**УДК 519.714.3**

# КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Алексеев Александр Олегович**

К.э.н., доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: alekseev@cems.pstu.ru

**Аннотация.** Приводится обзор известных и полученных автором матричных механизмов комплексного оценивания сложных объектов, под которыми понимаются объекты (группа объектов или система), свойства которых могут быть как числовой (количественно-измеримые свойства объекта), так и нечисловой (качественно-описываемые свойства объекта) природы, а также обладающими неопределенностью разной степени, формы и источников возникновения. Предложена система классификации матричных механизмов комплексного оценивания, основаниями которой является степень неопределённости о состоянии частных факторов сложного объекта и подходы к вычислению комплексных оценок. Показано, какие механизмы комплексного оценивания необходимо использовать при той или иной неопределённости сложного объекта.

**Ключевые слова:** сложные объекты, механизмы управления, комплексное оценивание, неопределённость, матрицы свёртки, дискретное комплексное оценивание, непрерывное комплексное оценивание, нечёткое комплексное оценивание, статистическое комплексное оценивание.

**Цитирование:** Алексеев А.О. Классификация механизмов комплексного оценивания сложных объектов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2 (10). С. 106–120. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-11

**Введение.** Объекты, описываемые вектором свойств, различные исследователи называют многофакторными [18, 23], многопараметрическими [19], многомерным [9], многокритериальными [26], много атрибутными (от англ. multi-attribute) и т.д. Многообразие терминов частично можно было бы объяснить разнообразием самих методов и подходов к комплексному оцениванию. В отношении задач выбора и процедур принятия решений применяются словосочетания multi-objective decision making[1] [25] и multi-attribute decision making [24], в настоящее время практически устоялся термин – многокритериальное принятие решений (multi-criteria decision making), в связи с чем логично было бы такие объекты называть многокритериальными. Однако, задание критериев, описывающих состояние свойств объекта, или объекта целиком, индивидуально для задачи выбора, стоящей перед лицом, принимающим решение (ЛПР), а объект выбора, в свою очередь,

[1] необходимо отметить, что в multi-attribute decision making речь идёт о том, что именно объекты выбора (альтернативы) описываются набором атрибутов, а в multi-objective decision making речь идёт о том, что каждая альтернатива влияет на значение нескольких целевых функций, то есть альтернатива описывается не набором свойств, а набором значений целевых критериев, аналогичный смысл заложен в multi-criteria decision making.

представляет собой набор свойств, описываемых какими-либо параметрами, вне зависимости от ЛПР. Поэтому объекты, описываемые вектором свойств, можно было бы называть многопараметрическими, однако некоторые свойства объекта оценивания могут быть нечисловой природы, то есть не количественно измеримыми, а качественно описываемыми, поэтому термин "многопараметрический" также не является общеупотребимым. Для целей настоящей работы объекты (группу объектов или систему), описываемые вектором свойств, будем называть сложными.

Свойства сложных объектов предлагается определять кортежем $\langle K, T, \Phi \rangle$, где $K$ – множество частных свойств (параметров, факторов, критериев), по которым оценивается объект, данное множество образовано двумя подмножествами $K = K_q \cup K_n$: $K_q$ – подмножество качественно-описываемых свойств объекта, $K_n$ – подмножество количественно-измеримых свойств объекта; элементы множества $K_q \subseteq K, q = \overline{1, \bar{q}}$ оцениваются с помощью термов $t_q$ из множеств $T_q$: $t_q \in T_q, T = \prod_q T_q$, $\bar{q}$ – число качественно-описываемых свойств объекта; элементы множества $K_n \subseteq K, n = \overline{1, \bar{n}}$ оцениваются с помощью действительно-значных шкал $x_n \in \Phi_n \subseteq R^1$, $\Phi = \prod_n \Phi_n$, $\bar{n}$ – число количественно-измеримых свойств объекта.

Тогда состояние сложного объекта $o$ задаётся в пространстве $O$:

$$O = \left( \prod_{q=\overline{1,\bar{q}}} K_q \times T \right) \times \left( \prod_{n=\overline{1,\bar{n}}} K_n \times \Phi \right)$$

и определяется вектором $o \in O$: $o = \{t_q, x_n\}$, $q = \overline{1, \bar{q}}$, $n = \overline{1, \bar{n}}$. Объекты, заданные таким образом, что отсутствует неопределенность состояния отдельных свойств объекта, будем называть точно определёнными.

Задача комплексного оценивания сложных объектов заключается в установлении отображения между пространством сложных объектов $O$ и ограниченным множеством действительных значений $V \subset R^1$, с помощью механизма комплексного оценивания (МКО):

$$\text{МКО}: O \to V \subset R^1, \tag{1}$$

К МКО предъявляют следующие требования:

А.1 для любых точно определённых объектов $\mathrm{o_a}$ и $\mathrm{o_b}$, один из которых является предпочтительным по отношению к другому $\mathrm{o_a} \succ \mathrm{o_b}$, комплексная оценка предпочтительного объекта должна быть строго больше комплексной оценки второго объекта $\mathrm{v_a} > \mathrm{v_b}$ ; $\mathrm{v_a}, \mathrm{v_b} \in \mathrm{V}$;

А.2 для любых точно определённых объектов $\mathrm{o_a}$ и $\mathrm{o_b}$, ни один из которых не является предпочтительным по отношению к другому, то есть одновременно не выполняется $o_a \succ o_b$ и не выполняется $o_b \succ o_a$, комплексные оценки объектов должны быть равны $v_a = v_b, v_a, v_b \in V$.

**Комплексное оценивание сложных объектов в условиях неопределённости.** При наличии неопределённости о состоянии отдельных количественно-измеримых факторов элементы вектора, описывающего состояние объекта, представляют собой при интервальной неопределённости пару оценок $\{\underline{x}_i, \overline{x}_i\}$, $x_i \in \Phi_i$, $\Phi_i \subseteq \Phi$, $i \in \{1, \dots, \bar{i}\}$, $\bar{i}$ – число количественно-измеримых факторов, описываемых интервально, а при стохастической неопределённости – распределение вероятностей $P(x_p)$, $x_p \in \Phi_p$, $\Phi_p \subseteq \Phi$, $p \in \{1, \dots, \overline{p}\}$, $\overline{p}$ –

число количественно-измеримых факторов, носящих случайный характер. Стоит отметить, что качественно-описываемые свойства объекта подвержены неопределённости, источником которой является субъективность суждений экспертов, привлекаемых для их оценивания.

Поэтому в общем случае состояние сложного объекта описывается вектором $o = \{t_q, x_n, \{\underline{x}_i, \overline{x}_i\}, P(x_p)\}$, $q = \overline{1, \overline{q}}$, $n = \overline{1, \overline{n} - \overline{i} - \overline{p}}$, $i \in \{1, \dots, \overline{i}\}$, $p \in \{1, \dots, \overline{p}\}$. При этом задача комплексного оценивания (1) сохраняется, однако в случае интервальной неопределённости комплексная оценка представляет собой интервал $\{\underline{v}, \overline{v}\}$; $\underline{v}, \overline{v} \in V$ и, очевидно, что в этих условиях выполнение условий А.1 и А.2 в общем случае не представляется возможным. В случае стохастической неопределённости комплексная оценка представляет собой распределение вероятностей $P(v)$ на множестве $V$. В этом случае можно требовать выполнения условий А.1 и А.2 для математического ожидания $M(v)$.

Применительно к количественно-измеримым свойствам объекта источником неопределённости могут служить средства объективного контроля, то есть оценки частных свойств объекта могут быть как точными значениями на множестве действительных чисел, так и интервальными оценками. В случае стохастической неопределённости по отношению к количественно-измеримым свойствам может иметься распределение вероятностей о возможном состоянии объекта. Качественно-описываемые свойства объекта подвержены неопределённости, источником которой является субъективность суждений экспертов, привлекаемых для их оценивания.

В связи с этим целесообразно одним из оснований для классификации ММКО использовать степень неопределённости о состоянии частных факторов сложного объекта. Для классификации будем использовать критерий «неопределённость» и выделять следующие классы:

А. Неопределённость **высокая**;

Б. Неопределённость **средняя**;

В. Неопределённость **низкая**;

Г. Неопределённость **очень низкая** или **отсутствует**.

Субъективные оценки могут высказываться с разной степенью модальности. Под разной степенью модальности подразумевается, что лица, привлечённые к оцениванию свойств, в зависимости от их квалификации могут высказать суждения:

- без каких либо ограничений на выбор категорий (термов) и степени своей уверенности в каждой категории (данные суждения будут формализованы с помощью Ф-нечётких или мягких множеств, т.е. функция принадлежности может иметь доверительные интервал),

- без каких либо ограничений на выбор категорий (термов), но с ограничением на оценку своей уверенности в каждой категории (данные суждения будут формализованы с помощью нечётких множеств, т.е. функция принадлежности должна быть задана единственным значением для каждого носителя нечёткого множества),

- с ограничением на суждения с использованием ближайших по смыслу категорий (термов) и с ограничением на оценки своей уверенности в каждой категории (данные суждения будут формализованы с помощью нечётких множеств с ограничением на сумму равенства значений функций принадлежности единице).

**Таблица 1.** Соответствие исходных данных уровню неопределённости и предлагаемому способу описания сложного объекта

| Количественные оценки (объективные входные данные) ОВ | | | Качественные оценки (субъективные входные данные) СВ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Источник данных** | **Неопределённость** | **Код** | **Источник данных** | **Неопределённость** | **Код** |
| Данных объективного контроля нет | высокая | - | Молодой специалист* | высокая | СВ1 |
| Оценка измерений с погрешностью (интервальная оценка) | средняя | ОВ1 | Специалист* | средняя | СВ2 |
| Распределение вероятностей | низкая | ОВ2 | Эксперт* | низкая | СВ3 |
| Точная оценка измерений с минимальной погрешностью | очень низкая или отсутствует | ОВ3 | Группа экспертов | очень низкая или отсутствует | СВ4 |

*Примечание:* * *– разделение степени неопределённости субъективных оценок по уровню квалификации на категории: молодой специалист, специалист и эксперт, условно.*

**СВ1** – свойства сложного объекта описываются с помощью Ф-нечётких переменных:

$$\tilde{\tilde{o}} = \{\tilde{\tilde{t}}_q, \tilde{\tilde{x}}_n\},\ \tilde{\tilde{x}}_n = \left\{x_n / \left\{\underline{\mu}_{x_n}, \overline{\mu}_{x_n}\right\}\right\},\ \tilde{\tilde{t}}_q = \left\{t_q / \left\{\underline{\mu}_{t_q}, \overline{\mu}_{t_q}\right\}\right\}.$$

$q = \overline{1, \bar{q}}$, $\bar{q}$ – число качественно-описываемых свойств объекта

$n = \overline{1, \bar{n}}$, $\bar{n}$ – число количественно-измеримых свойств объекта

**СВ2** – свойства сложного объекта описываются с помощью нечётких переменных:

$$\tilde{o} = \{\tilde{t}_q, \tilde{x}_n\},\ \tilde{x}_n = \{x_n / \mu_{x_n}\},\ \tilde{t}_q = \left\{t_q / \mu_{t_q}\right\}.$$

**СВ3** – свойства сложного объекта описываются с помощью нечётких переменных, имеющих ограничение на вход – равенство суммы значений функции принадлежности единице:

$$\tilde{o} = \{\tilde{t}_q, \tilde{x}_n\},\ \tilde{x}_n = \{x_n / \mu_{x_n}\},\ \tilde{t}_q = \left\{t_q / \mu_{t_q}\right\},\ \sum \mu_{x_n} = 1,\ \sum \mu_{t_q} = 1.$$

**СВ4** – свойства сложного объекта оцениваются группой экспертов с помощью процедур активной экспертизы, нечёткой и Ф-нечёткой активной экспертизы. В этом случае степень неопределённости результата активной экспертизы будет определяться по участнику, обладающему наихудшей неопределённостью.

**ОВ1** – свойства сложного объекта описываются с помощью с помощью интервальных оценок:

$$o = \left\{\{\underline{x}_i, \overline{x}_i\}\right\},$$

$i \in \{1, \dots, \bar{i}\}$, $\bar{i}$ – число количественно-измеримых факторов, описываемых интервально,

**ОВ2** – свойства сложного объекта описываются с помощью распределения вероятностей:

$$o = \{P(x_p)\},$$

$p \in \{1, \dots, \overline{p}\}$, $\overline{p}$ – число количественно-измеримых факторов, носящих случайный характер

**ОВ3** – свойства сложного объекта описываются с помощью точных или приближенных оценок:

$$o = \{x_n\}.$$

В общем случае состояние сложного объекта описывается вектором $o = \{t_q, x_n, \{\underline{x}_i, \overline{x}_i\}, P(x_p)\}$, $q = \overline{1, \overline{q}}$, $n = \overline{1, \overline{n} - \overline{i} - \overline{p}}$, $i \in \{1, \dots, \overline{i}\}$, $p \in \{1, \dots, \overline{p}\}$.

В практике решения задач комплексного оценивания себя зарекомендовали матричные механизмы комплексного оценивания, которые разрабатывались, начиная с 80-х годов XX века (например, [10, 12, 13, 19 и др.]), и совершенствуются по сей день (например, [1, 3, 7, 8, 16, 20, 21, и др.]).

Преимущество матричных механизмов комплексного оценивания заключается в том, что, используя простые категорические суждения эксперта, оценивающего состояние каждого свойства сложного объекта, формируются составные правила вывода «если $i$-ое свойство … и $j$-ое свойство …, то …». Например, «если $i$-ое свойство плохое и $j$-ое свойство хорошее, то объект, по мнению эксперта, удовлетворительный» [1].

Набор таких правил удобно представлять в матричном виде, что и определило название данного подхода. Эти правила составляют базис для ранжирования любых сложных объектов, описываемых набором учтённых экспертом свойств. За счёт того, что эксперт формирует правила по каждому свойству и каждому значению параметра, описывающего конкретное свойство, учитывается сложная нелинейная связь свойств объектов.

**Матричные механизмы комплексного оценивания. Определение.** Матричный механизм комплексного оценивания (ММКО) задаётся кортежем (1):

$$\langle G, M, Q \rangle, \tag{2}$$

где $G$ – граф, определяющий последовательность агрегирования (свёртки) частных факторов в комплексную оценку, узлам дерева $G$ соответствуют матрицы свёртки;

$M$ – множество матриц свёртки, матрица свёртки является подмножеством декартового произведения шкал качественного оценивания сворачиваемых факторов и шкалы обобщённой, агрегированной оценки, матрица задается множеством элементов $m = \{m_{rc}\}$, $r = \{1, \dots, \overline{r}\}$, $c = \{1, \dots, \overline{c}\}$;

$Q$ – критериальное (квалиметрическое) пространство, образованное множеством шкал качественного оценивания частных факторов $K$, промежуточных свёрток и шкалой комплексной оценки $V$.

ММКО [10, 12, 13, 19, 20 и др.] позволяет ранжировать сложные объекты по значениям комплексной оценки, однако, в силу дискретности шкалы $m_{rc}$ , не выполняет условий А.1 и А.2 для любых объектов, либо данные условия необходимо формулировать в не строгом виде. Данная проблема решается в случае применения непрерывных матричных механизмов комплексного оценивания (НММКО) или матричных механизмов нечёткого комплексного оценивания (ММНКО). Стоит отметить, что эти подходы развивались практически параллельно и независимо друг от друга, вначале появился ММНКО – первая работа [7] вышла в 2002 году, а в 2003 был предложен НММКО, описанный в работе [9]. В каких случаях эти подходы эквивалентны, то, какие у них есть ограничения, будет рассмотрено в другой работе автора.

**Матричные механизмы нечёткого комплексного оценивания. Определение.** Матричный механизм нечёткого комплексного оценивания (ММНКО) задаётся кортежем (3):

$$\langle G, M, Q, P, DF\rangle, \quad (3)$$

где, в отличие от кортежа (2), дополнительно определяется $P$ – подход к теоретико-множественным операциям над нечёткими множествами и процедура дефаззификации $-DF$, которая отображает нечёткие переменные на множество действительных значений.

В случае применения ММНКО для оценивания состояния сложного объекта могут применяться лингвистические и нечёткие переменные, то есть сложный объект описывается в пространстве $o \in \tilde{O}$ (символ с тильдой далее будет означать применение нечётких переменных и множеств) следующим вектором: $o = \{\tilde{t}_q, \tilde{x}_n, \tilde{x}_i, \tilde{x}_p\}$, $q = \overline{1, \bar{q}}$, $n = \overline{1, \bar{n} - \bar{i} - \bar{p}}$, $i \in \{1, \dots, \bar{i}\}$, $p \in \{1, \dots, \bar{p}\}$, где $\tilde{t}_q = \{t_q/\mu_{t_q}\}$ – это нечёткое множество, носителем которого является множество $T_q$, образованное набором термов $t_q$, каждому из которых поставлено в соответствие некоторое значение характеристической функции $\mu_{t_q} \in [0,1]$ (с определёнными оговорками можно считать $\tilde{t}_q$ аналогом лингвистической переменной), $\tilde{x}_n = \{x_n/\mu_{x_n}\}$ – это нечёткая переменная, носителем которого является действительно-значная шкала $\Phi_n \subseteq R^1$, каждому значению которой поставлено в соответствие некоторое значение характеристической функции $\mu_{x_n} \in [0,1]$. При этом факторы, обладающие интервальной неопределённостью, опишем в виде нечётких переменных следующим образом: $\tilde{x}_i = \{x_i/\mu_{x_i} = 1 | x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]\}$, а факторы, обладающие стохастической неопределённостью – $\tilde{x}_p = \{x_p/\mu_{x_p} = P(x_p)\}$.

В этом случае задача комплексного оценивания с помощью ММНКО сводится к установлению отображения между пространством сложных объектов и нечётким множеством:

$$\text{ММНКО}: \tilde{O} \to \tilde{V}. \quad (4)$$

Строго говоря, требовать от ММНКО выполнения условий А.1 и А.2 нельзя, поскольку в них речь идёт о точно определённых объектах, а применение теории нечётких множеств вызвано потребностью формализовать состояние отдельных свойств сложных объектов, в отношении которых имеется неопределённость. Однако условия А.1 и А.2 можно проверять по значениям комплексных оценок в дефаззицированном виде:

$$DF: \tilde{V} \to V \subset R^1. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что применительно к ММНКО могут использоваться и Ф-нечёткие переменные [15], то есть нечёткие переменные, у которых значения функции принадлежности являются нечёткими переменными. В российской литературе такие переменные называются мягкими [16]. Это востребовано в случае, если для комплексного оценивания привлечены специалисты невысокой квалификации и их высказывания имеют весьма «размытый» характер. Для обозначения этих методов будем далее использовать аббревиатуру ММФНКО.

Как отмечено выше, помимо матричных механизмов нечёткого комплексного оценивания, известны непрерывные матричные механизмы комплексного оценивания.

**Непрерывные матричные механизмы комплексного оценивания. Определение.** Непрерывный матричный механизм комплексного оценивания (НММКО) задаётся кортежем (6):

$$\langle G, M, Q, FI \rangle, \tag{6}$$

где вместо подхода к теоретико-множественным операциям над нечёткими множествами и функции дефаззификации (3) определяется функция интерполяции матриц свёртки – $FI$.

Известны две функции интерполяций ММКО, делающие функцию свёртки непрерывной, монотонной и кусочно-гладкой.

Первая из них была предложена в работе [8]:

$$FI_{MM}: v = \begin{cases} j_3 + \gamma_1 \cdot (j_6 - j_5) + \gamma_2 \cdot (j_5 - j_3), \text{ если } \gamma_2 \geq \gamma_1, \\ j_3 + \gamma_1 \cdot (j_4 - j_3) + \gamma_2 \cdot (j_6 - j_4), \text{ если } \gamma_1 > \gamma_2, \end{cases} \tag{7}$$

где введены следующие обозначения:

$$\gamma_1 = \lceil X_r \rceil, X_r \in [1, \bar{r}]$$
$$\gamma_2 = \lceil X_c \rceil, X_r \in [1, \bar{c}]$$
$$j_3 = m_{r=\lfloor X_r \rfloor c=\lfloor X_c \rfloor},$$
$$j_4 = m_{r=min(\lfloor X_r+1 \rfloor; \bar{r}) c=\lfloor X_c \rfloor},$$
$$j_5 = m_{r=\lfloor X_r \rfloor c=min(\lfloor X_c+1 \rfloor; \bar{c})},$$
$$j_6 = m_{r=min(\lfloor X_r+1 \rfloor; \bar{r}) c=min(\lfloor X_c+1 \rfloor; \bar{c})}.$$

Вторая функция была определена в аналогичной записи, но таким образом, чтобы получить случай, эквивалентный ММНКО с аддитивно-мультипликативным подходом $\langle G, M, Q, P_{AM}, DF \rangle$ [2]:

$$FI_{AM}: v = j_3 + \gamma_1 \cdot [j_5 - j_3] + \gamma_2 \cdot [j_4 - j_3] + \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot [j_6 + j_3 - j_4 - j_5], \tag{8}$$

**Матричный механизм комплексного оценивания сложных объектов, состояние которых задано распределением вероятностей.** Необходимо отметить, что в работе [11] было показано применение ММКО для сложных объектов, состояние которых задано распределением вероятностей $o = \{P(x_p)\}$, $p \in \{1, \dots, \overline{p}\}$, $\overline{p}$ – число количественно-измеримых факторов, носящих случайный характер.

$$\langle G, M, Q, PP \rangle, \tag{9}$$

где $PP$ – правила исчисления теории вероятностей, согласно которой вероятность свершения обоих несвязных случайных событий определяется умножением вероятностей их свершения, а вероятность свершения хотя бы одного определяется суммой вероятностей.

Пусть правило агрегирования пары частных факторов описывается с помощью матрицы $m = \{m_{rc}\}$, $r = \{1, \dots, \overline{r}\}$, $c = \{1, \dots, \overline{c}\}$ и имеется распределение вероятностей о состоянии сворачиваемых факторов $P(X_r)$ и $P(X_c)$. Тогда вероятность того, что результатом обобщения станет элемент $m_{rc}$ , будет определяться следующим образом:

$$P(m_{rc}) = P(X_r) \cdot P(X_c), \tag{10}$$

а вероятность того, что результатом комплексного оценивания будет некоторая оценка:

$$P(m_{rc}, m_{rc} + 1) = P(m_{rc}) + P(m_{rc} + 1) \tag{11}$$

Все элементы матрицы образуют полную группу событий:

$$\sum_{m_{rc}} P(m_{rc}) = 1$$

Комплексную оценку можно определять как математическое ожидание:

$$X(X_r, X_c) = M(m_{rc}) = \textstyle\sum_{m_{rc} \in Q} P(m_{rc}) \cdot m_{rc} \tag{12}$$

Непрерывные матричные механизмы комплексного оценивания эквивалентны матричным механизмам нечёткого комплексного оценивания, использующим аддитивно-мультипликативный и максиминный подходы к операциям над нечёткими множествами, что позволяет применять их совместно для оценивания сложных объектов. В случае нечёткого комплексного оценивания могут применяться Ф-нечёткие, или мягкие переменные, для формализации модальных суждений специалистов, обладающих невысоким уровнем знаний о предметности области. Показано, что механизм комплексного оценивания, использующий правила исчисления теории вероятностей при распределении вероятностей о состояниях частных факторов эквивалентен матричному механизму нечёткого комплексного оценивания, использующему аддитивно-мультипликативный подход.

**Классификации матричных механизмов комплексного оценивания** Система классификации методов комплексного оценивания (табл. 2) образована путём сопоставления возможных источников неопределённости, степени проявления неопределённости и способов формализованного описания информации в сочетании с двумя классами механизмов комплексного оценивания. В представляемой системе классификации нашли своё место как известные, так и полученные автором механизмы комплексного оценивания, определённые по условиям, при которых они применимы.

Стоит отметить, что сложный (на то он и сложный) объект, описываемый набором свойств, может одновременно обладать разной степенью и источником неопределённости, а также формой ее описания по различным свойствам (которых должно быть не менее двух), например, некоторое свойство точно измерено, другое описано статистически, третье оценено экспертно и т.д. Таким образом, полная классификация должна была бы определяться сочетанием из 7 способов формализации (табл. 2) по 2 свойствам (2 свойства, поскольку предлагается использовать бинарные матрицы, это, в свою очередь, определяется соображением, что, как показано в работе [13], бинарная структура графа соответствует наименьшему количеству элементов матриц свёртки, которые требуется определить для построения ММКО), т.е. должна иметь 21 столбец с соответствующими методами комплексного оценивания.

Здесь целесообразно заметить, что непрерывные матричные механизмы комплексного оценивания эквивалентны матричным механизмам нечёткого комплексного оценивания, использующим аддитивно-мультипликативный и максиминный подходы к операциям над нечёткими множествами, что позволяет применять их совместно для оценивания сложных объектов, а механизм комплексного оценивания, использующий правила исчисления теории вероятностей при распределении вероятностей о состояниях частных факторов, эквивалентен матричному механизму нечёткого комплексного оценивания, использующему аддитивно-мультипликативный подход. Доказательство этих утверждений здесь не приводится в силу ограниченности объёма статьи.

**Таблица 2** . Система классификация матричных механизмов комплексного оценивания

| Источник неопределённости | | Квалификация пользователей МКО | | | | Имеющиеся данные объективного контроля | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Источник информации | | Молодой специалист | Специалист | Эксперт | Группа экспертов | Приборы с погрешностью | Статистика | Точные приборы |
| Способ формализации* | | Ф-нечёткие / мягкие множества | Нечёткие множества | Нечёткие множества с ограничением на функции принадлежности | Процедуры активной экспертизы, в том числе нечёткой активной экспертизы | Интервальные оценки | Распределение вероятностей | Точные или приближенные оценки |
| Состояние сложного объекта описывается вектором | | $\tilde{\tilde{o}} = \{\tilde{\tilde{t}}_q, \tilde{\tilde{x}}_n\}$, $\tilde{\tilde{x}}_n = \left\{x_n / \left\{\underline{\mu}_{x_n}, \overline{\mu}_{x_n}\right\}\right\}$, $\tilde{\tilde{t}}_q = \left\{t_q / \left\{\underline{\mu}_{t_q}, \overline{\mu}_{t_q}\right\}\right\}$ | $\tilde{o} = \{\tilde{t}_q, \tilde{x}_n\}$, $\tilde{x}_n = \left\{x_n / \mu_{x_n}\right\}$ $\tilde{t}_q = \left\{t_q / \mu_{t_q}\right\}$ | $\tilde{o} = \{\tilde{t}_q, \tilde{x}_n\}$, $\tilde{x}_n = \left\{x_n / \mu_{x_n}\right\}$ $\tilde{t}_q = \left\{t_q / \mu_{t_q}\right\}$ $\sum \mu_{x_n} = 1$ $\sum \mu_{t_q} = 1$ | $o = \left\{\{t_q\}, \{x_n\}\right\}$, $t_q = \pi(\{t_q\})$ $x_n = \pi(\{x_n\})$ | $o = \left\{\{\underline{x}_i, \overline{x}_i\}\right\}$, | $o = \{P(x_p)\}$, | $o = \{x_n\}$, |
| Функции приведения: $O \to Q_O$ | | $X_n = f_n(x_n), X_q = f_q(t_q)$ | | | | $X_n = f(x_n)$ | | |
| ММ** | ММНКО | | $\langle G, M, Q, P_{MM}, DF \rangle$ Новиков Д.А. и др., 2003 [7] | $\langle G, M, Q, P_{MM}, DF \rangle$ Харитонов В.А. и др., 2007 [21,22] | | | | |
| | НММКО | | | | | $\langle G, M, Q, FI_{MM} \rangle$ Анохин А.М., Павельев В.В., Гусев В.Б., 2002 [9]*** | | $\langle G, M, Q, FI_{MM} \rangle$ Анохин А.М., Павельев В.В., Гусев В.Б., 2002 [9] |
| АМ** | ММНКО | $\langle G, M, Q, P_{AM}, DF \rangle$ Алексеев А.О., 2016***** | $\langle G, M, Q, P_{AM}, DF \rangle$ Алексеев А.О. и др., 2011, 2015 [1, 4] | $\langle G, M, Q, P_{AM}, DF \rangle$ Алексеев А.О. и др.,, 2014 [3] | $\langle G, M, Q, P_{AM}, DF \rangle$ Алексеев А.О., Коргин Н.А. 2015,2016 [5, 6] | | $\langle G, M, Q, P_{AM}, DF \rangle \equiv \langle G, M, Q, PP \rangle$ Бурков В.Н., Новиков Д.А., 1997 [11]**** | |
| | НММКО | | | | | $\langle G, M, Q, FI_{AM} \rangle$ Алексеев А.О. и др., 2015 [2] | | $\langle G, M, Q, FI_{AM} \rangle$ Алексеев А.О. и др.,, 2015 [2] |

Примечания к таблице 2:

* Табл. 2 представлена в сокращённом виде, т.к. для описания всевозможных ситуаций достаточно представленных в таблице способов формализации информации, обладающей той или иной степенью неопределённости о состоянии частного параметра (свойства). На самом деле система классификация матричных механизмов комплексного оценивания имеет более развёрнутый вид, например, интервальные оценки, как способ формализации, могут соответствовать не только приборам с погрешностью, но и субъективной оценке человека.

** Аббревиатура ММ образована от словосочетания **М**акси**М**инный подход и обозначает класс матричных механизмов комплексного оценивания, эквивалентных ММНКО с **м**акси**м**инным подходом к нечёткому комплексному оцениванию, АМ – **А**ддитивно-**М**ультипликативный. Как отмечалось ранее, иные подходы к теоретико-множественным операциям исследовались в работе [1], однако они не давали нужных свойств МКО: непрерывность, монотонность и кусочная гладкость функции свёртки, поэтому в предложенной классификации рассмотрены два класса механизмов, удовлетворяющих этим свойствам.

*** В работе [9] авторами говорится о многомерных объектах, которые в данной работе определяются как точно заданные, т.е. авторы не рассматривали задачу комплексного оценивания при интервальных оценках частных параметров. Однако несмотря на это, предложенный авторами метод может применяться при интервальной неопределённости и занимает два места в системе классификации.

**** Метод был предложен ещё в 1997 году, однако эквивалентность матричным механизмам нечёткого комплексного оценивания и непрерывным механизмам комплексного оценивания была показана только в 2014 году на семинаре по теории управления организационными системами в ИПУ РАН.

***** Применимость метода в случае Ф-нечётких или мягких множеств обсуждалась на семинаре по теории управления организационными системами в 2016 году.

**Заключение.** Необходимо отметить, что благодаря эквивалентности механизмов комплексного оценивания, которая частично затронута в данной работе, представленную систему классификации методов комплексного оценивания вполне можно считать полной. Так, в частности, с помощью матричных механизмов комплексного оценивания, входящих в класс «АМ» можно описать сложный объект, обладающий любым сочетанием источников, степени и формы проявления неопределённости (см. табл. 2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.О. Исследование альтернативных подходов к теоретико-множественным операциям над нечёткими множествами в процедуре нечёткого комплексного оценивания // Прикладная математика и вопросы управления. №1. 2015. С. 60–72
2. Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Математическое моделирование предпочтений экономических субъектов (агентов) // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2015. № 4 (76). Режим доступа: http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=3441 (дата обращения: 14.04.2015)
3. Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Процедуры нечёткого комплексного оценивания объектов различной природы // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ 2014), г. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: ИПУ РАН. 2014. С. 7884–7893

4. Алексеев А.О., Галиаскаров Э.Р. Развитие механизмов нечеткого комплексного оценивания // Управление большими системами: материалы VIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Редакционная коллегия: Новиков Д.А. (главный редактор), Чукин М.В., Мезин И.Ю., Гун Г.С., Касаткина Е.Г., Яковлева Е.С., Джерыкина Л.В. 2011. С. 48–52.
5. Алексеев А. О. , Коргин Н. А. Матричный анонимный обобщенный медианный механизм с правом делегирования сообщений // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. № 4. 2016. С. 137–156.
6. Алексеев А.О., Коргин Н.А. О применении обобщенных медианных схем для матричной активной экспертизы // Прикладная математика, механика и процессы управления. 2015. Т. 1. С. 170–177
7. Андроникова Н.Г., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Процедуры нечёткого комплексного оценивания // Современные сложные системы управления: Тр. межд. науч.-пр. конф. – Липецк. 2002. С. 7– 8
8. Андронникова Н.Г., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Механизмы нечёткой активной экспертизы // Автоматика и Телемеханика. 2002. № 8. С. 128–137
9. Анохин А.М. Гусев В.Б. Павельев В.В. Комплексное оценивание и оптимизация на моделях многомерных объектов. М.: ИПУ РАН. 2003. 79 с. (Научное издание / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН)
10. Бурков В.Н., Кондратьев В.В., Цыганов В.В., Черкашин А.М. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма. М.: Наука. 1984. 272 с.
11. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами? М.: Синтег. 1997. 190 с.
12. Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. М.: Наука. 1984. 132 с.
13. Губко М.В. Модели и методы оптимизации структуры иерархических систем обработки информации: дис. … д-ра физ.-мат. наук: 05.13.01, защищена 17.04.14: утверждена: 06.10.14. Москва. Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. 372 с.
14. Кондратьев В.Д., Щепкин А.В. Комплексное оценивание в области безопасности дорожного движения. М.: ИПУ РАН. 2002. 51 с.
15. Кофман А., Хил Алуха Х. Введение теории нечётких множеств в управлении предприятиями. Пер. с испанского под ред. В.В. Краснопрошина, Н.А. Лепешинского. Минск: Выш. шк.. 1992. 223 с. (в серии «Новые математические модели и методы в управлении»)
16. Молодцов Д. А. Теория мягких множеств. М.: URSS. 2004. 360 с.
17. Новиков Д.А., Суханов А.Л. Нечёткие сетевые системы комплексного оценивания // Проблемы информационной экономики. Выпуск 6: Моделирование инновационных процессов и экономической динамики. М.: Ленанд, 2006. С. 279–292.
18. Орлов А.И. Теория экспертных оценок в нашей стране // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). №09 (093). 2013. С. 1652–1683.
19. Павельев В.В. Структурная идентификация целевой функции в задачах выбора многопараметрических объектов // Идентификация систем и задач управления SICPRO-12: труды IX Международной конференции (Москва, 30 января – 2 февраля 2012 г.). М.: ИПУ РАН. 2012. С. 783–791

20. Семенов И.Б., Чижов С.А., Полянский С.В. Комплексное оценивание в задачах управления социально-экономическими системами. М.: ИПУ РАН. 1996. 54 с.
21. Харитонов В.А., Винокур И.Р., Белых А.А. Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свёртки // Управление большими системами. Выпуск 18. М.: ИПУ РАН. 2007. С. 129–140.
22. Харитонов В.А., Белых А.А. Технологии современного менеджмента. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. 2007. 190 с.
23. Цапенко М.И. Количественные способы оценки инновационного потенциала региона // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). №4. 2011. С. 145–156
24. Bossert W., Peters H. Multi-attribute decision-making in individual and social choice // Mathematical social sciences. vol. 40. iss. 3. 2000. Pp. 327–339
25. Chankong, V., Haimes, Y.Y. Multiobjective decision making: theory and methodology, North-Holland. 1983. 213 p.
26. Sabaei D., Erkoyuncu J., Roy R. A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery // Procedia CIRP 37. 2015. Pp. 30–35

---

**UDK 519.714.3**

## CLASSIFICATION OF INTEGRATED ASSESSMENT MECHANISMS FOR COMPLEX OBJECTS

**Aleksandr O. Alekseev**

Candidate of Economics, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Komsomolskiy av., 29, e-mail: alekseev@cems.pstu.ru

**Abstract.** The known matrix mechanisms of integrated assessment and those obtained by the author for complex objects that are considered to be the objects (a group of objects or system), whose properties may be both of numerical (quantitatively measurable object properties) and nonnumerical (qualitatively описываемые object properties) nature, as well as have uncertainty of different degree, shape and sources. A classification system of matrix integrated assessment mechanisms based on uncertainty degree in relation to individual complex objects factors and approaches to the integrated assessment calculation, is proposed. It was demonstrated what integrated assessment mechanisms are to be used with one or another complex object uncertainty.

**Keywords:** complex objects, control mechanisms, integrated assessment, uncertainty, convolution matrices, discrete integrated assessment, continuous integrated assessment, fuzzy integrated assessment, statistic integrated assessment.

### References

1. Alekseev A.O. Issledovanie al'ternativnyh podhodov k teoretiko-mnozhestvennym operacijam nad nechjotkimi mnozhestvami v procedure nechjotkogo kompleksnogo ocenivanija [Research of alternative approaches to theoretic-multiple operations under fuzzy

sets in the procedure of fuzzy integrated assessment] // Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya = Applied Mathematics and Control Sciences. 2015. no 1. Pp. 60–72. (in Russian)

2. Alekseev A.O., Alekseeva I.E. Matematicheskoye modelirovaniye predpochteniy ekonomicheskikh sub"yektov (agentov) [Mathematical modelling of economic agent's preferences] // Upravleniye ekonomicheskimi sistemami: elektronnyy nauchnyy zhurnal = Management of economic systems: scientific electronic journal. 2015. no 4. iss. 76. Available at: http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=3441 (accessed 14.04.2015) (in Russian)
3. Alekseev A.O., Alekseeva I.E. Procedury nechjotkogo kompleksnogo ocenivanija ob#ektov razlichnoj prirody [Fuzzy integrated assessment procedures of different nature objects] // XII Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija (VSPU 2014), g. Moskva, 16-19 iiunia 2014 g. = 12th Control Sciences All-Russian Meeting (Moscow, June, 16-19, 2014). Moscow. Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 2014. Pp. 7884–7893.
4. Alekseev A.O., Galiaskarov Je.R. Razvitie mehanizmov nechetkogo kompleksnogo ocenivanija [Development of fuzzy integrated assessment mechanisms] // Upravlenie bol'shimi sistemami: trudy VIII Vserossijskoj shkoly-konferencii molodyh uchenyh (Magnitogorsk, 25-27 maja 2011 g. ) = Proceeding of VIII-th Russian school-conference of young scientists "Control of large systems" (Magnitigorsk city, 25-27 may 2011, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences and others). Moscow. Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 2011. Pp. 48–52. (in Russian)
5. Alekseev A.O., Korgin N.A. Matrichnyj anonimnyj obobshhennyj mediannyj mehanizm s pravom delegirovanija soobshhenij [The matrix anonymous generalized median schemes with delegation] // Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya = Applied Mathematics and Control Sciences. 2016. no. 4. Pp. 137–156.
6. Alekseev A.O., Korgin N.A. O primenenii obobshchennykh mediannykh skhem dlia matrichnoi aktivnoi ekspertizy [About the generalized median schemes application for the matrix active examination] // Prikladnaia matematika, mekhanika i protsessy upravleniia = Applied Mathematics, Mechanics and Control Processes. 2015. vol. 1. Pp. 170–177. (in Russian)
7. Andronikova N.G. Leont'ev S.V. Novikov D.A. Procedury nechetkogo kompleksnogo ocenivanija [Fuzzy integrated assessment procedures] // Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Sovremennye slozhnye sistemy upravlenija" = Proceeding of int. conf. "Modern difficult control systems" (Lipeck, Lipeckiy state technical university 12-14 march 2002). 2002. Pp. 7–8. (in Russian)
8. Andronikova N.G., Leont'ev S.V., Novikov D.A. Mehanizmy nechjotkoj aktivnoj jekspertizy [Mechanisms of active fuzzy expertise] // Avtomatika i Telemekhanika = Automation and Remote Control. 2002. no. 8. Pp. 128–137. (in Russian)
9. Anohin A.M. Gusev V.B. Pavel'ev V.V. Kompleksnoe ocenivanie i optimizacija na modeljah mnogomernyh ob#ektov [Complex estimation and optimization on models of multidimensional objects]. Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova

Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 2003. 79 p. (Scientific publication) (in Russian)

10. Burkov V.N., Kondrat'ev V.V., Cyganov V.V., Cherkashin A.M. Teorija aktivnyh sistem i sovershenstvovanie hozjajstvennogo mehanizma [Theory of active systems and improvement of an economic mechanism]. Moscow. Nauka = Science. 1984. 272 p. (in Russian)
11. Burkov V.N., Novikov D.A. Kak upravljat' proektami? [How to project management?] Moscow. SINTEG. 1997. 190 p. (in Russian)
12. Glotov V.A., Pavel'ev V.V. Vektornaja stratifikacija [Vector stratification]. Moscow. Nauka = Science. 1984. 132 p. (in Russian)
13. Gubko M.V. Modeli i metody optimizacii struktury ierarhicheskih sistem obrabotki informacii. Doc.diss. [Models and methods of optimization of structure of hierarchical systems of information processing. Doc. diss.]. Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 2014. 372 p. (in Russian)
14. Kondrat'ev V.D., Shhepkin A.V. Kompleksnoe ocenivanie v oblasti bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija [Complex estimation in the field of traffic safety]. Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 2002. 51 p. (in Russian)
15. Kofman A., Hil Aluha H. Vvedenie teorii nechjotkih mnozhestv v upravlenii predprijatijami [Introduction of the theory of indistinct sets in management of the enterprises]. Minsk. Vysshaja shkola = High school. 1992. 223 p. (in Russian)
16. Molodcov D.A. Teorija mjagkih mnozhestv [Theory of soft sets]. Moscow. URSS. 2004. 360 p. (in Russian)
17. Novikov D.A., Suhanov A.L. Nechjotkie setevye sistemy kompleksnogo ocenivanija [Indistinct network systems of complex estimation] // Problemy informacionnoj jekonomiki = Problems of information economy. Moscow. Lenand. 2006. no. 1. Pp. 279–292. (in Russian)
18. Orlov A.I. Teorija jekspertnyh ocenok v nashej strane [Theory of expert values in our country] // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. no. 93. Pp. 1–11. Available at: http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/19.pdf (in Russian)
19. Pavel'ev V.V. Strukturnaja identifikacija celevoj funkcii v zadachah vybora mnogoparametricheskih ob#ektov [Structure identification of the goal function problems of selection of multiparameter plants] Identifikacija sistem i zadach upravlenija SICPRO-12: trudy IX Mezhdunarodnoj konferencii, g. Moskva, 30 janvarja – 2 fevralja 2012 g. (Proc. of IX int. conf. "System Identification and Control Problems" SICPRO-12, Moscow, January 30- February 2, 2012). Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 2012. Pp.783–791. (in Russian)
20. Semenov I.B., Chizhov S.A., Poljanskij S.V. Kompleksnoe ocenivanie v zadachah upravlenija social'no-jekonomicheskimi sistemami [Assessment procedures in the tasks of control in sociao-economical systems]. Moscow. Institut problem upravleniya im. V.A.

Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk (IPU RAN) = Institute of Control Sciences RAS. 1996. 54 p. (in Russian)

21. Haritonov V.A., Vinokur I.R., Belyh A.A. Funkcional'nye vozmozhnosti mehanizmov kompleksnogo ocenivanija s topologicheskoj interpretaciej matric svjortki [Functional abilities of integrated assessment mechanisms with a topological interpretation of matrix convolutions] // Upravlenie bol'shimi sistemami = Large-Scale Systems Control. . 2007. vol. 18. Pp. 129–140. (in Russian)
22. Haritonov V.A., Belyh A.A. Tehnologii sovremennogo menedzhmenta [Technologies of contemporary management]. Perm: Publ. of Perm state technical university. 2007. 190 p. (in Russian)
23. Capenko M.I. Kolichestvennye sposoby ocenki innovacionnogo potenciala regiona [Quantitative ways of estimating the regional innovative potential] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroljova (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta) = VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2011. no. 4. Pp. 145–156. (in Russian)
24. Bossert W., Peters H. Multi-attribute decision-making in individual and social choice – Mathematical social sciences. 2000. vol. 40. iss. 3. Pp. 327–339
25. Chankong, V., Haimes, Y.Y. Multiobjective decision making: theory and methodology, North-Holland. 1983. 213 p.
26. Sabaei D., Erkoyuncu J., Roy R. A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery // Procedia *CIRP 37*. 2015. Pp. 30–35.