

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Azimova N.N.

*Assistant Professor in Mathematics & Computer sciences
Don State Technical University*

Ashikhmin D.V.

*Bachelor in Mathematics & Computer sciences
Don State Technical University*

Zakharova O.A.

*D.Sci. in education
Don State Technical University*

Ladosha E.N.

*Ph.D in Mathematics & Computer sciences, Associate Professor
Don State Technical University*

Selikhina A.V.

*Undergraduate student in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

Snigireva V.I.

*Bachelor in Mathematics & Computer sciences,
Don State Technical University*

Tymbalova V.M.

*Engineer for occupational safety,
Concern "Rostselmash"*

MATHEMATICAL TECHNIQUE FOR OBJECTIVIZATION IN EXPERT OPINIONS IN OCCUPATIONAL AND LABOR SAFETY

Азимова Наталья Николаевна

*старший преподаватель кафедры «Прикладная математика»
Донской Государственный Технический Университет*

Ашихмин Денис Валерьевич

*бакалавр кафедры «Прикладная математика»
Донской Государственный Технический Университет*

Захарова Ольга Алексеевна

*доктор педагогических наук, проф. кафедры «Информационные технологии»
Донской Государственный Технический Университет*

Ладоса Евгений Николаевич

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика»
Донской Государственный Технический Университет*

Селихина Александра Викторовна

*аспирант кафедры «БЖ и ЗОС»
Донской Государственный Технический Университет*

Снигирева Валерия Ильинична

*бакалавр кафедры «Прикладная математика»,
Донской Государственный Технический Университет*

Цымбалова Виктория Михайловна

инженер по охране труда ОАО «Ростсельмаш»

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ОБЪЕКТИВИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Summary. A methodology has been developed for the quantitative assessment of expert agreement on the ranking of factors affecting industrial safety. The methodology was tested in relation to the assessment of labor safety at a large machine-building enterprise on the basis of the opinion of 20 independent experts. The stability of the mathematical model in relation to the rare mistakes of experts and the size of their group was studied. It is proposed to use the development to assess working conditions at enterprises of various profiles.

Аннотация. Разработана методика количественной оценки согласия экспертов в вопросе ранжирования факторов, влияющих на производственную безопасность. Методика испытана применительно к оценке безопасности труда на крупном машиностроительном предприятии на основании мнения 20-ти независимых экспертов. Изучена устойчивость математической модели по отношению к

редким ошибкам экспертов и численности их группы. Применять разработку предлагается для оценки условий труда на предприятиях различного профиля.

Key words: labor and occupational safety, expert opinion, statistics, correlation, distribution function, computational stability.

Ключевые слова: производственная безопасность, экспертные оценки, математическая статистика, корреляционный анализ, функции распределения, устойчивость алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

Количественное представление экспертных оценок является важнейшим элементом трудноформализуемых систем, к которым относятся в т.ч. разного рода экспертные оценки. Поскольку целью такого представления ставится выявление объективных истин на основе множественных субъективных данных, приходится предъявлять жёсткие требования к надёжности как собственно исходной экспертной информации, так и алгоритмам их математической обработки. Эти требования сводятся к объективности конечного результата, т.е. его достоверности, универсальности и разумной устойчивости [1].

Под достоверностью формализации экспертной оценки будем подразумевать соблюдение следующих условий:

1) качественный выбор ключевых показателей, подлежащих экспертному оцениванию (сюда входят как структура, так и объём анализируемых фактических данных);

2) обеспечение первичной оценки данных достаточным числом наиболее компетентных профессионалов, имеющих богатый опыт работы, как в анализируемой предметной области, так и в смежных с ней областях;

3) использование только тщательно апробированных научных методов переработки трудноформализуемых предметных данных;

4) всесторонняя проверка перечисленных выше условий и результатов на всех этапах квантифицируемого экспертного анализа (осуществляется сопоставлением с содержанием, процедурами и результатами сходных проектов).

Универсальность результата предусматривает его непосредственный, масштабируемый, трансформируемый или иной перенос методов и результатов на процедуры экспертного анализа прочих трудноформализуемых систем.

Устойчивость результатов экспертной оценки является комплексным показателем и сводится к малому изменению конечного результата при незначительных изменениях:

1) структуры и объёма исходных (неоцифрованных исходных данных);

2) состава экспертной комиссии и индивидуального опыта экспертов, а также сроков и условий проведения экспертизы;

3) методов математической обработки и наглядного представления данных, а также используемых для этого программных средств.

Таким образом, разработка математических моделей и методов анализа трудноформализуемых субъективных данных с целью их последующего

использования при принятии решений представляется крайне актуальной [1].

Основная идея работы состоит в существенной детализации анализа таблиц экспертных мнений для выявления тонких характеристик, как в результате опроса, так и степени подготовленности экспертов. Такой подход, однако, требует существенной вычислительной работы, выполнить которую можно лишь используя специализированные вычислительные средства и технологии [2].

Целью данного математического исследования ставится объективно оценить значимость факторов, влияющих на безопасность производственного персонала и комфортность трудовых условий. Её актуальность определяется острой потребностью повысить культуру производства и качество рабочих мест в машиностроении до передового (в мире) уровня.

Реализация этой цели осуществляется путём комплексного решения следующих задач:

- выбора ключевых качественных показателей, подлежащих количественному оцениванию;

- формирования коллектива наиболее компетентных предметных экспертов достаточной численности;

- проведения первичного этапа исследования (собственно экспертной оценки);

- разработки алгоритмов оценивания объективности экспертных мнений и их реализации применительно к фактическим предметным данным;

- интерпретации и квалификации результатов экспертной оценки;

- выработки рекомендаций и мер по совершенствованию отработанной процедуры экспертного оценивания, а также по её внедрению в практику квантификации трудноформализуемых объектов различной природы.

Новизна подхода использованных методов и полученных результатов состоит в отработке научно-методического задела, востребованного при выработке адекватных решений касающихся функционирования сложных систем с участием человека. Его основу составляют информационные модели, отражающие связи в больших выборках субъективных мнений и реализуемые в форме специализированных программ.

Практическое применение разработки видится в применении программы для систематизации и анализа экспертных оценок в сфере производственной безопасности.

1. Ключевые параметры производственной безопасности

Для создания математической модели экспертной системы на основе анализа литературных источников нами были выделены 11 основных параметров безопасности рабочего места:

1. *Оснащенность* (функциональное наполнение) рабочего места – совокупность главного и дополнительного оборудования удовлетворяющего направленности рабочего пространства, а также организационной и технологической оснащенности, инструменту, средствам связи, специальным устройствам по охране труда, технике безопасности и производственной санитарии.

2. *Соответствие оборудования характеристикам человека* – организация рабочего места, способствующая облегчению перемещения работника во время рабочего процесса и упрощению доступа к оборудованию для его обслуживания, а также восприятию звуковой и визуальной информации.

3. *Наличие средств индивидуальной и коллективной защиты, а также систем и средств пожаротушения.* Средства индивидуальной защиты (СИЗ) – это изделия для защиты и предоставления первой помощи работникам во время чрезвычайных ситуаций. К СИЗ относятся: средства индивидуальной защиты органов дыхания (противогазы, самоспасатели, противоаэрозольные фильтрующие полумаски, респираторы и прочее), комплекты индивидуальной медицинской защиты, перевязочные пакеты, индивидуальный противохимический пакет и др. Средства коллективной защиты (СКЗ) используют сразу несколько и более сотрудников. К ним относятся средства нормализации воздушной среды рабочей зоны; защитные сооружения гражданской обороны (убежища, противорадиационные укрытия).

4. *Доступ на рабочее место* (монтаж, демонтаж, обслуживание, ремонт и т.д.) и возможность быстрой эвакуации при возникновении чрезвычайной ситуации. Рациональное расположение рабочих мест с учетом всех норм и требований, обеспечивающее безопасное передвижение работников и транспортных средств, удобные и безопасные действия с производственными материалами, а также техническое обслуживание и ремонт производственного оборудования.

5. *Исправность производственного оборудования.* Сохранение всех производственных качеств оборудования. Исправность проверяется работником ежедневно и достигается регулярным техническим обслуживанием.

6. *Выполнение производственных операций согласно требованиям.* Предполагает строгое соблюдение производственного цикла, применение СИЗ, закрепленных за операциями.

7. *Мониторинг распределенных опасных и вредных факторов.* Физические факторы –

аэрозоли и пыль в основном фиброгенного воздействия; повышенный уровень шума, а также инфразвук и ультразвук; вибрация (общая и локальная); электромагнитные поля, создаваемые ПЭВМ; недостаток естественного, либо искусственного освещения; повышенная яркость и блескость; не соответствующий нормам микроклимат помещения и прочее. Химические факторы – химические вещества и смеси, находящиеся в воздухе трудовой зоны и на кожных покровах и одежде работников, также выделяемые при производстве пары и газы. Биологические факторы – влияющие на организм работника микроорганизмы-продуценты, живые клетки и споры, содержащиеся в бактериальных препаратах, патогенные микроорганизмы – возбудители инфекционных заболеваний. Напряженность труда – это характеристика трудового процесса, включающая в себя нагрузку на центральную нервную систему, умственное и физическое перенапряжение, монотонность выполняемых работ и эмоциональные перегрузки.

8. *Соблюдение установленного порядка и организованности, высокой производственной, технологической и трудовой дисциплины.* Предполагает ответственное отношение работника к вверенному ему технологическому процессу.

9. *Квалификация работника.* Подтверждается соответствием квалификации работника занимаемому рабочему месту.

10. *Своевременное прохождение инструктажей и переподготовки работника.* Все работники допускаются к рабочему месту только после прохождения инструктажей по технике безопасности. Инструктаж подразделяется на пять подвидов: вводный инструктаж; первичный инструктаж на рабочем месте; повторный инструктаж; внеплановый инструктаж; целевой инструктаж. В числе обязанностей работодателя в сфере безопасности рабочего места находится профессиональная переподготовка по охране труда в отношении кадров, ответственных за эффективное функционирование системы внутреннего контроля в этой части. Периодичность такого обучения, его сроки и методика регламентированы законодательством.

11. *Регулярность мониторинга.* Специальная оценка условий труда (СОУТ) – мероприятия, производимые для выявления опасных и (или) вредных производственных факторов и по оцениванию их уровня воздействия на организм работника и его самочувствие в целом. С учетом отклонения практических значений факторов от предельно допустимого количества, либо уровня и контроль наличия и использования средств индивидуальной и коллективной защиты работников.

2. Коллектив экспертов

Для формирования множества первичных субъективных оценок касательно значимости, выделенных выше критериев производственной безопасности, был сформирован коллектив

экспертов (20 человек), имеющих продолжительный успешный опыт в сфере машиностроительного производства. Разнообразные должности и функции, которые занимали и выполняли эксперты на производстве, обеспечивают разносторонний взгляд на проблему

оценивания производственной безопасности, что делает коллективную субъективную оценку обобщённой и глубокой. Должности и производственный опыт экспертного коллектива приведён в табл. 1.

Таблица 1

Должности и производственный опыт экспертного коллектива

№	Должность	Стаж работы
1	Ведущий инженер «Ростсельмаш»	более десяти лет
2	Кандидат технических наук, заведующий сектором ДГТУ	более десяти лет
3	Ведущий специалист «Ростсельмаш»	более десяти лет
4	Ведущий инженер НИИ «ВиТ»	более десяти лет
5	Профессор ДГТУ	более десяти лет
6	Начальник научно-исследовательского отдела	более десяти лет
7	Начальник ОТК «Ростов-Миль»	более десяти лет
8	Ведущий инженер ОПБиП	более десяти лет
9	Профессор ДГТУ	более десяти лет
10	Ведущий специалист «Ростсельмаш»	более десяти лет
11	Инженер по подготовке производства	более десяти лет
12	Профессор ДГТУ	более десяти лет
13	Инженер по промышленной безопасности «Ростсельмаш»	более десяти лет
14	Кандидат технических наук, ведущий специалист ДГТУ	более десяти лет
15	Инженер по охране труда «Роствертол»	более десяти лет
16	Специалист по охране труда	более десяти лет
17	Технический директор «Ростов-Миль»	более десяти лет
18	Профессор ДГТУ	более десяти лет
19	Кандидат технических наук, кафедра ТМ	более десяти лет
20	Профессор ДГТУ	более десяти лет

Как видно из представленной таблицы, подобранные нами эксперты имеют разнообразный производственный опыт, а также опыт работы в управленческих и образовательных организациях. Это позволяет им всесторонне оценивать проблемы производственной безопасности.

3. Первичные экспертные мнения

Для создания экспертной системы было принято решение использовать метод экспертных оценок. Группа экспертов в составе 20 человек произвела оценку параметров по шкале от 2 до 12. Опрос был проведен с помощью анкетирования. На основе результатов была создана сводная матрица.

Очевидно, что для обеспечения объективности экспертных суждений проблема почти всегда сводится к оценке предпочтений группы на основе индивидуальных мнений ее участников (экспертной комиссии).

С целью проверить надёжность приведённой субъективной оценки спустя 9 месяцев был проведён повторный опрос, причем предлагалась анкета, составленная иным образом. Результаты двойного анкетирования, согласованные между собой по каждому эксперту, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Матрица оценки параметров безопасности рабочего места

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Исправность производственного оборудования	11	10	11	11	12	11	12	10	11	8	11	10	10	11	12	11	10	11	10	11
Доступ на рабочее место	10	11	12	10	9	10	7	9	7	5	10	11	12	10	10	7	12	10	11	8
Наличие СИЗ и СП	9	9	9	8	10	9	9	11	9	9	12	9	8	9	9	10	9	9	9	9
Соответствие оборудования характеристикам человека	5	6	5	7	5	5	6	5	5	2	5	5	6	4	6	5	6	5	7	5

Мониторинг распределённых опасных и вредных факторов	1 2	1 2	1 0	1 2	1 1	1 2	1 1	1 2	1 2	1 2	9	1 2	1 1	1 2	1 1	1 2	1 1	1 2	1 2	1 2
Квалификация работника	2	2	2	2	4	2	2	3	2	1 0	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2
Оснащённость рабочего места	6	5	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	5	6	5	6	3	6	6	6
Выполнение производственных операций согласно требованиям	4	4	4	4	2	3	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	4	4	4
Прохождение инструктажей и переподготовки работника	7	7	8	5	7	8	1 0	7	1 0	7	7	7	7	7	7	9	8	7	5	7
Соблюдение порядка и дисциплины	3	3	3	3	3	4	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	4	3	3	3
Регулярность мониторинга	8	8	7	9	8	7	8	8	8	1 1	8	8	9	8	8	8	7	8	8	1 0

Таким образом, в этой части работы изучена техника экспертных оценок, составлен коллектив экспертов, дважды проведена экспертная оценка производственной безопасности на базовом машиностроительном предприятии. Ожновременно поставлена задача выбрать адекватную методику интерпретации экспертных мнений, позволяющую выявлять больше особенностей в коллективном мнении по сравнению с традиционно используемым подходом Кендалла.

4. Усовершенствованная методика и результаты статистического анализа экспертных мнений

Предлагаемая методика базируется на математическом аппарате случайных величин, функций при корреляционном анализе данных [3]. Пусть мнение каждого эксперта представляет собой 11-ти компонентный вектор в соответствующем пространстве натуральных чисел от 2-х до 12-ти. Существенно, что в этом векторе не существует одинаковых компонент.

Очевидно, при таком составлении все векторы индивидуальных экспертных оценок M_i имеют одинаковую длину. Это обстоятельство (нормировка векторов M_i) облегчает анализ оценки их близости: векторы равной длины отличаются лишь своим направлением в 11-ти мерном пространстве. Идентичным оценкам M_i и M_j соответствуют одинаковые векторы, а различие в оценках характеризуется углом между векторами оценки M_i и M_j , предлагаемыми различными экспертами.

С точки зрения математической статистики, косинус угла между M_i и M_k отвечает коэффициенту линейной корреляции их координат, рассматриваемых как упорядоченные наборы чисел. Соответственно о согласованности мнений экспертов позволяет судить корреляционная матрица.

Корреляционная матрица, вычисленная для 20-ти экспертов, перечисленных в табл. 2, показана на рис. 1.

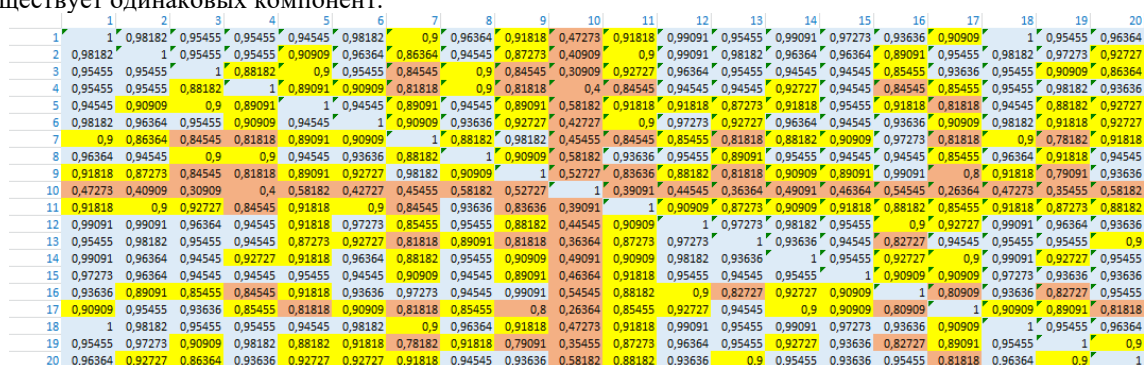


Рис. 1. Окрашенная корреляционная матрица экспертной оценки сравнительной важности факторов производственной безопасности на основании индивидуальных мнений табл. 2

Строки и столбцы этой матрицы соответствуют отдельным экспертам. Для удобства анализа использовано закрашивание полей: высококоррелированные значения (коэффициент корреляции $> 0,93$) здесь выделены синим цветом, среднекоррелированные ($0,85 < \text{коэффициент корреляции} < 0,93$) – желтым, слабокоррелированные (коэффициент корреляции $< 0,85$) – красным.

Из представленных на рисунке данных следует, что в целом эксперты уверенно одинаково ранжируют выбранные нами факторы производственной безопасности. В то время как эксперт №10 высказывает точку зрения, существенно отличную от средней. На графике рис. 1 этому эксперту соответствует «красный крест». Поэтому в дальнейшем анализе мы исключим его из экспертного сообщества. Практически ценно, что предложенное в работе раскрашивание

корреляционной матрицы позволяет легко отсеивать экспертов с существенно отличной от общей позицией.

Альтернативным удобным представлением данных о согласованности экспертных мнений является лепестковая диаграмма, отражающая согласованность мнения отдельного эксперта с усредненным коллективным мнением. Соответствующий коэффициент корреляции в такой диаграмме откладывается как радиус вектор в направлении, отведённом эксперту, с длиной, отвечающей коэффициенту корреляции. Для данных рис. 1 такая диаграмма показана на рис. 2. Используя эту диаграмму, также легко отсеивать несогласных экспертов: точка, отвечающая их позиции, в данном случае оказывается глубоко внутри зоны согласия, которая отмечена синим цветом.

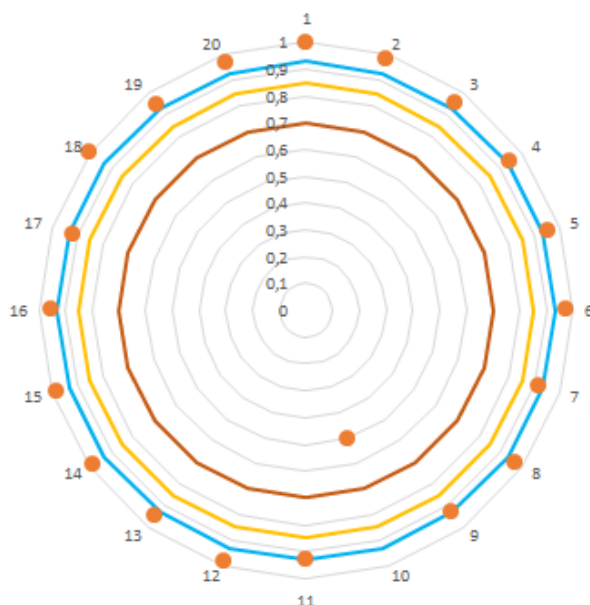


Рис. 2. Корреляция частных экспертных мнений с коллективным средним. Номер эксперта на круговой диаграмме увеличивается по часовой стрелке; большая окружность соответствует уровню корреляции 0,93, средняя – 0,85, малая – 0,7

Отклонения частных мнений экспертов от среднего коллективного $\langle M \rangle = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I M_i$ (I – число экспертов) характеризуют данные рис. 3. Мерой отклонения служит длина вектора

$$|\langle M \rangle - M_i| = \left(\sum_{j=1}^{J=11} (\langle M \rangle_j - M_{ij})^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где $J = 11$ – число рассматриваемых параметров. Применительно к нашим данным соответствующий результат показан на рис. 3.

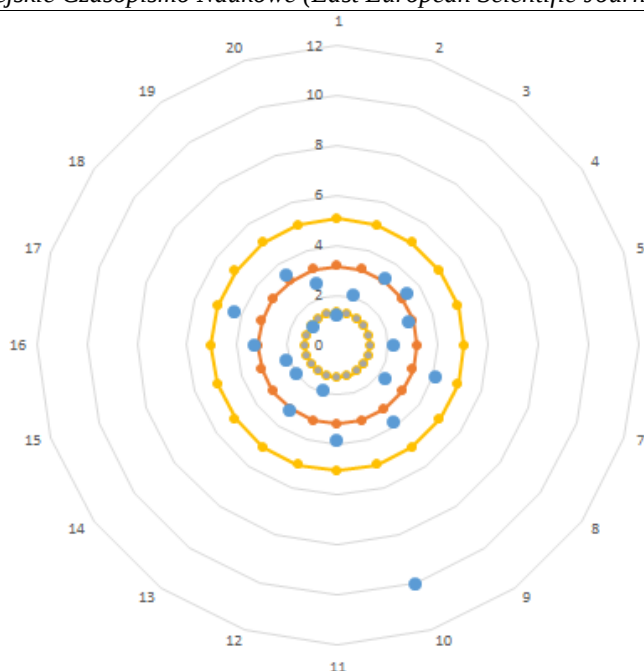


Рис. 3. Отклонение частных экспертных мнений от коллективного среднего. Номер эксперта на круговой диаграмме увеличивается по часовой стрелке; центральная окружность соответствует отклонению от среднего мнения на 1 балл, средняя – на 3 балла, большая – на 5 баллов. Масштабной величиной может служить $|\langle M \rangle| = |M_i| = 25,48$

Связь между данными рис. 2 и 3 определяется теоремой Коши: если данные плотно группируются вокруг среднего значения, то они плотно группируются между собой и наоборот.

Данные рис. 2-3 также свидетельствуют, что мнение эксперта № 10 сильно расходится с коллективным средним, что побуждает исключить его из состава экспертного сообщества.

После исключения из экспертной комиссии лица с сильно противоречащим общему мнению получаем оптимизированную группу экспертов. Проведём обработку мнений этой группы в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

Корреляция мнений 19-ти оставшихся экспертов иллюстрируется матрицей на рис. 4, а иные способы подтверждения согласованности их мнений на рис. 5 и 6.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	0,98182	0,95455	0,95455	0,94545	0,98182	0,9	0,96364	0,91818	0,91818	0,99091	0,95455	0,99091	0,97273	0,93636	0,90909	1	0,95455	0,96364
2	0,98182	1	0,95455	0,95455	0,90909	0,96364	0,86364	0,94545	0,87273	0,9	0,99091	0,98182	0,96364	0,96364	0,89091	0,95455	0,98182	0,97273	0,92727
3	0,95455	0,95455	1	0,88182	0,9	0,95455	0,84545	0,9	0,84545	0,92727	0,96364	0,95455	0,94545	0,94545	0,85455	0,93636	0,95455	0,90909	0,86364
4	0,95455	0,95455	0,88182	1	0,89091	0,90909	0,81818	0,9	0,81818	0,84545	0,94545	0,94545	0,92727	0,94545	0,84545	0,85455	0,95455	0,98182	0,93636
5	0,94545	0,90909	0,9	0,89091	1	0,94545	0,89091	0,94545	0,89091	0,91818	0,91818	0,87273	0,91818	0,95455	0,91818	0,81818	0,94545	0,88182	0,92727
6	0,98182	0,96364	0,95455	0,90909	0,94545	1	0,90909	0,93636	0,92727	0,9	0,97273	0,92727	0,96364	0,94545	0,93636	0,90909	0,98182	0,91818	0,92727
7	0,9	0,86364	0,84545	0,81818	0,89091	0,90909	1	0,88182	0,98182	0,84545	0,85455	0,81818	0,88182	0,90909	0,97273	0,81818	0,9	0,78182	0,91818
8	0,96364	0,94545	0,9	0,9	0,94545	0,93636	0,88182	1	0,90909	0,93636	0,95455	0,89091	0,95455	0,94545	0,85455	0,96364	0,91818	0,94545	
9	0,91818	0,87273	0,84545	0,81818	0,89091	0,92727	0,98182	0,90909	1	0,83636	0,88182	0,81818	0,90909	0,89091	0,99091	0,8	0,91818	0,79091	0,93636
10	0,91818	0,9	0,92727	0,84545	0,91818	0,9	0,84545	0,93636	0,83636	1	0,90909	0,87273	0,90909	0,91818	0,88182	0,85455	0,91818	0,87273	0,88182
11	0,99091	0,99091	0,96364	0,94545	0,91818	0,97273	0,85455	0,95455	0,88182	0,90909	1	0,97273	0,98182	0,95455	0,9	0,92727	0,99091	0,96364	0,93636
12	0,95455	0,98182	0,95455	0,94545	0,87273	0,92727	0,81818	0,89091	0,81818	0,87273	0,97273	1	0,93636	0,94545	0,82727	0,94545	0,95455	0,95455	0,9
13	0,99091	0,96364	0,94545	0,92727	0,91818	0,96364	0,88182	0,95455	0,90909	0,90909	0,98182	0,93636	1	0,95455	0,92727	0,9	0,99091	0,92727	0,95455
14	0,97273	0,96364	0,94545	0,94545	0,94545	0,90909	0,94545	0,89091	0,91818	0,95455	0,94545	0,95455	1	0,90909	0,90909	0,97273	0,93636	0,93636	
15	0,93636	0,89091	0,85455	0,84545	0,91818	0,93636	0,97273	0,94545	0,99091	0,88182	0,9	0,82727	0,92727	0,90909	1	0,80909	0,93636	0,82727	0,95455
16	0,90909	0,95455	0,93636	0,85455	0,81818	0,90909	0,81818	0,85455	0,8	0,85455	0,92727	0,94545	0,9	0,90909	0,80909	1	0,90909	0,89091	0,81818
17	1	0,98182	0,95455	0,95455	0,94545	0,98182	0,9	0,96364	0,91818	0,91818	0,99091	0,95455	0,99091	0,97273	0,93636	0,90909	1	0,95455	0,96364
18	0,95455	0,97273	0,90909	0,98182	0,88182	0,91818	0,78182	0,91818	0,79091	0,87273	0,96364	0,95455	0,92727	0,93636	0,82727	0,89091	0,95455	1	0,9
19	0,96364	0,92727	0,86364	0,93636	0,92727	0,92727	0,91818	0,94545	0,93636	0,88182	0,93636	0,9	0,95455	0,93636	0,95455	0,81818	0,96364	0,9	1

Рис. 4. Окрашенная корреляционная матрица экспертной оценки сравнительной важности факторов производственной безопасности на основании индивидуальных мнений (табл. 2)

Представленные на рис. 2.4-2.6 данные свидетельствуют о хорошем согласии экспертов в

отношении важностного ранжирования выбранных факторов производственной безопасности.

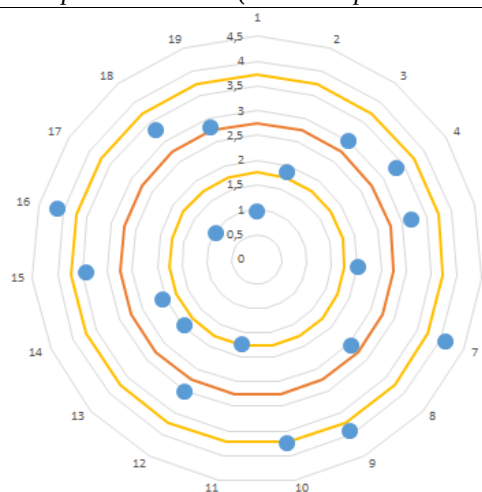


Рис. 5. Отклонение частных экспертных мнений от коллективного среднего

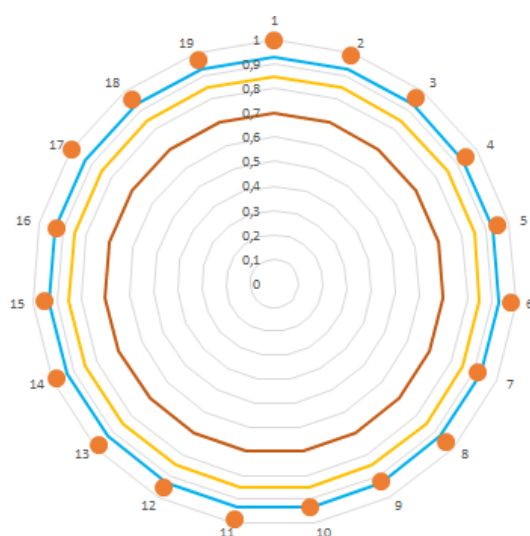


Рис. 6. Корреляция частных экспертных мнений с коллективным средним.
Обозначения в соответствии с рис. 2

Данные рис. 7 представляют альтернативную интерпретацию данных рис. 5, позволяя оценить

отличие (среднеквадратичное отклонение) частных экспертных мнений от усредненного.

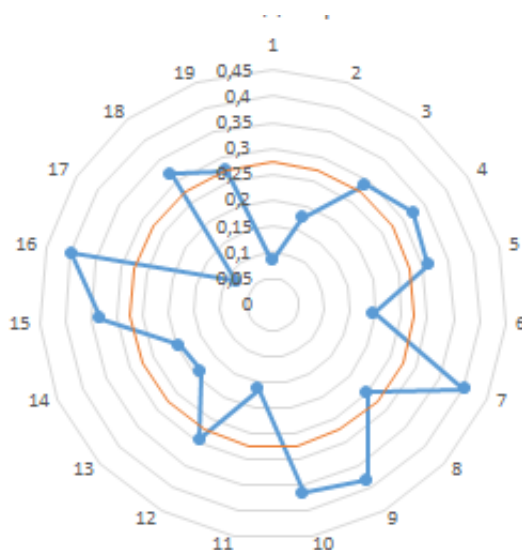


Рис. 7. Соотношение отклонения частных экспертных мнений (приведены ломаной линией с маркерами) с коллективным среднеквадратичным отклонением (приведено сплошной линией)

Проанализируем закономерности в отклонении частных экспертных мнений от коллективного среднего, выбрав мерой отклонения величину угла между векторами индивидуального и коллективного мнений. Если обозначить её символом α , распределение мнений характеризуется функцией $F(\alpha)$, показанной на рис.

8. Там же, наряду с эмпирическим распределением $F(\alpha)$, приведены результаты её аппроксимации кусочно-линейной зависимостью. Характер этих данных позволяет заключить, что выбранная для ранжирования равномерная целочисленная шкала достаточна для уверенного определения ценностных предпочтений.

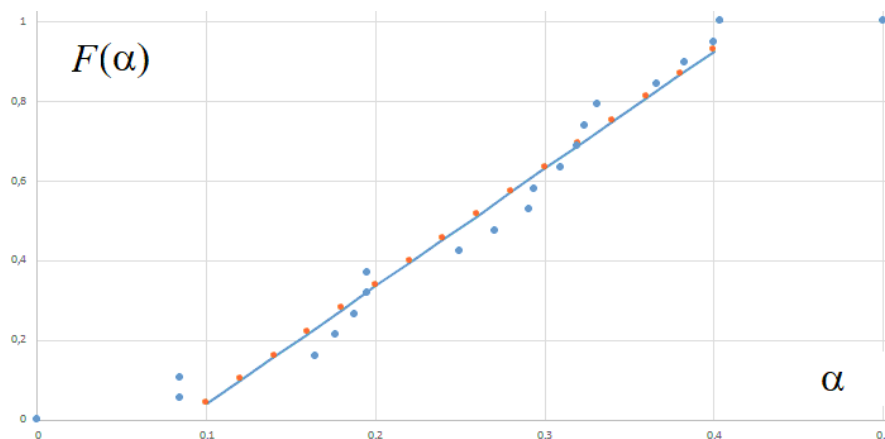


Рис. 8. Эмпирическая функция распределения для отклонения частных экспертных мнений от коллективного среднего и ее аппроксимация кусочно-линейной зависимостью

Формульная аппроксимация данных рис. 8 имеет вид:

$$F(\alpha) = \begin{cases} 0, & \alpha < 0.08606 \\ 2.95143\alpha - 0.254, & 0.08606 \leq \alpha \leq 0.42488 \\ 1, & \alpha > 0.42488 \end{cases} \quad (2)$$

Для подтверждения, что формула (2) хорошо описывает исходные данные, сопоставим интегральные характеристики этого модельного распределения с аналогичными характеристиками для исходных (на графике рис. 8 синим цветом) точек. В качестве интегральных характеристик выберем среднее квадратичное отклонение, асимметрию и эксцесс. Для равномерного распределения

$$F(\alpha) = \begin{cases} 0, & \alpha < a \\ \frac{\alpha - a}{b - a}, & a \leq \alpha \leq b \\ 1, & \alpha > b \end{cases} \quad (3)$$

среднеквадратичное отклонение σ , асимметрия (skewness) и эксцесс (kurtosis) выражаются соотношениями:

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 dF(\alpha)} = \sqrt{\int_a^b \left(\alpha - \frac{b+a}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{b-a} d\alpha} = \frac{|b-a|}{\sqrt{12}}, \quad (4)$$

$$\text{Skewness} = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha - \langle \alpha \rangle)^3 dF(\alpha) = \frac{1}{\sigma^3} \int_a^b \left(\alpha - \frac{b+a}{2}\right)^3 \cdot \frac{1}{b-a} d\alpha = 0, \quad (5)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha - \langle \alpha \rangle)^4 dF(\alpha) = \frac{1}{\sigma^4} \int_a^b \left(\alpha - \frac{b+a}{2}\right)^4 \cdot \frac{1}{b-a} d\alpha = \frac{9}{5}, \quad (6)$$

в которых $\langle \alpha \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha dF(\alpha)$. Результаты сопоставления теоретических (для равномерного

распределения (3)) и фактических (рис. 8) данных приведено в табл. 3.

Таблица 3

Теоретические и фактические моменты равномерного распределения применительно к данным рис. 8

Источник	Параметр	σ	Skewness	Kurtosis
Теория		0,09781	0	9/5
Фактически		0,0986	-0,325	1,902

Данные табл. 3 подтверждают равномерность разброса частных экспертных мнений от коллективного среднего, что подтверждает

высокое качество выполненного экспертной комиссией ранжирования производственных

факторов по важности в отношении безопасности труда.

В описанной ситуации представляет интерес проанализировать чувствительность полученного результата (экспертной оценки) по отношению к возмущениям, как самой процедуры оценивания, так и по отношению к погрешностям мнения отдельных экспертов и/или составу/численности экспертного сообщества. Характер и результаты соответствующей работы описаны в следующем параграфе.

5. Устойчивость экспертной оценки к неопределенности частных мнений

Важную роль в математическом анализе реальных процессов играет устойчивость моделей. Устойчивость означает малое изменение результата при малом изменении исходных данных. Мы «возмущали» исходные данные,

случайно переставляя две смежные позиции во мнении каждого эксперта. Такое возмущение назовем однократным или единичным. Результат влияния однократного возмущения на ансамбль мнений и его статистические параметры показан на рис. 9-13, табл. 4.

Возмущение экспертных мнений осуществлялось в рамках следующей процедуры. Исходное мнение каждого из экспертов претерпевало единичную случайную коррекцию. Случайным образом выбирался фактор с рангом x и равновероятным образом взаимно переставлялся с фактором, имеющим ранг на единицу больше, или на единицу меньше. Затем совокупность возмущенных экспертных мнений подвергалось статистической обработке при помощи алгоритмов описанных выше.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	0,96364	0,95455	0,93636	0,94545	0,98182	0,84545	0,92727	0,92727	0,92727	0,96364	0,91818	0,96364	0,97273	0,91818	0,91818	0,97273	0,95455	0,96364
2	0,96364	1	0,95455	0,9	0,90909	0,95455	0,83636	0,91818	0,92727	0,9	0,97273	0,95455	0,92727	0,96364	0,90909	0,97273	0,95455	0,93636	0,91818
3	0,95455	0,95455	1	0,88182	0,9	0,97273	0,77273	0,86364	0,88182	0,9	0,97273	0,91818	0,90909	0,94545	0,83636	0,90909	0,92727	0,90909	0,88182
4	0,93636	0,9	0,88182	1	0,90909	0,90909	0,8	0,85455	0,81818	0,87273	0,91818	0,91818	0,92727	0,96364	0,84545	0,85455	0,91818	0,95455	0,94545
5	0,94545	0,90909	0,9	0,90909	1	0,94545	0,86364	0,94545	0,90909	0,94545	0,90909	0,85455	0,92727	0,95455	0,91818	0,84545	0,93636	0,88182	0,92727
6	0,98182	0,95455	0,97273	0,90909	0,94545	1	0,87273	0,9	0,94545	0,92727	0,94545	0,89091	0,93636	0,97273	0,91818	0,90909	0,95455	0,90909	0,92727
7	0,84545	0,83636	0,77273	0,8	0,86364	0,87273	1	0,81818	0,94545	0,84545	0,75455	0,75455	0,78182	0,88182	0,97273	0,80909	0,82727	0,73636	0,86364
8	0,92727	0,91818	0,86364	0,85455	0,94545	0,9	0,81818	1	0,90909	0,95455	0,91818	0,86364	0,95455	0,91818	0,91818	0,87273	0,96364	0,86364	0,91818
9	0,92727	0,92727	0,88182	0,81818	0,90909	0,94545	0,94545	0,90909	1	0,89091	0,87273	0,82727	0,89091	0,91818	0,97273	0,88182	0,92727	0,80909	0,90909
10	0,92727	0,9	0,9	0,87273	0,94545	0,92727	0,84545	0,95455	0,89091	1	0,90909	0,84545	0,91818	0,93636	0,91818	0,85455	0,92727	0,87273	0,89091
11	0,96364	0,97273	0,97273	0,91818	0,90909	0,94545	0,75455	0,91818	0,87273	0,90909	1	0,96364	0,95455	0,95455	0,84545	0,92727	0,96364	0,94545	0,92727
12	0,91818	0,95455	0,91818	0,91818	0,85455	0,89091	0,75455	0,86364	0,82727	0,84545	0,96364	1	0,9	0,94545	0,82727	0,95455	0,92727	0,91818	0,91818
13	0,96364	0,92727	0,90909	0,92727	0,92727	0,93636	0,78182	0,95455	0,89091	0,91818	0,95455	0,9	1	0,94545	0,82727	0,87273	0,99091	0,91818	0,95455
14	0,97273	0,96364	0,94545	0,96364	0,95455	0,97273	0,88182	0,91818	0,91818	0,93636	0,95455	0,94545	0,94545	1	0,92727	0,93636	0,96364	0,93636	0,95455
15	0,91818	0,90909	0,83636	0,84545	0,91818	0,91818	0,92727	0,91818	0,92727	0,91818	0,84545	0,82727	0,87273	0,92727	1	0,88182	0,90909	0,82727	0,91818
16	0,91818	0,97273	0,90909	0,85455	0,84545	0,90909	0,80909	0,87273	0,88182	0,85455	0,92727	0,95455	0,87273	0,93636	0,88182	1	0,91818	0,89091	0,87273
17	0,97273	0,95455	0,92727	0,91818	0,93636	0,95455	0,82727	0,96364	0,92727	0,92727	0,96364	0,92727	0,99091	0,96364	0,90909	0,91818	1	0,90909	0,96364
18	0,95455	0,93636	0,90909	0,95455	0,88182	0,90909	0,73636	0,86364	0,80909	0,87273	0,94545	0,91818	0,91818	0,93636	0,82727	0,89091	0,90909	1	0,90909
19	0,96364	0,91818	0,88182	0,94545	0,92727	0,92727	0,86364	0,91818	0,90909	0,89091	0,92727	0,91818	0,95455	0,95455	0,91818	0,87273	0,96364	0,90909	1

Рис. 9. Корреляционная матрица экспертной оценки сравнительной важности факторов производственной безопасности на основании индивидуальных мнений 19-ти экспертов для одной случайной перестановки у каждого эксперта

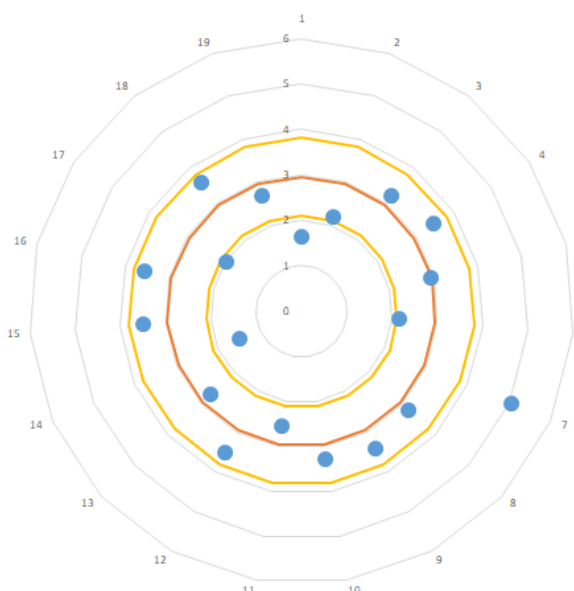


Рис. 10. Отклонение частных экспертных мнений от коллективного среднего, одна случайная перестановка для каждого эксперта

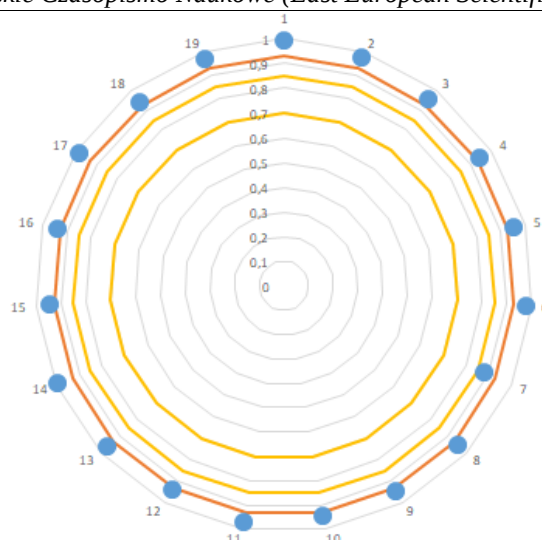


Рис. 11. Корреляция частных экспертных мнений с коллективным средним. Одна случайная перестановка для каждого эксперта. Обозначения согласно рис. 2

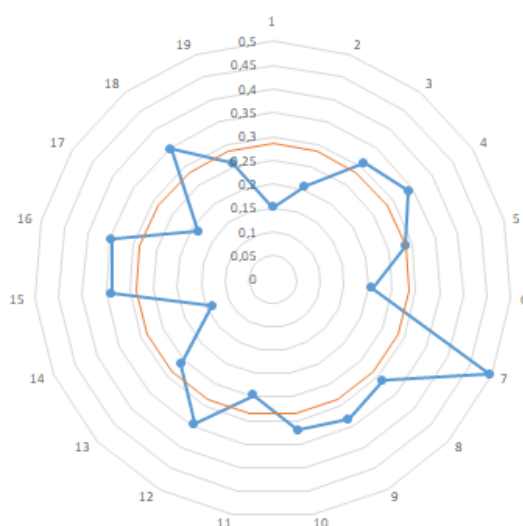


Рис. 12. Соотношение частных экспертных мнений (приведены ломаной линией с маркерами) с коллективным средним (приведено сплошной линией), одна случайная перестановка для каждого эксперта

Как видно из данных на рис. 9-12 единичное случайное возмущение привело к появлению одного эксперта с существенно отличающимся от общего мнением. В числовом выражении

возмущение индивидуального мнения на $\sim 1\%$ привело к несогласованности общей оценки с на $\sim 0,5\%$.

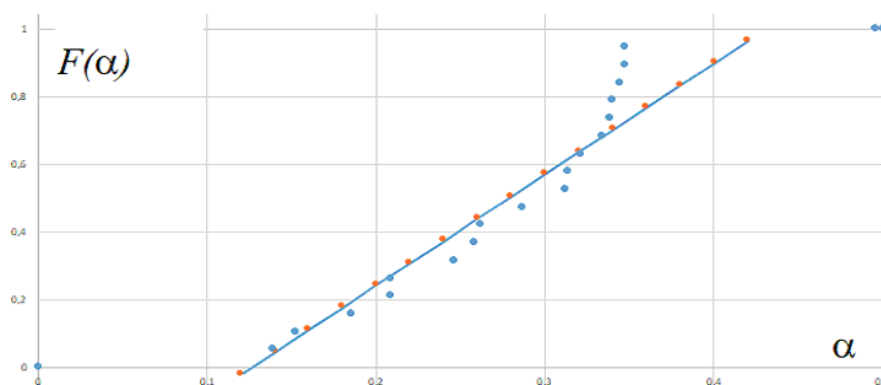


Рис. 13. Эмпирическая функция распределения для отклонения частных экспертных мнений от коллективного среднего и ее аппроксимация кусочно-линейной зависимостью, одна случайная перестановка для каждого эксперта

Теоретические и фактические моменты равномерного однократно возмущенного распределения экспертных мнений

Источник Параметр	σ	Skewness	Kurtosis
Теория	0,09781	0	9/5
Фактически	0,08495	0,226	2,982

Как видно из данных рис. 13 и табл. 4, разброс экспертных мнений при однократном возмущении характеризуется, вероятно, функцией распределения, похожей на Гауссову нормальную

Определим параметры $\langle \alpha \rangle$ и σ , воспользовавшись решателем оптимизационных задач, встроенным в Excel. Результат инициализации Гауссовой функции показан на рис. 14 и в табл. 5.

$$P(\alpha) = dF(\alpha)/d\alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\alpha - \langle \alpha \rangle)^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

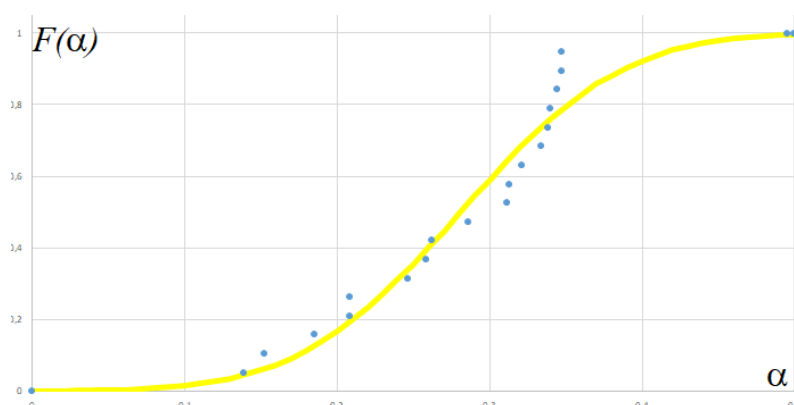


Рис. 14. Эмпирическая функция распределения для отклонения частных экспертных мнений от коллективного среднего и ее аппроксимация нормальным распределением Гаусса ($\langle \alpha \rangle = 0,280912$ $\sigma = 0,083505$), одна случайная перестановка для каждого эксперта

Таблица 5

Теоретические и фактические моменты нормального однократно возмущенного распределения экспертных мнений

Источник Параметр	σ	Skewness	Kurtosis
Теория	0,0833	0	3
Фактически	0,085	0,225	2,982

Кроме того, невязка фактических возмущенных мнений с теоретическим результатом в рамках гипотезы о нормальном характере разброса мнений вдвое меньше, чем невязка с теоретически предполагаемым результатом в рамках гипотезы о равномерном разбросе мнений.

Усилив возмущение, разыграв по две, три и т.д. случайные перестановки у каждого эксперта, получили результат, который сводится к следующему. При данной численности экспертной группы и согласованности предъявленных мнений разработанная модель устойчива к неизбежным единичным ошибкам каждого эксперта. Такой результат объясняется высокой степенью согласия их начальных мнений.

6. Влияние численности экспертной группы на результаты оценивания

Поскольку отбор большого числа

квалифицированных экспертов часто затруднен, представляет интерес исследовать, как качество экспертной оценки зависит от численности группы. В расчетах мы последовательно сокращали численность экспертов по схеме $19 \rightarrow 13 \rightarrow 7$ человек. Результаты вычислений показаны на рис. 15 и сводятся к следующему. С понижением качества отдельных экспертов, выражаемого увеличивающимся числом ошибок, согласованность экспертного мнения снижается. При этом средний уровень коэффициента корреляции уменьшается со скоростью $\sim 1.5\%$ на каждую ошибку вне зависимости от числа экспертов, которые выбираются из качественных 19-ти. Установлено, что допустимым является сокращение нашей экспертной группы до семи произвольно выбранных (из 19-ти).

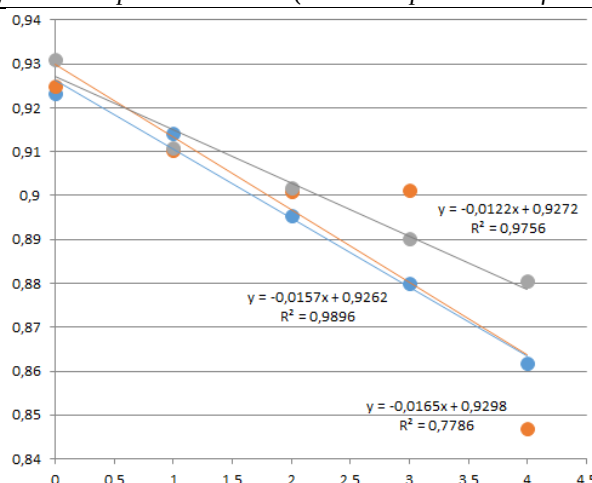


Рис. 15. Снижение согласованности мнений экспертной комиссии в зависимости от числа ошибок, допущенных каждым экспертом. Синей линией (маркером) отображены мнения 19-ти экспертов.

Оранжевой – 13-ти экспертов и серой – 7-ми.

Там же приведена линейная аппроксимация этих зависимостей

Практически, используя предложенный в работе математический подход, можно не только сократить число экспертов в 2.5 раза, но и допустить, что каждый из них имеет право на 1-2 ошибки в подобном тесте.

Существенно, что различные способы представления данных, использованные в работе, облегчают и ускоряют анализ экспертных мнений.

Заключение

Результаты экспертного опроса, выполненные по классическому и детализованному алгоритму, в целом согласуются: мнения экспертного сообщества в вопросе относительной значимости опасности и вредности отдельных производственных факторов непротиворечивы.

Однако, в отличие от классического, предлагаемый метод позволил легко выявить недостаточно согласных экспертов. Предложенные здесь алгоритмы выявления противоречивых данных основаны на целевом раскрывании

корреляционных матриц и удобных лепестковых диаграммах. Такой подход снимает всякие ограничения на число анализируемых факторов и привлекаемых экспертов.

Обнаруженные в ходе компьютерного эксперимента возможности разработанных алгоритмов подтверждают их пригодность для оптимизации экспертных групп и процедур.

Список первоисточников

1. Захарова О.А., Селихина А.В. Моделирование информационно-аналитической систем машиностроения производственной безопасности на основе экспертных оценок. Вестник ДГТУ №1, 2020г.
2. Гельман В. Я. Решение математических задач средствами Excel. Практикум. Учебник для ВУЗов – Санкт-Петербург: 2003.-240 с.
3. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере. ИНФРА-М, 2002.-528с.

УДК 62-533.65

ГРНТИ 75.31.25

Chermalykh A.V.

candidate of engineering sciences, associate professor
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Brovko V.O.

postgraduate at the department of automation control of electrotechnical systems
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

THE AIR EXCHANGE CONTROL SYSTEM IN PUBLIC AREAS DEPENDING ON TEMPERATURE AND HUMIDITY

Чермалых Александр Валентинович

к.т.н., доц.

Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского

Бровко Валерия Олеговна

аспирант кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами
Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского