

УДК 621.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГАЗОВ С УЧЕТОМ ТИПА ЗАЩИТЫ МАСЛА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ШУТЕНКО О. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Передача электрической энергии» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

Цель работы. Разработка метода для определения граничных значений концентраций газов, с учетом особенностей газосодержания оборудования с разным типом защиты масла.

Методы исследования. Статистический анализ, проверка гипотезы о предполагаемом распределении экспериментальных значений, методы статистических решений, метод минимального риска, метод Нелдера-Мида.

Полученные результаты. Приведены результаты сравнительного анализа содержания газов в трансформаторах герметичного и негерметичного исполнения. Установлено, что концентрации газов, растворенных в масле исправных автотрансформаторов 330 кВ герметичной конструкции, могут быть описаны распределением Вейбулла. Предложен метод определения граничных значений концентраций газов, основанный на минимизации функции среднего риска. Выполненный анализ значений средних рисков, с использованием полученных автором граничных значений и типичных концентраций газов, регламентируемых известными стандартами, показал высокую достоверность предложенного метода.

Научная новизна. Предложен метод для определения граничных концентраций растворенных в масле газов, которые обеспечивают минимальное значение среднего риска, при диагностике состояния трансформаторов по значениям концентраций растворенных в масле газов. Данный метод отличается тем, что граничные значения концентрации газов получаются путем минимизации функции среднего риска для многомерных распределений методом Нелдера-Мида.

Практическая ценность. Предложенный метод позволяет определять граничные значения концентраций газов с учетом особенностей газосодержания оборудования, его конструктивного исполнения, условий эксплуатации, сорта трансформаторного масла и ряда других факторов. Полученные при этом значения граничных концентраций обеспечивают минимальные значения риска, по сравнению с значениями риска, которые сопровождаются использованием типичных значений концентраций газов, которые регламентируются действующими стандартами.

Ключевые слова: анализ растворенных в масле газов; газосодержание трансформаторов с разным типом защиты масла, уровни концентраций, газ с максимальным содержанием, граничные значения концентраций газов; распределение Вейбулла; функции плотности распределения, метод минимального риска, метод Нелдера-Мида.

I. ВВЕДЕНИЕ

Старение парка высоковольтных силовых трансформаторов, является актуальной проблемой, как для Украины, так и для большинства развитых стран. С учетом того, что одновременная замена всех трансформаторов, которые эксплуатируются за пределами нормативного срока службы, экономически невозможна, то для обеспечения эксплуатационной надежности такого оборудования все более широкое применение находят методы неразрушающей диагностики. Одним из таких методов является анализ растворенных в масле газов (АРГ), который позволяет выявить до 80% всех дефектов оборудования. В большинстве международных и национальных стандартах [1]-[5] по интерпретации результатов АРГ в качестве первичного признака наличия дефекта используют превышение концентраций газов, некоторых значений, называемых граничными или типичными. Действующим в

Украине стандартом [4] граничные значения концентраций газов рекомендовано определять графически по отдельности для каждого из газов, как 90%-ную точку интегральной функции распределения концентрации газа, полученной для 100 и более единиц исправного однотипного оборудования. Однако согласно стандарту МЭК 60-599 [1], полученные таким образом, концентрации являются не граничными, а типичными. Т.е. максимальными концентрациями газов, которые могут быть обнаружены у 90% оборудования от общего количества, не имеющего признаков дефекта. Согласно [1] отождествление граничных и типичных концентраций является ошибочным. В связи с этим возникает объективная необходимость в разработке метода, который бы позволил определять граничные концентрации растворенных в масле газов, с учетом влияния наиболее значащих факторов и последующей оценкой достоверности принятых решений.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Как показано в работах [6]-[10] газосодержание исправных нормально работающих трансформаторов герметичной и негерметичной конструкции имеет существенные количественные и качественные различия. Согласно результатам, приведенных в этих работах для герметичного оборудования газосодержание соответствует общепринятым представлениям [4], согласно которым при низкотемпературных воздействиях, характерных для исправного состояния основными газами являются водород и предельные углеводороды (метан и этан). А в негерметичном оборудовании имеет место более высокое содержание непредельных углеводородов в частности этилена и ацетилена, вследствие интенсивных окислительных реакций и более низкое содержание водорода из-за диффузии в атмосферу. В тоже время, несмотря на очевидные различия в содержании газов, в действующих стандартах, для герметичного и негерметичного оборудования регламентируются одни и те же граничные значения концентраций газов. Выполненный анализ открытых литературных источников, показал, что для определения граничных концентраций газов используется два подхода. Первый подход связан с усовершенствованием метода интегральных функций, например в [11] предлагается выбирать предельный уровень F_x с учетом уровня потока отказов, для данного вида оборудования, а граничные значения определять с учетом наиболее значащих факторов. Однако результаты, приведенные в работе [12] показывают, что граничные значения полученные методом интегральных функций обеспечивают более высокие значения риска, по сравнению с граничными значениями, которые получены другими методами. Более перспективным, по мнению автора, является второй подход, который основан на использовании методов статистических решений. Так в работе [13] решается задача прогнозирования отказов трансформаторов на основе анализа распределений концентраций газов в трансформаторах с различным состоянием, с учетом продолжительности эксплуатации, номинальной мощности и напряжения. В работах [14]-[15] граничные концентрации определялись на основе критерия Неймана-Пирсона, в [16] использовался метод, основанный на байесовском правиле построения границ для раздела классов состояний. А в работах [17]-[18] определены граничные значения концентрации газов методом минимального риска для негерметичных трансформаторов, залитых разными сортами масел. Однако, несмотря, на значительный объем публикаций, вопросы учета конструктивных особенностей трансформаторов при определении граничных значений концентраций газов рассмотрены недостаточно, что и послужило поводом для написания данной статьи.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является учет особенностей газо-

содержания высоковольтных трансформаторов с разным типом защиты масла при определении граничных значений концентраций растворенных в масле газов. Для этого анализируются газосодержание масел исправных трансформаторов герметичного и негерметичного исполнения. Исследуются законы распределения концентраций газов в исправных трансформаторах. Определяются граничные значения концентраций газов методом минимального риска и анализируются полученные результаты.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для иллюстрации отличий газосодержания в масле исправных трансформаторов негерметичного и герметичного исполнения выполнен анализ результатов АРГ для 426 трансформаторов напряжением 110 и 330 кВ, негерметичного исполнения (общим объемом 7393 выборочных значений) и 10 автотрансформаторов напряжением 330 кВ (563 значения). На первом этапе исследований проанализировано распределение газов по значениям концентраций, для чего были использованы уровни концентраций газов, которые рекомендованы в [4] для диагностики состояния высоковольтного оборудования напряжением до 330 кВ включительно. Согласно [4] если значения концентраций газов соответствуют уровню 1, то это свидетельствует об исправном состоянии оборудования. Если концентрация хотя бы одного из газов соответствует уровню 2, то решение о состоянии оборудования, принимается на основании анализа значений скоростей нарастания рассчитанных для суммы газов углеводородного ряда (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сутки). Если значения концентраций хотя бы одного из газов соответствует уровню 3, то прогнозируется наличие дефекта. Учитывая, что систематическая погрешность измерения концентраций газов, растворенных в масле, растет по мере приближения концентраций к порогу чувствительности хроматографа, то для анализа распределений газов были использованы значения предела появления газов в масле. Эти значения также регламентированы в [4], с целью снижения систематической погрешности, результатов расчета отношений газов и графических методов интерпретации. Значения нормируемых уровней концентраций (выделены полужирным шрифтом) и результаты анализа приведены в табл. 1. Далее был выполнен анализ распределения результатов АРГ по критерию газа с максимальной концентрацией. Результаты анализа приведены на рис. 1. Анализируя данные из табл. 1 и рис. 1 легко увидеть, что содержание газов в исправных герметичных и негерметичных трансформаторах существенно отличается. Так в негерметичных трансформаторах газами с максимальным содержанием являются в основном C_2H_4 и CH_4 , при низком содержании H_2 . В герметичных автотрансформаторах газами с максимальным содержанием являются CH_4 и H_2 . При этом практически отсутствуют пробы масла, в которых газов с максимальным содержанием является

C_2H_2 , в то время как в негерметичном оборудовании общее число таких проб, сравнимо с числом проб, в которых газом с максимальным содержанием является C_2H_6 . В целом приведенные результаты совпадают,

с результатами аналогичных исследований, приведенных в [6]-[10].

Таблица 1. Распределение газов по уровням концентраций в герметичных и негерметичных трансформаторах

| Негерметичные трансформаторы напряжением 110-330 кВ [10] | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Уровни концентраций | Газы, % об. | | | | |
| | H_2 | CH_4 | C_2H_6 | C_2H_4 | C_2H_2 |
| Ниже предела обнаружения хроматографа | 5161 (69,81%) | 2304 (31,2%) | 1957 (26,47%) | 1090 (14,7%) | 4551 (61,6%) |
| Ниже предела появления газов в масле | 0,005 | 0,0015 | | | 0,0003 |
| | 2106 (28,49%) | 3342 (45,2%) | 4485 (60,67%) | 3763 (50,9%) | 1602 (21,7%) |
| Уровень I | <0,01 | <0,005 | | <0,0015 | <0,00005 |
| | 71 (0,96%) | 1160 (15,7%) | 619 (8,37%) | - | - |
| Уровень II | 0,01-0,015 | 0,005-0,012 | 0,0015-0,01 | | 0,00005-0,001 |
| | 26 (0,35%) | 367 (4,96%) | 153 (2,07%) | 1914 (25,9%) | 982 (13,3%) |
| Уровень III | >0,015 | >0,012 | >0,01 | | >0,001 |
| | 29 (0,39%) | 220 (2,98%) | 179 (2,42%) | 626 (8,5%) | 258 (3,5%) |
| Герметичные автотрансформаторы напряжением 330 кВ | | | | | |
| Уровни концентраций | Газы, % об. | | | | |
| | H_2 | CH_4 | C_2H_6 | C_2H_4 | C_2H_2 |
| Ниже предела обнаружения хроматографа | 206 (36,59%) | 7 (1,24%) | 35 (6,22%) | 44 (7,815%) | 453 (90,94%) |
| Ниже предела появления газов в масле | 0,005 | 0,0015 | | | 0,0003 |
| | 200 (35,524%) | 180 (31,97%) | 317 (56,31%) | 432 (76,732%) | 80 (7,10%) |
| Уровень I | <0,01 | <0,005 | | <0,0015 | <0,00005 |
| | 132 (23,446%) | 263 (46,71%) | 172 (30,55%) | - | - |
| Уровень II | 0,01-0,015 | 0,005-0,012 | 0,005-0,01 | 0,0015-0,01 | 0,00005-0,001 |
| | 12 (2,131%) | 79 (14,03%) | 39 (6,93%) | 75 (13,321%) | 30 (1,78%) |
| Уровень III | >0,015 | >0,012 | >0,01 | | >0,001 |
| | 13 (2,309) | 34 (6,04%) | 0 (0%) | 12 (2,131%) | 1 (0,18%) |

Поскольку законы распределения концентраций газов в трансформаторах негерметичного исполнения исследованы и использованы для определения граничных концентраций газов в [17]-[18], то основной задачей дальнейших исследований являлось оценка законов распределений концентраций газов в исправных автотрансформаторах герметичного исполнения. Несмотря на то, что анализируются результаты АРГ для автотрансформаторов одного типа: АДЦТН-200/330/110, с пленочной защитой, которые залиты

маслом марки Т-1500, полученные в результате эксплуатационного контроля данные, являются статистически неоднородными. Это вызвано различными значениями загрузки, разной степенью влияния аварийных режимов работы сети и т.д. Все это приводит к тому, что значения концентраций газов в различных автотрансформаторах могут существенно различаться и более того, значения концентраций газов в одном автотрансформаторе, но полученные в разные моменты времени также значительно отличаются между собой.

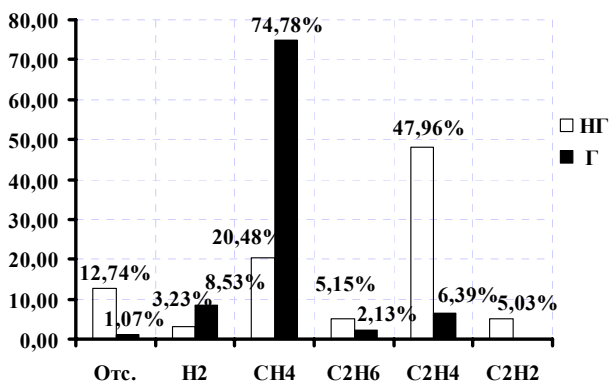


Рисунок 1. Диаграмма распределения результатов АРГ для негерметичных трансформаторов (НГ) и герметичных (Г) автотрансформаторов, по критерию газа с максимальным содержанием

Для формирования массивов однородных концентраций был использован алгоритм статистической обработки результатов АРГ, предложенный в [19]. В таблице 2 приведены объем выборочных значений N , значения выборочных средних M_x , выборочных дисперсий D_x , а также значений коэффициентов асимметрии и эксцесса j_a и j_e для массивов исходных данных (M_0) и однородных массивов (M_1) концентраций растворенных в масле газов, полученных в результате статистической обработки. Как видно из таблицы статистическая обработка массива исходных данных привела к существенному снижению не только значений выборочной дисперсии, но и к снижению значений коэффициентов асимметрии и эксцесса.

Таблица 2. Статистические характеристики исходных массивов результатов АРГ (M_0) и массивов данных полученных в результате статистической обработки (M_1)

| Газ | Массив | N | M_x | D_x | j_a | j_e |
|-------------------------------|--------|-----|---------|-----------------------|---------|--------|
| CH ₄ | M_0 | 563 | 0,00373 | $2,101 \cdot 10^{-5}$ | 3,338 | 19,546 |
| | M_1 | 118 | 0,00455 | $2,138 \cdot 10^{-6}$ | -0,0714 | 2,632 |
| C ₂ H ₆ | M_0 | 563 | 0,00166 | $2,898 \cdot 10^{-6}$ | 1,544 | 5,065 |
| | M_1 | 111 | 0,00216 | $9,558 \cdot 10^{-7}$ | 0,128 | 2,482 |
| C ₂ H ₄ | M_0 | 563 | 0,00180 | $9,899 \cdot 10^{-6}$ | 3,283 | 14,449 |
| | M_1 | 119 | 0,00308 | $4,520 \cdot 10^{-7}$ | -0,0715 | 3,038 |
| C ₂ H ₂ | M_0 | 563 | 0,00003 | $1,753 \cdot 10^{-8}$ | 8,352 | 94,990 |
| | M_1 | 106 | 0,00012 | $4,780 \cdot 10^{-9}$ | 0,503 | 2,603 |
| H ₂ | M_0 | 563 | 0,00212 | $4,426 \cdot 10^{-5}$ | 8,876 | 112,38 |
| | M_1 | 128 | 0,00254 | $1,664 \cdot 10^{-6}$ | 0,881 | 4,496 |

Построение гистограмм эмпирического распределения, оценка параметров 18 известных законов распределения, расчет значений критериев согласия (χ^2 Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова) выполнялись с помощью, разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» программы «ZR» [20]. По результатам анализа выполненного с помощью программы «ZR» удалось установить, что распределение концентраций газов, растворенных в масле исправных, герметичных автотранс-

форматоров, подчиняется закону распределения Вейбулла. В качестве примера на рис. 2 приведена гистограмма эмпирического распределения и функция плотности теоретического распределения Вейбулла для концентраций водорода, растворенного в масле исправных автотрансформаторов 330 кВ, герметичной конструкции.

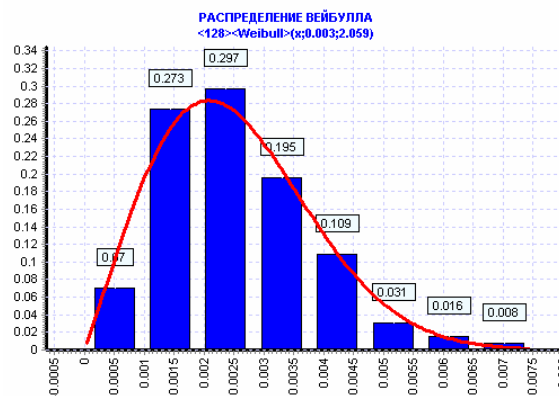


Рисунок 2. Гистограмма эмпирического распределения и функция плотности теоретического распределения Вейбулла для концентраций водорода, растворенного в масле исправных автотрансформаторов 330 кВ герметичной конструкции

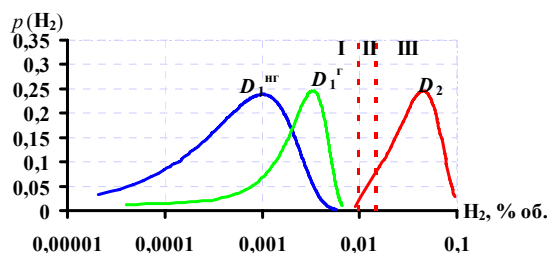
Значения параметров распределения α и β , критериев согласия χ^2 и критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 3. Как видно из таблицы для всех массивов данных и расчетные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова не превышают критических точек, на основании чего можно сделать вывод о том, что нет оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Вейбулла.

Таблица 3. Значения параметров законов распределения Вейбулла, а также расчетные и критические значения (при $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы f) критериев согласия, для концентраций газов, растворенных в масле исправных автотрансформаторов 330 кВ, герметичной конструкции

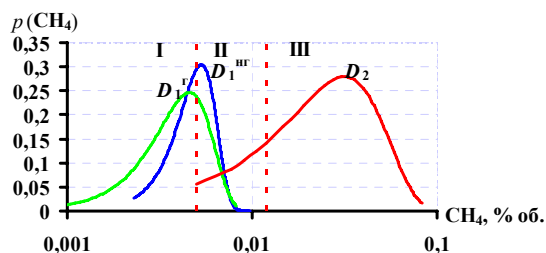
| Газ | Параметры закона распределения | | f | Значение Критерия Пирсона | | Значение критерия Колмогорова-Смирнова | |
|-------------------------------|--------------------------------|----------|-----|---------------------------|------------------|--|-------------------|
| | α | β | | $\chi^2_{расч.}$ | $\chi^2_{крит.}$ | $\lambda_{расч.}$ | $\lambda_{крит.}$ |
| CH ₄ | 0,005058 | 3,427525 | 3 | 1,354 | 7,820 | 0,368 | 1,360 |
| C ₂ H ₆ | 0,002437 | 2,333563 | 3 | 0,875 | 7,820 | 0,331 | 1,360 |
| C ₂ H ₄ | 0,003346 | 5,267013 | 3 | 0,861 | 7,820 | 0,258 | 1,360 |
| C ₂ H ₂ | 0,000144 | 1,913608 | 4 | 1,252 | 9,490 | 0,270 | 1,360 |
| H ₂ | 0,002877 | 2,059459 | 3 | 2,077 | 7,820 | 0,354 | 1,360 |

Следует отметить, что приведенные результаты отличаются от некоторых результатов, полученных другими исследователями. Так в работах [15], [21] для диагностики оборудования по результатам АРГ, автором был использован нормальный закон распределе-

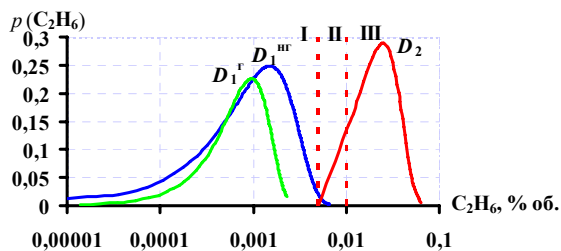
ния. В работах [11], [14] для анализа распределений концентраций газов были использованы огибающие функции, предложенные авторами. А в работе [22] установлено, что значения концентраций газов подчиняются распределению Вейбулла, что совпадает с полученными результатами. По мнению автора, подобные расхождения обусловлены различным алгоритмом предварительной статистической обработки результатов АРГ, которые использовались разными исследователями. В большинстве работ [11], [13], [14], [19] гистограммы эмпирических распределений являются несимметричными относительно математического ожидания, в отличие от нормального закона, используемого в [15] и [22]. Такая не симметрия имеет четкий физический смысл для исправного нормально работающего оборудования, наибольшую вероятность реализации имеют относительно низкие значения концентраций газов, а с ростом значений концентраций газов вероятность их реализации снижается. На рис. 2 приведены взаимные расположения плотностей теоретических распределений концентраций газов для исправных трансформаторов негерметичной конструкции (D_1^{nr}), герметичной конструкции (D_1^r) и трансформаторов с развивающимися дефектами (D_2). Вертикальными пунктирными линиями выделены границы уровней концентраций газов, которые регламентированы в [4].



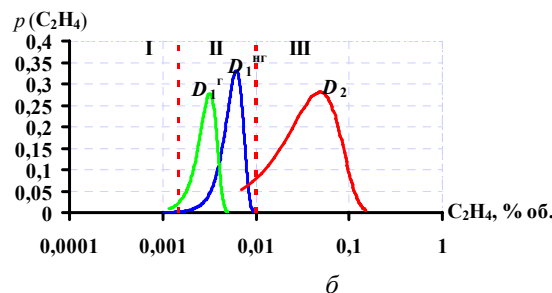
a



б



в



б

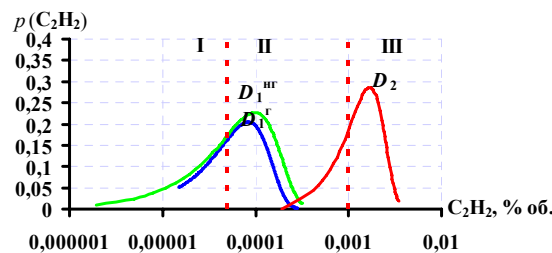
а – H₂; б – CH₄; в – C₂H₆; г – C₂H₄; д – C₂H₂.

Рисунок 3. Плотности теоретических распределений концентраций газов для исправных трансформаторов герметичного (D_1^r) и негерметичного (D_1^{nr}) исполнения и трансформаторов с развивающимися дефектами (D_2)

Как видно из рисунка взаимное расположение плотностей теоретических распределений концентраций газов для исправных трансформаторов с разным типом защиты масла, вполне адекватно отражает их реальное газосодержание. Кроме того из рисунка 2 видно, что функции плотностей распределений газов для исправных и дефектных трансформаторов пересекаются. А это значит, что для определения граничных значений концентраций газов следует использовать методы статистических решений.

При использовании данных методов [23] граничные значения диагностических признаков определяются исходя из минимизации заранее выбранных критериев. К таким критериям относятся: минимальное число ошибочных решений, минимаксный подход, минимизация значений вероятностей одной из ошибок при заданном уровне другой и т.д. Поскольку при диагностике состояния высоковольтных силовых трансформаторов цена ошибки II-го рода (принимается решение об исправном состоянии для дефектного трансформатора) много выше цены ошибки I-го рода (принимается решение о наличии дефекта в исправном трансформаторе), то для определения граничных значений концентраций газов был использован критерий минимума риска. Рассчитанные с использованием данного метода граничные значения обеспечивают минимум возможного экономического ущерба, который сопровождает принятие ошибочных решений.

Будем считать, что решение об исправном состоянии трансформатора принимается, 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 [23] при диагностике по комплексу признаков и с учетом того, что правильные решения не поощряются, может быть представлено как:

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

где: \mathbf{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;

$\int_{S_1} f(\mathbf{x}/D_1) d\mathbf{x}$ – вероятность того, что в исправном трансформаторе значения концентрации одного, двух и т.д., газов превысят граничные значения;

$\int_{S_2} f(\mathbf{x}/D_2) d\mathbf{x}$ – вероятность того, что в трансформа-

торе с развивающимся дефектом, значения концентраций всех газов будут ниже граничных; C_{21} – условная стоимость ошибки I-го рода; C_{12} – условная стоимость ошибки II-го рода; S_1 , S_2 – многомерные области интегрирования, характеризующие вероятности ошибок I-го и II-го рода и правильных решений

Значения вероятности ошибки первого рода (вероятность того, что в исправных трансформаторах концентрация одного, двух, трех, четырех или всех пяти газов превысит граничные значения) [12], [17], [18] можно представить как:

$$P_{21} = \left[\int_{CH_{4,зп}}^{\infty} \frac{\beta_{CH_4}}{\alpha_{CH_4}^{\beta_{CH_4}}} \cdot CH_4^{\beta_{CH_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{CH_4}{\alpha_{CH_4}}\right)^{\beta_{CH_4}}} dCH_4 \cdot \int_{C_2H_{6(0)}}^{C_2H_{6,зп}} \frac{\beta_{C_2H_6}}{\alpha_{C_2H_6}^{\beta_{C_2H_6}}} \cdot C_2H_6^{\beta_{C_2H_6}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\alpha_{C_2H_6}}\right)^{\beta_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \cdot \int_{C_2H_{4(0)}}^{C_2H_{4,зп}} \frac{\beta_{C_2H_4}}{\alpha_{C_2H_4}^{\beta_{C_2H_4}}} \cdot C_2H_4^{\beta_{C_2H_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\alpha_{C_2H_4}}\right)^{\beta_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \cdot \int_{C_2H_{2(0)}}^{C_2H_{2,зп}} \frac{\beta_{C_2H_2}}{\alpha_{C_2H_2}^{\beta_{C_2H_2}}} \cdot C_2H_2^{\beta_{C_2H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\alpha_{C_2H_2}}\right)^{\beta_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \right]$$

$$\left[\int_{H_{2(0)}}^{H_{2,зп}} \frac{\beta_{H_2}}{\alpha_{H_2}^{\beta_{H_2}}} \cdot H_2^{\beta_{H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{H_2}{\alpha_{H_2}}\right)^{\beta_{H_2}}} dH_2 \right] + \dots \quad (2)$$

$$\dots + \dots + \left[\int_{CH_{4,зп}}^{\infty} \frac{\beta_{CH_4}}{\alpha_{CH_4}^{\beta_{CH_4}}} \cdot CH_4^{\beta_{CH_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{CH_4}{\alpha_{CH_4}}\right)^{\beta_{CH_4}}} dCH_4 \cdot \int_{C_2H_{6,зп}}^{\infty} \frac{\beta_{C_2H_6}}{\alpha_{C_2H_6}^{\beta_{C_2H_6}}} \cdot C_2H_6^{\beta_{C_2H_6}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\alpha_{C_2H_6}}\right)^{\beta_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \cdot \int_{C_2H_{4,зп}}^{\infty} \frac{\beta_{C_2H_4}}{\alpha_{C_2H_4}^{\beta_{C_2H_4}}} \cdot C_2H_4^{\beta_{C_2H_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\alpha_{C_2H_4}}\right)^{\beta_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \cdot \int_{C_2H_{6,зп}}^{\infty} \frac{\beta_{C_2H_2}}{\alpha_{C_2H_2}^{\beta_{C_2H_2}}} \cdot C_2H_2^{\beta_{C_2H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\alpha_{C_2H_2}}\right)^{\beta_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \cdot \int_{H_{2,зп}}^{\infty} \frac{\beta_{H_2}}{\alpha_{H_2}^{\beta_{H_2}}} \cdot H_2^{\beta_{H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{H_2}{\alpha_{H_2}}\right)^{\beta_{H_2}}} dH_2 \right],$$

где: CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , H_2 – значения концентраций газов; $CH_{4гр}$, $C_2H_{6гр}$, $C_2H_{4гр}$, $C_2H_{2гр}$, $H_{2гр}$ – граничные значения концентраций газов; $CH_{4(0)}$, $C_2H_{6(0)}$, $C_2H_{4(0)}$, $C_2H_{2(0)}$, $H_{2(0)}$ – предел обнаружения соответствующих газов хроматографом; α_{CH_4} , $\alpha_{C_2H_6}$, $\alpha_{C_2H_4}$, $\alpha_{C_2H_2}$, α_{H_2} – параметры масштаба закона распределения Вейбулла, для концентраций в исправных трансформаторах; β_{CH_4} , $\beta_{C_2H_6}$, $\beta_{C_2H_4}$, $\beta_{C_2H_2}$, β_{H_2} – параметры формы закона распределения Вейбулла для концентраций газов в исправных трансформаторах.

Вероятность ошибки второго рода (вероятность того, что при развитии дефекта концентрации всех пяти газов будут меньше граничных) [12], [17], [18] можно представить как:

$$P_{12} = \left[\int_{CH_{4(0)}}^{CH_{4,зп}} \frac{\gamma_{CH_4}}{\eta_{CH_4}^{\gamma_{CH_4}}} \cdot CH_4^{\gamma_{CH_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{CH_4}{\eta_{CH_4}}\right)^{\gamma_{CH_4}}} dCH_4 \cdot \int_{C_2H_{6(0)}}^{C_2H_{6,зп}} \frac{\gamma_{C_2H_6}}{\eta_{C_2H_6}^{\gamma_{C_2H_6}}} \cdot C_2H_6^{\gamma_{C_2H_6}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\eta_{C_2H_6}}\right)^{\gamma_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \cdot \int_{C_2H_{4(0)}}^{C_2H_{4,зп}} \frac{\gamma_{C_2H_4}}{\eta_{C_2H_4}^{\gamma_{C_2H_4}}} \cdot C_2H_4^{\gamma_{C_2H_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\eta_{C_2H_4}}\right)^{\gamma_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \cdot \int_{C_2H_{2(0)}}^{C_2H_{2,зп}} \frac{\gamma_{C_2H_2}}{\eta_{C_2H_2}^{\gamma_{C_2H_2}}} \cdot C_2H_2^{\gamma_{C_2H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\eta_{C_2H_2}}\right)^{\gamma_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \cdot \int_{H_{2(0)}}^{H_{2,зп}} \frac{\gamma_{H_2}}{\eta_{H_2}^{\gamma_{H_2}}} \cdot H_2^{\gamma_{H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{H_2}{\eta_{H_2}}\right)^{\gamma_{H_2}}} dH_2 \right]$$

$$\left. \begin{aligned} & \int_{C_{2H_4(0)}}^{C_{2H_4_{sp}}} \frac{\gamma_{C_2H_4}}{\eta_{C_2H_4}^{\gamma_{C_2H_4}}} \cdot C_{2H_4}^{\gamma_{C_2H_4}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_{2H_4}}{\eta_{C_2H_4}}\right)^{\gamma_{C_2H_4}}} dC_{2H_4} \cdot \\ & \int_{C_{2H_2(0)}}^{C_{2H_2_{sp}}} \frac{\gamma_{C_2H_2}}{\eta_{C_2H_2}^{\gamma_{C_2H_2}}} \cdot C_{2H_2}^{\gamma_{C_2H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{C_{2H_2}}{\eta_{C_2H_2}}\right)^{\gamma_{C_2H_2}}} dC_{2H_2} \cdot \\ & \int_{H_{2(0)}}^{H_{2_{sp}}} \frac{\gamma_{H_2}}{\eta_{H_2}^{\gamma_{H_2}}} \cdot H_2^{\gamma_{H_2}-1} \cdot e^{-\left(\frac{H_2}{\eta_{H_2}}\right)^{\gamma_{H_2}}} dH_2 \end{aligned} \right\} (3)$$

где: η_{CH_4} , $\eta_{C_2H_6}$, $\eta_{C_2H_4}$, $\eta_{C_2H_2}$, η_{H_2} – параметры масштаба закона распределения Вейбулла для концентраций газов в трансформаторах с развивающимся дефектом; γ_{CH_4} , $\gamma_{C_2H_6}$, $\gamma_{C_2H_4}$, $\gamma_{C_2H_2}$, γ_{H_2} – параметры формы закона распределения Вейбулла для концентраций газов в трансформаторах с развивающимся дефектом.

Для определения граничных значений концентраций газов был использован подход, основанный на методах градиентного спуска, в частности метод Нелдера-Мида [24]. Этот метод, также известный как метод деформируемого многогранника – метод безусловной оптимизации вещественной функции от нескольких переменных, который решает задачу поиска минимизатора x^* некоторой заданной функции f . Метод состоит в том [24], что в пространстве поиска S^n строится равноосторонний многогранник (регулярный симплекс) с количеством вершин, равным $(n+1)$. Далее вычисляется значение функции $f(x)$ во всех вершинах и выясняется, какая из вершин симплекса является наихудшей в смысле значения функции. Найденная наихудшая вершина заменяется новой вершиной, которая является отражением наихудшей вершины относительно центра тяжести оставшихся вершин. Получается новый симплекс, где вся процедура повторяется. В результате симплекс передвигается по пространству поиска в сторону искомого минимизатора функции $f(x)$. Данный метод реализован в виде авторской программы «BOUNDARY», которая позволяет определять граничные значения диагностических признаков методом минимального риска.

По аналогии с [17], [18] расчет граничных значений выполнялся при значениях вероятности исправного состояния $P_1=0,95$ и вероятности появления дефекта $P_2=0,05$ и соотношении условных стоимостей ошибочных решений $C_{12}/C_{21}=10000$.

В качестве параметров законов распределений, для исправного состояния использовались значения, приведенные в табл. 3, а для дефектного состояния значения параметров приведенные в [12], [17], [18]. Полученные значения концентраций, обеспечивающие минимум риска, приведены в табл. 4. Там же для сравнения приведены граничные значения концентраций газов для негерметичных трансформаторов,

залитых маслом марки Т-1500, полученные методом минимального риска в работе [17].

Таблица 4. Граничные значения концентраций газов, полученные по результатам АРГ автотрансформаторов 330 кВ, герметичного исполнения, методом минимального риска

| Растворенные в масле газы, % об. | | | | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | H ₂ |
| Герметичные автотрансформаторы 330 кВ | | | | |
| 0,0111 | 0,0076 | 0,0056 | 0,00058 | 0,0104 |
| Негерметичные трансформаторы 110-330 кВ [17] | | | | |
| 0,0095 | 0,0094 | 0,0106 | 0,00077 | 0,0086 |
| 0 | | | | |

Для оценки достоверности принятия решения был выполнен анализ значений среднего риска, который сопровождается использованием полученных граничных концентраций с рисками, которые сопровождаются использованием граничных (типичных) концентраций газов, рекомендуемых известными стандартами по интерпретации результатов АРГ. Эти значения с указанием литературных источников приведены в табл. 5.

В табл. 5 для стандартов IEC 60599, IEEE Std C57.104, COY-H EE 46.501:2006, California state university и Latvian Energy Standard LEK 118 типичные значения концентраций газов заданы в виде диапазонов значений, соответствующих различной степени дефектности. В стандарте SECR (Япония), типичные значения концентраций газов заданы для оборудования напряжением выше 275 кВ и номинальной мощностью меньше 10 МВА (верхняя строка) и выше 10 МВА (нижняя строка).

Как видно из табл. 5 максимальное значение риска получено для граничных значений, которые соответствуют четвертому и третьему уровням стандарта IEEE Std C57.104. При этом с ростом значений граничных концентраций величина риска существенно возрастает, т.к. растет значение вероятности ошибки II-го рода. Наименьшее значение риска для принятых параметров расчета обеспечивают граничные значения, полученные методом минимума риска для автотрансформаторов напряжением 330 кВ герметичного исполнения. Значение риска, которое сопровождается использованием граничных значений концентраций газов из табл. 4 в 30,943 раза меньше чем минимальное значение риска, обеспечиваемое типичными значениями из действующих стандартов (в данном случае это граничные значения уровня 1 стандарта IEEE Std C57.104). Минимальное значение риска в 597641,509 раз меньше максимального значения риска обеспечиваемое типичными значениями из действующих стандартов (в данном случае это граничные значения уровня 4 стандарта IEEE Std C57.104). Значения рисков, которые сопровождаются использованием типичных значений концентраций газов, рекомендуемых другими стандартами, имеют промежуточные значения.

Таблиця 5. Значения типичных концентраций газов, рекомендуемые известными стандартами и значения среднего риска, которые сопровождают их использование для диагностики исправных автотрансформаторов 330 кВ герметичной конструкции

| Стандарт | Концентрации растворенных в масле газов, % об. | | | | | R |
|---|---|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | |
| IEC 60599 [1] | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,006 | - | 0,95 |
| | 0,015 | 0,013 | 0,009 | 0,028 | - | 0,95 |
| IEEE Std C57.104 [2] | 0,01 | 0,012 | 0,0065 | 0,005 | 0,0035 | 3,28 10 ⁻⁴ |
| | 0,077 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,311 |
| | 0,18 | 0,18 | 0,015 | 0,02 | 0,008 | 6,186 |
| | 0,1801 | 0,1 | 0,0151 | 0,0201 | 0,0081 | 6,335 |
| Методика Дорненбурга [3] | 0,02 | 0,005 | 0,0035 | 0,008 | 0,0005 | 0,421 |
| COУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) [4] | 0,01 | 0,005 | 0,005 | 0,0015 | 0,00005 | 0,949 |
| | 0,015 | 0,012 | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 3,64 10 ⁻⁴ |
| РД 153.34.0-46.302- 00 (Россия) [5] | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,01 | 0,001 | 4,56 10 ⁻³ |
| Energopomiar (Польша) [25] | 0,05 | 0,02 | 0,017 | 0,026 | 0,007 | 1,341 |
| Методика Дюваля [26] | 0,01 | 0,0075 | 0,0075 | 0,0075 | 0,0003 | 0,036 |
| EDF, (Франция) [27] | 0,013 | 0,013 | 0,015 | 0,0044 | 0,00004 | 0,873 |
| BBC, (Швейцария) [27] | 0,02 | 0,005 | 0,0015 | 0,006 | 0,0015 | 0,788 |
| OY STROMBERG (Финляндия) [27] | 0,01 | 0,01 | 0,015 | 0,01 | 0,003 | 7,91 10 ⁻⁴ |
| HYDRO QUEBEC (Канада) [27] | 0,025 | 0,0033 | 0,0015 | 0,004 | 0,0025 | 0,900 |
| SECR (Япония) [27] | 0,04 | 0,02 | 0,015 | 0,03 | - | 0,42 |
| | 0,04 | 0,015 | 0,015 | 0,02 | - | 0,95 |
| California state university (США) [27] | 0,015 | 0,0025 | 0,001 | 0,002 | 0,0015 | 0,949 |
| | 0,1 | 0,008 | 0,0035 | 0,01 | 0,007 | 0,101 |
| Northern Technology & Testing (США) [28] | 0,15 | 0,008 | 0,0035 | 0,015 | 0,0007 | 0,100 |
| MSZ-09-00.0352 (Малайзия) [29] | 0,016 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,0004 | 0,856 |
| Latvian Energy Standard LEK 118 (Латвия) [30] | 0,006 | 0,0045 | 0,003 | 0,0015 | 0,0001 | 0,947 |
| | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,01 | 0,001 | 0,0045 |
| Метод минимального риска для негерметичных трансформаторов [17] | 0,0086 | 0,00950 | 0,0094 | 0,0106 | 0,00077 | 3,84 10 ⁻³ |
| Метод минимального риска для герметичных автотрансформаторов | 0,0104 | 0,0111 | 0,0076 | 0,0056 | 0,00058 | 1,06 10 ⁻⁵ |

Принципиально важным, является то, что граничные значения полученные методом минимального риска, но для негерметичных трансформаторов сопровождаются величиной риска, значение которой превышают значения риска, которым сопровождается использование граничных концентраций из действующих стандартов, например OY STROMBERG (Финляндия), COУ-Н ЕЕ 46.501:2006, Украина (уровень 2), IEEE Std C57.104 (уровень 1). При этом следует учесть, что и герметичные автотрансформаторы и негерметичные трансформаторы, в рассматриваемых примерах залиты маслом марки Т-1500, что исключает влияние сорта масла на полученные результаты.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для снижения возможного экономического ущерба, в случае принятия ошибочных решений при диагностике состояния оборудования по результатам АРГ, при определении граничных значений концентраций растворенных в масле газов, недостаточно использовать метод минимального риска, необходимо также учитывать особенности газосодержания оборудования с разным типом защиты масла.

Полученные значения граничных концентраций обеспечивают минимум риска только для заданных значений цен ошибочных решений, вероятностей состояний и параметров законов распределений. На

практике и значения вероятностей диагнозов, и значения цен ошибочных решений, и значения параметров распределений могут изменяться в широких пределах. Приведенные в работе [17] результаты показывают, что при изменении хотя бы одного из перечисленных параметров граничные значения концентраций газов, обеспечивающие минимум риска будут изменяться. Из чего следует, что граничные значения концентраций газов, обеспечивающие минимум экономического ущерба, должны определяться с учетом данных факторов.

V. ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты сравнительного анализа распределений газов, растворенных в масле исправных трансформаторов герметичного и негерметичного исполнения, по уровням концентраций и по критерию газа с максимальным содержанием. Показано наличие существенных количественных и качественных отличий в газосодержании оборудования с разным типом защиты масла, что хорошо согласуется с результатами, полученными другими исследователями.

2. Установлено, что распределение концентраций газов растворенных в масле исправных автотрансформаторов 330 кВ, негерметичного исполнения может быть описано распределением Вейбулла. При этом функции плотности распределений концентраций газов для исправных и дефектных трансформаторов пересекаются, а это значит, что принципиально невозможно определить граничные значения концентраций газов, которые бы не давали ошибочных решений. В таких условиях для определения граничных значений концентраций газов целесообразно использовать методы статистических решений.

3. Выполнен анализ рисков, которые сопровождаются использованием полученных автором граничных значений и значений типичных концентраций газов, регламентируемых известными стандартами. Показано, что для заданных параметров расчета значение риска при использовании граничных значений полученных автором, практически в 30,943 раз меньше, чем минимальное значение риска, и в 597641,509 раз меньше максимального значения риска, которые бы имели место при использовании типичных значений из стандартных методик.

4. Установлено, что для снижения возможных рисков, в случае принятия ошибочных решений при диагностике состояния оборудования по результатам АРГ, при определении граничных значений концентраций растворенных в масле газов, недостаточно использовать только совершенный математический аппарат, необходимо также учитывать физические особенности процессов газообразования в оборудовании с разным типом защиты масла.

5. Граничные значения концентраций газов, обеспечивающих минимальное значение среднего

риска, не являются постоянными. Очевидно, что они будут изменяться в зависимости от значений 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 экономического ущерба, должны определяться с учетом данных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] IEC Publication 60599, Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis [Text], 2015. –38 p.
- [2] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCD C57.104-2008 [Text], 2009. –28 p.
- [3] Dornenburg, E. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis [Text] / E. Dornenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review. – 1974. – Vol. 61. – pp. 238-274.
- [4] 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 [Текст].– Київ: Індустрія, 2007. – 92 с.
- [5] РД 153-34.0-46.302-00: Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле [Текст].– М.: НЦ ЭНАС, 2001– 26 с.
- [6] Абрамов, В.Б. Отличительные особенности газообразования в трансформаторном масле герметичного и негерметичного высоковольтного оборудования [Текст] / В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский // Новини енергетики. – 2009. – № 9. – С. 17-32.
- [7] Боярчуков, Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле [Текст] / Г.М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – № 7. – С. 23-33.
- [8] Абрамов, В.Б. Особенности контроля маслonaполненного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов [Текст] / В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. – № 4. – С. 77-79.
- [9] Боярчуков, Г.М. Диагностика состояния негерметичного высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле [Текст] / Г.М. Боярчуков // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 7.– С. 24-28.
- [10] Шутенко, О.В. Анализ особенностей газосодержания масел в бездефектных

- трансформаторах негерметичного виконання [Текст] /О.В. Шутенко// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 38 (1260). – С. 84-97.
- [11] Давиденко, І.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслонаполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных [Текст] / И.В. Давиденко // Электричество. – 2009. – № 6. – С. 81-82.
- [12] Shutenko, O. Comparative analysis of risks which are accompanied by the use of typical and boundary gases concentrations for the diagnostics of high voltage transformers [Text] / O. Shutenko, O. Proskurnia, V. Abramov // Energetika – 2018. – Vol. 64. – №. 3. – pp 137-145, DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i3.3806> .
- [13] Mirowski, P. Statistical machine learning and dissolved gas analysis: a review [Text] / P. Mirowski, Y. LeCun // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27. – №. 4. – pp. 1791-1799.
- [14] Захаров, А.В. Обнаружение дефектов силовых маслонаполненных трансформаторов как процедура проверки статистических гипотез [Текст] / А.В. Захаров // Новое в российской энергетике. – 2001. – № 2. – С. 19-28.
- [15] Felea, I. The impact analyze of electric stress level in content of insulating oil gases in power transformers [Text] / I. Felea, D. Secui, M. Oltean // Journal of sustainable energy. – 2011. – Vol. 2. – №4. – pp. 7-12.
- [16] Левин, М.Н. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию. [Текст] / М. Н. Левин // Промышленная энергетика – 2013. – №. 8. – С. 37-41.
- [17] Шутенко, О.В. Определение значений граничных концентраций растворенных в масле газов методом минимального риска [Текст] / О.В. Шутенко // Электричество – Москва. – 2017. – № 8. – С. 50–60 doi: <http://10.24160/0013-5380-2017-8-50-60>.
- [18] Shutenko, Oleg. Determine the boundary value of the concentration of gases dissolved in oil of method minimum risk [Text] / Oleg Shutenko //IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 29 – June 2, 2017: Kyiv. – 2017. – pp. 468-472. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100533.
- [19] Шутенко, О.В. Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов. [Текст] /О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2013. – №60(1033). – С. 136-150.
- [20] Шутенко, О.В. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных. [Текст]: учеб. пособие для вузов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай; Нац. техн. ун-т «Харьковский политехнический ин-т». – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – 268 с.
- [21] Lin, M.-J. Gaussian distribution Diagnoses in Transformer's Insulating Oil [Text] / M.-J. Lin, // Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference (JIMET 2015), Chongqing, 2015. – pp. 824–830. doi: <http://doi.org/10.2991/jimet-15.2015.154>.
- [22] Piotrowski, T. Probability distributions of gases dissolved in oil of failed power transformers [Text] /T. Piotrowski // High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference on. – IEEE, 2014. – pp. 1-4. DOI 10.1109/ICHVE.2014.7035482.
- [23] Биргер, И.А. Техническая диагностика [Текст] /И.А. Биргер; – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
- [24] Черноруцкий, И.Г. Методы принятия решений [Текст] /И.Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
- [25] Алексеев, Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов [Текст] /Б. А. Алексеев – М.: «НЦ ЭНАС», 2002. – 216 с.
- [26] Saranya, S. Comparative study of various dissolved gas analysis methods to diagnose transformer faults [Text] / S. Saranya, U. Mageswari, N.Roy, Sudha R. // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) – 2013. – Vol.3. – Issue 3. – pp. 592-595.
- [27] Gray, I. A. R. A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. /I. A. R. Gray <[http://www.satcs.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf](http://www.satcs.co.za/Transformer%20Oil%20Analysis.pdf)> (2/2013).
- [28] DiGiorgio, J.B. Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids [Text] /J.B. DiGiorgio // DGA Expert System: A Leader in Quality, Value and Experience. – 2005. – Vol. 1. – pp. 1-17.
- [29] Raisan, A. Faults diagnosis and assessment of transformer insulation oil quality: intelligent methods based on dissolved gas analysis a-review [Text] /A. Raisan, M.M. Yaacob, M.A. Alsaedi //International Journal of Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 4. – №. 1. – pp. 54-60.
- [30] Poiss, G. Development of DGA indicator for estimating risk level of power transformers [Text] /G. Poiss //Electric Power Engineering (EPE), 2016 17th International Scientific Conference on. – IEEE, 2016. – pp. 1-4.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2018

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГАЗІВ З УРАХУВАННЯМ ТИПУ ЗАХИСТУ МАСЛА ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

ШУТЕНКО О. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

Мета роботи. Розробка методу для визначення граничних значень концентрацій газів, з урахуванням особливостей вмісту газів в обладнанні з різним типом захисту масла.

Методи дослідження. Статистичний аналіз, перевірка гіпотези про передбачуваний розподіл експериментальних значень, методи статистичних рішень, метод мінімального ризику, метод Нелдера-Міда.

Отримані результати. Наведено результати порівняльного аналізу вмісту газів в трансформаторах герметичного і негерметичного виконання. Встановлено, що концентрації газів, розчинених в маслі справних автотрансформаторів 330 кВ герметичної конструкції, можуть бути описані розподілом Вейбулла. Запропоновано метод визначення граничних значень концентрацій газів, заснований на мінімізації функції середнього ризику. Виконаний аналіз значень середніх ризиків, з використанням отриманих автором граничних значень і типових концентрацій газів, що регламентуються відомими стандартами показав, високу достовірність запропонованого методу.

Наукова новизна. Запропоновано метод для визначення граничних концентрацій розчинених в маслі газів, які забезпечують мінімальне значення середнього ризику, при діагностиці стану трансформаторів за значеннями концентрацій розчинених в маслі газів. Даний метод відрізняється тим, що граничні значення концентрацій газів виходять шляхом мінімізації функції середнього ризику для багатовимірних розподілів методом Нелдера-Міда.

Практична цінність. Запропонований метод дозволяє визначати граничні значення концентрацій газів з урахуванням особливостей вмісту газів в обладнанні, його конструктивним виконанням, умовами експлуатації, сортом трансформаторних масел і рядом інших чинників. Отримані при цьому значення граничних концентрацій забезпечують мінімальні значення ризику, в порівнянні зі значеннями ризику, що супроводжується використанням типових значень концентрацій газів, які регламентуються діючими стандартами.

Ключові слова: аналіз розчинених у маслі газів; вміст газів в трансформаторах з різним типом захисту масла; рівні концентрацій, газ з максимальним змістом, граничні значення концентрацій газів; розподіл Вейбулла; функції щільності розподілу, метод мінімального ризику, метод Нелдера-Міда.

DETERMINATION OF THE VALUES OF THE BOUNDARY CONCENTRATIONS OF GASES TAKING INTO ACCOUNT THE TYPE OF PROTECTION OF OIL OF HIGH VOLTAGE TRANSFORMERS

SHUTENKO O. V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of «Electric power transmission» of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute, Ukraine, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

Purpose. Development of a method for determining the boundary values of gas concentrations, taking into account the characteristics of the gas content of equipment with different types of oil protection.

Methodology. Statistical analysis, testing the hypothesis of the proposed distribution of experimental values, methods of statistical solutions, the method of minimal risk, the Nelder-Mead method.

Findings. The results of a comparative analysis of the gas content in sealed and unsealed transformers are presented. It has been established that the concentrations of gases dissolved in oil of serviceable autotransformers 330 kV of hermetic construction can be described by the Weibull distribution. A method for determining the boundary values of gas concentrations, based on minimizing the mean risk function, is proposed. The analysis of the mean risk values, using the boundary values obtained by the author and typical gas concentrations regulated by known standards, showed high reliability of the proposed method.

Originality. A method is proposed for determining the boundary concentrations of gases dissolved in oil, which provide the minimum value of the average risk in diagnosing the state of transformers from the concentrations of gases dissolved in oil. This method differs in that the boundary values of gas concentrations are obtained by minimizing the mean risk function for multidimensional distributions by the Nelder – Mead method.

Practical value. The proposed method allows determining the boundary values of gas concentrations, taking into

account the characteristics of the gas content of the equipment, its design, operating conditions, the sort of transformer oil and a number of other factors. The resulting values of boundary concentrations provide minimal risk values, compared with the risk values that are accompanied by the use of typical gas concentrations, which are regulated by the applicable standards.

Keywords: dissolved gas analysis; gas content of transformers with different types of oil protection, concentration levels, gas with maximum content, boundary values of gas concentrations; Weibull distribution; density functions, minimum risk method, Nelder-Mid method.

REFERENCES

- [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. (1974). Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, *Brown Boveri Review*, 61, 238-274.
- [4] SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljacijnomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kiïv, 2007, 92 p. (in Ukrainian).
- [5] RD 153-34.0-46.302-00: Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivajushhihsja defektov transformatornogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenyh v masle. [RD 153-34.0-46.302-00: Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of the chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moskva: NC JeNAS, 2001, 28 p. (in Russian).
- [6] Abramov, V.B., Bojarchukov, G.M Jablonskij, R.V. (2009). Otlichitel'nye osobennosti gazoobrazovanija v transformatornom masle germetichnogo i negermetichnogo vysokovol'tnogo oborudovanija. [Distinctive features of gas formation in transformer oil of hermetic and non-hermetic high-voltage equipment]. *Novini energetiki*, 9, 17-32. (in Russian).
- [7] Bojarchukov, G.M. (2010). Prakticheskie problemy ocenki sostojanija vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. [Practical problems in assessing the state of high-voltage equipment for the gas content in transformer oil]. *Novini energetiki*, 7, 23–33. (in Russian).
- [8] Abramov, V.B. (2012). Osobennosti kontrolja maslonapolnennogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. [Features of the control of oil-filled equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 4, 77–79. (in Russian).
- [9] Bojarchukov, G.M. (2012). Diagnostika sostojanija negermetichnogo vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. [Diagnosis of the state of high-voltage equipment non-hermetic execution for the content of gases in transformer oil]. *Energetika ta elektrifikacija*, 7, 24-28. (in Russian).
- [10] Shutenko, O.V. (2017). Analiz osobennostej gazosoderžanija masel v bezdefektnyh transformatorah negermetichnogo ispolnenija. [Analysis of peculiarities of gas content of oils in defect-free transformers ofuntight construction]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut».Zbirnik naukovih prac'. Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug*, 38 (1260), 84-97. (in Russian).
- [11] Davidenko, I.V. (2009). Opredelenie dopustimyh znachenij kontroliruemyh parametrov maslonapolnennogo oborudovanija na osnove massiva nabljudajemyh dannyh [Determination of admissible values of controlled parameters of oil-filled equipment on the basis of an array of observable data]. *Jelektrichestvo*, 6, 81–82. (in Russian).
- [12] Shutenko, O., Proskurnia, O., Abramov, V. (2018). Comparative analysis of risks which are accompanied by the use of typical and boundary gases concentrations for the diagnostics of high voltage transformers *Energetika*, 64, 3, 137-145, DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i3.3806> .
- [13] Mirowski, P., LeCun. (2012). Statistical machine learning and dissolved gas analysis: a review. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 27, 4, 1791-1799.
- [14] Zaharov, A.V. (2001). Obnaruzhenie defektov silovyh maslonapolnennyh transformatorov kak procedura proverki statisticheskikh gipotez [Detection of defects in oil-filled power transformers as a procedure for testing statistical hypotheses].*Novoye v rossijskoi energetike*, 2, 19-28 (in Russian).
- [15] Felea, I., Secui, D., Oltean, M. (2011). The impact analyze of electric stress level in content of insulating oil gases in power transformers. *Journal of sustainable energy*. 2, 4, 7-12.
- [16] Levin, M.N. (2013). Statisticheskij metod raspoznavanija defektov v silovyh transformatorah pri ih tehničeskom obsluzhivanii po sostojaniju [Statistical method of defect recognition in power transformers for their maintenance according to their state]. *Promyshlennaja jenergetika*, 8, 37-41. (in Russian).
- [17] Shutenko, O.V. (2017). Opredelenie znachenij granichnyh koncentracij rastvorenyh v masle gazov

- metodom minimal'nogo riska [Determination of the values of the boundary concentrations of gases dissolved in oil by the minimum risk method]. *Jelektrichestvo*, 8, 50–60 (in Russian) doi: <http://10.24160/0013-5380-2017-8-50-60>
- [18] Shutenko, Oleg. (2017). Determine the boundary value of the concentration of gases dissolved in oil of method minimum risk. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2017, 468–472. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100533.
- [19] Shutenko, O.V., Baklaj, D.N. (2013). Osobennosti statisticheskoy obrabotki rezul'tatov jekspluatatsionnyh ispytanij pri issledovanii zakonov raspredelenija rezul'tatov hromatograficheskogo analiza rastvorennyh v masle gazov [Features of statistical processing of the results of operational tests in the study of the laws of the distribution of the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug*, 60 (1033), 136–150. (in Russian).
- [20] Shutenko, O.V., Baklaj D.N. (2013). Planirovaniye eksperimental'nykh issledovaniy v jelektrojenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh. Kharkiv: NTU "KhPI", 268.
- [21] Lin, M.-J. (2015). Gaussian distribution Diagnoses in Transformer's Insulating Oil. *Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference (JIMET 2015)*. Chongqing, 2015, 824–830. doi: <http://doi.org/10.2991/jimet-15.2015.154>.
- [22] Piotrowski, T. (2014). Probability distributions of gases dissolved in oil of failed power transformers. *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), International Conference on. – IEEE*, 2014, 1–4. DOI 10.1109/ICHVE.2014.7035482.
- [23] Birger, I.A. (1978). *Tehnicheskaja diagnostika*. M. Mashinostroenie, 240.
- [24] Chernorutskii, I.G. (2005). *Metody prinyatiya reshenii*. St. Petersburg, Publ. «BKhV-Peterburg», 416.
- [25] Alekseev, B.A. (2002). Kontrol' sostojanija (diagnostika) krupnyh silovyh transformatorov. M. NC JeNAS, 216.
- [26] Saranya, S., Mageswari, U., Roy, N., Sudha, R. (2013) Comparative study of various dissolved gas analysis methods to diagnose transformer faults. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3, 3, 592–595.
- [27] Gray I. A. R. (2013). A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <[http://www.satcs.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf](http://www.satcs.co.za/Transformer%20Oil%20Analysis.pdf)> (2/2013).
- [28] DiGiorgio, J.B. (2005). Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids. *DGA Expert System: A Leader in Quality, Value and Experience*, 1, 1–17.
- [29] Raisan, A., Yaacob, M.M., Alsaedi, M.A. (2015). Faults diagnosis and assessment of transformer insulation oil quality: intelligent methods based on dissolved gas analysis a-review. *International Journal of Engineering & Technology*, 4, 1, 54–60.
- [30] Poiss, G. (2016). Development of DGA indicator for estimating risk level of power transformers. *Electric Power Engineering (EPE), 2016 17th International Scientific Conference on*, 2016 IEEE, 1–4.