения, для которых эта степень наибольшая. Расчет ведется в соответствии с целевой функцией (3). Для формального построения этой функции требуется определение значений коэффициентов  $k_w, k_k, k_e$ . В принципе, для учета весомости факторов, представленных в целевых функциях (3) и (4), лицо, принимающее решение, может использовать различные системы сравнительной их оценки [2].

Поясним процедуру расчета перспективности решения на примере. Все факторы будем рассматривать как одинаково предпочтительные, соответственно значения коэффициентов весомости будут следующие:

$$k_w = k_k = k_e = 0,333.$$

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 16.

Таблица 16

**ЗНАЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ**

Номер $S$	$W(S_i, S)$	$d_k(X_i)$	$d_e(X_i)$	Значение степени перспективности $d_w(X_i)$
$S_1$	0,791	0	0	0,070
$S_2$	0,791	0	0	0,070
$S_3$	0,767	0,67	0,33	0,410
$S_4$	0,890	0,33	0	0,147
$S_5$	0,890	0	0	0,037
$S_6$	0,832	0,67	0,33	0,389
$S_7$	0,732	0,67	0,33	0,422
$S_8$	0,732	0,67	0,33	0,422
$S_9$	0,722	1	0,67	0,649
$S_{10}$	0,791	1	0,33	0,512
$S_{11}$	0,791	0,67	0,33	0,402
$S_{12}$	0,767	1	0,67	0,634

Для примера покажем, как производится расчет степени перспективности  $S_1, S_2$  и  $S_3$ :

$$d_w(X_1) = (1 - 0,791) * 0,333 + 0 * 0,33 + 0 * 0,33 = 0,07;$$

$$d_w(X_2) = (1 - 0,791) * 0,333 + 0 * 0,333 + 0 * 0,333 = 0,07;$$

$$d_w(X_3) = (1 - 0,767) * 0,333 + 0,67 * 0,333 + 0,33 * 0,333 = 0,410.$$

Как видно из представленных в табл. 16 результатов расчетов, наиболее перспективным представляется решение  $S_9$  ( $d_w(\bar{X}_9) = 0,649$ ), а наименее  $S_5$  ( $d_w(\bar{X}_5) = 0,037$ ). Если требуется отобрать для дальнейшего анализа и оценки, например, три наиболее перспективных решения, то будут выбраны следующие:

$$S_9, S_{12} \text{ и } S_{10} \text{ (поскольку } d_w(\bar{X}_9) = 0,649, d_w(\bar{X}_{12}) = 0,634 \text{ и } d_w(\bar{X}_{10}) = 0,512).$$

Развитием методики поиска перспективных решений на основе расчета меры включения является методика синтеза решений на основе критерия сходства с прототипами. Методика предполагает проведение конструктивно-функционального анализа систем рассматриваемого класса, построение морфологической матрицы (дающей систематизированное представление о суще-

ствующих и возможных решениях в данной области), построение формализованной модели морфологической матрицы (содержащей описание вариантов решений), подготовку данных (требуемых для расчета комбинационной и элементной новизны) и их анализ.

В предлагаемой ниже методике этапы с первого по четвертый соответствуют первым четырем этапам методики поиска перспективных решений на основе расчета меры включения, описанной выше. Различия являются в изменении расчетов на этапе 5а.

**Этап 5а. Методики синтеза решений на основе критерия сходства с прототипами**

На этапе 5а осуществляется выбор и подготовка описаний объектов-прототипов, по критерию сходства с которыми, будет осуществляться синтез перспективных вариантов решений. В рамках данной методики можно предложить ряд рекомендаций по выбору прототипов.

1. Представляется целесообразным выбирать в качестве объектов-прототипов современные системы, используемые для решения задач, соответствующих рассматриваемой и имеющие функциональную структуру соответствующую функциональной структуре, определенной в процессе реализации этапов методики и на которой базируются проведенные на этапах 2 и 3 морфологические построения.
2. Допускается выбор прототипов, обладающих высокими показателями, относимыми к различным группам показателей качества (например, только функциональным, технологическим, экономическим и т.д.). Это обусловлено тем, что в результате синтеза множества перспективных решений некоторое подмножество решений включает в описание комбинацию признаков, составляющих описание нескольких или всех объектов-прототипов.
3. В принципе, число объектов-прототипов может быть любым. Естественным ограничением здесь является их признаковый состав. Если в множестве объектов-прототипов будут представлены все признаки во всех комбинациях из множества  $F$ , то степень сходства каждого  $S$  с множеством  $H$  будет равна  $1/N_s$ . На основе экспериментов был определен рекомендуемый диапазон числа объектов-прототипов – от одного до трех [3].

Для пояснения расчетных операций, реализуемых на этапах предлагаемой методики, будем использовать небольшую морфологическую матрицу, приведенную в табл. 4. Описание выбранных объектов-прототипов по конструктивно-функциональным признакам приведено в табл. 17.

Таблица 17

**ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ-ПРОТОТИПОВ**

Прототипы	Признаки						
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$S_1^H$	1	1	0	1	1	0	1
$S_2^H$	0	1	0	0	1	1	1

Результаты расчета мер сходства между синтезированными на морфологической матрице вариантами решений и объектами множества  $H$  приведены в табл. 18.

Таблица 18

**МЕРЫ СХОДСТВА С ПРОТОТИПАМИ**

Номер решения	$C(S_i, S_1^H)$	$C(S_i, S_2^H)$	$C(S_i, H)$
$S_1$	0,67	0,50	0,59
$S_2$	0,44	0,50	0,47
$S_3$	0,60	0,67	0,64
$S_4$	0,50	0,29	0,40
$S_5$	0,25	0,29	0,27
$S_6$	0,44	0,50	0,47



Номер решения	$C(S_i, S_1^H)$	$C(S_i, S_2^H)$	$C(S_i, H)$
$S_7$	0,80	0,67	0,74
$S_8$	0,60	0,67	0,64
$S_9$	0,73	0,80	0,77
$S_{10}$	0,67	0,50	0,59
$S_{11}$	0,22	0,50	0,36
$S_{12}$	0,60	0,67	0,64

Поясним схему расчета мер сходства на примере определения значений  $C(S_1, H)$  и  $C(S_2, H)$ :

$$C(S_1, S_1^H) = (1 * 1 + 0 * 1 + 1 * 0 + 0 * 1 + 1 * 1 + 0 * 0 + 1 * 1) * 2 / ((1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0 + 1) + (1 + 1 + 0 + 1 + 1 + 0 + 1)) = 6 / 9 \approx 0,67;$$

$$C(S_1, S_2^H) = (1 * 1 + 0 * 1 + 1 * 0 + 0 * 0 + 1 * 1 + 0 * 1 + 1 * 1) * 2 / ((1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0 + 1) + (0 + 1 + 0 + 0 + 1 + 1 + 1)) = 4 / 8 = 0,5.$$

$$C(S_1, H) = (C(S_1, S_1^H) + C(S_1, S_2^H)) / 2 = (0,67 + 0,5) / 2 \approx 0,59;$$

$$C(S_2, S_1^H) = (1 * 1 + 0 * 1 + 1 * 0 + 0 * 1 + 1 * 1 + 1 * 0 + 0 * 1) * 2 / ((1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 1 + 0) + (1 + 1 + 0 + 1 + 1 + 0 + 1)) = 4 / 9 \approx 0,44;$$

$$C(S_2, S_2^H) = (1 * 0 + 0 * 1 + 1 * 0 + 0 * 0 + 1 * 1 + 1 * 1 + 0 * 1) * 2 / ((1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 1 + 0) + (0 + 1 + 0 + 0 + 1 + 1 + 1)) = 4 / 8 = 0,5;$$

$$C(S_2, H) = (0,44 + 0,5) / 2 \approx 0,47.$$

После расчетов мер сходства с прототипами  $C(S_i, H)$ , производится расчет степени перспективности решений в соответствии с целевой функцией (4). Применительно к рассматриваемому примеру результаты расчетов приведены в табл. 19. Значения коэффициентов  $K_k, K_e, K_c$  приняты равными 0,333.

Поясним на примере процедуру расчета степени перспективности для  $S_1, S_2, S_3$ :

$$d_c(X_1) = 0 * 0,333 + 0 * 0,333 + 0,59 * 0,333 = 0,196;$$

$$d_c(X_2) = 0 * 0,333 + 0 * 0,333 + 0,47 * 0,333 = 0,157;$$

$$d_c(X_3) = 0,67 * 0,333 + 0 * 0,333 + 0,59 * 0,333 = 0,196.$$

Таблица 19

**ЗНАЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ**

Номер S	$C(TPi, TP)$	$d_k(\bar{X}_i)$	$d_e(\bar{X}_i)$	Значение степени перспективности S $d_c(\bar{X}_i)$
$S_1$	0,59	0	0	0,196
$S_2$	0,47	0	0	0,157
$S_3$	0,64	0,67	0,33	0,546
$S_4$	0,4	0,33	0	0,243
$S_5$	0,27	0	0	0,08
$S_6$	0,47	0,67	0,33	0,49
$S_7$	0,74	0,67	0,33	0,579
$S_8$	0,64	0,67	0,33	0,546
$S_9$	0,77	1	0,67	0,813
$S_{10}$	0,59	1	0,33	0,639
$S_{11}$	0,36	0,67	0,33	0,453
$S_{12}$	0,64	1	0,67	0,769

В том случае, если для дальнейшего анализа и оценки требуется выбрать три наиболее перспективных решения, то будут выбраны следующие:

$$S_9 (d_c(\bar{X}_9) = 0,813);$$

$$S_{12} (d_c(\bar{X}_{12}) = 0,769);$$

$$S_{10} (d_c(\bar{X}_{10}) = 0,639).$$

На этапе 2 осуществлялась оценка конкурентоспособности полученных решений, для чего было проведено их сравнение с системами, имеющими близкие

техническо-экономические характеристики с помощью метода анализа иерархий. В результате такого исследования было установлено, что синтезированные на первом этапе ВЗС по обобщенному показателю качества превосходят существующие аналоги.

Для оценки конкурентоспособности полученных на предыдущих стадиях вариантов решений используется метод анализа иерархий Т. Саати [7], ориентированный на организацию обоснованного выбора подмножества решений из заданного множества и предусматривает оценивание всех элементов исходного множества по каким-либо критериям. Применительно к задаче комплексной оценки инновационного решения в качестве таких критериев выступают показатели назначения, надежности, технологичности, эргономичности, безопасности [5], и т.д. Данный метод предусматривает наличие системы оценки множества альтернативных вариантов решений, строящейся на базе множества показателей качества и имеющей иерархическую структуру.

Подход, лежащий в основе метода принятия решений на иерархии, в сущности сводится к получению обобщенной оценки всех альтернатив с точки зрения цели выбора, на основании оценок множества возможных вариантов по множеству достаточных конкретных показателей качества технических систем. При этом для получения оценок альтернатив по показателям качества используется метод экспертного оценивания на основе парного сравнения альтернатив. Оценивание, как правило, ведется по девятибалльной шкале (табл. 20). Данный метод также позволяет реализовать принцип учета весомости (значимости) показателей.

Таблица 20

**ШКАЛА ОТНОШЕНИЙ ПРЕДПОЧТЕНИЯ**

Численная оценка предпочтений	Лингвистическая оценка предпочтений	Пояснения
1	Одинаково предпочтительны	Два объекта дают равный вклад в цель
3	Слабая предпочтительность	Опыт и оценки слегка в пользу одного из сравниваемых объектов
5	Сильная предпочтительность	Опыт и оценки существенно в пользу одного объекта перед другим
7	Очень сильная предпочтительность	Один объект очень сильно предпочтительнее. Это доминирование подтверждает практика
9	Абсолютная предпочтительность	Очевидна высшая степень предпочтения
2, 4, 6, 8	Промежуточные оценки	Когда необходим компромисс между суждениями

В процессе принятия решения по методу анализа иерархий можно выделить следующие основные стадии. На первой стадии производится определение множества показателей качества, характеризующих исследуемое множество технических объектов и построение схемы, отражающей структуру системы оценки технических решений. На второй стадии – проведение оценки альтернатив по показателям качества, с которыми они непосредственно связаны и оценка весомости показателей на всех уровнях иерархии методом экспертных оценок на основании парного сравнения объектов. Результаты такого оценивания представляются в виде матриц экспертных оценок. На третьей стадии осуществ-

вляется осуществление вычисления вектора оценок альтернатив для всех показателей на каждом уровне иерархии на основе матриц экспертных оценок альтернатив и матриц парного сравнения показателей. Вектор оценок альтернатив относительно нечеткой цели выбора позволяет выбрать подмножество рациональных вариантов решений из множества возможных.

Принципиальную схему оценки альтернатив по множеству показателей можно представить в виде схемы, которая приведена на рис. 1.

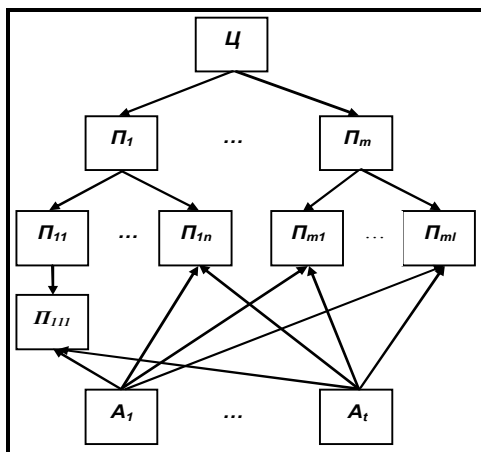


Рис. 1. Иерархическая структура оценки альтернатив

В данной схеме приняты следующие обозначения:

**Ц** – цель, реализуемая посредством применения метода принятия решений;

**П<sub>11</sub>, П<sub>1n</sub>, П<sub>111</sub>, П<sub>m</sub>, П<sub>m1</sub>, П<sub>ml</sub>** – показатели, по которым производится оценка;

**П<sub>1</sub>, П<sub>m</sub>** – показатели, конкретизирующие цель выбора;

**П<sub>11</sub>, П<sub>1n</sub>** – показатели, конкретизирующие показатель **П<sub>1</sub>**;

**П<sub>111</sub>** – показатель, конкретизирующий показатель **П<sub>11</sub>**;

**П<sub>m1</sub> и П<sub>ml</sub>** – показатели, конкретизирующие **П<sub>m</sub>**;

**n** – число показателей, конкретизирующих показатель **П<sub>1</sub>**;

**m** – число показателей, конкретизирующих цель выбора;

**l** – число показателей, конкретизирующих показатель **П<sub>m</sub>**;

**t** – размерность множества альтернатив.

Данная структура показателей имеет четыре уровня иерархии, причем показатели на более высоких уровнях отражают более общие свойства исследуемого множества технических решений и конкретизируются показателями более низких уровней иерархии. Система показателей включает связи «общий показатель – конкретный показатель». Помимо этого, на схеме представлены связи «альтернатива – показатель», отражающие состав множества показателей, обладающих достаточной степенью конкретности, для того, чтобы по ним велась непосредственная оценка альтернатив.

Рассмотрим задачи, решаемые на второй стадии. Одной из них является задача построения матриц оценок альтернатив по множеству показателей. Ее можно представить следующим образом. Пусть:

**A = {A<sub>i</sub>}** – множество альтернатив,

**Π<sup>A</sup> = {Π<sub>j</sub><sup>A</sup>}** – множество показателей, которые, с точки зрения системы оценки технических решений, непосредственно связаны с альтернативами из множества **A**.

Для каждого показателя **Π<sub>j</sub><sup>A</sup>** строится квадратная матрица:

$$A^{(j)} = \{a_{ik}\}; i = 1, q^A; k = 1, q^A,$$

где

**q<sup>A</sup>** – размерность множества альтернатив, наименования строк и столбцов которой соответствуют альтернативам из множества **A**;

**a<sub>ik</sub>** – оценка, данная экспертом, определяющая степень предпочтения альтернативы **A<sub>i</sub>** перед альтернативой **A<sub>k</sub>**.

Если представить шкалу отношений в виде дискретного множества:

$$B = \{b_j\} \in \{1, \dots, 9\},$$

то

$$a_{ik} = b_l$$

или

$$a_{ik} = 1/b_l,$$

соответственно, если альтернатива **A<sub>i</sub>** предпочтительнее **A<sub>k</sub>**, и наоборот. При этом соблюдается принцип однородности суждений, который отражается формулой:

$$a_{ik} = 1 / a_{ki}.$$

Другой задачей является построение матриц оценок для множества показателей **{Π<sub>ij</sub>}**, конкретизирующих показатель **Π<sub>i</sub>**. При этом строятся матрицы для множества показателей:

$$Π = \{Π_l / Π^A\}, l = 1, q^Π,$$

где **q<sup>Π</sup>** – общее число показателей.

На третьей стадии осуществляется построение вектора оценок альтернатив, соответствующих цели выбора. Методика выбора рационального технического решения предусматривает применение на данной стадии алгоритма вычисления вектора приоритетов для матриц парного сравнения альтернатив, который в принципе базируется на теореме существования и единственности для неотрицательных неприводимых матриц. Вычисление производится по формуле (8).

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{A^k * e}{e^T * A^k * e} = c * w_c, \tag{15}$$

где

$$e = \{1, 1, 1, \dots, 1\}^T;$$

**k = 1, 2, 3, ...** – показатели степени;

**c** – константа, равная единице.

Вычисление проводится до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность:

$$e^T |w_c^{(l)} - w_c^{(l+1)}| \leq \xi, \tag{16}$$

где

**l** – номер итерации, такой, что **l = 1** соответствует **k = 1**; **l = 2 – k = 2**; **l = 3 – k = 3** и т.д.;

**ξ = 0,001** – допустимая погрешность суммы элементов вектора приоритетов.

В рамках данной стадии можно выделить следующие основные процедуры.

1. Процедура вычисления вектора приоритетов:

$$W^A = \{w_i^A\}, i = 1, q^A$$

для матриц оценок альтернатив **A** по показателям из множества **Π<sup>A</sup>**.

2. Процедура вычисления векторов приоритетов:

$$W^Π = \{w_i^Π\}, i = 1, q^Π$$

для матриц оценок показателей.

3. Процедура вычисления векторов приоритетов  $W_A^{Pk}$  оценки альтернатив по показателям для всех уровней иерархии структуры. Расчет ведется в соответствии со следующей формулой:

$$W_A^{Pk} = [W_A^{Pk-1}] * W^{Pk}, \quad (17)$$

где  $W^{Pk}$  – вектор приоритетов, соответствующий матрице парных сравнений показателей  $\{P_{kj}\}$ , конкретизирующих показатель  $P_k$ .

Выражение  $[W_A^{Pk-1}]$  соответствует матрице, столбцами которой являются векторы приоритетов альтернатив, рассчитанные относительно показателей уровня иерархии  $k - 1$ . Данная процедура выполняется для всех уровней иерархии, начиная с нижнего и до самого высшего.

4. Процедура выбора из множества альтернатив подмножества, которому соответствуют максимальные значения вектора:

$$W_A^U = \{W_{Ai}^U\},$$

соответствующего высшему уровню иерархии-цели выбора  $U$ .

На первой стадии было произведено углубленное исследование общей задачи синтеза конкурентоспособной системы виброзащиты человека – оператора локомотива. Затем были разработаны морфологические матрицы, на базе которых производился поиск перспективных решений. Подготовка информации о структуре матрицы опиралась на результаты системных исследований класса виброзащитных систем [3]. Среди решений, синтезированных с использованием целевой функции (3), наивысший приоритет получила пневматическая виброзащитная система комбинированного типа. Среди решений, синтезированных с использованием целевой функции (4), была выбрана пневматическая виброзащитная система с частотно-зависимым сопротивлением. Для повышения эффективности реализации рассматриваемой комплексной методики была разработана программная система [6], позволяющая осуществить в диалоговом режиме процесс принятия решений на иерархическом множестве показателей.

*Декатов Дмитрий Евгеньевич*

*Терелянский Павел Васильевич*

## Литература

1. Андреев В.Л. Классификационные построения в экологии и систематике [Текст] / В.Л. Андреев. – М. : Наука, 1980. – 142 с.
2. Андрейчиков А.В. / Анализ, синтез, планирование решений в экономике [Текст] / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2000. – 368 с.
3. Декатов Д.Е. и др. Модели и средства концептуального проектирования виброзащитных систем [Текст] : монография / Андрейчиков А.В., Декатов Д.Е., Кузнецов С.Ю., Егорова И.Е. – Волгоград : Волгоград. гос. техн. ун-т, 2004. – 144 с.
4. Инновационный менеджмент [Текст] : учеб. / под ред. С.Д. Ильенковой. – М. : Юнити, 1997. – 118 с.
5. Инновационный менеджмент [Текст] : учеб. пособие / под ред. Л.Н. Оголевой – М. : ИНФРА-М, 2001. – 238 с.
6. Терелянский П.В. Информационные технологии прогнозирования технических решений на основе нечетких и иерархических моделей [Текст] : монография / П.В. Терелянский, А.В. Андрейчиков. – Волгоград : ВолгГТУ, 2007. – 204 с.

7. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process/ T. L. Saaty. – Mc.Graw-Hill, 1980. – 267 p.

## Ключевые слова

Инновационное решение; конкурентоспособность; кластерный анализ; синтез; принятие решения.

## РЕЦЕНЗИЯ

Статья посвящена рассмотрению методики выбора инновационных решений с использованием формальных критериев, отражающих новизну рассматриваемых вариантов, а также степень их близости к существующим в исследуемой области решениям. Основой представления всех возможных вариантов решений служит морфологическая матрица. Положительной чертой данной методики является то, что в процессе поиска наилучшего перебирается значительное множество вариантов решений. Окончательная оценка качества решения производится с помощью метода анализа иерархий, позволяющего организовать его многоуровневую экспертную оценку. Проведенные исследования представляются актуальными вследствие актуальности проблемы реализации комплексных подходов, основанных на математических методах и автоматизированных информационных технологиях, к созданию инноваций. Предложенная методика в целом обладает научной новизной. Практическая ценность разработок нашла подтверждение при решении задач поиска инновационных технических решений для создания систем защиты человека от вибрации на транспорте. Представляется целесообразным опубликование данной работы.

*Лукьянов В.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электронно-вычислительные машины и системы» Волгоградского государственного технического университета*

## 3.5. FORMALIZATION OF PROCEDURES OF THE ANALYSIS AND ESTIMATION OF INNOVATIVE DECISIONS ON THE BASIS OF MATHEMATICAL METHODS

D.E. Dekatov, Candidate of Science (Technical), the Senior Lecturer «Information Systems in Economy»; P.V. Tereliansky, Candidate of Science (Technical), the Senior Lecturer Managing Chair «Information Systems in Economy»

*Volgograd State Technical University*

In article is considered the complex approach for a choice of innovative decisions (from set potentially possible) on the basis of application of formal criteria and mathematical methods of the decision-making theory. Various innovations, in particular, technical decisions, can be described the signs as reflecting properties, their realizations essentially influencing results. Criteria of originality and similarity to the existing progressive analogues, based on methods cluster analysis and counted on the basis of the description of decisions by means of signs are considered. Representation of set of possible variants of decisions by means of a morphological method allows to calculate measures of combinational and element novelty. By means of the given criteria the formalized analysis of set of potential decisions and localization of a variant represented by the best, from the point of view of working out of the innovative competitive decision is carried out. The estimation of competitiveness of the received variant of the decision is carried out by criteria technical and economic efficiency by means of the analytic hierarchy processes. The described approaches have found realization in problems of synthesis of technical decisions on protection-against-vibration systems.

**Literature**

1. V.L. Andreev. Classified Construction in Ecology and Systematization. M.: Nauka, 1980. – 142 p.
2. A.V. Andrejchikov. The Analysis, Synthesis, Planning of Decisions in Economics / A.V. Andrejchikov, O.N. Andrejchikova. – M.: Finansi i statistica, 2000. – 368 p.
3. D.E. Dekatov. , etc. Models and Means of Conceptual Designing Systems for Protection Against Vibration: the Monograph / A.V. Andrejchikov, D.E. Dekatov, S.U. Kuznetsov, I.E. Egorova. – Volgograd : Volgograd State Technical University, 2004. – 144 p.
4. Innovative Management. The Textbook / edited by. S.D. Ilenkova. – M.: Uniti, 1997. – 118 p.
5. Innovative Management: The Manual / edited by L.N.Ogoleva – M.: INFRA-M, 2001. – 238 p.
6. T.L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process/T.L. Saaty. – Mc.Graw-Hill, 1980. – 267p.
7. P.V. Tereliansky, The Information Technologies of the Prognostication of the Technical Solutions on the Basis of the Fuzzy Sets and Hierarchical Models: the Monograph / P.V. Tereliansky, A.V. Andreychikov. – Volgograd: VSTU, 2007. – 204 p.

**Keywords**

Innovative decision; competitiveness; cluster analysis, synthesis; decision-making.