

rectangle, and rectangular and oblique triangles. Features pertinent to the field of arbitrarily shaped uniformly polarized and uniformly magnetized bodies are described. The following uniformly polarized and uniformly magnetized bodies are considered: a right-angle prism, a polyhedron with the symmetry axis of the third and higher orders, an infinitely long trapezoid body, and a truncated right circular cone.

Key words: field calculation, materials with different shapes, uniformly charged polygonal plates, polyhedral body, uniformly polarized polyhedron, uniformly magnetized polyhedron

## REFERENCES

1. Iossel' Yu.Ya. *Raschet emkosti elementov elektrotekhnicheskikh apparatov i ustroystv* (Calculation of the capacity of electrical devices and devices). Moscow, Publ. «Informelekto», 1985, 60 p.

2. Sivukhin D.V. *Elektrichestvo. Obshchii kurs fiziki (Electricity General physics course)*. Moscow, Publ. «Nauka», 1977, vol. III, 688 p.

[23.04.2017]

\* \* \*

*Электричество*, 2017, № 8, с. 50–60

DOI:10.24160/0013-5380-2017-8-50-60

## Определение значений граничных концентраций растворенных в масле газов методом минимального риска

ШУТЕНКО О.В.

*Представлен метод определения граничных концентраций растворенных в масле газов, обеспечивающих минимум возможного риска в случае принятия ошибочных решений. Граничные концентрации растворенных в масле газов предлагается определять путем минимизации функции среднего риска для многомерных распределений методом Нелдера—Мида. Выполнен сравнительный анализ значений среднего риска, которые сопровождаются использованием граничных значений концентраций газов, регламентируемых известными международными и национальными методиками. Выполнено исследование влияния значений параметров законов распределения, вероятности возникновения дефекта и отношения стоимостей ошибочных решений на значения граничных концентраций. Установлено, что граничные значения концентраций газов, обеспечивающих минимальное значение среднего риска, не являются постоянными. Они изменяются в зависимости от значения параметров законов распределения газов для исправных трансформаторов и трансформаторов с развивающимися дефектами, от значений цен ошибочных решений и вероятностей дефектного и бездефектного состояния трансформаторов. Из чего следует, что граничные значения концентраций газов, обеспечивающие минимум риска, должны определяться с учетом данных факторов.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** силовые трансформаторы, анализ растворенных газов, граничные значения концентраций газов, метод минимального риска, вероятности ошибочных и правильных решений, условия эксплуатации трансформаторов

В большинстве известных стандартов и методик [1–5] по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ) в качестве первичного признака наличия дефекта используют превышение концентраций газов некоторых значений, которые в разных методиках имеют статус либо граничных, либо типичных концентраций. Граничные (типичные) значения концентраций определяются по отдельности для каждого из газов графически и соответствуют 90–95 %-й точке на интегральной функции распределения концентрации газа, полученной для 100 и более единиц однотипного исправного оборудования. Данное ограничение является произвольным и связано с тем, что согласно усредненной мировой статистике только у 5–10% оборудования могут быть отклонения, приводящие к развитию дефек-

тов. В некоторых стандартах и методиках граничные (типичные) концентрации задаются отдельно для блочных и сетевых трансформаторов, ранжируются по номинальному напряжению, а в некоторых методиках — и по значению номинальной мощности трансформаторов. В то же время ряд факторов, таких как особенности конструктивного исполнения трансформаторов, срок и условия их эксплуатации, сорт трансформаторного масла не учитываются, что может привести к принятию ошибочных решений при диагностике оборудования. В связи с этим разработка метода для определения граничных концентраций растворенных в масле газов с учетом влияния наиболее значащих факторов и с последующей оценкой достоверности принятия решений является актуальной и практически значимой задачей.

**Анализ публикаций.** В настоящее время описанию методов определения значений граничных концентраций газов посвящен ряд публикаций. Так, в [6] граничные значения концентраций газов предлагается определять на основе анализа интегральных функций распределения, но предельный уровень определяется с учетом уровня потока отказов для данного вида оборудования. Там же предлагается регламентировать два уровня значений концентраций – допустимого и предельно допустимого, которые в [6] определялись с учетом таких факторов, как тип защиты масла, сорт масла, срок эксплуатации трансформаторов и тип РПН. В [7] для определения граничных значений концентраций газов был использован критерий Неймана–Пирсона. В [8] граничные значения концентраций газов определялись методом минимального риска, причем для каждого газа отдельно (метод минимального риска для одномерных распределений), без учета значения концентраций остальных газов, что не обеспечивает минимального значения риска при диагностике состояния трансформаторов по всему спектру газов. В статье предлагается дальнейшее развитие метода минимального риска для определения граничных значений концентраций газов для многомерных распределений.

**Метод решения.** В теории технической диагностики [9] для определения граничных значений диагностических признаков на основе методов статистических решений используется целый ряд критериев: минимальное число ошибочных решений, минимаксный подход, минимизация значений вероятностей одной из ошибок при заданном уровне другой и т.д. Тот или иной критерий выбирается с учетом конкретной задачи. При диагностике состояния высоковольтных силовых трансформаторов следует учитывать, что цена ошибки II рода (решение об исправном состоянии трансформатора с развивающимся дефектом) много выше цены ошибки I рода (решение о наличии дефекта в исправном трансформаторе). В таких условиях граничные значения целесообразней определять не с точки зрения минимизации общего числа ошибочных решений или вероятностей одного из них, а с точки зрения минимизации возможного экономического ущерба, которым сопровождается принятие ошибочного решения. Поэтому в данной работе для определения граничных концентраций газов выбран критерий минимума среднего риска, который согласно [9] определяется как сумма произведений вероятностей ошибочных решений на их условные цены. Следует отметить, что аналогичный подход используется и некоторыми зарубежными исследователями, например в [10].

Решение об исправном состоянии трансформатора будем принимать, если концентрации всех газов не превышают соответствующих граничных значений. Если концентрация хотя бы одного газа превышает соответствующее граничное значение, то принимается решение о наличии дефекта. Выражение для определения среднего риска [9] при диагностике по комплексу признаков и с учетом того, что правильные решения не поощряются, может быть представлено в виде

$$R = C_{21} P_1 \int_{S_2} f(x / D_1) dx + C_{12} P_2 \int_{S_1} f(x / D_2) dx, \quad (1)$$

где  $x$  – вектор диагностических признаков (значения концентраций растворенных в масле газов);  $P_1$  – априорная вероятность отсутствия дефекта в трансформаторе;  $P_2$  – априорная вероятность появления дефекта в трансформаторе;  $\int_{S_1} f(x / D_1) dx$  – вероятность ошибки I рода;  $\int_{S_2} f(x / D_2) dx$  – вероятность ошибки II рода;  $C_{21}$  – условная цена ошибки I рода;  $C_{12}$  – условная цена ошибки II рода;  $S_1, S_2$  – многомерные области интегрирования, характеризующие вероятности ошибок I и II рода и правильных решений.

Выполненные в [11] исследования показали, что распределение концентраций газов, растворенных в масле трансформаторов, подчиняется закону распределения Вейбулла с плотностью

$$p(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta$  – параметры закона распределения, интерпретируемые соответственно как параметр масштаба и параметр формы.

Диагностика состояния трансформаторов осуществляется по комплексу диагностических признаков, т.е. анализируются концентрации 7 газов ( $H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CO$  и  $CO_2$ ). В некоторых стандартах и методиках, например в [4], рекомендуется также контролировать концентрации азота и кислорода, однако граничные значения для данных газов в [4] не регламентированы, по их значениям анализируется отношение  $O_2/N_2$ . Выполненный анализ показал, что не все известные стандарты и методики регламентируют значения граничных (типичных) концентраций для оксида и диоксида углерода, что создает объективные труд-

ности при сравнении значений риска, которые обеспечивают значения концентраций газов, регламентируемые разными методиками. В связи с этим в данной статье выражение для расчета среднего риска приведено только для газов углеводородного ряда и водорода. Следует отметить, что никаких принципиальных ограничений по количеству используемых газов методом минимального риска не существует. Допущенное ограничение обусловлено исключительно возможностью сравнения значений среднего риска для максимального числа стандартов и методик.

При определении значений вероятностей ошибок I и II рода для многомерных распределений диагностических признаков необходимо ввести допущения, связанные с наличием либо отсутствием корреляции между растворенными в масле газами. Приведенные в [12] результаты показывают, что при отсутствии дефектов в трансформаторах не герметичного исполнения значимая коррекция между газами отсутствует. В то же время развитие дефекта характеризуется значимой корреляцией между газами углеводородного ряда и водородом. В литературе по технической диагностике, например [9], рекомендуется, вместе с тем, считать признаки независимыми даже при наличии значимой корреляционной связи между ними. Допустив взаимную независимость газов, что позволяет представить многомерные распределения концентраций газов для разных состояний в виде произведения соответствующих одномерных распределений, были определены выражения для расчета вероятностей ошибок I и II рода.

**Значение вероятности ошибки I рода** будет заключаться в том, что при отсутствии дефекта в трансформаторе концентрация хотя бы одного из газов превысит граничное значение. Поскольку диагностика осуществляется по комплексу признаков, вероятность ошибки I рода будет равна сумме вероятностей превышения концентрации одним, двумя, тремя, четырьмя и пятью газами в исправных трансформаторах. Для определения полного числа возможных сочетаний в [13] использовалось выражение

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!},$$

где  $k$  — число газов;  $m$  — число элементов в сочетании; число возможных сочетаний по 5:

число элементов в сочетании	1	2	3	4	5
число возможных сочетаний 5 газов	5	10	10	5	1

Как видно, для определения вероятности ошибки I рода необходимо выполнить численное интегрирование произведения функций плотностей распределения 5 газов для исправного состояния 31

раз, меняя соответствующие пределы интегрирования.

**Значение вероятности ошибки II рода** — вероятность того, что при развитии дефекта концентрации всех газов будут меньше граничных.

Граничными значениями концентраций растворенных в масле газов в данном случае будут те значения газов, которые обеспечивают минимум функции среднего риска. Полученное выражение для функции среднего риска достаточно громоздко, что затрудняет определение граничных концентраций газов путем дифференцирования функции риска, как показано в [9], поэтому для минимизации функции риска был использован подход, основанный на методах градиентного спуска, в частности метод Нелдера-Мида [14]. Этот метод, также известный как метод деформируемого многогранника, — метод безусловной оптимизации вещественной функции от нескольких переменных решает задачу поиска минимизатора  $x^*$  некоторой заданной функции  $f$ . В пространстве поиска  $S^n$  строится равносторонний многогранник (регулярный симплекс) с числом вершин, равным  $(n+1)$ . Далее выясняется, какая из вершин симплекса является наихудшей в смысле значения функции  $f(x)$ . Для этого необходимо вычислить  $f(x)$  во всех вершинах (если функция  $f(x)$  задана аналитически или алгоритмически). Найденная наихудшая вершина заменяется на новую вершину, которая является отражением наихудшей вершины относительно центра тяжести оставшихся вершин. Получается новый симплекс, и вся процедура повторяется. В результате симплекс передвигается по пространству поиска в сторону искомого минимизатора функции  $f(x)$ .

Для расчета значений граничных концентраций газов необходимо задаться параметрами законов распределения газов в исправных трансформаторах и трансформаторах с развивающимися дефектами. Кроме того, необходимо обосновать значения стоимостей ошибочных решений и вероятностей исправного и неисправного состояний. Параметры законов распределений концентраций газов для исправных трансформаторов [6] необходимо задавать с учетом конструктивных особенностей трансформаторов, срока и условий эксплуатации, сорта трансформаторного масла, класса точности хроматографа и других факторов.

В качестве примера для расчета здесь использовались значения параметров масштаба и формы распределения Вейбулла, полученные для трансформаторов напряжением 110 кВ типа ТДТН, введенных в эксплуатацию в 1985 г., залитых маслом Т-1500. Для нагрузки трансформаторов характерно

преобладание промышленных потребителей (металлургических, машиностроительных предприятий и угольных шахт). Трансформаторы имеют негерметичное исполнение, что обуславливает некоторые особенности их газосодержания [15, 16]: повышенное содержание по сравнению с герметичным оборудованием этилена и метана, низкое содержание этана и водорода, что отражают значения параметров законов распределения, которые приведены в табл. 1.

При развитии дефектов в трансформаторах значение концентраций газов, а следовательно, и параметры законов распределений будут существенно различаться в зависимости от стадии развития дефекта и особенно от его типа. В идеальном случае каждый тип дефекта желательно представить в виде отдельного набора распределений со значениями параметров, полученными для каждого газа. Однако реализация такого подхода требует большого массива результатов ХАРГ для трансформаторов с дефектами разного типа, каким, к сожалению, автор не располагает. Поэтому в качестве параметров законов распределения для трансформаторов с развивающимися дефектами использовались параметры распределения тех газов, которые являются ключевыми для данного типа дефекта (например этилен – высокотемпературный перегрев свыше 700 °С, водород – частичные разряды, ацетилен – разряды большой энергии, метан и этан – перегревы в диапазоне низких и средних температур). Значения этих параметров приведены в табл. 1.

Вероятность исправного состояния  $P_1$  и вероятность возникновения дефекта  $P_2$  определяются на основании анализа априорной информации. Вероятность возникновения дефекта будет зависеть от срока службы трансформаторов, особенностей их конструкции и т.д. Кроме того, значительное влияние на вероятность возникновения дефекта оказывают условия, в которых эксплуатируются трансформаторы: средняя нагрузка, частота возникновения и значение токов короткого замыкания, часто-

та и кратность атмосферных и коммутационных перенапряжений и др.

Аналізу надежности силовых трансформаторов посвящено много публикаций [6, 17, 18]. Обобщая приведенные в этих работах данные, в первом приближении можно принять значение вероятности возникновения дефектного состояния 5% (или 0,05 отн. ед.). Соответственно вероятность исправного состояния  $P_1 = 1 - P_2 = 0,95$  отн. ед. Значения цен ошибочных решений будут также варьироваться в широких пределах. Так, цена ошибки II рода будет зависеть от типа дефекта и его последствий для трансформатора, цена ошибки I рода во многом будет определяться квалификацией оперативного персонала и тем решением, которое будет принято при превышении концентрациями граничных значений. С учетом соображений, приведенных в [13], было принято, что цена ошибки II рода в 10000 раз превышает цену ошибки I рода. Используя алгоритм Нелдера-Мида, были рассчитаны граничные значения концентраций газов для заданных вероятностей исправного и дефектного состояний и отношений цен ошибочных решений для распределений с параметрами из табл. 1:

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub>
0,00950	0,0106	0,00077	0,0094	0,0086

**Сравнительный анализ средних рисков.** Поскольку полученные значения граничных концентраций газов только минимизируют значение возможного риска, но не устраняют его полностью, то представляет интерес сравнение значений среднего риска, который сопровождается использованием полученных граничных концентраций с рисками, которые сопровождаются использованием граничных (типичных) концентраций газов, рекомендуемых известными методиками по интерпретации результатов ХАРГ. Для сравнения использовались типичные и граничные концентрации, рекомендованные для интерпретации результатов ХАРГ наиболее известными методиками, которые приведены в международных, национальных и ведомственных стандартах, а также в открытых литературных ис-

Таблица 1

Газ	Состояние трансформаторов			
	Исправное		Дефект	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
CH <sub>4</sub>	0,005557	4,859278	0,041635	2,194290
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,006426	5,225124	0,065647	2,115252
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,002348	1,809682	0,030929	2,421890
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,000184	1,769949	0,019442	1,761373
H <sub>2</sub>	0,001829	1,616357	0,055464	2,503356

точниках. Эти значения с указанием литературных источников приведены в табл. 2.

В методике ИЕС 60599 [1] указан ограниченный нижним и верхним уровнями диапазон значений концентраций газов, называемых типичными. Для случаев, когда концентрации газов превышают эти типичные значения, данная методика (как, впрочем, и большинство других) рекомендует применять критерий скорости нарастания и отношения пар газов с целью определения опасности, вида (характера) дефекта и корректировки периодичности отбора проб на ХАРГ. Типичными названы также значения концентраций газов, приведенные в методике IEEE Std C57.104 [2]. Они имеют четыре уровня: первый соответствует бездефектному состоянию, остальные – различной степени дефектности. В методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 [4] критерии заданы в виде диапазонов значений концентраций растворенных в масле газов. В отличие от методики ИЕС 60599 эти концентрации газов называются граничными и имеют три уровня: наличие дефектов не предполагается; при превышении нижней границы диапазона концентраций газов, соответствующих второму уровню, определяется скорость нарастания газов (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сут); превышение верхней границы второго

уровня – прогнозируется наличие дефекта без учета скорости нарастания концентраций газов. Граничные значения, рекомендуемые California state university (США) [21], также заданы в виде двух уровней, соответствующих исправному состоянию (нижний уровень) и дефектному (верхний уровень). В остальных методиках граничные (типичные) значения концентраций заданы в виде одного уровня.

На первом этапе анализа была выполнена оценка значений вероятностей правильных и ошибочных решений, которые имеют место при использовании граничных концентраций из табл. 2.

Значения вероятностей ошибок I и II рода и вероятностей правильных решений для концентраций газов из табл. 2 для приведенных распределений, полученные в результате численного интегрирования, приведены в табл. 3. Для удобства анализа результаты расчета были ранжированы по мере увеличения вероятности принятия правильного решения при диагностике исправных трансформаторов (P11). Сопоставив значения граничных концентраций из табл. 2 со значениями вероятностей ошибочных решений, можно увидеть, что увеличение граничных значений приводит к снижению вероятности ошибки I рода, а также к увеличению вероятности ошибки II рода, и наоборот. Как вид-

Таблица 2

Методика	Концентрации растворенных в масле газов, %				
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
ИЕС 60599 [1]	0,006	0,004	0,005	0,006	0,0003
	0,015	0,011	0,009	0,028	0,005
IEEE Std C57.104 [2]	0,01	0,012	0,0065	0,005	0,0035
	0,077	0,04	0,01	0,01	0,005
	0,18	0,18	0,015	0,02	0,008
	0,1801	0,1	0,0151	0,0201	0,0081
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) [4]	0,01	0,005	0,005	0,0015	0,00005
	0,015	0,012	0,01	0,01	0,001
РД 153.34.0-46.302- 00 (Россия) [5]	0,01	0,01	0,005	0,01	0,001
Energopomiar (Польша) [18]	0,05	0,02	0,017	0,026	0,007
Методика Дюваля [20]	0,01	0,0075	0,0075	0,0075	0,0003
Методика Дорненбурга [21]	0,02	0,005	0,0035	0,008	0,0005
EDF (Франция) [21]	0,013	0,013	0,015	0,0044	0,00004
ВВС (Швейцария) [21]	0,02	0,005	0,0015	0,006	0,0015
OY STROMBERG (Финляндия) [21]	0,01	0,01	0,015	0,01	0,003
HYDRO QUEBEC (Канада) [21]	0,025	0,0033	0,0015	0,004	0,0025
SECR (Япония) [21]	0,04	0,015	0,015	0,02	0,00005
California state university (США) [21]	0,015	0,0025	0,001	0,002	0,0015
	0,1	0,008	0,0035	0,01	0,007
Northern Technology & Testing (США) [22]	0,15	0,008	0,0035	0,015	0,0007
MSZ-09-00.0352 (Малайзия) [23]	0,016	0,006	0,006	0,006	0,0004

Таблица 3

Методика	Значения вероятностей, отн.ед.			
	$P_{11}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{12}$
SECR (Япония)	$4,800 \cdot 10^{-10}$	$9,999999 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$1,499 \cdot 10^{-14}$
California state university (США) <sup>1</sup>	$8,797 \cdot 10^{-6}$	$9,999999 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$5,543 \cdot 10^{-12}$
COY-H EE 46.501:2006 (Украина) <sup>1</sup>	$2,091 \cdot 10^{-5}$	$9,999999 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$8,343 \cdot 10^{-13}$
HYDRO QUEBEC (Канада)	$2,208 \cdot 10^{-3}$	$9,978 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$6,780 \cdot 10^{-10}$
EDF (Франция)	$8,381 \cdot 10^{-3}$	$9,916 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$1,092 \cdot 10^{-9}$
MSZ-09-00.0352 (Малайзия)	$7,257 \cdot 10^{-2}$	$9,274 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$5,700 \cdot 10^{-11}$
BBC (Швейцария)	$8,126 \cdot 10^{-2}$	$9,187 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$1,384 \cdot 10^{-9}$
IEC 60599 <sup>1</sup>	$8,183 \cdot 10^{-2}$	$9,182 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$6,200 \cdot 10^{-11}$
Методика Дюваля	$2,006 \cdot 10^{-1}$	$7,994 \cdot 10^{-1}$	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$3,682 \cdot 10^{-9}$
IEEE Std C57.104 (США) <sup>1</sup>	$2,358 \cdot 10^{-1}$	$7,642 \cdot 10^{-1}$	$9,999992 \cdot 10^{-1}$	$7,873 \cdot 10^{-8}$
California state university (США) <sup>2</sup>	$8,700 \cdot 10^{-1}$	$1,300 \cdot 10^{-1}$	$9,9999753 \cdot 10^{-1}$	$2,461 \cdot 10^{-6}$
Методика Дорненбурга	$3,749 \cdot 10^{-1}$	$6,251 \cdot 10^{-1}$	$9,9999999 \cdot 10^{-1}$	$3,671 \cdot 10^{-9}$
Northern Technology & Testing (США)	$8,700 \cdot 10^{-1}$	$1,300 \cdot 10^{-1}$	$9,999991 \cdot 10^{-1}$	$8,848 \cdot 10^{-7}$
РД 153.34.0-46.302-00 (Россия)	$9,803 \cdot 10^{-1}$	$1,974 \cdot 10^{-2}$	$9,9999996 \cdot 10^{-1}$	$3,464 \cdot 10^{-8}$
COY-H EE 46.501:2006 (Украина) <sup>2</sup>	$9,99957 \cdot 10^{-1}$	$4,289 \cdot 10^{-5}$	$9,999927 \cdot 10^{-1}$	$7,278 \cdot 10^{-7}$
IEEE Std C57.104 (США) <sup>2</sup>	$9,99957 \cdot 10^{-1}$	$4,289 \cdot 10^{-5}$	$9,994 \cdot 10^{-1}$	$6,228 \cdot 10^{-4}$
OY STROMBERG (Финляндия)	$9,99957 \cdot 10^{-1}$	$4,204 \cdot 10^{-5}$	$9,99998 \cdot 10^{-1}$	$1,517 \cdot 10^{-6}$
Метод минимального риска	$9,99985 \cdot 10^{-1}$	$1,424 \cdot 10^{-5}$	$9,999992 \cdot 10^{-1}$	$7,440 \cdot 10^{-8}$
IEC 60599 <sup>2</sup>	$9,99988 \cdot 10^{-1}$	$1,146 \cdot 10^{-5}$	$9,999855 \cdot 10^{-1}$	$1,447 \cdot 10^{-5}$
IEEE Std C57.104 (США) <sup>3</sup>	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$3,518 \cdot 10^{-13}$	$9,876 \cdot 10^{-1}$	$1,237 \cdot 10^{-2}$
IEEE Std C57.104 (США) <sup>4</sup>	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$2,486 \cdot 10^{-13}$	$9,873 \cdot 10^{-1}$	$1,267 \cdot 10^{-2}$
Energopomiar (Польша)	$9,99999 \cdot 10^{-1}$	$6,040 \cdot 10^{-17}$	$9,973 \cdot 10^{-1}$	$2,682 \cdot 10^{-3}$

Примечание: верхний индекс после названия методики обозначает уровень концентраций газов, для которого получены значения вероятностей правильных и ошибочных решений.

но из табл. 3, значения вероятностей ошибочных и правильных решений отличны для разных методик. Максимальное значение вероятности принятия правильного решения для исправных трансформаторов (и, как следствие, минимальное значение ошибки I рода) обеспечивает граничные значения, регламентируемые польской методикой Energopomiar [18]. В то же время крайне низкие значения вероятности ошибки I рода для методики Energopomiar сопровождаются относительно высокими значениями вероятности ошибки II рода и, соответственно, невысокими значениями вероятности принятия правильного решения при диагностике трансформаторов с развивающимися дефектами.

Наименьшие значения вероятности принятия правильного решения при диагностике исправных трансформаторов обеспечивают граничные значения концентраций газов, которые рекомендует методика SECR (Япония) [21]. Эти же граничные значения обеспечивают максимальное значение вероятности принятия правильного решения при диагностике трансформаторов с развивающимися дефектами ( $P_{22}$ ) и, как следствие, минимальное зна-

чение вероятности ошибки II рода. Граничные значения, полученные по критерию минимума риска, обеспечивают пятую по значению вероятность принятия правильного решения при диагностике исправных трансформаторов и одиннадцатую по значению вероятность принятия правильного решения при диагностике трансформаторов с развивающимися дефектами. При этом вероятности ошибочных решений  $P_{21}$  и  $P_{12}$  имеют промежуточные значения по сравнению с аналогичными значениями вероятности, которые обеспечивают граничные концентрации газов из сравниваемых методик. Таким образом, метод минимального риска обеспечивает принятие промежуточных по значениям вероятности правильных и ошибочных решений.

Далее были рассчитаны значения среднего риска, который сопровождается использованием граничных значений концентраций газов из 15 приведенных методик (табл. 2), а также граничных значений, рассчитанных методом минимального риска. Значения рисков приведены в табл. 4 и для удобства анализа ранжированы по убыванию. Как

видно из табл. 4, максимальное значение риска получено для граничных значений, соответствующих четвертому и третьему уровням стандарта IEEE Std C57.104. Наименьшее значение риска для принятых параметров расчета обеспечивают граничные значения, полученные методом минимума риска.

Таблица 4

Методика	R
IEEE Std C57.104 (США) <sup>4</sup>	6,335
IEEE Std C57.104 (США) <sup>3</sup>	6,186
Energopomiar (Польша)	1,340
SECR (Япония)	0,950
California state university (США) <sup>1</sup>	0,949
COY-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) <sup>1</sup>	0,949
HYDRO QUEBEC (Канада)	0,947
EDF (Франция)	0,942
MSZ-09-00.0352 (Малайзия)	0,881
BBC (Швейцария)	0,873
IEC 60599 <sup>1</sup>	0,872
IEEE Std C57.104 (США) <sup>2</sup>	0,726
Методика Дорненбурга	0,593
IEEE Std C57.104 (США) <sup>2</sup>	0,311
Методика Дюваля	0,190
California state university (США) <sup>2</sup>	0,125
Northern Technology & Testing (США)	0,124
РД 153.34.0-46.302-00 (Россия)	0,0188
IEC 60599 <sup>2</sup>	0,00724
OY STROMBERG (Финляндия)	0,000798
COY-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) <sup>2</sup>	0,000405
Метод минимального риска	0,0000507

Примечание: верхний индекс после названия методики обозначает уровень концентраций газов, для которого получено значение среднего риска.

Минимальное значение риска практически в 8 раз меньше значения, обеспечиваемого граничными значениями из стандартных методик (в данном случае это граничные значения второго уровня из методики COY-Н ЕЕ 46.501:2006, Украина) и в 124950,69 раз меньше максимального значения риска, который сопровождается использованием граничных значений, соответствующих четвертому уровню стандарта IEEE Std C57.104. Остальные методики дают промежуточные значения среднего риска.

**Обоснование необходимости учета условий эксплуатации трансформаторов при определении граничных значений концентраций газов.** Полученные значения граничных концентраций являются «точечными», поскольку обеспечивают минимум риска

только для заданных значений цен ошибочных решений, вероятностей состояний и параметров законов распределений. На практике и значения вероятностей диагнозов, и цен ошибочных решений, и параметров распределений могут изменяться в широких пределах. Приведенные в [19] результаты показывают, что при изменении хотя бы одного из перечисленных параметров значение среднего риска изменяется, а следовательно, будут изменяться и граничные значения концентраций газов, обеспечивающих его минимум. В связи с этим представляет непосредственный интерес анализ влияния этих параметров на значения граничных концентраций газов. Он позволит наглядно продемонстрировать необходимость корректировки граничных концентраций газов с учетом влияния эксплуатационных факторов.

При выполнении анализа в качестве параметров законов распределения были использованы значения, приведенные выше в разделе «Значение вероятности ошибки II рода». Считая, что  $P_1 = 1 - P_2$ , задавая вместо значений цен ошибочных решений значениями их отношений  $C = C_{12} / C_{21}$  (отношение цены ошибки II рода к цене ошибки I рода) и принимая  $C_{21} = 1$ , были рассчитаны граничные значения концентраций газов для различных значений вероятности появления дефекта. На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости граничных концентраций этилена, которые обеспечивают минимум среднего риска, от вероятности возникновения дефектного состояния при различных значениях отношений цен ошибочных решений.

Как видно из рис. 1, с ростом вероятности появления дефекта граничные значения снижаются, при этом полученные зависимости являются нелинейными. Наибольшее снижение наблюдается в области очень малых и очень больших значений вероятностей дефектного состояния. В середине интервала граничные значения снижаются практически линейно. С ростом цены ошибки II рода по отношению к цене ошибки I рода зависимости смещаются в область более низких значений граничных концентраций.

Далее исследовались зависимости значений граничных концентраций от отношения стоимостей ошибочных решений. Для этого, задавая фиксированными значениями вероятности ошибки II рода и считая  $P_1 = 1 - P_2$ , были построены зависимости граничных концентраций газов от значений отношений цен ошибочных решений. Зависимости для граничных концентраций этилена приведены на рис. 2, из которого видно, что при росте отношения цены ошибки II рода к цене ошибки I рода значения граничных концентраций газов снижаются. С ростом вероятности возникновения дефекта

Таблица 5

№	Параметры распределения Вейбулла		Граничные значения концентраций газов, обеспечивающие минимум риска, %					Риск
	$\alpha$	$\beta$	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
1	0,001163	3,575221	0,00960	0,00250	0,01032	0,01091	0,00087	5,505·10 <sup>-6</sup>
2	0,001989	1,54227	0,00856	0,01010	0,00940	0,01058	0,00077	5,914·10 <sup>-5</sup>
3	0,00231	2,811695	0,00896	0,00587	0,00976	0,01072	0,00081	2,344·10 <sup>-5</sup>
4	0,002588	1,454027	0,00832	0,01400	0,00917	0,01050	0,00075	9,993·10 <sup>-5</sup>
5	0,002627	2,405808	0,00877	0,00767	0,00959	0,01065	0,00079	3,673·10 <sup>-5</sup>
6	0,00388	3,10723	0,00865	0,00890	0,00949	0,01062	0,00078	4,629·10 <sup>-5</sup>
7	0,004092	1,368431	0,00795	0,02339	0,00881	0,01038	0,00073	2,137·10 <sup>-4</sup>
8	0,004098	2,934544	0,00858	0,00982	0,00942	0,01059	0,00078	5,436·10 <sup>-5</sup>
9	0,00443	2,358238	0,00838	0,01284	0,00922	0,01053	0,00076	8,434·10 <sup>-5</sup>
10	0,005332	3,459435	0,00848	0,01118	0,00933	0,01056	0,00077	6,652·10 <sup>-5</sup>
11	0,005557	4,859278	0,00860	0,00950	0,00940	0,01060	0,00077	5,073·10 <sup>-5</sup>
12	0,00698	4,472519	0,00840	0,01240	0,00926	0,01240	0,00076	7,775·10 <sup>-5</sup>

зависимости смещаются в область более низких значений граничных концентраций.

При выполнении практических расчетов отношения цен ошибочных решений целесообразно определять из условий наиболее неблагоприятного сценария [9], т.е. максимально возможного превышения цены ошибки II рода над ценой ошибки I рода. В этом случае в качестве условной цены ошибки I рода следует принимать стоимость выполнения ХАРГ, а в качестве условной цены ошибки II рода – стоимость новой единицы оборудования, для которого определяются граничные значения концентраций газов.

Таким образом, даже для одних и тех же параметров законов распределений граничные значения концентраций газов, обеспечивающие минимум среднего риска, не являются постоянными, а зависят от вероятностей дефектного и бездефектного состояний и отношений цен ошибочных решений.

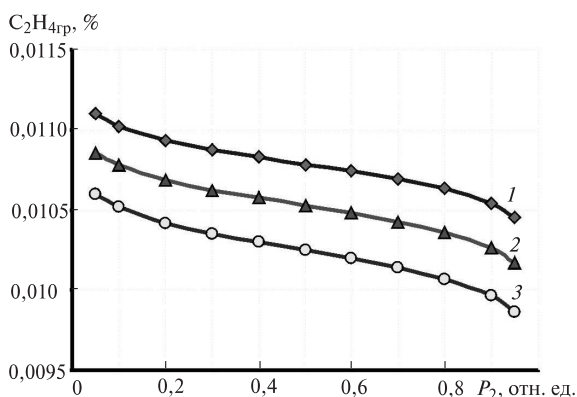


Рис. 1. Зависимость граничных концентраций этилена, обеспечивающих минимум риска, от вероятности возникновения дефектного состояния при различных значениях цен ошибочных решений: 1 –  $C_{12}/C_{21} = 100$ ; 2 – 1000; 3 – 10000

Для оценки влияния параметров масштаба и формы на граничные значения концентраций газов граничные значения рассчитывались при варьировании параметров закона распределения только одного из газов при исправном состоянии трансформаторов. Значения параметров распределения всех газов для трансформаторов с развивающимися дефектами и четырех газов для исправного состояния находились на фиксированном уровне.

Граничные значения рассчитывались для  $P_2 = 0,05$  отн. ед.,  $P_1 = 0,95$  отн. ед. и соотношения цен ошибочных решений  $C = C_{12}/C_{21} = 10000$  для параметров распределений, приведенных выше. В качестве примера в табл. 5 приведены граничные значения концентраций растворенных в масле газов, обеспечивающие минимум среднего риска, полученные для разных значений параметров распределения концентраций метана в исправных трансформаторах. Там же приведены значения риска, полученные для этих граничных значений.

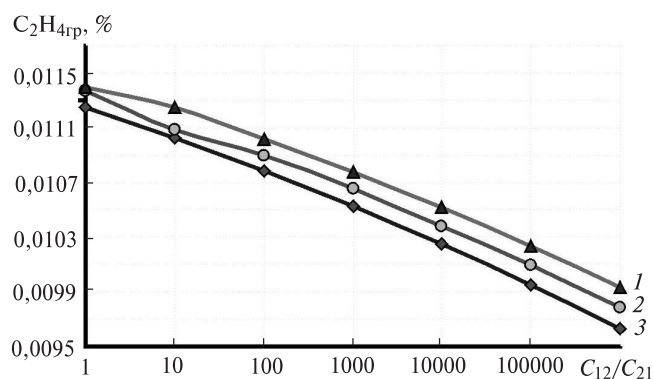


Рис. 2. Зависимость граничных концентраций этилена, обеспечивающих минимум риска, от отношений стоимостей ошибочных решений при различных значениях вероятностей возникновения дефекта: 1 –  $P_2 = 0,5$ ; 2 – 0,25; 3 – 0,1



Следует отметить, что для расчета использовались только параметры законов распределения, полученные для реальных трансформаторов, однако приведенные в табл. 5 граничные значения концентраций газов следует рассматривать как результаты моделирования. Это обусловлено тем, что при выполнении расчета к параметрам законов распределения водорода, этана, этилена и ацетилена, полученных для трансформаторов напряжением 110 кВ типа ТДТН, введенных в эксплуатацию в 1985 г., залитых маслом Т-1500, поочередно добавлялись значения параметров законов распределения метана, полученные для других условий эксплуатации. Поскольку значения параметров распределений для одного и того же газа, полученные для трансформаторов в разных условиях эксплуатации, имеющих различную конструкцию или залитых разными сортами масел, будут отличаться, то получаемые таким образом общие распределения не встречаются в реальной эксплуатации. В то же время такой подход позволяет оценить влияние параметров масштаба и формы на граничные значения концентраций газов.

Анализируя данные табл. 5, легко увидеть, что изменение значений параметров распределения даже для одного газа приводит к изменению граничных значений, обеспечивающих минимум риска для всех остальных газов, а также к изменению самого значения риска. Как видно из табл. 5, при

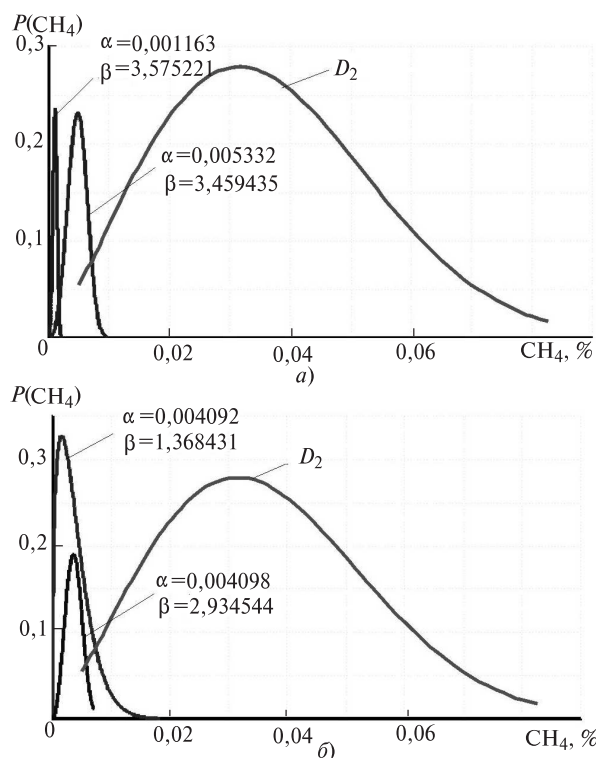


Рис. 3. Функции плотности распределений концентраций метана для трансформатора с развивающимися дефектами ( $D_2$ ) и исправных трансформаторов с разными параметрами масштаба и формы

близких значениях коэффициента формы (например распределения 1, 6, 10) рост значений коэффициента масштаба одного из газов приводит к росту значения граничной концентрации данного газа и незначительному снижению значений граничных концентраций остальных газов. Значения параметра формы также оказывают значимое влияние на значения граничных концентраций газов при близких значениях параметров масштаба (например распределения 7, 8); граничные значения концентраций метана резко возрастают при значениях параметра формы, близких к единице. Следует отметить, что распределения 2, 4 и 7 получены по результатам ХАРГ исправных трансформаторов разного типа и года выпуска, но залитых маслом марки ГК. В то же время при более высоких значениях параметра масштаба и значениях параметров формы больше двух (например распределения 10–12) граничные концентрации метана имеют меньшие значения.

Для объяснения полученных результатов на рис. 3 показаны функции плотности распределений концентраций метана для трансформатора с развивающимися дефектами ( $D_2$ ) и исправных трансформаторов с разными параметрами масштаба и формы.

Как видно из рис. 3,а, увеличение параметра масштаба приводит к смещению математического ожидания кривой распределения для исправного состояния в область более высоких значений концентраций. Известно [9], что граничные значения концентраций геометрически располагаются между значениями математических ожиданий распределений диагностических признаков для разных состояний. В связи с этим приближение математического ожидания концентрации газа для исправного состояния к математическому ожиданию концентрации этого же газа, полученному для трансформатора с развивающимися дефектами, приводит к росту граничного значения концентрации данного газа. Значение параметра формы определяет рассеяние значения концентраций газов относительно математических ожиданий. Геометрически (рис. 3,б) это можно интерпретировать как смещение точки пересечения плотностей распределения для исправных трансформаторов и трансформаторов с развивающимися дефектами в область более высоких значений концентраций по мере увеличения рассеяния концентраций и снижения значения коэффициента формы. В [9] отмечено, что при  $C_{12} / C_{21} > 1$  граничное значение концентрации газа превышает значение, соответствующее точке пересечения распределений двух состояний. Таким образом, приведенные результаты совпадают с основными положениями теории распознавания образов, изложенными в открытых литературных источниках.

Результаты показали, что граничные значения концентраций газов, обеспечивающих минимальное значение среднего риска, не являются постоянными. Они изменяются в зависимости от значения параметров законов распределения газов для исправных трансформаторов и трансформаторов с развивающимися дефектами, а также от значений цен ошибочных решений и вероятностей дефектного и бездефектного состояния трансформаторов. Из этого следует, что граничные значения концентраций газов, обеспечивающие минимум экономического ущерба, должны определяться с учетом данных факторов.

Предложенный метод может быть использован для расчета граничных значений концентраций газов, которые обеспечивают минимум экономического ущерба в случае принятия ошибочных решений. Эти значения могут определяться крупными энергетическими компаниями или конкретной энергосистемой по группам однотипных трансформаторов (блочные, сетевые, с регулированием напряжения или без регулирования, одного класса напряжения, залитых маслом одного сорта и т.д.), что и рекомендуется в действующих нормативных документах [4, 5]. Практическое использование полученных граничных значений осуществляется в рамках диагностических алгоритмов, регламентируемых действующими национальными стандартами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.
2. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARcd C57.104-2008, Feb. 2009.
3. Dornenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, Brown Boveri Review, 1974, vol. 61, pp. 238–274.
4. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Диагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі, Київ, 2007.
5. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. — М.: НЦ ЭНАС, 2001.
6. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных. — Электричество, 2009, № 6, с. 81–82.
7. Захаров А.В. Обнаружение дефектов силовых маслonaполненных трансформаторов как процедура проверки статистических гипотез. — Новое в российской энергетике, 2001, № 2, с. 19–28.
8. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Методика определения значений граничных концентраций растворенных в масле газов. — Збірник наукових праць першої Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів, «Сучасні проблеми електропостачання промислових та побутових об'єктів». Донецький національний технічний університет, 2013, с. 24–25.
9. Биргер И.А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
10. Felea I., Secui D., Oltean M. The impact analyze of electric stress level in content of insulating oil gases in power transformmers. — Journal of sustainable energy, 2011, vol. 2, No. 4, pp. 7–12.
11. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Аналіз законів розподілу концентрацій газів, розчинених в маслі високовольтних трансформаторів негерметичного виконання. — Вісник НТУ «ХПІ», 2014, No. 24(067), с. 102–117.
12. Шутенко О.В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. — Электрические сети и системы (Киев), 2010, No. 3, с. 38–45.
13. Шутенко О.В., Абрамов В.Б., Баклай Д.Н. Методика определения среднего риска при использовании граничных значений концентраций растворенных в масле газов в качестве критерия наличия дефекта в высоковольтных трансформаторах. — Энергетика и электрификация (Киев), 2012, № 1, с. 22–34.
14. Черноуцкий И.Г. Методы принятия решений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005, 416 с.
15. Абрамов В.Б., Боярчуков Г.М., Яблонский Р.В. Отличительные особенности газообразования в трансформаторном масле герметичного и негерметичного высоковольтного оборудования. — Новини енергетики (Київ), 2009, № 9, с. 17–32.
16. Боярчуков Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле. — Новини енергетики (Київ), 2010, № 7, с. 23–33.
17. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Деметьев Ю.А., Антипов К.М., Сурба А.С., Шейко П.А., Неклепаев Б.Н., Шифрин Л.Н., Кассихин С.Д. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей. — Электрические станции, 2005, № 11, с. 69–75.
18. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. — М.: НЦ ЭНАС, 2002, 216 с.
19. Абрамов В.Б., Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Порівняльний аналіз середніх ризиків, що виникають під час використання граничних значень концентрацій розчинених у маслі газів для виявлення дефектів у трансформаторах 110 кВ. — Наукові вісті НТУУ «КПІ» (Київ), 2014, No. 6, с. 16–26.
20. Saranya S., Mageswari U., Roy, N., Sudha R. Comparative study of various dissolved gas analysis methods to diagnose transformer faults. — International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2013, vol. 3, Iss. 3, pp. 592–595.
21. Gray I.A.R., Guide A. Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <http://www.satcs.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf> (2/2013)
22. DiGiorgio J.B. Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids. — DGA Expert System: A Leader in Quality, Value and Experience, 2005, vol. 1, pp. 1–17.
23. Raisan A., Yaacob M.M., Alsaedi M.A. Faults diagnosis and assessment of transformer insulation oil quality: intelligent methods based on dissolved gas analysis a-review. — International Journal of Engineering & Technology, 2015, vol. 4, No. 1, pp. 54–60.

[01.02.2017]

А в т о р : Шутенко Олег Владимирович окончил в 1994 г. Харьковский политехнический институт. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Усовершенствование диагностики силовых высоковольтных трансформаторов на основе анализа закономерностей длительного старения масел». Доцент кафедры «Передача электрической энергии» в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт».

## Determining the Limit Concentrations of Gases Dissolved in Oil Using the Minimal Risk Method

SHUTENKO Oleg V. (The National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine) — Associate Professor, Cand. Dci. (Eng.)

The article describes a method for determining the limit concentrations of gases dissolved in oil at which the minimal possible risk is achieved in case of making erroneous decisions. The limit concentrations of gases dissolved in oil are suggested to be determined by minimizing the average risk function for multidimensional distributions using the Nelder–Mead method. The average risk values accompanied by using the limit gas concentrations stipulated by the well-known international and national procedures are subjected to a comparative analysis. The effect the values of distribution law parameters, the flaw occurrence probabilities, and the erroneous decision cost ratios have on the limit concentration values is investigated. It has been revealed that the limit gas concentration values at which the minimal average risk is achieved are not constant, but vary depending on the values of gas distribution laws' parameters for healthy transformers and for transformers containing developing flaws, on the values of erroneous decision costs, and on the probabilities of defective and flawless state of transformers. It follows from the above-mentioned findings that the limit gas concentration values at which the minimal risk is achieved should be determined taking into account the above-mentioned factors.

Key words: power transformers, dissolved gas analysis, limit gas concentration values, minimal risk method, probabilities of erroneous and correct decisions, transformer operation conditions

### REFERENCES

- IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.
- IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCD C57. 104-2008, Feb., 2009.
- Dornenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, Brown Boveri Review, 1974, vol. 61, pp. 238–274.
- СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі, Київ, 2007.
- RD 153-34.0-46.302-00. Metodicheskiye ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defectov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenykh v masle (Methodical instructions for diagnosing developing defects of transformer equipment based on chromatographic analysis of gases dissolved in oil). Moscow, Scientific Centre «ENAS», 2001.
- Davidenko I.V. Elektrichestvo — in Russ. (Electricity), 2009, No. 6, pp. 81–82.
- Zakharov A.V. Novoye v rossiiskoi energetike — in Russ. (New in the Russian energy sector), 2001, No. 2, pp. 19–28.
- Shutenko O.V., Baklai D.N. Збірник наукових праць першої міжнародної науко-технічної конф. викладачів, аспірантів і студентів. «Сучасні проблеми електропостачання промислових та побутових об'єктів». Донецький національний технічний університет, 2013, pp. 24–25.
- Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika (Technical diagnostics). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 1978, 240 p.
- Felea I., Secui D., Oltean M. The impact analyze of electric stress level in content of insulating oil gases in power transformers. Journal of sustainable energy, 2011, vol. 2, No. 4, pp. 7–12.
- Shutenko O.V., Baklai D.N. Вісник HTУ «ХПІ» (Харків) — in Ukraine, 2014, No. 24(067), pp. 102–117.
- Shutenko O.V. Elektricheskiye seti i sistemy — in Russ. (Electrical networks and systems), Київ, 2010, No. 3, pp. 38–45.
- Shutenko O.V., Abramov V.B., Baklai D.N. Енергетика та електрифікація — in Ukraine (Київ), 2012, No. 1, pp. 22–34.
- Chernorutskii I.G. Metody prinyatiya reshenii (Decision-making methods). St. Petersburg, Publ. «BKHV-Peterburg», 2005, 416 p.
- Abramov V.B., Boyarchukov G.M., Yablonskii R.V. Новини енергетики — in Ukraine (Київ), 2009, No. 9, pp. 17–32.
- Boyarchukov G.M. Новини енергетики — in Ukraine (Київ), 2010, No. 7, pp. 23–33.
- L'vov M.Yu., L'vov Yu.N., Dement'yev Yu.A., Antipov K.M., Surba A.S., Sheiko P.A., Neklepavev B.N., Shifrin L.N., Kassikhin S.D. Elektricheskiye stantsii — in Russ. (Power plants), 2005, No. 11, pp. 69–75.
- Alekseyev B.A. Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov (Monitoring of the condition (diagnostics) of large power transformers). Moscow, Publ. «Nauchnyi tsentre» ENAS», 2002, 216 p.
- Abramov V.B., Shutenko O.V., Baklai D.N. Наукові вісми HTУУ «ХПІ» — in Ukraine (Київ), 2014, No. 6, pp. 16–26.
- Saranya S., Mageswari U., Roy N., Sudha R. Comparative study of various dissolved gas analysis methods todiagnose transformer faults. — International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2013, vol. 3, Iss. 3, pp. 592–595.
- Gray I.A.R., Guide A. Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <http://www.satcs.co.za/ Transformer Oil Analysis.pdf> (2/2013)
- Di Giorgio J.B. Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids. — DGA Expert System: A Leader in Quality, Value and Experience, 2005, vol. 1, pp. 1–17.
- Raisan A., Yaacob M.M., Alsaedi M.A. Faults diagnosis and assessment of transformer insulation oil quality: intelligent methods based on dissolved gas analysis a-review. — International Journal of Engineering & Technology, 2015, vol. 4, No. 1, pp. 54–60.