

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 597.97

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180



### Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы

© 2024, С.В. Микони

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

#### Аннотация

Обсуждается понятие нормы на шкале показателя качества объекта в задачах определения наиболее предпочтительного объекта или его состояния. Используются понятия допустимого и предельно допустимого отклонения от нормы. Предельно допустимые отклонения от нормы принимаются как границы шкалы показателя. За основной вариант нормы принимается отрезок на шкале показателя, не включающий границы шкалы. Точечная и полуинтервальные («не более», «не менее») нормы принимаются за частные случаи интервальной нормы. Полуинтервальная норма отражает совпадение границы исходной интервальной нормы с границей шкалы показателя. Для некоторых показателей отклонение в одну из сторон от нормы считается не только допустимым, но и полезным. Показатель, отвечающий этому условию, называется оптимизируемым, а показатель с нежелательными отклонениями от обеих границ нормы – нейтральным. В модели принадлежности норме выделяются три класса: «норма», «не более» и «не менее» нормы. Предлагаются кусочно-линейная и нелинейная функции принадлежности классам. В нелинейном варианте границы интервальной нормы расширяются до допустимых границ, что влечёт пересечение функций принадлежности смежным классам. Классификация объекта на три класса выполняется отдельно по нейтральным и оптимизируемым показателям. Трактовка отклонений от нормы, как неприемлемых, так и приемлемых, влечёт необходимость введения двух фиктивных классов: «хуже нормы» и «лучше нормы». Они формируются данными из классов «не менее» и «не более». Для вычисления функции принадлежности каждому классу по всем показателям применяется средневзвешенная функция. Обобщённые по всем показателям принадлежности классам «норма», «лучше нормы», «хуже нормы» названы индексами соответственно стабильности, развития и ухудшения объекта, которые используются для целостной оценки объекта, названной индикатором его состояния. Приведён пример анализа отклонений от нормы, реализованный в модифицированной системе выбора и ранжирования СВирЬ-М.

**Ключевые слова:** оценка, объект, показатель, норма, отклонение от нормы, допустимое отклонение, предельно допустимое отклонение, класс, функция принадлежности.

**Цитирование:** Микони С.В. Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.

**Благодарности:** Автор выражает благодарность своим коллегам д.т.н. профессору Б.В. Соколову за ряд ценных замечаний, сделанных при обсуждении статьи, и к.т.н. доценту Д.П. Буракову за оперативную доработку системы СВирЬ-М с целью реализации машинно-ориентированной модели анализа объекта на отклонения от нормы.

**Финансирование:** исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF–2022–0004.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Введение

Ключевым понятием управления любым реальным или мыслимым объектом (Об) является его *состояние* [1]. В каждой предметной области задаются свои требования к состоянию управляемого Об, но общим для всех является либо сохранение состояния на заданном уровне (гомеостазис), либо его подстраивание (целенаправленное изменение) под состояние внешней среды (открытая система). Эти требования касаются как живых, так и искусственных систем, что позволяет рассматривать их с самой общей, онтологической точки зрения.

Поскольку состояние Об представляется набором значений характеризующих его показателей (параметров), целесообразно требования к описанию состояния представлять на языке задания значений показателей. На практике требования к значениям показателей формулируются на языке норм [2-4]. В прикладном смысле норме присущи следующие свойства:

- любая норма *относительна*, ибо её устанавливает человек;
- норма устанавливается *теоретическим, статистическим и опытным* путём;
- статистическая норма – это *усреднённые значения* показателя, полученные при обследовании представительной группы однородных Об;
- в отличие от физических и математических констант норма *изменчива*;
- границы нормы *расплывчаты* по причине усреднения значений показателя;
- *индивидуальные* нормы отличаются от обобщённых;
- *профессиональные* нормы отличаются от норм непрофессионалов в жёсткую сторону.

Изменчивость внутренней и внешней среды влечёт отклонение текущего значения показателя от нормы. Отслеживание отклонений показателей от нормы осуществляется в рамках мониторинга объекта. В [5] мониторинг определён как «специальная форма наблюдения (слежения) за текущим изменением тех или иных процессов или объектов в пространстве и во времени, осуществляемая на постоянной основе». Для отражения расплывчатости оценок показателей в процессе мониторинга объектов востребованы методы мягких измерений [6,7].

С точки зрения безопасности объекта различают две меры отклонения от нормы – допустимую и предельно допустимую [8, 9]. Допустимым считается процент отклонения от нормы, не оказывающий существенного влияния на функционирование Об. К предельно допустимому отклонению относится краткосрочное отклонение от нормы, не влекущее угрозы существованию Об. Выход за предельно допустимые значения показателя рассматривается как угроза существованию Об.

Недопустимое отклонение от нормы является сигналом для выработки управляющего воздействия в системе управления (СУ) Об [10]. Общность применения нормы влечёт потребность в обобщённой модели отклонений по многим показателям. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

## 1 Требования к значениям показателя

Исходя из понятия нормы, она выражается отрезком  $[c_{нj}, c_{вj}]$  на шкале  $j$ -го показателя,  $j = \overline{1, n}$ . Исходными данными для создания модели отклонений  $j$ -го показателя от нормы являются:

- нижняя  $c_{нj}$  и верхняя  $c_{вj}$  границы интервальной нормы  $[c_{нj}, c_{вj}]$ ;
- допустимые отклонения от нормы к меньшим (ДОМ) и большим (ДОБ) значениям:  $c_{домj}$  и  $c_{добj}$ .
- предельные отклонения от нормы к меньшим (ПОМ) и большим (ПОБ) значениям:  $c_{помj}$  и  $c_{побj}$ .

Графическое представление на шкале  $j$ -го показателя интервальной нормы и отклонений от неё приведено на рисунке 1.

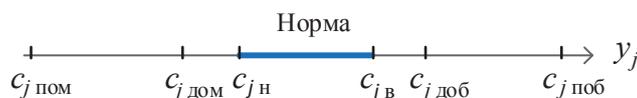


Рисунок 1 – Графическая модель отклонений от нормы

Предельные отклонения от нормы  $c_{j пом}$  и  $c_{j поб}$  принимаются за границы шкалы  $j$ -го показателя  $[y_{j min}, y_{j max}]$ :  $c_{j пом} = y_{j min}$ ,  $c_{j поб} = y_{j max}$ . В общем случае допустимые и предельные отклонения в обе стороны от границ нормы не равны:

$$[c_{j н} - c_{j дом}] \neq [c_{j доб} - c_{j в}], [c_{j н} - c_{j пом}] \neq [c_{j поб} - c_{j в}].$$

Выход текущего значения  $j$ -го показателя за границы шкалы модели требований к значениям показателя ( $y_j < y_{j min}$  или  $y_j > y_{j max}$ ) является сигналом для незамедлительного принятия мер. При моделировании отклонений их необходимо обнаруживать на этапе анализа исходных данных.

Интервальное задание нормы можно рассматривать как интервальное ограничение показателя:  $y_j \in [c_{j н}, c_{j в}]$ . Частным случаем интервального ограничения является *точечная* норма  $c_{j н} = c_{j в} = c_j$ . За точечную норму  $c_j$  может быть принято среднее значение интервальной нормы  $c_j = (c_{j н} + c_{j в})/2$ .

Принятому за норму отрезку шкалы  $[y_{j min}, c_{j н}]$  соответствует полуинтервальное ограничение сверху:  $y_j \leq c_{j н}$  (не более нижней границы), а отрезку шкалы  $[c_{j в}, y_{j max}]$  – ограничение снизу:  $y_j \geq c_{j в}$  (не менее верхней границы). Эти ограничения могут рассматриваться как частные случаи совпадения одной из границ интервальной нормы с границей шкалы – предельным отклонением от нормы. Ограничение «не более»  $c_j$  показано в верхней части рисунка 2, а ограничение «не менее»  $c_j$  – в его нижней части.

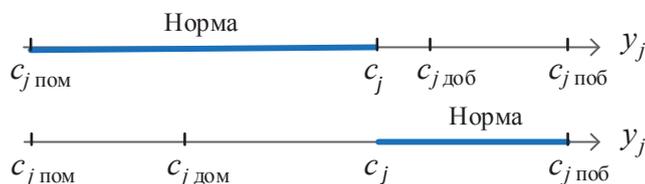


Рисунок 2 – Модель нормы в терминах полуинтервальных ограничений

С точки зрения допустимости отклонения от нормы целесообразно различать нейтральные и оптимизируемые показатели. У нейтрального показателя отклонения значений в обе стороны от границ нормы нежелательны, а у оптимизируемого показателя отклонение значения за одну из границ нормы предпочтительно, что соответствует полуинтервальным ограничениям «не более» и «не менее».

## 2 Моделирование отклонения показателя качества от нормы

Направленность и величину отклонения от нормы отражает биполярная функция отклонений. Она была предложена в [11] для моделирования ограничительных критериев «не более» ( $\leq$ ) и «не менее» ( $\geq$ ). Графики соответствующих функций отклонений применительно к точечной норме показаны на рисунке 3. Переход к интервальной норме реализуется разбиением точечной нормы  $c_j$  на интервал  $[c_{н j}, c_{в j}]$ , представляемый полочкой на оси абсцисс. Положительной полуоси функции отклонений от нормы ставится в соответствие штраф  $d^+(y_j) > 0$  за нарушение ограничения, а отрицательной полуоси – премия (поощрение)  $d^-(y_j) < 0$  за пре-

вышение ограничения. Значение  $d_n(y_j) = 0$  означает принадлежность значения  $j$ -го показателя точечной или интервальной норме.

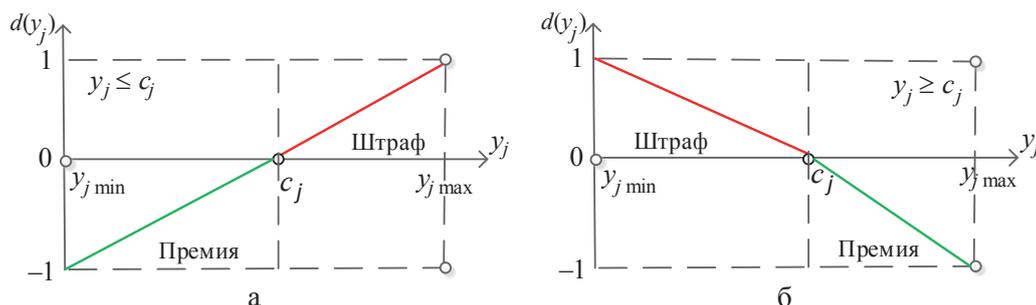


Рисунок 3 – Функции отклонения от точечной нормы: а – минимизируются; б - максимизируются

Значения кусочно-линейной функции отклонений от нормы для предиката «не более» (минимизируемый показатель) вычисляются по следующим формулам [12]:

$$d^-(y_j) = \frac{y_j - c_{nj}}{c_{nj} - y_{j\min}} \text{ если } y_j < c_{nj}, \quad (1)$$

$$d^+(y_j) = \frac{y_j - c_{bj}}{y_{j\max} - c_{bj}}, \text{ если } y_j > c_{bj}. \quad (2)$$

Значения кусочно-линейной функции отклонений от нормы для предиката «не менее» (максимизируемый показатель) вычисляются по следующим формулам:

$$d^+(y_j) = \frac{c_{nj} - y_j}{c_{nj} - y_{j\min}}, \text{ если } y_j < c_{nj}, \quad (3)$$

$$d^-(y_j) = \frac{c_{bj} - y_j}{y_{j\max} - c_{bj}}, \text{ если } y_j > c_{bj}. \quad (4)$$

Функции отклонения от нормы применимы к оптимизируемым показателям, значения которых минимизируются (рисунок 3а) или максимизируются (рисунок 3б). Функция отклонения нейтрального показателя униполярна, поскольку отклонения в обе стороны от нормы нежелательны и оцениваются только штрафами.

### 3 Моделирование меры принадлежности показателя качества норме

#### 3.1 Кусочно-линейная функция принадлежности классу

Моделирование принадлежности норме предполагает построение соответствующей функции принадлежности (ФПр) на шкале каждого оцениваемого показателя [13]. В отсутствие уточняющей информации эта функция является кусочно-линейной – для интервальной нормы эта функция трапецидальная, а для точечной нормы треугольная. У трапецидальной функции на отрезке шкалы  $[c_{jn}, c_{jв}]$  принадлежность норме одинакова, а при отклонении от границ  $c_{jn}$  и  $c_{jв}$  в обе стороны принадлежность норме равномерно убывает (рисунок 4). Шкала значений показателя на рисунке 4 делится на три отрезка:

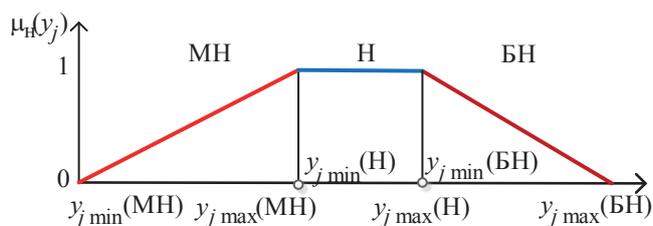


Рисунок 4 – Функция принадлежности классу «Норма»

$[y_{j \min}(\text{МН}), y_{j \max}(\text{МН})]$ ,  $[y_{j \min}(\text{Н}), y_{j \max}(\text{Н})]$ ,  $[y_{j \min}(\text{БН}), y_{j \max}(\text{БН})]$ . Эти отрезки шкалы значений показателя трактуются как «меньше нормы» (МН), «норма» (Н) и «больше нормы» (БН).

Согласно требованию раздельного анализа отклонений значений показателя по обе стороны от границ нормы модель ФПр классу Н с нечёткими границами разделим на три класса: МН, Н, БН. Значения показателя, не достигающие нижней границы нормы, относятся к классу МН, а превышающие верхнюю границу нормы – к классу БН. ФПр  $\mu_k(y_j)$  классов Н, МН, БН строятся автоматически по признакам норм (предикатов  $[], \leq, \geq$ ).

Классифицируемый Об по значению любого показателя относится к одному из трёх классов МН, Н, БН. Принадлежность значения показателя классу МН или БН позволяет оценить направление и относительную величину его отклонения от нормы.

На рисунке 5 показана классификация значений  $j$ -го показателя на три класса. Для вычисления величины принадлежности каждому из трёх классов привлекается функция отклонений от нормы  $d(y_j)$ , изображённая на рисунке 6. С учётом того, что принадлежность классу «Норма»  $\mu_{\text{Н}}(y_j) = 1$ , величина принадлежности классам МН и БН вычисляется по формулам:

$$\text{Если } d(y_j) = 0, \text{ то } \mu_{\text{Н}}(y_j) = 1; \quad \mu_{\text{МН}}(y_j) = 0; \quad \mu_{\text{БН}}(y_j) = 0; \quad (5)$$

$$\text{Если } d(y_j) < 0, \text{ то } \mu_{\text{МН}}(y_j) = 1 - |d(y_j)|; \quad \mu_{\text{Н}}(y_j) = 0; \quad \mu_{\text{БН}}(y_j) = 0; \quad (6)$$

$$\text{Если } d(y_j) > 0, \text{ то } \mu_{\text{БН}}(y_j) = 1 - d(y_j); \quad \mu_{\text{Н}}(y_j) = 0; \quad \mu_{\text{МН}}(y_j) = 0. \quad (7)$$

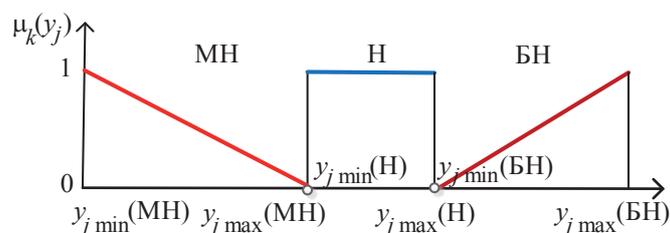


Рисунок 5 – Кусочно-линейные функции принадлежности трём классам

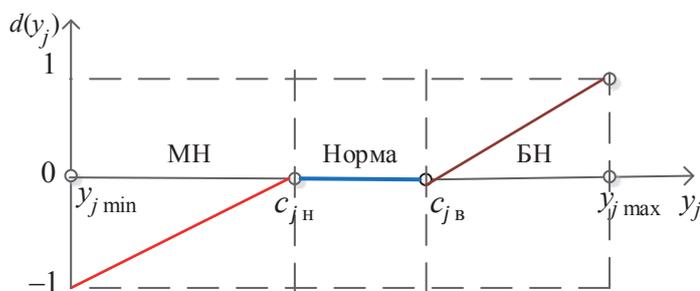


Рисунок 6 – Функция отклонений от интервальной нормы

Нулевая принадлежность классу Н в формулах (6) и (7) следует из прямоугольной формы функции принадлежности и реализует закон двоичной логики, не учитывая взаимозависимости класса Н с соседними классами. Для учёта этой взаимозависимости требуется вычисление величины принадлежности классу Н как дополнения отклонения от нормы до 1. Это достигается заменой средних членов выражений (6) и (7) на формулы:

$$\mu_{\text{Н}}(y_j) = 1 - \mu_{\text{МН}}(y_j); \quad (8)$$

$$\mu_{\text{Н}}(y_j) = 1 - \mu_{\text{БН}}(y_j). \quad (9)$$

Частичная принадлежность классу Н реализуется с применением нелинейных ФПр классу.

### 3.2 Нелинейная функция принадлежности классу

Для учёта соотношения классов МН и БН с классом Н следует использовать принцип усиления / убывания интереса лица, принимающего решения (ЛПР), к отклонению от нормы, подобного принципу склонности / несклонности ЛПР к риску [14]. В качестве уточняющей информации в модель отклонений от нормы включены допустимые отклонения от нормы к меньшим (ДОМ) и большим (ДОБ) значениям:  $c_{j \text{ дом}}$  и  $c_{j \text{ доб}}$ .

Ценность информации об отклонении значения показателя на отрезках шкалы  $[c_{j \text{ н}}, c_{j \text{ дом}}]$   $[c_{j \text{ в}}, c_{j \text{ доб}}]$  от границ нормы до допустимых значений  $j$ -го показателя невелика. До приближения к допустимым границам отклонения от нормы принадлежность отклонениям принимается *незначительной* и нелинейно возрастает по мере приближения к границам шкалы с максимальным ростом в точках  $c_{j \text{ дом}}$  и  $c_{j \text{ доб}}$ . Этот принцип реализуется логистической функцией – убывающей для класса МН и возрастающей для класса БН. Моделирование классов МН и БН соответственно убывающей и возрастающей логистическими функциями показано на рисунке 7.

Применительно к ФПр классу Н принцип реализуется в двух вариантах – *полной* и *убывающей* принадлежности норме. Он демонстрируется верхней и нижней моделями на рисунке 7. Для полной принадлежности норме сохраняется условие  $\mu_N(x) = 1, x \in [c_{j \text{ н}}, c_{j \text{ в}}]$ . На областях определения  $[c_{j \text{ дом}}, c_{j \text{ в}}]$  и  $[c_{j \text{ н}}, c_{j \text{ доб}}]$  строятся соответственно *возрастающая* и *убывающая* параболы. Убывающая принадлежность норме описывается *колоколообразной* функцией с  $\mu_N(x) = 1$  в средней точке нормы  $(c_{j \text{ н}} + c_{j \text{ в}})/2$ .

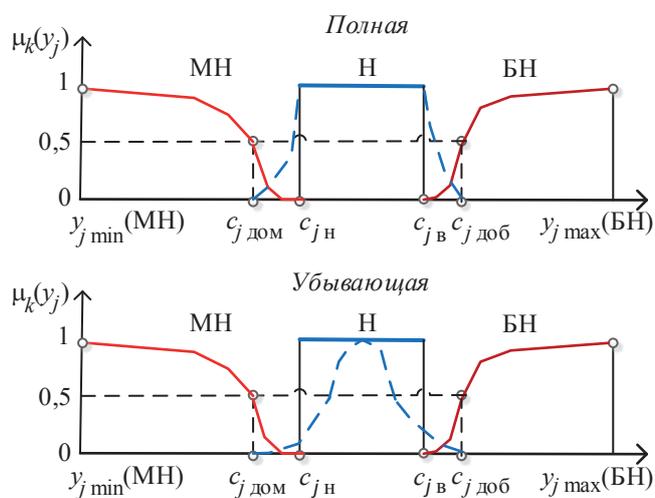


Рисунок 7 – Нелинейные функции принадлежности трём классам

### 4 Классификация объекта относительно нормы

При непересекающихся ФПр классам значение показателя может принадлежать только одному классу и двум классам – в противоположном случае. Принадлежность Об классу по многим показателям вычисляется как средневзвешенная функция частных принадлежностей этому классу по формуле:

$$\mu_k(x) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \mu_{jk}(x), \quad k = Н, МН, БН. \tag{10}$$

Весовой коэффициент  $w_j$  отражает важность показателя по отношению к остальным. При равенстве весов  $w_j = 1/n$  формула (10) сводится к среднеарифметической функции.

Для общей характеристики Об представляет интерес не только мера его принадлежности норме и классам МН и БН, но и отношения ЛПР к этим отклонениям. Для представления этого отношения вводятся два дополнительных класса «хуже нормы» (ХН) и «лучше нормы» (ЛН). Нежелательность отклонения значения нейтрального показателя в любую сторону от границ нормы выражается через делегирование принадлежностей классам МН и БН в класс ХН.

Для оптимизируемых показателей нежелательной является принадлежность только одному из этих классов. Принадлежность противоположному классу предпочтительнее принадлежности норме и имеет значение ЛН. Значения класса ЛН формируются из принадлежностей классу БН для максимизируемых показателей и из принадлежностей классу МН для минимизируемых показателей.

Принадлежность Об классам ХН и ЛН по всем показателям вычисляется также по формуле (10). Обобщённая оценка принадлежности классам Н, ЛН, ХН называется индексом класса. Согласно смыслу этих классов их оценки трактуются соответственно как индексы *стабильности*, *развития* и *ухудшения* свойств Об. В таблице 1 приведены примеры формирования классов ХН и ЛН на основе классов МН и БН и расчёта принадлежности Об каждому из классов применительно к кусочно-линейной модели принадлежности.

Таблица 1 – Примеры расчёта меры принадлежности объекта классам

| Нейтральные показатели |        |             |       |             | Показатели min |       |             |       |              |              |
|------------------------|--------|-------------|-------|-------------|----------------|-------|-------------|-------|--------------|--------------|
|                        | МН     | Н           | БН    | ХН          |                | МН    | Н           | БН    | ХН           | ЛН           |
| П1                     | 0      | 1           | 0     |             | П4             | 0     | 1           | 0     |              |              |
| П2                     | 0,25   | 0,75        | 0     | 0,25        | П5             | 0     | 0,5         | 0,5   | 0,5          |              |
| П3                     | 0      | 0,5         | 0,5   | 0,5         | П6             | 0,25  | 0,75        | 0     |              | 0,25         |
|                        |        |             |       |             | Показатели max |       |             |       |              |              |
|                        |        |             |       |             | П7             | 0     | 1           | 0     |              |              |
|                        |        |             |       |             | П8             | 0,25  | 0,75        | 0     | 0,25         |              |
|                        |        |             |       |             | П9             | 0     | 0,5         | 0,5   |              | 0,5          |
| Расчёт                 | 0,25/3 | 2,25/3      | 0,5/3 | 0,75/3      |                | 0,5/6 | 4,5/6       | 1,0/6 | 0,75/6       | 0,75/6       |
| Индекс                 | 0,083  | <b>0,75</b> | 0,167 | <b>0,25</b> |                | 0,083 | <b>0,75</b> | 0,167 | <b>0,125</b> | <b>0,125</b> |

Левая часть таблицы охватывает три возможных состояния нейтральных показателей П1-П3, а именно, принадлежность классам Н, МН и БН. Величина принадлежности норме определена как дополнение принадлежности отклонению от нормы до 1 (числа помечены курсивом). В класс ХН делегируются принадлежности классам МН и БН. В строке «Расчёт» приведены формулы вычисления среднеарифметических оценок принадлежности классам по всем равноважным показателям, а в строке «Индекс» – полученные оценки.

Правая часть таблицы охватывает по три возможных состояния оптимизируемых показателей П4-П9. В класс ХН минимизируемых показателей переносятся данные из класса БН, а для максимизируемых показателей – из класса МН. В столбец ЛН переносятся данные из противоположных классов. Жирным шрифтом в строке «Индекс» выделены индексы стабильности, ухудшения и развития Об. По нейтральным показателям индекс развития не вычисляется из-за отсутствия класса ЛН.

## 5 Обобщённые оценки состояния объекта

Отклонение какого-либо показателя качества Об от нормы является поводом для принятия решения по управлению его состоянием. Наряду с частными отклонениями Об от нормы представляет интерес общая оценка его состояния. Она востребована при наблюдении динамики состояния Об, а также для сопоставления его с состояниями однородных Об, что особенно актуально для сложных Об, характеризующихся десятками показателей. Эта задача может быть решена введением числового индикатора состояния (ИС) Об [15].

В качестве индикатора состояния объекта  $x$ , отражающего принадлежность норме и отклонениям от неё, примем аддитивную свёртку оценок соответствующих показателей:

$$ИС(x) = \sum_{k=1}^3 w_k \cdot Pr(\mu_k(x), c_k). \quad (11)$$

В формуле (11) множитель  $Pr(\mu_k(x), c_k)$  представляет собой значение критерия, сформированного на основе показателя принадлежности объекта  $x$   $k$ -му классу,  $c_k$  и  $w_k$  – целевое значение и важность этого показателя. Значениями  $c_k$  являются  $\min$  или  $\max$ .

В решаемой задаче рассматриваются две тройки показателей принадлежности классам – с первичными и вторичными отклонениями. К первой тройке относятся показатели принадлежности классам Н, МН и БН, а ко второй – показатели принадлежности классам Н, ХН и ЛН.

В задаче мониторинга объекта используются классы Н, МН и БН. Требованию соответствия всех показателей объекта норме отвечают следующие критерии:

$$\mu_N(x) \rightarrow \max, \mu_{MN}(x) \rightarrow \min, \mu_{BN}(x) \rightarrow \min. \quad (12)$$

Соотношение между составляющими целостной оценки задаётся вектором весов:  $w = (w(\mu_{MN}(x)); w(\mu_N(x)); w(\mu_{BN}(x)))$ . Значения весов задаются в зависимости от интереса ЛПР к этим составляющим. В том случае, когда отклонения в разные стороны от границ нормы неравноценны, классы МН и БН имеют разную важность. Бóльшая важность одного из двух отклонений значения показателя качества от границы нормы будет указывать на бóльшую опасность ухудшения свойств Об. Учёт важности отклонений от нормы позволяет оценить тенденцию более опасного ухудшения свойств Об.

В задаче оценивания объекта с точки зрения соотношения его стабильности и развития используются классы Н, ХН и ЛН. Принадлежность классу ХН отражает степень ухудшения состояния Об, а классу ЛН – его улучшение по отношению к норме. Таким образом, качество состояния Об отражают критерии:

$$\mu_{XN}(x) \rightarrow \min, \mu_N(x) \rightarrow \max, \mu_{LN}(x) \rightarrow \max. \quad (13)$$

Соотношение между составляющими целостной оценки задаётся вектором весов:  $w = (w(\mu_{XN}(x)); w(\mu_N(x)); w(\mu_{LN}(x)))$ . Значения весов задаются в зависимости от интереса ЛПР к этим составляющим. Предпочтение стабильности выражается бóльшим весом показателя  $\mu_N(x)$ , например,  $w_c = (0,17; 0,5; 0,33)$ , а предпочтение развитию – бóльшим весом показателя  $\mu_{LN}(x)$ , например,  $w_p = (0,17; 0,33; 0,5)$ .

Нейтральные показатели участвуют только в оценивании стабильности Об. Из этого следует их нулевая принадлежность классу ЛН. Она отражается и в назначении только двух весовых коэффициентов классов. Например, при равной важности классов Н и ХН вектор  $w_c$  имеет следующий вид:  $w_c = (0,5; 0,5; 0)$ . Поскольку индикатор состояния Об вычисляется по разным исходным данным для нейтральных и оптимизируемых показателей, целесообразно оценивать их отдельно.

При равной важности критериев принадлежности классам величина индикатора состояния Об зависит только от их значений, а они, в свою очередь, зависят от меры принадлежности первичных показателей норме и отклонениям от неё. Таким образом, для фиксированного набора первичных показателей и установленных для них норм индикатор состояния объекта представляет собой конкретную обобщённую характеристику состояния объекта относительно нормального состояния. Его величина равна единице в том случае, когда для тройки классов Н, МН, БН  $\mu_{MN}(x) = \mu_{BN}(x) = 0$ . Из этого условия следует  $\mu_{XN}(x) = 0$ . Величина индикатора состояния играет роль потенциала объекта в отношении его стабильности и развития. Чем она ближе к единице, тем выше качество оцениваемого по этим свойствам объекта. Это даёт возможность оценивать динамику стабильности и развития объекта, а также сопоставлять его по этим свойствам с другими объектами.

## 6 Программная реализация задачи анализа отклонений объекта от нормы

Задача анализа отклонений Об от нормы реализована в новой редакции инструментальной системы выбора и ранжирования СВИРЬ-М, разработанной на языке *Java* к.т.н. доцентом Д.П. Бураковым во взаимодействии с автором. Эта задача является разновидностью многомерной классификации Об. В отличие от произвольной классификации число классов в этой задаче и их назначение фиксированы и являются производными от класса Н. По заданию границ нормы, отклонений от неё, признаков ФПр классу, типа показателя автоматически строится любая из трёх рассмотренных моделей на шкале каждого показателя, участвующего в оценивании.

Под признаками ФПр классу понимаются линейность / нелинейность её значений. Под типом показателя понимается нейтральный, минимизируемый и максимизируемый показатель. Подготовка исходных данных для решения задачи выполняется в табличном пакете *MS Excel* в виде таблиц «Объекты/Показатели» и «Требования к показателям».

Автоматически сформированная модель для решения задачи многомерной классификации при необходимости уточняется пользователем системы средствами редактирования модели. Изменению подлежат границы классов и отклонений, параметры нелинейности нелинейной модели. Простота формирования модели задачи достигается автоматизацией построения классов на шкалах показателей на этапе ввода требований к показателям. На рисунке 8 показано разделённое на две части окно настройки параметров задачи «Отклонения от нормы» в системе СВИРЬ-М.

Левая часть окна настроена на решение одной из четырёх базовых задач аксиоматической классификации [16], а именно, на отклонение от нормы по ФПр. В окне «Список классов» приведён автоматически формируемый список пяти классов. С учётом возможных отклонений от нормы выбрана опция «Частичная принадлежность» классам.

Для оценивания меры принадлежности классам по всем показателям выбрана аддитивная обобщающая функция (правая часть рис. 8). Для вычисления индикатора состояния Об активировано «Сквозное упорядочение объектов». Принимается способ формирования класса ХН из классов МН и БН по максимальному отклонению. Весам (приоритетам) классов в специальном окне задана равная важность.

Пример результатов расчёта принадлежности классам Об 1 по трём нейтральным и шести оптимизируемым показателям показан на рисунках 9 и 10. Значения показателей П1-П9, измеренных в общей шкале [0, 10], равны (5, 3, 8, 5, 8, 3, 5, 3, 8). Границы общей для всех показателей нормы определены интервалом [4, 6]. Границы и значения показателей подобраны под реализацию принадлежностей классам в таблице 1. Требованиям нормы удовлетворяют показатели П1, П4, П7 со значением 5. Остальные показатели имеют отклонения в обе стороны от границ нормы.

На рисунке 9 приведены меры принадлежности Об 1 классам по нейтральным показателям П1, П2, П3 со значениями (5, 3, 8).

Принадлежности объекта 1 по нейтральным показателям классам совпали с расчётными величинами, приведёнными в левой части таблицы 1. Принадлежность объекта 1 классу ЛН равна нулю. Индикатор состояния объекта 1 относительно вектора важности (0,5; 0,5; 0) классов ХН и Н равен 0,5.

На рисунке 10 приведены меры принадлежности объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям П4-П9 со значениями (5, 8, 3, 5, 3, 8).

Принадлежности объекта 1 классам совпали с расчётными величинами, приведёнными в правой части таблицы 1. Принадлежность объекта 1 с оптимизируемыми показателями классу ЛН  $0,125 > 0$  отражает меру его развития. Индикатор состояния объекта 1 относительно вектора важности (0,33; 0,33; 0,33) классов ХН, Н, ЛН равен 0,58. Среднеарифметическая

оценка ИС объекта 1 по всем показателям вычисляется как  $(0,50 + 0,58)/2 = 0, 54$ . Эта величина, далёкая от единицы, отражает значительные отклонения объекта 1 от нормы и от оптимальных значений показателей.

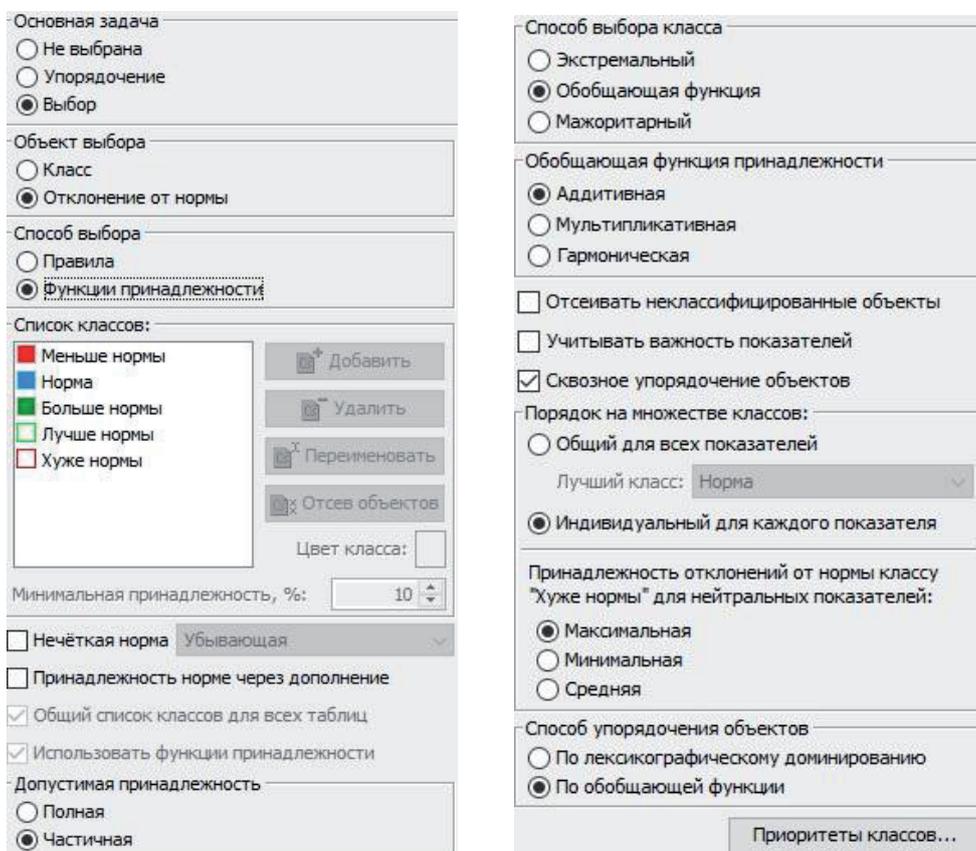


Рисунок 8 – Две части окна настройки параметров задачи «Отклонения от нормы»

| 1 \ 3    | Меньше нормы | Норма | Больше нормы | Лучше нормы | Хуже нормы | Общая оценка |
|----------|--------------|-------|--------------|-------------|------------|--------------|
| Объект 1 | 0.083        | 0.750 | 0.167        | 0.000       | 0.250      | 0.500        |

Рисунок 9 – Принадлежность объекта 1 классам по трём нейтральным показателям

| 1 \ 6    | Меньше нормы | Норма | Больше нормы | Лучше нормы | Хуже нормы | Общая оценка |
|----------|--------------|-------|--------------|-------------|------------|--------------|
| Объект 1 | 0.083        | 0.750 | 0.167        | 0.125       | 0.125      | 0.58         |

Рисунок 10 – Принадлежность объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям

Применение нелинейных ФПр норме и отклонениям от неё (см. рисунок 7) существенно влияет на результаты оценивания состояния объекта за счёт быстрого роста принадлежности отклонениям. Влияние этого свойства ФПр можно показать на рассматриваемом примере с применением функций, приведённых в нижней части рисунка 7. На рисунке 11 приведены меры принадлежности Об 1 классам по нейтральным показателям П1, П2, П3 с нелинейными ФПр классам.

На рисунке 12 приведены меры принадлежности объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям П4-П9 с нелинейными ФПр классам.

| 1 \ 3    | Меньше нормы | Норма | Больше нормы | Лучше нормы | Хуже нормы | Общая оценка |
|----------|--------------|-------|--------------|-------------|------------|--------------|
| Объект 1 | 0.167        | 0.334 | 0.318        | 0.000       | 0.485      | 0.285        |

Рисунок 11 – Принадлежность объекта 1 классам по трём нейтральным показателям с нелинейными функциями принадлежности

| 1 \ 6    | Меньше нормы | Норма | Больше нормы | Лучше нормы | Хуже нормы | Общая оценка |
|----------|--------------|-------|--------------|-------------|------------|--------------|
| Объект 1 | 0.167        | 0.334 | 0.318        | 0.318       | 0.167      | 0.50         |

Рисунок 12 – Принадлежность объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям с нелинейными функциями принадлежности

Применение нелинейных ФПр классам удвоило меру принадлежности объекта классам МН и БН, что повлияло на принадлежность классам ХН и ЛН, и через них – на индикаторы состояния объекта в сторону их уменьшения. Таким образом, применение нелинейных ФПр отражает большее влияние отклонений от нормы на индексы и индикатор состояния объекта.

## Заключение

Проблема качества функционирования объекта носит всеобщий характер. Оценивание качества осуществляется путём контроля значений показателей, характеризующих состояние объекта, на предмет соответствия норме. Однако, с одной стороны, нормы условны, поскольку задаются человеком, а, с другой стороны, под влиянием внутренних и внешних факторов имеет место выход значений показателей за границы норм. Он может считаться как недопустимым, с точки зрения стабильности функционирования объекта, так и желательным, с точки зрения его развития.

Предложенная в работе модель ФПр норме и отклонений от неё позволяет оценить направленность и величину отклонений значений показателей от нормы. Модель строится на основе задания границ нормы – номинальных, допустимых и предельных. Номинальные и предельные границы достаточны для построения кусочно-линейной (грубой) модели отклонений от нормы. Включение в модель допустимых отклонений от нормы даёт дополнительную информацию для построения нелинейных ФПр норме и отклонений от неё, учитывающих отношение к ним ЛПР.

Предложенная модель является двухступенчатой. Модель первой ступени включает классы «Норма», «Меньше нормы», «Больше нормы». Эти классы используются для решения задач мониторинга объекта. На основе принадлежности этим классам по многим показателям вычисляется индикатор состояния объекта, по которому можно судить об общем состоянии объекта.

В модели второй ступени класс «Норма» сопоставляется с двумя фиктивными классами «Хуже нормы» и «Лучше нормы», сформированными из представителей классов «Меньше нормы» и «Больше нормы». Для их формирования используется деление показателей на нейтральные и оптимизируемые. Индикатор состояния объекта, вычисляемый на основе принадлежности классам Н, ХН, ЛН по многим показателям, позволяет судить об объекте с точки зрения стабильности и развития его свойств. По отношению к единице значение индикатора состояния объекта может рассматриваться как его потенциал для сравнения развития объекта во времени и сопоставления с другими объектами. Общность предложенной модели и возможность моделирования в различных режимах системы СВБРЬ-М определяет широкую сферу её применения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Юревич Е.И.** Теория автоматического управления. Л.: Машиностроение, 1980. 412 с.
  - [2] Социологический энциклопедический словарь. М.: Норма. 1998. 554 с.
  - [3] **Карнович В. Н.** Норма и описание как категории эпистемологии: рациональность как вид и основание нормативности // *Сибирский философский журнал*. 2013. Т.11. №4. С.5-11.
  - [4] **Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
  - [5] Лернера индекс. Большая российская энциклопедия. Электронная версия. <https://old.bigenc.ru/economics/text/2227291#>.
  - [6] **Прокочина С.В.** Современная теория измерений: классификация типов измерений // *Мягкие измерения и вычисления*. 2017. № 1(1). С.4-16.
  - [7] Многозначные логики и их применения. Т.1. Логические исчисления, алгебры и функциональные свойства / Под ред. В.К.Финна. - М.: Изд-во ЛКИ, 2008.
  - [8] ГОСТ Р 59819-2021. Национальный стандарт РФ. Самолеты и вертолеты. Построение и изложение технических условий. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 24 с.
  - [9] **Фридман А.Я.** Онтология проектирования ситуационных цифровых двойников для моделирования структурной безопасности индустриально-природных комплексов // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.29-41. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-29-41.
  - [10] **Александров А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа. 1989. 263 с.
  - [11] **Mikoni S.V.** Method of choice by approximation to a pattern // *Proceedings of Conf. NITE'2000*, Minsk: Belarus State Economic University. 2000. pp.156–159.
  - [12] **Микони С.В.** Теория принятия управленческих решений. СПб.: Лань, 2022. 314 с.
  - [13] **Zadeh L.A.** Toward perception-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities // *Сборник докладов Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'2003*. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 25-27 июня 2003. С.69–75.
  - [14] **Neumann John von, Morgenstern Oskar.** *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, NJ. Princeton University Press, 1953. 46 p.
  - [15] **Богданова Т.К., Жукова Л.В.** Оценка состояния объекта управления на основе универсального комплексного индикатора с использованием структурированных и неструктурированных данных // *Бизнес-информатика*. 2021. Т.15 №2. С.21-33. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.21.33.
  - [16] **Микони С.В.** О классе, классификации и систематизации // *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №1(19). С. 67-80. DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-1-67-80.
- 

## Сведения об авторе



**Микони Станислав Витальевич**, 1936 г. рождения. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова в 1963 г., д.т.н. (1992), профессор (1994), ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (1998). В списке публикаций 360 работ, из них 2 монографии и 7 учебных пособий в области технической диагностики, дискретной математики, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. [smikoni@mail.ru](mailto:smikoni@mail.ru).

---

Поступила в редакцию 02.02.2024, после рецензирования 28.03.2024. Принята к публикации 5.04.2024.

---



## Modeling deviations of object quality indicators from the norm

© 2024, S.V. Mikoni

*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences*

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

### Abstract

The concept of a norm on the scale of an object's quality indicator in the context of determining the most preferable object or its state is explored. The notions of permissible and maximum permissible deviations from the norm are utilized, with maximum permissible deviations defining the boundaries of the indicator scale. The fundamental version of the norm is represented as a segment on the indicator scale that excludes these boundaries. Point and semi-interval norms ("no more", "no less") are considered special cases of the interval norm, where the semi-interval norm reflects the alignment of the original interval norm's boundary with the indicator scale's boundary. For certain indicators, deviation in one direction from the norm is not only acceptable but also beneficial. An indicator satisfying this condition is termed optimized, while an indicator with undesirable deviations from both ends of the norm is termed neutral. In the model of belonging to the norm, three classes are distinguished: "norm", "no more" and "no less" than the norm. Piecewise linear and nonlinear membership functions for these classes are proposed. In the nonlinear model, the boundaries of the interval norm are expanded to acceptable limits, leading to the intersection of membership functions of adjacent classes. Classification into these three classes is conducted separately for neutral and optimized indicators. Interpreting deviations from the norm, both unacceptable and acceptable, necessitates introducing two fictitious classes: "worse than the norm" and "better than the norm." These classes are formed from the "not less than" and "not more than" classes. To calculate the membership function for each class across all indicators, a weighted average function is employed. Aggregated indices of belonging to the classes "norm," "better than norm," and "worse than norm" across all indicators are referred to as indices of stability, development, and deterioration of an object, respectively. These indices are used for a comprehensive assessment of the object, termed an indicator of its condition. An example of analyzing deviations from the norm, implemented in the modified SVIR-M selection and ranking system, is provided.

**Keywords:** *assessment, object, indicator, norm, deviation from the norm, permissible deviation, maximum permissible deviation, class, membership function.*

**Citation:** *Mikoni SV. Modeling deviations of object quality indicators from the norm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024;14(2): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.*

**Acknowledgments:** The author expresses gratitude to his colleagues Dr. Sc. Professor B.V. Sokolov for a number of valuable comments made during the discussion of the article, and Ph.D. Associate Professor D.P. Burakov for the prompt improvement of the SVIR-M system in order to implement a machine-oriented model for analyzing an object for deviations from the norm.

**Financial support:** Research was carried out on this topic was carried out under budget topic FFZF-2022-0004.

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

### List of figures and table

Figure 1 - Graphic model of deviations from the norm

Figure 2 - Model of norm in terms of half-interval constraints

Figure 3 - Functions of deviation from a point norm (a – minimized; b – maximized)

Figure 4 - Membership function of the "norm" class

Figure 5 - Piecewise linear membership functions for three classes

Figure 6 - Function of deviations from the interval norm

Figure 7 - Nonlinear membership functions for three classes

Figure 8 - Two parts of the window for setting parameters for the "Deviations from the norm" task

Figure 9 - Class membership of an object according to three neutral indicators

Figure 10 - Class membership of an object according to six optimized indicators

Figure 11 - Class membership of an object according to three neutral indicators with non-linear class membership functions

Figure 12 - Class membership of an object according to six optimized indicators with non-linear class membership functions

Table 1 - Examples of calculating the measure of an object's class membership

## References

- [1] **Yurevich EI.** Theory of automatic control [In Russian]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1980. 412 p.
- [2] Sociological encyclopedic dictionary [In Russian]. Moscow: Norma. 1998. 554 p.
- [3] **Karpovich VN.** Norm and description as categories of epistemology: rationality as a type and basis of normativity [In Russian]. *Siberian Journal of Philosophy*. 2013; 11(4): 5-11.
- [4] **Yakushev AI, Vorontsov LN, Fedotov NM.** Interchangeability, standardization and technical measurements [In Russian]. Moscow: *Mechanical engineering*. 1986. 352 p.
- [5] Lerner index. Great Russian Encyclopedia. Electronic version. [In Russian]. <https://old.bigenc.ru/economics/text/2227291#>.
- [6] **Prokopchina SV.** Modern measurement theory: classification of measurement types [In Russian]. *Soft measurements and calculations*. 2017; 1(1): 4-16.
- [7] Many-valued logics and their applications. V.1. Logical calculus, algebras and functional properties [In Russian]. Ed. V.K. Finn. Moscow: Publishing house LKI, 2008.
- [8] GOST R 59819-2021. National standard of the Russian Federation. Airplanes and helicopters. Construction and presentation of technical conditions. General requirements [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2021. 24 p.
- [9] **Fridman AYA.** Ontology for designing situational digital twins of industrial-natural complexes for modeling their structural safety [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(1): 29-41. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-29-41.
- [10] **Aleksandrov AG.** Optimal and adaptive systems [In Russian]. Moscow: Higher school. 1989. 263 p.
- [11] **Mikoni SV.** Method of choice by approximation to a pattern // Proceedings of Conf. NITE'2000, Minsk: Belarus State Economic University. 2000. pp.156–159.
- [12] **Mikoni SV.** The theory of managerial decision making. Tutorial [In Russian] St. Petersburg: Lan, 2022, 314 p.
- [13] **Zadeh LA.** Toward perception-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities // Collection of reports International. conf. on soft computing and measurements SCM'2003. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", June 25-27, 2003 indicators of object quality from the norm. P.69–75.
- [14] **Neumann J, Morgenstern O.** Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, NJ. Princeton University Press, 1953. 46 p.
- [15] **Bogdanova TK, Zhukova LV.** Assessing the state of a control object based on a universal complex indicator using structured and unstructured data [In Russian]. *Business informatics*. 2021; 15(2): 21-33. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.21.33.
- [16] **Mikoni SV.** About the class, classification and systematization [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(1): 67-80. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-1-67-80.

---

## About the author

**Stanislav Vitalievich Mikoni** (b. 1936) graduated from the Obraztsov Institute of Engineers of Railway Transport (Leningrad) in 1963, D. Sc. Eng. (1992), Professor (1994), Leading Researcher at the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. He is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence (1998). He is the author and a co-author of 360 publications in the field of technical diagnostic, discrete mathematic, system analyses, artificial intelligence, and decision making theory. AuthorID (РИИЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. [smikoni@mail.ru](mailto:smikoni@mail.ru).

---

Received February 2, 2024, Revised March 28, 2024. Accepted April 5, 2024.

---