
ЭНТРОПИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА ПО МНОГИМ КРИТЕРИЯМ

Махин Александр Александрович, асп.

Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ»,
Каменская, 56, Новосибирск, Россия, 630099; e-mail: kislik0fist@mail.ru

Предмет: понятие энтропии (по Шеннону) распространено на экспертные оценки комплексных показателей качества объектов, используемых для оптимизации или ранжирования. Энтропия экспертных оценок служит мерой их неопределенности, что позволяет измерять и контролировать ее снижение в результате применения тех или иных методов уменьшения неопределенности и, соответственно, повышения объективности нечетких параметров. *Цель:* ввести понятие энтропии экспертных оценок комплексного качества и применить его в задаче маркетингового анализа, решаемой с помощью метода интерактивной аппроксимации экспертных оценок. *Дизайн исследования:* на основании комплексного рейтинга из 10 смартфонов по 7 потребительским свойствам: цена смартфона в долларах, размеры постоянной и оперативной памяти в Гбайтах, емкость батареи в миллиампер-часах, размер экрана в сантиметрах, качество фронтальной камеры в Мегапикселях, тактовая частота процессора в Гигагерцах, построен многочлен степени 2 и рассчитано уменьшение энтропии при применении метода интерактивной аппроксимации. *Результаты:* рассмотрен практический пример, связанный с задачей получения комплексного рейтинга, т.е. ранжирования смартфонов по нескольким потребительским свойствам. Показано, что в результате применения метода интерактивной аппроксимации экспертных оценок энтропия снизилась на 60%.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, нормализованная средняя функция, сдвиг-инвариантный многочлен, агрегирующий оператор, весовой коэффициент, комплексный показатель, интегральный показатель, экспертная оценка, рейтинг смартфонов, функциональный вес, принятие решений, неопределенность.

DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2025/10/33-44

Введение

На любом уровне производства или бизнеса процесс принятия управленческих решений часто связан с оптимальным выбором из совокупностей, объектами которых могут служить изделия, товары, технологические реше-

ния, инвестиционные проекты и многое другое, где объекты сравниваются по нескольким качествам. Задача выбора наиболее предпочтительного товара с учетом различных потребительских качеств играет важную роль в поведении субъектов экономических отношений.

Качества объекта, которые учитываются при его оптимальном выборе (в дальнейшем – частные качества), обычно измеряются показателями $q_i \in [0; 1]$ при $i = 1, \dots, n$, где n – число частных качеств. Часто эти качества называются критериями, а их оптимизация – многокритериальной. Большее значение показателя q_i соответствует более предпочтительный по i -му качеству объект. Этот объект может быть способом действий, и тогда в роли его частных качеств выступают оценки полезности с различных точек зрения. Если между критериями нет линейного порядка по их важности, то объективного метода оптимизации не существует. Можно лишь утверждать, что наиболее предпочтительный объект должен быть парето-оптимальным [9]. Если объект оптимален по Парето, то область поиска уменьшается, но остается неопределенность. Для устранения этой неопределенности приходится привлекать разного рода субъективные (нечеткие) оценки, которые могут исходить от экспертов или лица, принимающего решения (ЛПР), также выступающего в роли эксперта.

Наиболее часто используется метод взвешенного усреднения показателей q_i , в соответствии с которым вычисляется т.н. комплексный показатель качества $q \in [0; 1]$ (также называемый агрегирующим, интегральным, средним и т.д.):

$$q = \sum_{i=1}^n w_i q_i. \quad (1)$$

Числа $w_i \geq 0$ называются весовыми коэффициентами (весами)¹ и удовлетворяют условию $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. Функция (1) называется также функцией полезности или функцией ценности². Использование функций вида (1) обусловлено их максимальной простотой. Оптимальный по всем критериям q_i объект имеет наибольшее значение q .

При всей прозрачности такого подхода с ним связана нетривиальная проблема определения весовых коэффициентов. Веса w_i отображают относительную важность (значимость) частных качеств, измеряемых показателями q_i , однако строгого определения, из которого можно извлечь правило их вычисления, не существует. В обзоре [1] описаны более сотни методов, которые могут давать различные значения весовых коэффициентов. Каждый из них, так или иначе, использует экспертные оценки неопределенных параметров. В роли оцениваемых экспертами параметров могут выступать комплексные показатели качества q . Субъективное оценивание само по

¹ Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии, под ред. Гличева А.В. Москва, Издательство стандартов, 1973. 172 с.

² Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва, Радио и связь, 1981. 560 с.

себе может дать решение задачи многокритериальной оптимизации, однако такой подход является организационно сложным и затратным. Очевидно, что серьезные экспертизы не могут проводиться часто. Для регулярного вычисления комплексных показателей, например в целях маркетингового анализа, необходима формула, которую пытаются извлечь из данных однократной экспертизы и других соображений.

Для примера рассмотрим экспертно-статистический метод вычисления весов w_i^3 . Пусть дана выборка из K объектов с частными показателями $q_i = q_i^j$, где $i=1, \dots, n$ и $j=1, \dots, K$. Если получены экспертные оценки $q = q_0^j$ комплексного показателя для каждого объекта № j , то коэффициенты w_i являются решением задачи оптимизации:

$$\sum_{j=1}^K \left(q_0^j - \sum_{i=1}^n w_i q_i^j \right)^2 \rightarrow \min \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad w_i \geq 0 \quad \forall i.$$

Оценки комплексных показателей q могут не только субъективно назначаться напрямую, но и вычисляться косвенными методами, которые призваны повысить объективность результатов экспертизы. Среди последних – метод Терстоуна⁴, основанный на парных сравнениях альтернатив, базируется на неявном предположении о том, что эксперты способны дать объективные, нормально распределенные оценки комплексных показателей.

Комплексные показатели качества $q = f(q_1, \dots, q_n)$ не обязаны быть многочленами степени 1 от частных показателей q_i . В работе Aggregation operators: Properties, classes and construction methods⁵ описано множество примеров таких показателей (т.н. агрегирующих операторов). В [3] были введены т.н. нормализованные средние функции, которые обладают всеми свойствами функций (1), существенными для многокритериального ранжирования [10]. В частности, они могут быть многочленами произвольной степени от q_i (класс таких многочленов обозначается CM [10]). В [7] рассмотрен пример вычисления такого многочлена 2-й степени, аналогичный экспертно-статистическому методу.

Независимо от вида показателя качества $q = f(q_1, \dots, q_n)$, для его определения нужны экспертные, т.е. субъективные оценки некоторых параметров функции f . При этом возникает неопределенность в их значениях, которую следует по возможности уменьшить, чтобы повысить уровень объективности экспертных оценок и одновременно упростить задачу экспертов. Но как измерить эту неопределенность, чтобы объективно судить о том, насколько существенно она изменилась?

³ Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. Москва, «Финансы и статистика», 1989. С. 334.

⁴ Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. Москва, Радио и связь, 1982. С. 184.

⁵ Calvo T., Kolesárová A., Komorníková M., Mesiar R. Aggregation operators: Properties, classes and construction methods. in Aggregation operators. New trends and applications. Physica-Verlag Heidelberg Publisher, 2002, pp. 3-106.

В настоящей статье предлагается использовать понятие энтропии (по Шеннону) для измерения неопределенности экспертных оценок комплексного показателя качества q . Рассмотрен практический пример уменьшения энтропии методом интерактивной аппроксимации экспертных оценок, описанным в [10].

Методы и результаты исследования

Следующее описание энтропии приводится в работе Вентцель Е.С.⁶. Пусть некоторая система X находится в одном из несовместных состояний № 1, 2, ..., n , причем вероятность состояния № k равна p_k . Обозначим A_k событие пребывания системы в состоянии № k , и пусть $P(A_k)=p_k$. Поскольку

событие $\sum_{k=1}^n A_k$ является достоверным, имеет место $\sum_{k=1}^n p_k = 1$.

Точное состояние данной системы неизвестно. Мерой неопределенности состояния системы служит энтропия $H(X)$, определяемая следующим образом:

$$H(X) = - \sum_{k=1}^n p_k \log_2 p_k. \quad (2)$$

Энтропия – неотрицательная величина, она измеряется в битах. Если система X может находиться только в двух равновероятных состояниях, то $H(X)=1$ бит. В случае, когда состояние системы определено однозначно, ее энтропия равна нулю. Если все состояния x_i равновероятны, то энтропия $H(X)=\log_2 n$. Это – ее максимальное значение, когда состояние системы является полностью неопределенным.

Таким образом, энтропия любой системы принимает значения в промежутке $[0; \log_2 n]$, где n – число возможных состояний системы. При объединении независимых систем в единую систему их энтропии складываются.

Информация, полученная о системе X , равна уменьшению ее энтропии после получения данной информации, т.е. «полученная информация» $= -\Delta H(X)$ бит.

Предположим, что эксперт субъективно оценивает комплексный показатель качества q некоторого объекта, присваивая ему значение $q_0 \in [0; 1]$. Будем считать, что эксперт (или группа экспертов) способен назвать число q_0 с точностью до двух знаков после запятой. С практической точки зрения этого достаточно. При этом задача эксперта не выглядит чрезмерно сложной, хотя и отнюдь не является простой. Можно существенно упростить ее, понизив точность оценки до одного знака после запятой. Это равносильно переходу от ранжирования объектов по шкале в 101 балл к ранжированию по шкале в 11 баллов. Практическая ценность такого грубого оценивания сомнительна. Поэтому в дальнейшем предполагается, что каждая экспертная оценка $q_0 \in E$, где

$$E = \{0; 0.01; 0.02; \dots; 0.98; 0.99; 1\}.$$

⁶ Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, Высшая школа, 2006. С. 575.

Мы хотим вычислить энтропию системы $(E; q)$, где q – искомая оценка комплексного качества, лежащая в множестве E . Значение переменной q неизвестно до получения его экспертной оценки q_0 , после чего $q=q_0$ и неопределенность системы $(E; q)$ исчезает. Любая информация, сужающая диапазон возможных значений q , уменьшает энтропию системы $(E; q)$ на величину полученной информации (в битах).

Энтропией экспертной оценки комплексного показателя качества q называется энтропия системы $(E; q)$, определенной выше. Она обозначается $H(q)$.

Если о возможном значении переменной q не известно ничего, то все ее возможные значения равновероятны, в силу чего $H(q)=\log_2 101=6.66$ бит (округлено до сотых).

Эксперт, во всяком случае, должен быть способен качественно оценить объект, присваивая ему одну из пяти характеристик:

плохой, посредственный, удовлетворительный, хороший, отличный, (3) что соответствует ранжированию по 5-балльной шкале $\{1;2;3;4;5\}$. На шкале $[0;1]$ этим характеристикам соответствуют значения показателя $q \in \{0;0.25;0.5;0.75;1\}$. Поскольку все значения q принадлежат множеству E , эксперт выбирает для оценки q_0 одно из следующих пяти подмножеств:

$$\begin{aligned} E_1 &= \{0; 0.01; 0.02; \dots; 0.11; 0.12\} \\ E_2 &= \{0.13; 0.14; 0.15; \dots; 0.36; 0.37\} \\ E_3 &= \{0.38; 0.39; 0.4; \dots; 0.61; 0.62\} \\ E_4 &= \{0.63; 0.64; 0.65; \dots; 0.86; 0.87\} \\ E_5 &= \{0.88; 0.89; 0.9; \dots; 0.99; 1\} \end{aligned}$$

Начальным значением энтропии $H(q)$ мы называем то значение, которая она имела перед тем, как в процессе изучения объекта эксперт получил какую-то информацию о его комплексном качестве. Таким образом, начальное значение $H(q)=6.66$ бит.

Предположим, что перед вынесением оценки q_0 эксперт оценил объект по шкале (3). Если он признал объект плохим или отличным, то значение q_0 будет выбрано из множества E_1 или E_5 соответственно, состоящего из 13 элементов. После этого энтропия $H(q)=\log_2 13=3.7$ бит. Таким образом, она уменьшилась на $6.66-3.7=2.96$ бит, что составляет 44,4%. Если эксперт признал объект посредственным, удовлетворительным или хорошим, то q_0 будет выбрано из множества E_2, E_3 или E_4 , состоящего из 25 элементов. После этого энтропия $H(q)=\log_2 25=4.64$ бит. Таким образом, она уменьшилась на $6.66-4.64=2.02$ бит, что составляет 30,3%.

Если из каких-то соображений возможные значения q_0 ограничены промежутком $[\alpha; \beta]$, где $0 \leq \alpha < \beta \leq 1$, то оставшуюся энтропию экспертной оценки комплексного показателя качества q можно вычислить следующим образом. Если $q_0 \in E_i$, где $i \in \{1;2;3;4;5\}$, то пусть n – число элементов множества E_i попадающих в промежуток $[\alpha; \beta]$.

Тогда непосредственно перед назначением экспертной оценки q_0 энтропия $H(q)=\log_2 n$.

Если в процессе экспертизы оцениваются несколько комплексных показателей качества q^j , где $j=1,2,\dots,N$. Предполагая, что каждая экспертная оценка $q^j=q_0^j$ назначается независимо от всех остальных, энтропию $H(q^1, q^2, \dots, q^N)$ всей системы экспертных оценок можно вычислить, как сумму энтропий оценок по отдельности:

$$H(q^1, q^2, \dots, q^N) = \sum_{j=1}^N H(q^j).$$

Например, если о возможном значении каждой переменной q^j не известно ничего, то

$$H(q^1, q^2, \dots, q^N) = N \cdot \log_2 101 = 6.658 \cdot N. \quad (4)$$

Метод Терстоуна [7] для оценивания комплексных показателей q исходит из того, что эксперты назначают оценки $q=q_0$ так, что случайные величины q имеют нормальное распределение. Исходя из этого предположения, вычислим энтропию после того, как эксперт оценил объект по шкале (3). Предположим, что он считает объект удовлетворительным, т.е. $q \in E_3 = \{0.38; 0.39; \dots; 0.62\}$.

Среднее значение нормальной величины q обозначим μ , тогда $\mu = ((0.38 + 0.62)) / 2 = 0.5$. Согласно правилу 3-сигма⁷, стандартное отклонение σ можно найти из равенства $3\sigma = (0.62 - 0.5) = 0.12$, откуда $\sigma = 0.04$. Обозначим x_k элемент № k множества E_3 , а p_k вероятность того, что эксперт назначит оценку $q_0 = x_k$, не имея никакой информации о показателе q , кроме того, что $q \in E_3$ (т.е. что объект удовлетворительный). Тогда

$$p_k \approx \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_k - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot 0.01 = \frac{0.25}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_k - 0.5)^2}{0.0032}\right) \quad k = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Используя (5) и формулу (2) при $n=25$, вычисляем энтропию $H(q)=4.03$ бит. Полученное значение на 13,1% меньше той энтропии (4,64 биты), которая была вычислена выше. Это означает, что нормально распределенные экспертные оценки являются более информативными, чем равномерно распределенные.

Предположение о нормальном распределении экспертных оценок комплексного показателя качества q является достаточно естественным, особенно в задачах экономики и управления. Соответствующий метод вычисления энтропии выглядит предпочтительней, чем более простой метод с равномерным распределением экспертных оценок q . Однако весомых причин не применять последний не существует. Этот вопрос нуждается в глубоком эмпирическом исследовании.

Рассмотрим практический пример из области маркетингового анализа.

В [9] для некоторой совокупности из десяти смартфонов (табл. 1) построен комплексный рейтинг по семи потребительским свойствам – цена

⁷ Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, Высшая школа, 2006. С. 575.

смартфона (в долларах), размеры постоянной и оперативной памяти (в Гбайтах), емкость батареи (в миллиампер-часах), размер экрана (в сантиметрах), качество фронтальной камеры (в Мегапикселях), тактовая частота процессора (в Гигагерцах). В представленных данных наблюдается зависимость, при которой с ростом показателя «Цена» улучшаются потребительские свойства объектов. Такая зависимость не является универсальной и может отсутствовать в других случаях.

Таблица 1

Параметры смартфонов

№	Имя устройства	Цена, \$	Па- мять, GB	ОЗУ, GB	Бата- рея, МАН	Размер дисплея, СМ	Камера, МР	Частота процессо- ра, GHZ
1	Redmi 7a	85	16	2	4000	13,84	12	2
2	Samsung Galaxy A10	105	32	2	3400	15,75	13	1,6
3	Samsung J6 Plus	171	64	4	3300	15,24	13	1,4
4	Oppo k1	197	64	4	3600	16,28	16	1,95
5	Realme 3	124	64	3	4230	15,8	13	2,1
6	Redmi Note 7S	131	32	3	4000	16	48	2,2
7	Honor 10 Lite	160	64	6	3400	15,77	13	2,2
8	Realme 5i	144	128	4	5000	16,56	12	2,2
9	Redmi 8a	98	32	3	5000	15,8	12	1,95
10	Redmi k20 pro	355	128	6	4000	16,23	48	2,84

Параметры из таблицы 1 пересчитаны в частные показатели качества $q_i=q_i^j$, характеризующие цену, память, ОЗУ, батарею, размер дисплея, фронтальную камеру, частоту процессора соответственно для смартфона № j , где $i = 1,...,7$ и $j = 1,...,10$. Данные показатели представлены в таблице 2.

Таблица 2

Частные показатели качества смартфонов

№	Имя устройства	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7
1	Redmi 7a	0,000	0,000	0,000	0,206	0,000	0,000	0,208
2	Samsung Galaxy A10	0,037	0,071	0,000	0,029	0,351	0,014	0,069
3	Samsung J6 Plus	0,159	0,214	0,250	0,000	0,257	0,014	0,000
4	Oppo k1	0,207	0,214	0,250	0,088	0,449	0,056	0,191
5	Realme 3	0,072	0,214	0,125	0,274	0,360	0,014	0,243
6	Redmi Note 7S	0,085	0,071	0,125	0,206	0,397	0,500	0,278

№	Имя устройства	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7
7	Honor 10 Lite	0,139	0,214	0,500	0,029	0,355	0,014	0,278
8	Realme 5i	0,109	0,500	0,250	0,500	0,500	0,000	0,278
9	Redmi 8a	0,024	0,071	0,125	0,500	0,360	0,000	0,191
10	Redmi k20 pro	0,500	0,500	0,500	0,206	0,439	0,500	0,500

В [10] был вычислен СМ $f(q)$ степени 2, аппроксимирующий экспертные оценки q_0^j комплексных показателей качества $q=q^j=f(q^j)$, где $j=1, \dots, 10$ и $q=(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7)$. Данный многочлен выглядит следующим образом:

$$f(q) = -0,017q_1^2 - 0,032q_2^2 - 0,032q_3^2 - 0,13q_4^2 - 0,049q_5^2 - 0,033q_6^2 \quad (6)$$

$$- 0,093q_7^2 + 0,034q_1q_4 + 0,063q_2q_4 + 0,023q_3q_4$$

$$+ 0,013q_3q_5 + 0,028q_3q_7 + 0,067q_4q_6 + 0,073q_4q_7$$

$$+ 0,086q_5q_7 + 0,034q_1 + 0,063q_2 + 0,064q_3 + 0,259q_4$$

$$+ 0,238q_5 + 0,067q_6 + 0,275q_7$$

В процессе вычисления коэффициентов многочлена (6) использовался алгоритм, который называется интерактивной аппроксимацией экспертных оценок [10]. Результатом его работы являются промежутки $[q_{\min}^j; q_{\max}^j]$ (табл. 3), являющиеся диапазонами возможных значений для экспертных оценок q_0^j . Из экспертных оценок q_0^j извлекаются коэффициенты СМ (6), обеспечивающие минимальное среднеквадратическое отклонение расчетных значений комплексных показателей $q^j=f(q_1^j, q_2^j, \dots, q_7^j)$ от экспертных оценок q_0^j при $j=1, \dots, 10$. При этом функция $f(q)$ является монотонной и сдвиг-инвариантной [10], поэтому она обладает теми же существенными для оптимизации свойствами, что и функция (1). Промежутки $[q_{\min}^j; q_{\max}^j]$ уменьшают неопределенность экспертных оценок и, соответственно, повышают их объективность.

Вычислим, насколько уменьшилась энтропия $H(q^1, q^2, \dots, q^{10})$ системы экспертных оценок комплексных показателей качества q^j в результате применения алгоритма интерактивной аппроксимации. Начальную энтропию находим по формуле (4), так что

$$H(q^1, q^2, \dots, q^{10}) = 10 \cdot \log_2 101 = 66.58 \text{ бит.}$$

Вычисляем конечную энтропию:

$$H(q^1, q^2, \dots, q^{10}) = \log_2 21 + \log_2 20 + 3 \log_2 7 + \log_2 5 + 3 \log_2 3 + \log_2 6 = 26.8.$$

Под логарифмами стоят числа 21, 20, 7 (три раза), 5, 3 (три раза), 6, выражающие количество точек из множества $\{0; 0,01; 0,02; \dots, 0,99; 1\}$, попадающих в соответствующие промежутки:

$$[q_{\min}^j; q_{\max}^j] \text{ при } j=1, \dots, 10 \text{ (табл. 3).}$$

Таким образом, энтропия уменьшилась на 39,78 бит, что составляет 59,7%.

Таблица 3

Диапазоны экспертных оценок комплексного качества

№	Имя устройства	q_{min}^j	q_{max}^j	q_0^j
1	Redmi 7a	0,000	0,208	0,104
2	Samsung Galaxy A10	0,015	0,210	0,113
3	Samsung J6 Plus	0,055	0,117	0,091
4	Oppo k1	0,186	0,249	0,218
5	Realme 3	0,223	0,264	0,244
6	Redmi Note 7S	0,236	0,299	0,268
7	Honor 10 Lite	0,198	0,227	0,212
8	Realme 5i	0,350	0,371	0,360
9	Redmi 8a	0,227	0,286	0,257
10	Redmi k20 pro	0,398	0,424	0,411

Абсолютная погрешность, с которой многочлен (6) аппроксимирует экспертные оценки q_0^j , равна $\Delta = 0,013$. Средний рейтинг смартфонов, построенный с помощью комплексного показателя качества $q = \hat{f}(q)$, выглядит следующим образом:

Таблица 4

Общий рейтинг смартфонов, построенный с помощью СМ (24)

Ранг	Имя устройства	q^j , расчетная оценка
1	Samsung J6 Plus	0,091
2	Redmi 7a	0,104
5	Samsung Galaxy A10	0,113
6	Honor 10 Lite	0,212
3	Oppo k1	0,218
8	Realme 3	0,244
7	Redmi 8a	0,257
9	Redmi Note 7S	0,268
4	Realme 5i	0,360
10	Redmi k20 pro	0,398

Заключение

В настоящей статье понятие энтропии (по Шеннону) распространено на экспертные оценки комплексных показателей качества объектов. Энтропия экспертных оценок служит мерой их неопределенности, что позволяет контролировать ее снижение в результате применения методов уменьшения неопределенности. Одним из таких методов является интерактивная аппроксимация экспертных оценок, описанная в [10]. Рассмотрен практический пример ее применения, связанный с задачей получения комплексного рейтинга смартфонов по нескольким потребительским свойствам, исследованной в [10]. Показано, что метод интерактивной аппроксимации экспертных оценок понизил энтропию на 60%.

Список источников

1. Анохин А.М., Глотов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев // *Автоматика и телемеханика*, 1997, no. 8, с. 3-35.
2. Брызгалин Г.И. Теория качеств и системные приложения // *Справочник. Инженерный журнал*, 2009, no. 5 (146), с. 57-63.
3. Зотьев Д.Б. Нормализованные средние функции и проблема свертывания показателей качества // *Справочник. Инженерный журнал*, 2009, no. 5 (146), с. 43-48.
4. Зотьев Д.Б. О многокритериальной оптимизации качества с помощью взвешенных средних показателей // *Справочник. Инженерный журнал*, 2010, no. 5 (158), с. 38-42.
5. Зотьев Д.Б. О нормализованных средних критериях, интерполирующих экспертные оценки // *Справочник. Инженерный журнал*, 2012, no. 7 (184), с. 50-56.
6. Кондрашова Н.В., Данилов И.С. Совершенствование алгоритма расчета интегрального показателя устойчивого развития экономического субъекта // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2002, no. 5, с. 54-66.
7. Махин А.А. Уменьшение энтропии экспертных оценок при использовании комплексного показателя качества в виде нормализованного среднего многочлена // *Бизнес. Образование. Право*, 2024, no. 2 (67), с. 158-165.
8. Орлов А.И. Экспертные оценки // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 1996, no. 1 (62), с. 54-60.
9. Goswami S.S., Behera D. K. Evaluation of the best smartphone model in the market by integrating fuzzy-AHP and PROMETHEE decision-making approach // *Decision*, 2021, no. 1 (48), pp. 71-96.
10. Zotev D.B. and Makhin A.A., Polynomial Regression of Expert Estimates of Complex Quality // *Control Sciences*, 2025, no. 1, pp. 13-24.
11. Marler R., Arora J. The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, no. 41, pp. 853-862.
12. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // *Int. J. Services Sciences*, 2008, no. 1 (1).

ENTROPY OF EXPERT QUALITY ASSESSMENTS ACCORDING TO MULTIPLE CRITERIA

Makhin Alexander Alexandrovich, graduate student

Novosibirsk State University of Economics and Management «NINH», st. Kamenskaya, 56, Novosibirsk, Russia, 630099; e-mail: kislik0fist@mail.ru

Importance: the concept of entropy (according to Shannon) is extended to expert assessments of complex quality indicators of objects used for optimization or ranking. The entropy of expert assessments serves as a measure of their uncertainty, which allows measuring and monitoring its reduction as a result of applying certain methods of reducing uncertainty and, accordingly, increasing the objectivity of fuzzy parameters. *Purpose:* to introduce the concept of entropy of expert assessments of complex quality and to apply it in the problem of marketing analysis solved using the method of interactive approximation of expert assessments. *Research design:* based on a comprehensive rating of 10 smartphones by 7 consumer properties: smartphone price in dollar, size of permanent and operational memory in GB, battery capacity in MAH, screen size in CM, quality of the front camera in MP, processor clock frequency in GHZ, a polynomial of degree 2 was constructed and the entropy reduction was calculated when using the interactive approximation method. *Results:* a practical example related to the task of obtaining a comprehensive rating, i.e., ranking smartphones by several consumer properties, is considered. It is shown that as a result of applying the method of interactive approximation of expert assessments, entropy decreased by 60%.

Keywords: multi-objective optimization, normalized mean function, shift-invariant polynomial, aggregation operator, weight coefficient, complex index, integral indicator, expert estimate, smartphones rating, functional weight, decision making, uncertainty.

References

1. Anokhin A.M., Glotov V.A., Pavel'ev V.V., Cherkashin A.M. Metody opredeleniia koëffitsientov vazhnosti kriteriev [Methods for determining criteria importance coefficients]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1997, no. 8, pp. 3-35. (In Russ.)
2. Bryzgalin G.I. Teoriia kachestv i sistemnye prilozheniia [Quality Theory and Systems Applications]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2009, no. 5 (146), pp. 57-63. (In Russ.)
3. Zot'ev D.B. Normalizovannye srednie funktsii i problema svertyvaniia pokazatelei kachestva [Normalized mean functions and the problem of convolution of quality indicators]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2009, no. 5 (146), pp. 43-48. (In Russ.)
4. Zot'ev D.B. O mnogokriterial'noi optimizatsii kachestva s pomoshch'iu vzveshenykh srednikh pokazatelei [On Multi-Criteria Quality Optimization Using Weighted Averages]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2009, no. 5 (146), pp. 43-48. (In Russ.)

- nal, 2010, no. 5 (158), pp. 38-42. (In Russ.)
5. Zot'ev D.B. O normalizovannykh srednikh kriteriiakh, interpoliruiushchikh ékspertnye otšenki [On normalized average criteria interpolating expert assessments]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2012, no. 7 (184), pp. 50-56. (In Russ.)
 6. Kondrashova N.V., Danilov I.S. Sovershenstvovanie algoritma rascheta integral'nogo pokazatelja ustoichivogo razvitiia ékonomicheskogo sub'ekta [Improving the algorithm for calculating the integral indicator of sustainable development of an economic entity]. *Sovremennaja ékonomika: problemy i resheniia*, 2002, no. 5, pp. 54-66. (In Russ.)
 7. Makhin A.A. Umen'shenie éntropii ékspertnykh otšenok pri ispol'zovanii kompleksnogo pokazatelja kachestva v vide normalizovannogo srednego mnogochlena [Reducing the entropy of expert assessments using a complex quality indicator in the form of a normalized mean polynomial]. *Biznes. Obrazovanie. Pravo*, 2024, no. 2 (67), pp. 158-165. (In Russ.)
 8. Orlov A.I. Ékspertnye otšenki [Expert assessments]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, 1996, no. 1 (62), pp. 54-60. (In Russ.)
 9. Goswami S.S., Behera D.K. Evaluation of the best smartphone model in the market by integrating fuzzy-AHP and PROMETHEE decision-making approach. *Decision*, 2021, no. 1 (48), pp. 71-96. (In Eng.)
 10. Zotev D.B. and Makhin A.A., Polynomial Regression of Expert Estimates of Complex Quality. *Control Sciences*, 2025, no. 1, pp. 13-24. (In Eng.)
 11. Marler R., Arora J. The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, no. 41, pp. 853-862. (In Eng.)
 12. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 2008, no. 1 (1). (In Eng.)