

УДК 621.311

**СОГЛАСОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ ДИАГНОСТИКЕ  
ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ****В.З. Манусов, Д.О. Крюков, Дж.С. Ахьёев***Новосибирский государственный технический университет*

Рассмотрены особенности диагностики технического состояния высоковольтного электрооборудования электрических сетей и систем электроснабжения на основе нечеткой логики экспертных оценок. На первоначальном этапе устанавливаются нечеткие отношения между признаками неисправностей (дефектов) и их возможными побудительными причинами. Специфика задачи определяется главным образом видом полученных оценок, а именно: причинно-следственных связей, между контролируруемыми параметрами трансформаторного оборудования и дефектами, способными повлечь за собой их изменение и возможность дальнейшего функционирования объекта. Наряду с этим уделено большое внимание проблеме степени согласованности экспертных мнений, от которых зависит качество экспертизы текущего технического состояния исследуемого объекта. В этой связи в работе предпринята попытка дать конкретные реалистические рекомендации по применению статистических методов для анализа экспертных оценок в зависимости от текущего технического состояния электрооборудования. Приведен сравнительный анализ среднеарифметических и медианных оценок согласованности мнений экспертов. Показано, что известный среднеарифметический подход имеет такой существенный недостаток, как неустойчивость к выбросам отдельных мнений всей совокупности и смещению под действием мнений «экспертов-диссидентов». Это может быть обусловлено как их некомпетентностью, так и наивысшей компетентностью. Этих недостатков лишена медианная оценка, которая является более устойчивой к выбросам и попросту отбрасывает часть радикально отклоняющихся мнений экспертов. Впервые для этих целей использована медиана Кемени в задачах технической диагностики, которая базируется на вводе метрики в пространстве множества мнений экспертов и аксиоматическом введении расстояния между ними. Кроме того, сформирован критерий для определения оптимального количества экспертов в группе.

*Ключевые слова:* электроэнергетика, электрооборудование электроэнергетических систем, техническая диагностика, текущее состояние, экспертные оценки, степень согласованности, коэффициент конкордации, медиана Кемени, нечеткие причинно-следственные отношения, нечеткая логика

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-72-84

**Введение**

Развитие технического прогресса и усложнение электроэнергетических систем (ЭЭС) выдвигают все более строгие требования по обеспечению их надежности. Также предъявляются все более высокие требования к эксплуатационному персоналу, углубленному знанию определенных процессов, касающихся работы тех или иных звеньев технических систем. Такое положение дел неминуемо образует появление и повышение роли экспертов – специалистов в конкретных узких областях техники.

Задача экспертных оценок становится все более актуальной в связи с тотальным переходом от системы планово-предупредительных ремонтов к системе ремонтов по текущему техническому состоянию электрооборудования.

Электроэнергетический сектор имеет свой круг задач как организационного, так и технического характера. Задачи технического характера традиционно решаются при помощи инженерных и метрологических подходов, но как было показано выше, усложнение структуры электрических сетей и систем электроснабжения, а также требований к эксплуатации электротехнического оборудования порой не позволяет рядовому специалисту сделать однозначный вывод о состоянии электроустановки. Например, силового трансформатора, на основании показаний датчиков температуры, газовых хроматографов и т. д. В связи с этим дилемма о сохранении эксплуатационного режима или же выведении из работы трансформатора для лица, принимающего решения (ЛПР), может оказаться трудноразрешимой. Здесь можно рассматривать два пути решения поставленной задачи: с одной стороны, это применение компьютеризированных экспертных систем, и с другой, сбор и обработка экспертных мнений, относительно поставленной задачи. Однако первый из двух подходов может оказаться бесполезным в случае, если задача будет иметь совершенно уникальный характер; второй же подход оказывается более трудоемким, но вместе с тем способен привести к более существенному результату. Остановимся на этом пути подробнее.

Главная особенность и преимущество, а вместе с тем и ответственная проблема экспертных оценок при определении текущего технического состояния электрооборудования заключается в ограниченности количества компетентных специалистов – экспертов в конкретных областях. Число экспертов обычно не превышает 25, что накладывает некоторые ограничения на применение статистических методов для поиска обобщенного экспертного мнения [1–2]. В меньшей степени такие ограничения испытывают алгебраические методы. Совсем избавиться от каких-то ограничений можно, непосредственно анализируя полученные экспертные оценки. Однако такой подход крайне трудоемок для лица, принимающего решения, и неминуемо вносит дополнительный вклад в субъективные мнения экспертов, поэтому в дальнейшем повествование будет касаться лишь математических методов обработки мнений экспертов.

Другая особенность, и на этот раз ключевая проблема экспертных оценок, заключается в их несогласованности. Проблема согласованности возникает особенно остро в случае с электроэнергетическим сектором, где ярко выражен дуализм мнений специалистов-теоретиков и специалистов, работающих в эксплуатации. Вполне ожидаема ситуация, что в результате экспертизы мнения распределятся по двум кластерам, соответственно в такой ситуации ни о какой согласованности речи идти не может, и в этом случае анализ нужно проводить в каждом кластере отдельно.

### **1. Постановка задачи**

На конкретном примере покажем все этапы от анализа согласованности до поиска обобщенного мнения экспертов; дадим рекомендации по применению тех или иных методов в определенных ситуациях с учетом специфики задачи в техническом анализе возможных состояний электрооборудования. В заключение попытаемся сформулировать критерий для выбора оптимального количества экспертов.

В качестве исходных данных приняты экспертные мнения, выраженные в виде нечетких оценок от 0 до 1, табл. 1 [3–7], выражающие вероятность возникновения дефекта в трансформаторном оборудовании при отклонении от нормы контролируемых параметров.

Таблица 1 / Table 1

**Пример оценок причинно-следственных связей одного из экспертов**  
**Example of the casual relationship of an expert**

Контролируемый параметр (эксперт 1) / Controlled parameters (expert 1)	Вид дефекта / Type of defects							
	Дефект в обмотке / A defect in the winding	Дефект в изоляции / A defect in the insulation	Дефект сердечника / Core defect	Горячие точки / Hot spots	Дугообразование / Arcing	Пузырьки газа / Gas bubbles	Грязь в масле / Dirt in oil	Утечки в системе / Leaks in the system
Влага в масле/ Moisture in oil	0	0	0	0,7	0	0	0	0,3
Газы в масле/ Gases in oil	0,1	0,5	0,1	0,3	0,7	0,3	0,2	0
Частичные разряды/ Partial discharges	0,2	0,9	0	0	0,3	0,1	0,1	0
Температура/ Temperature	0,8	0	0,1	0,5	0	0	0	0
Вибрация/ Vibration	0,3	0	0,7	0	0	0	0	0
Пробивное напряжение масла/ The breakdown voltage of oil	0	0	0	0,5	0	0,2	0,7	0
Перегревы/ Overheating	0,3	0	0,1	0,9	0	0	0	0

Всего рассмотрено девять совокупностей мнений. Можно заметить, что одна целая таблица содержит в себе большое количество информации, неудобной для анализа. Для упрощения анализа демонстрационного примера будем изолированно рассматривать возможности возникновения различных дефектов в оборудовании в связи с исходным параметром «Газы в масле». Этот параметр выбран еще и потому, что он содержит наибольшее количество оценок по различным факторам, а значит, можно наиболее широко сравнивать имеющиеся методы. В табл. 2 приведены все экспертные мнения по выбранному параметру. Приступим к их анализу.

Для упрощения анализа будем считать оценки равномерно распределенными на множестве оценок. Будем также считать равными компетентности экспертов.

## 2. Проверка согласованности

Для проверки согласованности можно пойти разными путями, основные из которых изложены в [8]. Здесь же воспользуемся коэффициентом конкордации.

Для вычисления коэффициента конкордации необходимо привести полученные экспертные оценки к единому нормированному виду [1] такому, чтобы суммы оценок всех экспертов были равны некоторому числу. Сделать это проще всего, заменив нечеткие оценки их порядковыми рангами, а оценки, имеющие одинаковый ранг, заменить на среднее арифметическое двух рангов соответствующих оценок. Результаты этих преобразований отражены в табл. 3 (для удобства таблица транспонирована).

Таблица 2 / Table 2

**Оценки экспертов по параметру «Газы в масле»**  
**Estimates of the experts on the parameter "Gases in Oil"**

Газы в масле								
№ эксперта/ Expert no.	Дефект в обмотке/ A defect in the winding a	Дефект в изоляции / A defect in the insulation b	Дефект сердечника/ Core defect c	Горячие точки/ Hot spots d	Дугообразование/ Arcing e	Пузырьки газа/ Gas bubbles f	Грязь в масле/ Dirt in oil g	Утечки в системе/ Leaks in the system h
1	0,1	0,5	0,2	0,3	0,7	0,3	0,2	0
2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,5	0,9	0,7	0
3	0,3	0,5	0	0,8	0,3	0,4	0,2	0
4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,6	0,4	0,1	0
5	0,3	0,4	0,1	0,5	0,3	0,1	0,1	0
6	0,3	0,8	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0
7	0,3	0,5	0	0	0,2	0,1	0,4	0
8	0,5	0,3	0,1	0,6	0,5	0,9	0,1	0
9	0,3	0,1	0,1	0,5	0,5	0,6	0,2	0

Таблица 3 / Table 3

**Матрица рангов**  
**The matrix of rank**

Факторы / factors Эксперты/ experts	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Сумма рангов/ The sum of ranks	d	d <sup>2</sup>
x1	2	4	4,5	5,5	5,5	6,5	6	5,5	5	44,5	4	16
x2	7	5	7	4	7	8	8	4	2,5	52,5	12	144
x3	3,5	2	1,5	2,5	3	2,5	2	2,5	2,5	22	-18,5	342,25
x4	5,5	3	8	5,5	8	6,5	2	7	6,5	52	11,5	132,25
x5	8	6	4,5	8	5,5	4,5	5	5,5	6,5	53,5	13	169
x6	5,5	8	6	7	3	4,5	4	8	8	54	13,5	182,25
x7	3,5	7	3	2,5	3	2,5	7	2,5	4	35	-5,5	30,25
x8	1	1	1,5	1	1	1	2	1	1	10,5	-30	900
Σ	36	36	36	36	36	36	36	36	36	324		1916

По каждому фактору вычисляется сумма рангов, затем вычисляется среднее арифметическое сумм рангов, равное 40,5. Далее отыскиваются отклонения  $d$  от средней арифметической сумм рангов по каждому фактору, что можно коротко записать выражением

$$d = \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ij} , \quad (1)$$

где  $m$  – количество экспертов;  $n$  – количество факторов.

Далее можно перейти непосредственно к вычислению коэффициента конкордации по выражению

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}m^2(n^3 - n) - m\sum T_i}, \quad (2)$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений сумм рангов от средней суммы, а  $T_i$  определяется как

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^n (t_j^3 - t_j), \quad (3)$$

где  $t_j$  определяется как количество повторяющихся элементов в ответах  $i$ -го эксперта.

Подставляя в (2) все известные величины, получим в итоге коэффициент конкордации  $W$ , равный 0,58.

Как и любой статистический коэффициент, коэффициент конкордации необходимо проверить на статистическую значимость, например, по критерию хи-квадрат. То есть должно выполняться условие 4

$$m(n-1)W > \chi_{n-1, \alpha}^2. \quad (4)$$

Для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  имеем табличное значение хи-квадрат, равное 14,07, при этом значение статистики коэффициента равно 36,54. То есть условие 4 выполняется! Следовательно, можно утверждать, что нулевая гипотеза об отсутствии статистической связи между выборками экспертных мнений может быть отвергнута с уровнем значимости 0,05.

Тем не менее полученное значение коэффициента конкордации сообщает нам о «средней» степени согласованности экспертных мнений, что в дальнейшем может отразиться на сопоставлении методов поиска обобщенного мнения. Примем это во внимание и двинемся дальше.

### 3. Методы средних арифметических и медиан

Поиск среднего арифметического некоторой совокупности является стандартным подходом не только в экспертных методах, но и в техническом анализе. Однако этот метод не лишен такого недостатка, как неустойчивость к выбросам отдельных значений совокупности, ибо такие значения способны сместить среднее арифметическое достаточно существенно, в результате чего оно перестанет соответствовать интуитивному представлению о средней величине. Такого недостатка лишена медианная оценка, которая нечувствительна к выбросам и всегда определяется как 0,5-квантиль распределения или значение, делящее площадь под кривой распределения на две равные части, что достаточно хорошо соответствует интуитивному пониманию среднего значения. На деле же оба метода имеют как свои преимущества, так и недостатки. Если среднее арифметическое начинает смещаться под действием мнения экспертов-диссидентов, мнения, которые далеко не всегда оказываются неправильными (возможно именно эти эксперты обладают наивысшей компетентностью), то медианная оценка попросту «обрубает» часть информации, которая, возможно, могла бы быть ценной для ЛПР. Поэтому в соответствии с концепцией устойчивости [8] рекомендуется применять обе оценки сразу, с целью выделить выводы, получаемые одновременно в обоих методах. Результаты обработки табл. 2 отражены в табл. 4.



Заполнение матрицы элементами происходит по следующему правилу:

- если  $x < y$ , то 1;
- если  $x = y$ , то 1;
- если  $x > y$ , то 0,

где  $x$  – текущий индекс строки;  $y$  – текущий индекс столбца.

Всего матриц парных сравнений будет 9, по количеству экспертов. Каждая матрица парных сравнений представляется элементом множества  $P$  – множества экспертных мнений. Либо, если вводить метрику и поместить элементы множества  $P$  в пространство, то элементы будут представляться точками этого пространства, что схематично (на примере пяти экспертов) можно видеть на рис. 1.

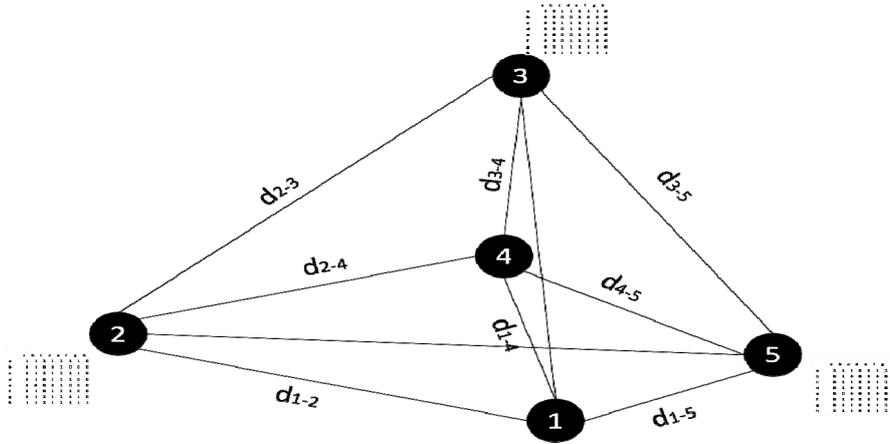


Рис. 1 – Пространство экспертных мнений

Fig. 1 – The space expert opinions

Другими словами, каждая матрица парных сравнений есть точка в пространстве экспертных мнений [9–10]. Далее аксиоматически вводится расстояние между двумя точками этого пространства, как сумма модулей разности всех элементов матриц, стоящих на эквивалентных позициях (5),

$$d(P_i, P_j) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n |p_{i,k,l} - p_{j,k,l}|, \quad (5)$$

где  $p_{k,l}$  – элемент матрицы парных сравнений,  $d$  – расстояние Кемени.

Тогда, можно определить медиану Кемени как некоторый элемент множества  $P$ , наименее удаленный от всех остальных элементов, что математически можно трактовать как минимальную сумму расстояний от фиксированного элемента множества  $P$  до всех остальных элементов данного множества:

$$M^*(P_1, \dots, P_m) = \arg \min_P \sum_{i=1}^m d(P, P_i). \quad (6)$$

И, представив полученные расстояния в виде таблицы, по выражению (6) получим медиану Кемени.

Таблица 6 / Table 6

**Суммы расстояний Кемени от мнения каждого эксперта до всех остальных**  
**Kemeny sum of the distances from each expert opinion to all others**

№ эксперта/ Expert no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сумма расстояний/ The sum of distance	129	157	107	115	129	114	184	121	126

Медианой оказалось мнение эксперта под номером 3. Добавим совокупность оценок данного эксперта в табл. 4 и отразим полученное в табл. 7.

Таблица 7 / Table 7

**Результаты обработки экспертных оценок с медианой Кемени**  
**The results of processing of expert evaluations with the Kemeny median**

Газы в масле/ Gasses in oil	Дефект в обмотке/ A defect in the winding a	Дефект в изоляции/ A defect in the insulation b	Дефект сердечника/ Core defect c	Горячие точки/ Hot spots d	Дугообразование/ Arcing e	Пузырьки газа/ Gas bubbles f	Грязь в масле/ Dirt in oil g
Среднее арифметическое $M(x_j)$ / Arithmetical mean $M(x_j)$	0,3	0,411	0,089	0,389	0,422	0,433	0,233
Медиана/ median	0,3	0,4	0,1	0,3	0,5	0,4	0,2
Медиана Кемени: мнение эксперта № 3 / Median Kemeny: opinion expert N 3	0,3	0,5	0	0,8	0,3	0,4	0,2

Анализируя полученную таблицу, уместно вспомнить о полученном выше значении коэффициента конкордации  $W = 0,58$ . Поэтому вполне ожидаемо, что оценки эксперта, мнение которого является медианой Кемени, будут отличаться, и порой разительно, от средних и медианных оценок. Что позволяет нам сделать вывод о том, что высокая степень согласованности (порядка  $W \sim 0,7-0,9$  [11–15]) является необходимым условием для целесообразности применения медианы Кемени и других непараметрических алгебраических методов.

### 5. Количество экспертов

Чтобы сформулировать критерий для определения максимального количества экспертов, воспользуемся результатами, представленными в табл. 5. Из полученных расстояний Кемени хорошо видно, что среди экспертов явным образом присутствует диссидент – эксперт № 7; мнение которого значительно отличается от мнений всех остальных экспертов. Обычно в подобном случае мнением этого эксперта пренебрегают в анализе оценок, но, как было сказано выше, существует вероятность того, что мнение этого эксперта находится ближе всего к истине, в то время как другие эксперты совокупно более далеки от истины. Другими словами, существует вероятность того, что мнение диссидента является самым компетентным в группе.

Поскольку получение объективной оценки компетентности каждого эксперта является в общем случае невыполнимой задачей (можно рассчитывать только на субъективные мнения других экспертов или самого эксперта), то ЛПР должен принять решение об исключении или неисклoчении мнения эксперта из анализа [16]. Если рассматривать случай, когда ЛПР все же решает исключить мнение эксперта, то автоматически образуется вероятность того, что его мнение было наиболее значимым, и, как следствие, весь анализ других мнений оказывается ошибочным.

Вернемся к рассмотренному выше примеру. Если для упрощения принять, что мнения экспертов распределены равномерно (как было сказано выше), а их компетенции равны, то получается, что вероятность получения ошибочного результата анализа равна  $1/9 = 0,111$ . Таким образом, мы приходим к выводу, что ввиду (как предполагается, из-за отсутствия детальной информации) равной компетентности экспертов у эксперта № 7 появляется вероятность, равная 0,111, «предсказать» наиболее близкий к истинному результат. А, следовательно, группа из оставшихся экспертов из 8 человек имеет вероятность  $8/9 = 0,89$ , что область (далее будем называть ее рабочей областью), образованная из покрытия мнений 8 экспертов (рис. 2) окажется ближе к истине, чем мнение эксперта № 7.



Рис. 2 – Наглядное представление о расположении мнений экспертов в пространстве (желтым выделена рабочая область)

Fig. 2 – A visual representation of the location of the opinions of experts in the (yellow highlighted workspace)

Учитывая вышесказанное, можно обнаружить, что при увеличении количества экспертов в рабочей области увеличится и вероятность того, что анализируемые мнения будут ближе к истине (если не будет увеличиваться количество диссидентов), а значит, ближе к истине окажется и медиана Кемени.

Теперь сформулируем критерий. Если до проведения экспертизы мы предполагаем, что в выборке окажется не более одного диссидента, и задаемся желаемой вероятностью, что рабочая область окажется ближе к истине с вероятностью  $\alpha$ , то задаваемое количество экспертов  $n$ , мнения которых распределены равномерно, а компетентности считаются равными, должно удовлетворять выражению

$$\frac{n-1}{n} \geq \alpha. \quad (7)$$

Так, например, при задании желаемой вероятности  $\alpha = 0,9$  требуется количество экспертов  $n = 10$ .

### Заключение

Резюмируя вышесказанное, сформулируем рекомендации по применению методов анализа экспертных оценок.

Согласованность экспертных мнений является ключевым фактором для адекватности трактовки результата экспертизы. Согласованность можно оценить, используя коэффициент конкордации, не забывая при этом проверять его статистическую значимость.

Высокая степень согласованности позволяет практически безошибочно полагаться на оценки эксперта(-ов), являющиеся медианой Кемени.

При недостаточной согласованности ЛПР оставляет за собой право применить классические методы поиска обобщенного мнения (ср. ариф. и медиана) и на их основе делать выводы, либо настаивать на проведении дополнительной экспертизы.

Асимметрия в распределении оценок (наличие выбросов) предупреждает нас о необходимости использования медианной оценки, при этом нужно иметь в виду, что мнения экспертов-диссидентов будут отброшены, как ошибочные.

Предпринята попытка сформулировать критерий для определения оптимального количества экспертов в рабочей группе, на основании предположения о равномерности распределения экспертных мнений, равенности компетенций, а также наличия диссидентов в рабочей группе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Орлов А.И.** Организационно-экономическое моделирование. В 3 ч. Ч. 1: учебник. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 540 с.
2. **Горский В.Г., Гриценко А.А., Орлов А.И.** Метод согласования кластеризованных ранжировок // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 3. – С. 159–167.
3. **Манусов В.З., Ахьёев Дж.С.** Диагностирование трансформаторного электрооборудования на основе экспертных моделей с нечеткой логикой // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
4. **Manusov V.Z., Ahyoev Dzh.S.** Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 324–329. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.324.
5. **Кoffман А.** Введение в теорию нечетких множеств: пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
6. **Манусов В.З., Коваленко Д.И.** Нечеткие математические модели диагностики трансформаторного оборудования // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 2. – С. 254–257.
7. **Манусов В.З., Демидас Ю.М.** Статистика дефектов, приведших к выходу из строя силовых трансформаторов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 405–407.
8. **Литвак Б.Г.** Экспертная информация: методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
9. **Кемени Дж., Снелл Дж.** Кибернетическое моделирование: некоторые приложения. – М.: Советское радио, 1972. – 192 с.
10. **Секретарев Ю.А.** Получение и использование эвристической информации при принятии решений: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 36 с.
11. **Зотьев Д.Б.** К проблеме определения весовых коэффициентов на основании экспертных оценок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 75–78.
12. **Новиков Д.А., Орлов А.И.** Экспертные оценки – инструменты аналитика // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 4. – С. 3–4.

13. Хрусталеv С.А., Орлов А.И., Шаров В.Д. Математические методы оценки эффективности управленческих решений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 11. – С. 67–72.
14. Пугач О.В. Математические методы оценки рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 7. – С. 64–69.
15. Манусов В.З., Крюков Д.О., Ахьёев Дж.С. Согласование экспертных оценок в задаче текущей технической диагностики трансформаторного оборудования // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: VI Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 70-летию Рубцовского индустриального института, 24–25 ноября 2016 г. – Рубцовск, 2016. – С. 267–275.
16. Петровский А.Б. Теория принятия решений: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2009. – 400 с.

## COORDINATION OF EXPERT APPRAISAL IN DIAGNOSTICS OF CURRENT CONDITION OF HIGH VOLTAGE ELECTRIC EQUIPMENT

**Manusov V.Z., Kryukov D.O., Ahyoev J.S.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Peculiarities of diagnostics of operating conditions of high-voltage electric power networks and power supply systems based on fuzzy logic expert assessments are described. First, fuzzy relationship between failure (defect) symptoms and their possible causes are determined. The specificity of the task is determined mainly through the obtained assessment, namely: causal relationship between the monitored parameters of transformer equipment and defects that may cause a change in them and the possibility of further operation of the facility. At the same time, great attention is paid to the problem of the coherence of expert opinions determining the quality of the examination of the current operating conditions of the object under study. Therefore, in an attempt is made to give specific and realistic recommendations for the use of statistical methods for the analysis of expert appraisals based on the current technical condition of electrical equipment. A comparative analysis of the arithmetic mean and median consistency estimates of expert opinions is discussed in the article. The well-known arithmetical mean has such a major drawback as the instability of bursts of certain opinions of the group and shifts under the influence of "expert – dissident" opinions." This may be due to both their incompetence and high competence. The median estimate is deprived of these shortcomings. It is more resistant to bursts and simply discards radically diverging expert opinions. The Kemeny median was used for the first time to diagnose technical problems. It is based on the introduction of the metric in the space of a variety of expert opinions and on axiomatic introduction of the distance between them. In addition, a criterion for determining an optimal number of experts in the group is formed.

*Keywords:* Electricity, electrical equipment of electric power systems, technical diagnostics, current conditions, expert appraisal, degrees of consistency, concordance coefficient, Kemeny median, fuzzy causal relations, fuzzy logic.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-72-84

### REFERENCES

1. Orlov A.I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie*. V 3 ch. Ch. 1 [Organizational and economic modeling. In 3 pt. Pt. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 540 p.
2. Gorskii V.G., Gritsenko A.A., Orlov A.I. Metod soglasovaniya klasterizovannykh ranzhirovok [A reconciliation method for clustered rankings]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2000, no. 3, pp. 159–167. (In Russian)

3. Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Diagnostirovanie transformatornogo elektrooborudovaniya na osnove ekspertnykh modelei s nechetkoi logikoi [Electrical transformer diagnostics based on expert models with fuzzy logic]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 2015, no. 5, pp. 45–48.
4. Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 792. Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering, pp. 324–329. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.324.
5. Kaufmann A. *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs*. Paris, Masson, 1977 (Russ. ed.: Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv*. Translated from French. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 432 p.).
6. Manusov V.Z., Kovalenko D.I. Nechetkie matematicheskie modeli diagnostiki transformatornogo oborudovaniya [Indistinct mathematical models of diagnostics of the transformer equipment]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2012, no. 2, pp. 254–257.
7. Manusov V.Z., Demidas Yu.M. Statistika defektov, privedsikh k vykhodu iz stroya silovykh transformatorov [Statistics of defects of the power transformers which have led to failure]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2009, no. 1, pp. 405–407.
8. Litvak B.G. *Ekspertnaya informatsiya: metody polucheniya i analiza* [The expert information: the methods of obtaining and analyzing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 184 p.
9. Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical models in the social sciences*. New York, Ginn-Blaisdell, 1962 (Russ. ed.: Kemeni Dzh., Snell Dzh. *Kiberneticheskoe modelirovanie: nekotorye prilozheniya*. Translated from English. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 192 p.).
10. Sekretarev Yu.A. *Poluchenie i ispol'zovanie evristicheskoi informatsii pri prinyatii reshenii* [The receipt and use of heuristic information when making decisions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 36 p.
11. Zot'ev D.B. K probleme opredeleniya vesovykh koeffitsientov na osnovanii ekspertnykh otsenok [In problem of determining the weighting coefficients based of expert estimates]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2011, vol. 77, no. 1, pp. 75–78. (In Russian)
12. Novikov D.A., Orlov A.I. Ekspertnye otsenki – instrumenty analitika [Expert estimations – the analytics tools]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2013, vol. 79, no. 4, pp. 3–4. (In Russian)
13. Khrustalev S.A., Orlov A.I., Sharov V.D. Matematicheskie metody otsenki effektivnosti upravlencheskikh reshenii [The mathematical methods for evaluating the effectiveness of management decisions]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2013, vol. 79, no. 11, pp. 67–72. (In Russian)
14. Pugach O.V. Matematicheskie metody otsenki riskov [The mathematical methods of risks estimation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2013, vol. 79, no. 7, pp. 64–69. (In Russian)
15. Manusov V.Z., Kryukov D.O., Ahyoev J.S. [Coordination of experts' evaluations on the problem of current technical diagnostics of transformer equipment]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy: VI Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 70-letiyu Rubtsovskogo industrial'nogo instituta* [The modern technique and technology: problems, status and prospects. VI All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 70th anniversary of Rubtsovsk Industrial Institute], Rubtsovsk, 24–25 November 2016, pp. 267–275. (In Russian)
16. Petrovskii A.B. *Teoriya prinyatiya reshenii* [The theory of decision making]. Moscow, Academia Publ., 2009. 400 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Манусов Вадим Зиновьевич** – д-р техн. наук, профессор, кафедра системы электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление исследований: применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем. Имеет более 300 научных работ, в том числе 4 монографии. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: manusov36@mail.ru).

**Manusov Vadim Zinovevich** – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the use of artificial intelligence techniques for planning and optimization of electric power systems modes. He is the author of more than 300 scientific papers including 4 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: manusov36@mail.ru).



**Крюков Дмитрий Олегович** – студент, кафедра системы электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление исследований: электроэнергетические устройства на основе явления высокотемпературной сверхпроводимости. Автор 5 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: fire-paladin@mail.ru).

**Kryukov Dmitry Olegovich** – student, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high temperature superconducting devices in the electrical power industry. He is the author of 5 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: fire-paladin@mail.ru).



**Ахъёев Джавод Саламшоевич** – аспирант, кафедра системы электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление исследований: мониторинг и диагностика текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Автор более 15 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: javod\_66@mail.ru).

**Ahyoev Javad Salamshoevich** – postgraduate student, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on monitoring and diagnostics of the current technical condition of high-voltage electrical equipment based on the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. He is The author of 15 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: javod\_66@mail.ru).

*Статья поступила 13 февраля 2017 г.  
Received February 13, 2017*

## To Reference:

Manusov V.Z., Kryukov D.O., Ahyoev J.S. Soglasovanie jekspertnyh ocenok pri diagnostike tekushhego tehničeskogo sostojanija vysokovol'tnogo jelektrooborudovanija [Coordination of expert assessment in diagnosis of current condition of high voltage electric equipment]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossijskoi Federatsii [Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences]*, 2017, no. 1(34), pp. 72–84. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-72-84