

УДК 621.314

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.140873

## **АНАЛИЗ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ВВОДОВ ГЕРМЕТИЧНОЙ И НЕГЕРМЕТИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

**Шутенко О. В., Загайнова А. А., Сердюкова Г. Н.**

*Объектом исследования являются законы распределения показателей изоляции конденсаторного типа, которые получены в ходе профилактических испытаний, как для исправных, так и дефектных высоковольтных вводов напряжением 110 кВ герметичной и негерметичной конструкции. Одним из наибольших проблемных мест является недостаточная изученность и отсутствие обоснования законов распределения данных профилактических испытаний изоляции вводов.*

*В ходе исследования использовался комплексный подход к решению поставленных задач, включая теорию вероятности и статистический анализ, анализ мирового опыта и логический подход. В перспективе предполагается распространение полученных результатов на вводы других типов, имеющих аналогичные проблемы при диагностике состояния.*

*Предложен метод статистической обработки результатов периодических испытаний высоковольтных вводов, который позволяет сформировать массивы с однородными значениями показателей в условиях ограниченности измерительной информации. Установлено, что для вводов герметичной и негерметичной конструкции показатели изоляции, как для исправного, так и дефектного состояния, могут быть описаны распределением Вейбулла. Установлено, что плотности распределения для исправного и дефектного состояния высоковольтных вводов пересекаются, а следовательно, невозможно выбрать предельно-допустимые значения параметров изоляции, которые бы не давали ошибочных решений. Предлагаются предельно-допустимые значения показателей изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов определять с использованием методов статистических решений и с учетом наиболее значимых эксплуатационных факторов. Показано, что для высоковольтных вводов одной и той же конструкции имеет место смещение математических ожиданий, которое обусловлено различием длительности эксплуатации и разными коэффициентами загрузки трансформаторов. Данное обстоятельство необходимо учитывать при корректировке предельно-допустимых значений показателей изоляции высоковольтных вводов.*

*Использование разработанных алгоритмов и процедур математической статистики в задачах диагностирования высоковольтных вводов способствуют улучшению экспертных оценок и принятия решений.*

**Ключевые слова:** высоковольтные вводы, показатели изоляции, статистические критерии, дисперсионный анализ, критерии согласия, распределение Вейбулла.

## 1. Введение

Высоковольтные вводы, наравне с обмотками и устройствами РПН (регулирование под нагрузкой), являются одними из наиболее повреждаемых узлов высоковольтных силовых трансформаторов [1–3], и от надежности их функционирования во многом зависит бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией. Повреждения маслonaполненных вводов 110–500 кВ с бумажно-масляной изоляцией были причиной многих аварий, как силовых трансформаторов, так и масляных выключателей [4, 5]. Если повреждение ввода, установленного, например, на трансформаторе, сопровождается взрывом и пожаром, то материальный ущерб весьма значителен из-за необходимости ремонта трансформатора на заводе-изготовителе. В настоящее время в энергосистемах Украины находятся в эксплуатации маслonaполненные вводы, как негерметичного исполнения, так и вводы герметичной конструкции. Кроме того, в последнее время происходит активная замена маслonaполненных вводов с бумажно-масляной изоляцией на вводы с RIP (*resin impregnated paper* – бумага пропитанная смолой) изоляцией [6]. Однако, несмотря на изменение конструкции, вводы продолжают оставаться одним из наиболее повреждаемых узлов трансформаторов. При этом достаточно интересным является изменение характера повреждений для вводов с разной конструкцией.

Для вводов негерметичной конструкции [5, 7] наиболее характерными повреждениями являются:

- увлажнение масла и твердой изоляции, приводящие к тепловому пробою и перекрытию по поверхности остова и крышки;
- ненадежная конструкция узлов уплотнения, приводящая к течи масла, его увлажнению и окислению.

Кроме того, в негерметичных вводах имеет место нарушения контактных соединений, приводящие к искрению и пробою, а также механическое повреждение ввода при изменении температуры из-за недостаточного объема маслорасширителя.

Для вводов герметичной конструкции, в силу ограниченности доступа кислорода воздуха и влаги, окислительные процессы не так интенсивны. Основной причиной повреждаемости таких вводов [7, 8] является перекрытие по внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки, которое происходит из-за отложения на поверхности фарфора желто-бурого осадка, выпадающего из масла в виде мелкодисперсной смеси. Еще одной причиной повреждаемости герметичных вводов [7] являются частичные разряды в масле и на поверхности остова и крышки, приводящие к перекрытию внутренней изоляции. А также загрязнение масла частицами алюминия, образующимися в баке давления при вибрации. Кроме того, в герметичных вводах имеет место нарушение электрической связи между токоведущей трубой и трубой изоляционного остова при вибрации трансформатора,

приводящее к возникновению электрического разряда, разложению масла и образованию газов. Также для герметичных вводов характерны повреждения в результате повышения внутри него гидростатического давления, вызванного потерей герметичности сильфонов или нарушением сообщения бака давления с вводом и снижением давления во вводе из-за потери герметичности. Кроме того, как для герметичных, так и для негерметичных вводов, залитых маслом с высоким содержанием парафиновых фракций, имеет место отложения X-воска (воскообразные продукты, образующиеся на поверхности или между листами изоляционной бумаги). Например, масло марки ГК (сорт масла, который вырабатывают из сернистых парафинистых нефтей с использованием процесса гидрокрекинга). Это может привести к тепловому пробую остова [9, 10].

Несмотря на относительно низкую наработку (массовое производство вводов с RIP изоляцией началось в 2003–2004 гг.), вводы с твердой изоляцией также имеют достаточно высокий уровень повреждаемости. В [11] отмечается, что в период с 2010 по 2011 гг. статистика повреждаемости этих вводов, достигла угрожающих масштабов, и ряд вводов 330 и 500 кВ были запрещены к установке. Основными причинами повреждения вводов с RIP изоляцией [7, 11, 12] являются расслоение остова, развитие частичных разрядов и повреждение фарфоровой крышки из-за недопустимых механических воздействий.

Приведенный анализ наглядно иллюстрирует, что изменение конструкции вводов не всегда приводит к повышению их эксплуатационной надежности. В связи с этим, усовершенствование методов контроля и диагностики состояния изоляции высоковольтных вводов, является актуальной и практически значимой задачей. Решение этой задачи позволит значительно повысить эксплуатационную надежность, как самих вводов, так и высоковольтного оборудования, на котором они установлены.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объект исследования* – законы распределения показателей изоляции конденсаторного типа, которые получены в ходе профилактических испытаний, как для исправных, так и дефектных высоковольтных вводов напряжением 110 кВ герметичной и негерметичной конструкции. В качестве показателей, характеризующих состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов, анализировались значения:

- тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg } \delta_1$ );
- емкости основной изоляции ( $C_1$ );
- тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора ( $\text{tg } \delta_2$ );
- емкости измерительного конденсатора ( $C_2$ );
- сопротивление изоляции вывода для измерения ( $R$ ).

Несмотря на то, что подобного рода испытания проводятся регулярно, как минимум 1 раз в три года, и к настоящему моменту накоплен достаточный объем статистического материала, законы распределения данных показателей не исследованы. Это обстоятельство не позволяет использовать более совершенные методы принятия решения при диагностике состояния вводов.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Целью работы* является анализ законов распределения показателей изоляции для исправных и дефектных высоковольтных вводов герметичного и негерметичного исполнения.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать алгоритм статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний высоковольтных вводов и выполнить оценку статистической однородности результатов периодических испытаний.
2. Выполнить проверку статистической гипотезы о схожести теоретических и эмпирических законов распределения, для значений показателей состояния изоляции исправных и дефектных высоковольтных вводов.
3. Проанализировать значения коэффициентов масштаба и формы для распределений показателей в исправных и дефектных высоковольтных вводах.
4. Выполнить анализ совместного расположения теоретических плотностей распределения показателей изоляции вводов с различным состоянием.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

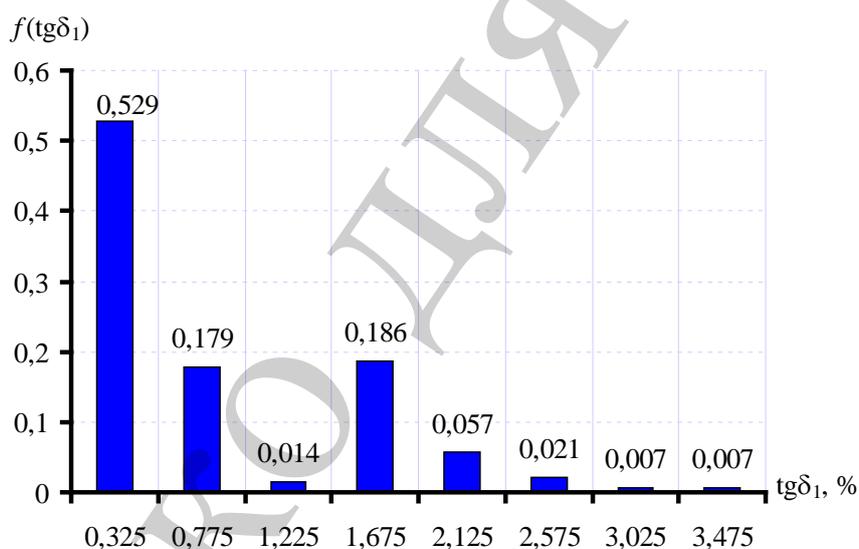
Одним из направлений усовершенствования методов и процедур принятия решений при диагностике состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования является использование статистических методов распознавания. Как показывает анализ литературных источников, использование методов статистических решений позволяет решать достаточно широкий спектр задач. Так, в работах [13, 14] приведены результаты корректировки предельно допустимых значений концентраций газов на основе анализа интегральных функций распределения. В [15] аналогичная задача решена методом Неймана-Пирсона, а в [16, 17] методом минимального риска. В [18] предложен метод диагностики маслонаполненного оборудования, основанный на байесовском правиле построения границ для раздела классов состояний, а в [19] приведен метод обнаружения развивающихся неисправностей на основе анализа распределения Гаусса. В [20] 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 работе [21] приведен анализ рисков, которые сопровождают диагностику состояния маслонаполненного оборудования.

Однако практическое использование статистических методов диагностики возможно, если известны законы распределения диагностических показателей, как для исправного, так и для дефектного состояний оборудования. В открытых литературных источниках описаны только законы распределений концентраций газов, как для высоковольтных вводов, так и для силовых трансформаторов [15, 22]. А также законы распределения показателей трансформаторного масла [23]. В то же время законы распределения показателей основной изоляции высоковольтных вводов, не исследовались.

## 5. Методы исследований

Для исследования законов распределения показателей изоляции, авторами были использованы результаты периодического контроля для 87 исправных высоковольтных маслонаполненных вводов напряжением 110 кВ герметичной и негерметичной конструкции из трех областей Украины (Харьковская, Полтавская, Сумская). Общий объем проанализированной выборки составил 593 значения. Для исследования законов распределения  $\operatorname{tg}\delta_l$  для дефектного состояния вводов были использованы результаты профилактических испытаний по 60 высоковольтным вводам герметичной конструкции, в которых выявлены дефекты различного типа.

Данные, полученные в результате эксплуатационного контроля, являются статистически неоднородными, поскольку, анализируемые вводы введены в эксплуатацию в разное время, эксплуатируются в разных условиях, имеют различия в сортах заливаемого масла и различные значения коэффициента загрузки. Все это приводит к тому, что значения изоляционных параметров в различных вводах могут существенно различаться. Наличие неоднородности в массивах исходных данных не позволяет получить корректные функции плотности законов распределения (рис. 1).



**Рис. 1.** Гистограмма эмпирического распределения значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции для исправных высоковольтных вводов негерметичного исполнения

В связи с этим возникает объективная необходимость в проведении процедуры предварительной статистической обработки исходных данных. В настоящее время в открытых литературных источниках приводятся два основных подхода к обработке результатов периодических испытаний показателей изоляции для маслонаполненного оборудования. Первый подход [13, 14] основан на использовании математического аппарата факторного анализа, при этом сначала с помощью моделей однофакторного дисперсионного анализа выявляются наиболее значимые факторы и с их учетом

формируются массивы однородных данных. Далее выполняется процедура «ленового сглаживания» для снижения статистической неоднородности.

Второй подход [22, 24] основан на проверке статистических гипотез для отдельных групп оборудования, при этом однородные массивы данных формируются на основании результатов статистического тестирования. Следует отметить, что использование первого подхода целесообразно, если известна полная информация не только о номинальных значениях характеристик оборудования, но и информация о режимах работы данного оборудования, особенностях его конструктивного исполнения. Вторым подходом позволяет сформировать однородные массивы данных в условиях ограниченной или неполной априорной информации. Учитывая, неполноту информации о режимах работы исследуемых вводов, которая имеется в распоряжении авторов, для формирования однородных массивов данных был использован второй подход.

Формирование массивов с однородными результатами периодических испытаний выполнялось с использованием трех статистических критериев [25], которые приведены в (табл. 1):

- ранговый непараметрический критерий Уилкоксона ( $W$ ) – для проверки статистической гипотезы о схожести законов распределения двух независимых выборок;
- критерий  $Z$  – для проверки статистической гипотезы о равенстве математических ожиданий двух независимых выборок;
- критерий Фишера-Снедекора ( $F$ ) для проверки статистической гипотезы о равенстве дисперсий двух независимых выборок.

Две независимые выборки считались однородными, если по результатам тестирования статистические гипотезы:

- о схожести законов распределения двух независимых выборок ( $S_1 > S_{n_1, n_2, 0,025}$ ,  $S_2 < S_{n_1, n_2, 0,975}$ );
- о равенстве математических ожиданий двух независимых выборок ( $Z_{\text{набл}} < Z_{\text{крит}, 0,95}$ );
- о равенстве дисперсий двух независимых выборок ( $F_{\text{набл}} < F_{(n_1-1), (n_2-1), 0,95}$ ) – не отвергались при заданном уровне значимости  $\alpha=0,05$ .

Таблица 1

Статистические критерии, используемые для формирования массивов  
однородных данных

Критерий	Статистическая модель	Основная гипотеза	Критериальная статистика	Статистика сравнения
$W$	$X_1=(x_n^1 \dots x_{n_1}^1) \sim f(x_1);$ $X_2=(x_n^2 \dots x_{n_2}^2) \sim f(x_2);$ $n=n_1+n_2$	$f(x_1)=f(x_2)$	$S_1$ – сумма рангов множества $\{x_1^1\}$ $S_2$ – сумма рангов множества $\{x_1^2\}$	$S_{n_1, n_2, 0,025}$ $S_{n_1, n_2, 0,975}$
$Z$	Выборка 1: – объём $n$ ; – выборочное среднее $m_1$ ; – выборочная дисперсия $\delta_1^2$ Выборка 2: – объём $m$ ; – выборочное среднее $m_2$ ; – выборочная дисперсия $\delta_2^2$	$m_1=m_2$	$Z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{D(x_1)}{n} + \frac{D(x_2)}{m}}}$	$Z_{\text{крит}}$
$F$	Выборка 1: – объём $n$ ; – выборочная дисперсия $\delta_1^2$ Выборка 2: – объём $m$ ; – выборочная дисперсия $\delta_2^2$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$F = \delta_{\max}^2 / \delta_{\min}^2$	$F_{(n-1), (m-1), 0,95}$

Объединение результатов периодического контроля полученных для разных вводов в один массив данных выполнялся только при условии равенства объема выборочных значений для данных вводов или если расхождения в объеме выборки не превышало одного значения. Приведенный алгоритм статистической обработки результатов испытаний, был реализован в виде авторской программы «ODNORODN» [26], которая позволяет обрабатывать значительные объемы исходных данных.

Объем выборочных значений  $N$ , значения выборочного среднего  $M_x$ , выборочной дисперсии  $D_x$ . А также коэффициентов асимметрии и эксцесса  $j_a$  и  $j_e$  для массивов исходных данных ( $M_0$ ), и массивов, полученных в ходе статистической обработки ( $M_1, M_2, M_3$ ) приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значения выборочных средних для массивов, полученных в результате процедуры статистической обработки, существенно различаются. Также легко увидеть, что в результате статистической обработки имеет место существенное снижение значений выборочной дисперсии для  $\text{tg} \delta_1$  и  $\text{tg} \delta_2$ , полученных массивов данных по сравнению с исходными массивами.

Таблица 2

Статистические характеристики массивов показателей высоковольтных вводов

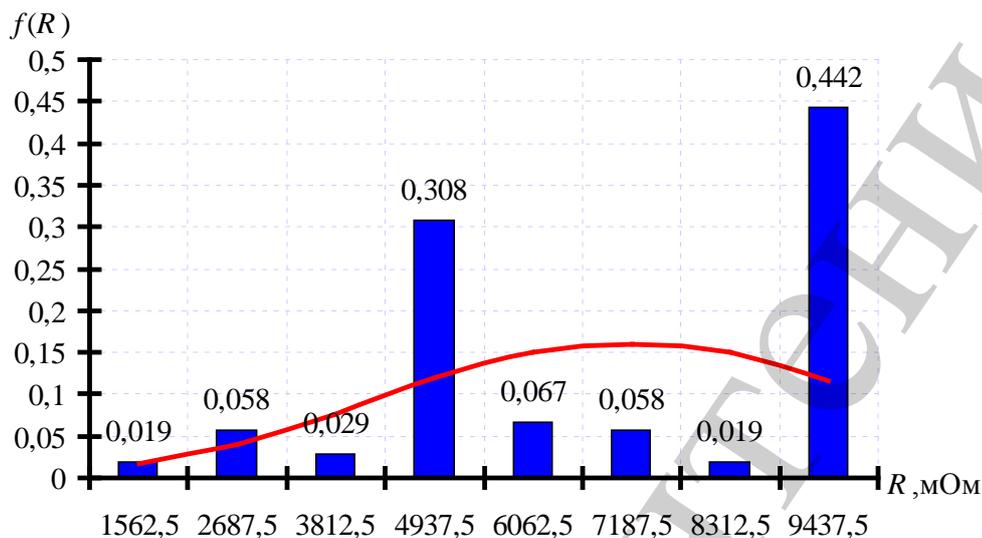
Показатель	Массив	$N$	$M_x$	$D_x$	$j_a$	$j_e$
Ввода негерметичной конструкции						
$\text{tg } \delta_1$	$M_0$	140	0,861	0,534	1,327	4,099
	$M_1$	67	0,499	0,0471	0,939	3,551
	$M_2$	73	0,372	0,0168	0,181	2,375
$\text{tg } \delta_2$	$M_0$	140	0,870	0,318	0,791	2,589
	$M_1$	75	0,619	0,109	0,858	3,678
	$M_2$	65	0,946	0,233	0,571	3,173
$C_1$	$M_0$	140	382,276	48512,412	0,564	2,732
	$M_1$	91	414,570	64913,923	0,217	2,030
$C_2$	$M_0$	140	452,888	50967,463	0,219	2,352
	$M_1$	87	385,522	39879,529	0,353	2,794
Ввода герметичной конструкции						
$\text{tg } \delta_1$	$M_0$	453	0,577	0,104	2,296	10,599
	$M_1$	102	0,392	0,00684	0,764	4,840
	$M_2$	243	0,481	0,0180	0,195	3,547
	$M_3$	103	0,861	0,186	0,172	2,883
$\text{tg } \delta_2$	$M_0$	453	0,722	0,181	1,808	7,115
	$M_1$	159	0,429	0,0072	1,020	5,403
	$M_2$	98	0,500	0,00759	-0,727	4,287
	$M_3$	128	0,831	0,153	0,456	3,150
$C_1$	$M_0$	453	309,393	18264,817	0,976	4,021
	$M_1$	128	268,846	9369,472	1,022	5,795
	$M_2$	115	314,753	34278,386	0,828	2,997
	$M_3$	70	321,662	10654,203	1,180	5,418
$C_2$	$M_0$	453	388,889	28013,380	0,495	3,215
	$M_1$	118	312,299	34197,433	0,698	3,190
	$M_2$	140	340,767	33439,218	0,477	3,011
	$M_3$	104	514,483	28968,568	-0,442	2,806

В тоже время значения выборочных дисперсий для  $C_1$  и  $C_2$  не только не снизились, но и для некоторых массивов возросли.

Все без исключения массивы данных имеют положительное значение коэффициента эксцесса, что говорит о том, что кривая распределения имеет более высокую и «острую» вершину, чем кривая нормального закона. В тоже время коэффициент асимметрии распределений имеет как положительные, так и отрицательные значения. Положительное значение коэффициента асимметрии свидетельствует о том, что «длинная часть» кривой распределения расположена справа от математического ожидания, при отрицательном значении коэффициента асимметрии «длинная часть» кривой распределения расположена слева.

Следует отметить что, несмотря на то, что для значений сопротивления изоляции измерительного вывода, в герметичных вводах удалось выделить несколько массивов с однородными значениями, определить закон распределения данного показателя не удалось. Это обусловлено наличием в

результатах испытаний преобладающего количества измерений с максимальными значениями сопротивления (рис. 2).



**Рис. 2.** Характерная гистограмма эмпирического распределения значений сопротивления изоляции измерительного вывода для однородного массива данных, исправных высоковольтных вводов герметичного исполнения

В то же время, для значений сопротивления изоляции измерительного вывода в негерметичных вводах не удалось сформировать ни одного массива с однородными данными. В связи с этим далее данный показатель не анализировался.

## 6. Результаты исследований

### 6.1. Оценка статистической однородности результатов периодических испытаний

Для проверки однородности данных в полученных массивах была использована модель однофакторного дисперсионного анализа. В процессе анализа оценивалась величина рассеивания между значениями показателей изоляции отдельных вводов, которые составляют тот или иной массив данных.

Известно [27, 28], что сумма квадратов отклонений всех значений составляющих массив данных ( $y_{ij}$ ) от общего среднего ( $\bar{y}$ ) составляет:

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 = n \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (1)$$

или  $S = S_1 + S_2$ ,

где  $n$  – объем выборочных значений;

$m$  – число уровней варьирования исследуемого фактора (количество вводов в массиве данных);

$S_1 = n \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2$  – сумма квадратов отклонений между средними

значениями исследуемого показателя в разных вводах, рассеивание по факторам;

$S_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$  – сумма квадратов отклонений значений показателя от

среднего для одного и того же ввода – остаточное рассеивание случайных погрешностей эксперимента;

$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2$  – общая или полная сумма квадратов отклонений

отдельных наблюдений от общего среднего  $\bar{y}$ .

Оценка значимости фактора сводится к сравнению дисперсии  $\sigma^2$ , полученной за счет  $S_1$ , с той же дисперсией, но полученной за счет  $S_2$ , что легко проверить по отношению:

$$F = \frac{S_1 \cdot (m-1)^{-1}}{S_2 \cdot (m \cdot (n-1))^{-1}} \sim F_{(m-1); m(n-1)}. \quad (2)$$

Статистика  $F$  является случайной величиной, имеющей  $F$ -распределение с  $(m-1)$  и  $m(n-1)$  степенями свободы.

Если при заданном  $\alpha$  (обычно  $\alpha=0,05$ )  $F > F_\alpha$  (преобладает числитель), то фактор значим. Это свидетельствует о неоднородности значений показателя в анализируемом массиве данных.

Вышеприведенные вычисления выполнялись в случае, если объем выборочных значений для всех вводов, составляющих анализируемый массив данных, являлся одинаковым.

Если же число измерений в разных вводах отличалось на единицу, а именно, имеет место  $k_1$  значений для ввода  $m_1$ ,  $k_2$  значений – для ввода  $m_2$ ,  $k_p$  значений – для ввода  $m_p$ , то в этом случае общая сумма квадратов отклонений определялась по формуле [25]:

$$S = [P_1 + P_2 + \dots + P_p] - \left[ \frac{(R_1 + R_2 + \dots + R_p)^2}{n} \right], \quad (3)$$

где  $P_i = \sum_{j=1}^{k_i} y_{ji}^2$  – сумма квадратов значений показателя  $y$  для ввода  $m_i$ ;

$R_i = \sum_{j=1}^{k_i} y_{ji}$  – сумма значений показателя  $y$  для ввода  $m_i$ ;

$n$  – общее число испытаний (объем выборки).

Факторная сумма квадратов отклонений определялась по формуле:

$$S = \left[ \frac{P_1}{n_1} + \frac{P_2}{n_2} + \dots + \frac{P_p}{n_p} \right] - \left[ \frac{(R_1 + R_2 + \dots + R_p)^2}{n} \right], \quad (4)$$

где  $n_i$  – объем выборочных значений признака  $y$  для ввода  $m_i$ .

Остальные вычисления производились, как и в случае одинакового числа испытаний. Выполнение однофакторного дисперсионного анализа осуществлялось с использованием авторской программы «ODA» [26]. Результаты расчета приведены в табл. 3.

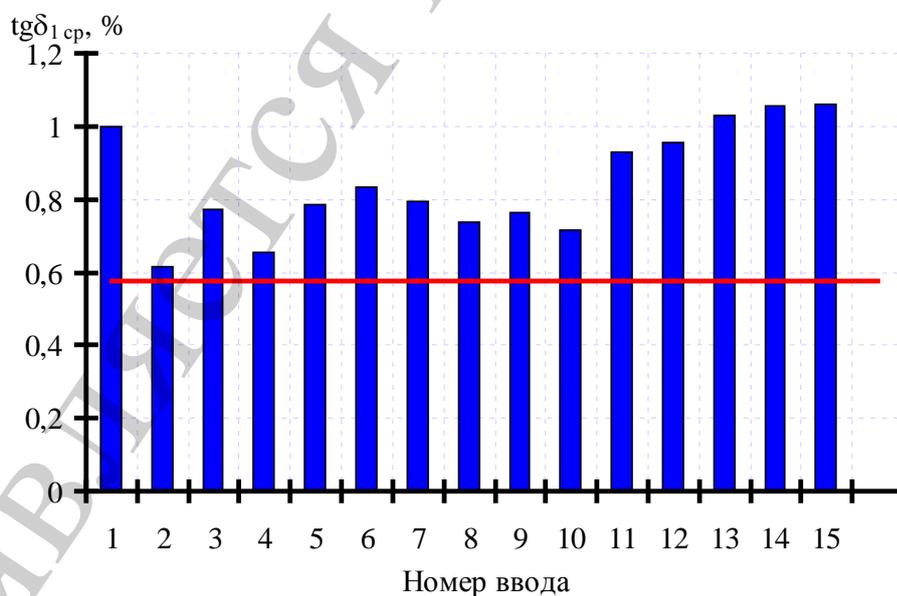
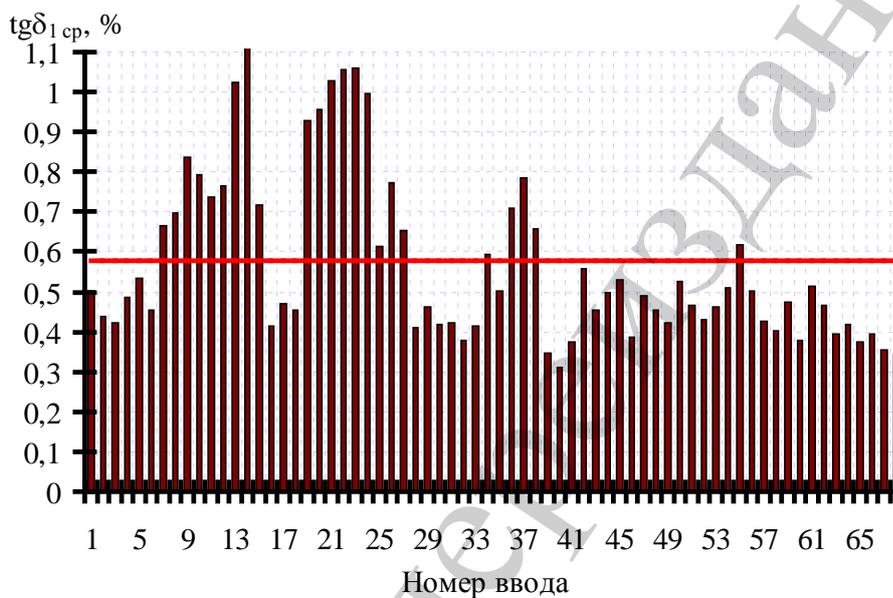
На рис. 3 показаны распределения групповых средних значений относительно общего среднего тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов герметичного исполнения из массива исходных данных ( $M_0$ ) и массива  $M_3$ , полученного в результате статистической обработки.

**Таблица 3**

Результаты оценки статистической однородности для массивов исходных данных и массивов, полученных в результате статистической обработки

Показатель	Массив	$n$	$m$	Значения сумм дисперсионного разложения			Значение $F$ -критерия	
				$S$	$S_1$	$S_2$	$F_{\text{набл}}$	$F_{\text{крит.}}$
Ввода негерметичной конструкции								
$\text{tg } \delta_1$	$M_0$	140	19	74,8850	58,2168	16,6682	23,47	1,608
	$M_1$	67	9	3,1608	0,6050	2,5557	1,716	2,105
	$M_2$	73	10	1,2323	0,1914	1,0409	1,287	2,036
$\text{tg } \delta_2$	$M_0$	140	19	44,5408	27,2961	17,2446	10,64	1,608
	$M_1$	75	9	8,2149	1,4275	6,7874	1,735	2,088
	$M_2$	65	7	15,1511	2,4458	12,7053	1,860	2,262
$C_1$	$M_0$	140	19	6791737,7	1059577,57	5732160,1	1,242	1,608
	$M_1$	91	13	5907167,0	791003,03	5116164,0	1,004	1,892
$C_2$	$M_0$	140	19	7135444,9	3961189,48	3174255,4	8,388	1,608
	$M_1$	87	12	3469519,0	446578,325	3022940,7	1,007	1,953
Ввода герметичной конструкции								
$\text{tg } \delta_1$	$M_0$	453	68	47,5053	21,6049	25,9004	4,793	1,306
	$M_1$	102	19	0,6986	0,1444	0,5542	1,201	1,749
	$M_2$	241	34	4,3848	0,4376	3,9472	0,702	1,439
	$M_3$	103	15	19,1592	2,1754	16,9838	0,805	1,823
$\text{tg } \delta_2$	$M_0$	453	68	82,4260	35,6870	46,7390	4,387	1,306
	$M_1$	159	24	1,1452	0,1515	0,9938	0,894	1,530
	$M_2$	98	16	0,7444	0,1688	0,5756	1,603	1,804
	$M_3$	128	19	19,6596	2,9851	16,6745	1,084	1,711
$C_1$	$M_0$	453	68	8273962,3	4350940,64	3923021,66	6,373	1,306
	$M_1$	128	21	1199292,4	126620,376	1072672,04	0,631	1,678
	$M_2$	115	18	3942014,4	593762,101	3348252,34	1,011	1,747
	$M_3$	70	12	745794,22	168485,723	577308,499	1,538	1,963
$C_2$	$M_0$	453	68	12690061,	8744069,82	3945991,4	12,73	1,306
	$M_1$	118	17	4035297,1	777868,802	3257428,38	1,507	1,759
	$M_2$	140	24	4681490,6	1112448,35	3569042,27	1,572	1,627
	$M_3$	104	17	3012731,1	602464,221	2410266,94	1,359	1,779

Как видно из табл. 3, практически во всех массивах исходных данных, за исключением емкости основной изоляции для негерметичных вводов, наблюдаемые значения  $F$ -критерия превышают табличные, при уровне значимости  $p=0,95$  и числе степеней свободы  $(m-1)$  и  $m \cdot (n-1)$ . Это свидетельствует о том, что значения параметров в разных вводах существенно отличаются друг от друга, а, следовательно, исходные данные являются неоднородными.



**Рис. 3.** Распределения групповых средних значений относительно общего среднего тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов герметичного исполнения: *а* – из массива исходных данных  $M_0$ ; *б* – из массива  $M_3$ , полученного в результате статистической обработки

Несмотря на то, что в исходном массиве показателя  $C_1$  для вводов негерметичного исполнения, согласно результатам дисперсионного анализа, данные являются однородными, с помощью процедуры статистической обработки из него также удалось выделить один массив данных. Подобное несоответствие объясняется тем, что однофакторный дисперсионный анализ выполняет оценку рассеивания по средним значениям, а формирования массивов однородных данных выполнялось как по равенству средних, так и по равенству дисперсий и схожести законов распределения. Данное обстоятельство еще раз подчеркивает эффективность используемой процедуры формирования массивов однородных данных, в условиях априорной ограниченности измерительной информации. Из табл. 3 также видно, что для всех без исключения массивов, полученных в результате статистической обработки, наблюдаемые значения  $F$ -критерия не превышают табличные, при уровне значимости  $p=0,95$  и числе степеней свободы  $(m-1)$  и  $m(n-1)$ . Это свидетельствует об отсутствии отличий между средними значениями показателей из разных вводов, составляющих анализируемые массивы данных.

Выполненный анализ состава массивов с однородными значениями показателей позволил установить, что в однородные массивы данных попали значения показателей вводов из разных областей Украины, разного типа и изготовленные по различным номерам заводских чертежей. Но при этом ввода, значение показателей, которых составляют однородные массивы данных, имеют близкую наработку, и установлены на трансформаторах с близким значением коэффициентов загрузки. Данное обстоятельство показывает необходимость учета данных факторов при диагностике состояния высоковольтных маслонаполненных вводов.

## **6.2. Исследование законов распределения показателей изоляции исправных высоковольтных вводов**

Построение гистограмм эмпирического распределения, оценка параметров 18 известных законов распределения, расчет значений критериев согласия ( $\chi^2$  Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова) выполнялись с помощью, разработанной авторской программы «ZR» [26].

По результатам анализа выполненного с помощью программы «ZR» удалось установить, что распределение показателей изоляции исправных высоковольтных маслонаполненных вводов, как негерметичной, так и герметичной конструкции может быть описано законом распределения Вейбулла, с плотностью:

$$p(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (5)$$

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

Значения параметров масштаба и формы для закона распределения Вейбулла определялись по выражениям:

$$\beta = \frac{N-1}{N} \cdot \left( 0,465 \cdot \frac{\sqrt{D}}{M} + 1,282 \cdot \frac{M}{\sqrt{D}} - 0,7 \right), \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{M}{1 - 0,427 \cdot (\beta - 1) \cdot \beta^{-1,9}}, \quad (7)$$

где  $N$  – объем выборочных значений;  $M$  – значения выборочного среднего;  $D$  – значение выборочной дисперсии.

Значения параметров распределения  $\alpha$  и  $\beta$ , критериев согласия  $\chi^2$  и критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 4.

**Таблица 4**

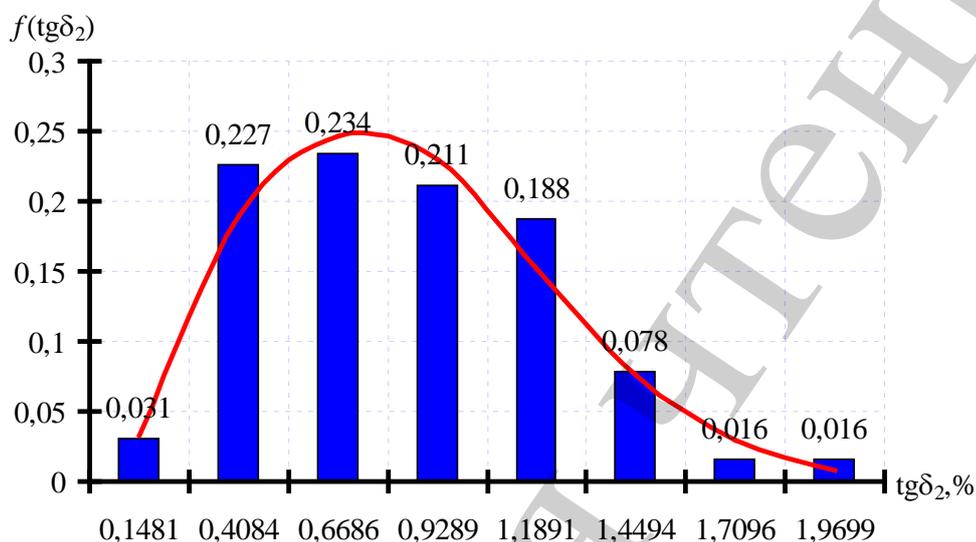
Значения параметров закона распределения Вейбулла, а также расчетные и критические значения (при  $\alpha=0,05$ ) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для однородных массивов показателей исправных вводов

Показатель	Массив	Параметры закона распределения		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
		$\alpha$	$\beta$	$f$	$\chi^2_{\text{расч.}}$	$\chi^2_{\text{крит.}}$	$\lambda_{\text{расч.}}$	$\lambda_{\text{крит.}}$
Ввода негерметичной конструкции								
$\text{tg } \delta_1$	$M_1$	0,563209	2,413753	2	0,488	5,990	0,213	1,360
	$M_2$	0,415860	3,093468	3	0,939	7,820	0,174	1,360
$\text{tg } \delta_2$	$M_1$	0,699454	1,923409	2	1,421	5,990	0,451	1,360
	$M_2$	1,069031	2,019215	2	1,012	5,990	0,361	1,360
$C_1$	$M_1$	464,4127	1,653419	3	2,677	7,820	0,406	1,360
$C_2$	$M_1$	435,3072	1,992624	3	1,350	7,820	0,268	1,360
Ввода герметичной конструкции								
$\text{tg } \delta_1$	$M_1$	0,424122	5,414246	2	2,933	5,990	0,588	1,360
	$M_2$	0,530256	4,008926	4	4,396	9,490	0,604	1,360
	$M_3$	0,973090	2,073233	4	1,351	9,490	0,277	1,360
$\text{tg } \delta_2$	$M_1$	0,462615	5,837836	2	4,878	5,990	0,692	1,360
	$M_2$	0,535515	6,670923	2	2,539	5,990	0,644	1,360
	$M_3$	0,939447	2,222901	4	4,949	9,490	0,445	1,360
$C_1$	$M_1$	350,8528	1,725618	4	3,848	9,490	0,503	1,360
	$M_2$	353,7525	1,737734	5	3,933	11,100	0,450	1,360
	$M_3$	357,5067	3,395118	2	3,546	5,990	0,603	1,360
$C_2$	$M_1$	324,9421	1,708024	2	4,693	5,990	0,774	1,360
	$M_2$	384,5258	1,924692	3	5,862	7,820	0,860	1,360
	$M_3$	572,7063	3,297039	4	3,002	9,490	0,452	1,360

Как видно из табл. 4, для всех массивов данных и расчетные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова не превышают критических точек. На основании этого можно сделать вывод о том, что нет

оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Вейбулла.

Гистограммы эмпирического распределения и функции плотности распределения Вейбулла для тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора в исправных герметичных вводах напряжением 110 кВ приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Гистограмма эмпирического распределения и функция плотности распределения закона Вейбулла тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора в исправных герметичных вводах напряжением 110 кВ для массива данных  $M_3$

### 6.3. Исследование законов распределения показателей изоляции дефектных высоковольтных вводов

Для формирования массивов данных показателей состояния дефектных высоковольтных вводов, из 60 вводов, в которых выявлены дефекты разного типа, были отобраны по три значения для каждого показателя. Первое значение соответствовало значению показателя непосредственно перед превышением им предельно допустимого, согласно [29], второе – первому значению показателя, превышающему предельно-допустимое, третье – последнему значению перед выводом ввода в ремонт.

Сформированные таким образом массивы содержат неоднородные значения показателей, а использование приведенной выше процедуры статистической обработки для полученных массивов – малоэффективна, поскольку каждый ввод представлен только тремя значениями. Для снижения неоднородности данных был использован подход, основанный на выделении грубых промахов из числа однотипных измерений.

Учитывая, что вид закона распределения неизвестен, то для выделения грубых промахов был использован критерий Ирвина [30]. Для этого для каждого отношения, по каждому вводу строился вариационный ряд, и

оценивались сомнительные значения на одном или обоих краях ряда. Для этого вычислялось расчетное значение критерия Ирвина:

$$I_{\text{рас}} = \frac{(x_k - x_{k \text{ пред}})}{S}, \quad (8)$$

где  $x_k$  – подозрительное значение;  $x_{k \text{ пред}}$  – предыдущее значение в вариационном ряду;  $S$  – выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО), рассчитываемое по исследуемой выборке с учётом сомнительного значения.

Полученное расчетное значение критерия Ирвина сравнивалось с табличным  $\eta_{\text{табл}}$ . Если  $\eta_{\text{расч.}} > \eta_{\text{табл.}}$ , то рассматриваемое значение отбрасывалось и проверялось следующее. Статистические характеристики массивов показателей для дефектных вводов приведены в табл. 5.

**Таблица 5**

Статистические характеристики однородных массивов показателей состояния изоляции для дефектных вводов

Показатель	$N$	$M_x$	$D_x$	$j_a$	$j_e$
$\text{tg} \delta_1$	100	2,858	0,650	-0,602	3,112
$\text{tg} \delta_2$	108	2,307	0,645	0,033	2,586
$C_1$	128	239,735	10818,669	0,522	2,457
$C_2$	106	567,954	20538,449	0,512	2,689

Как видно из табл. 5, использование критерия Ирвина практически вдвое снизило объемы выборочных значений. При этом статистические характеристики массивов показателей для дефектных вводов практически не отличаются от аналогичных показателей для исправных вводов, за исключением выборочных средних.

Выполненный анализ показал, что показатели изоляции для дефектных вводов также, как и для исправных, могут быть описаны распределением Вейбулла. Значения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  закона распределения Вейбулла, а также расчетные  $\chi^2_{\text{расч.}}$ ,  $\lambda_{\text{расч.}}$  и критические значения  $\chi^2_{\text{крит.}}$ ,  $\lambda_{\text{крит.}}$  (при  $\alpha=0,05$ ) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для анализируемых параметров приведены в табл. 6.

**Таблица 6**

Значения параметров закона распределения Вейбулла, а также расчетные и критические значения (при  $\alpha=0,05$ ) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для показателей состояния изоляции в дефектных вводах

Показатель	Параметры закона распределения		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
	$\alpha$	$\beta$	$f$	$\chi^2_{\text{расч.}}$	$\chi^2_{\text{крит.}}$	$\lambda_{\text{расч.}}$	$\lambda_{\text{крит.}}$
$\text{tg} \delta_1$	3,150824	3,933431	3	3,128	7,820	0,598	1,360
$\text{tg} \delta_2$	2,575944	3,113934	3	0,248	7,820	0,150	1,360
$C_1$	270,257889	2,437388	5	3,578	11,100	0,326	1,360
$C_2$	621,601752	4,455534	3	4,493	7,820	0,715	1,360

Как видно из табл. 6, для всех массивов данных расчетные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова не превышают критических значений. На основании этого можно сделать вывод о том, что нет оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Вейбулла.

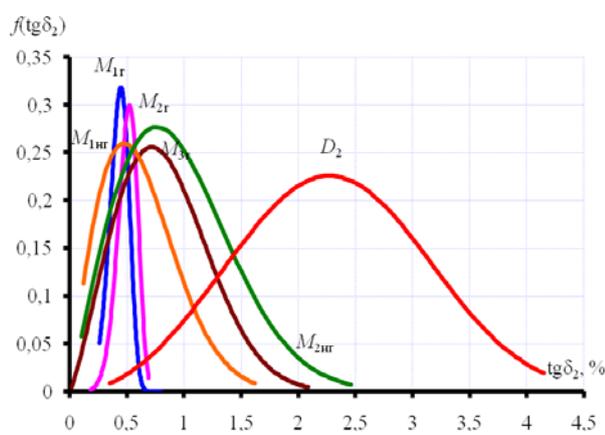
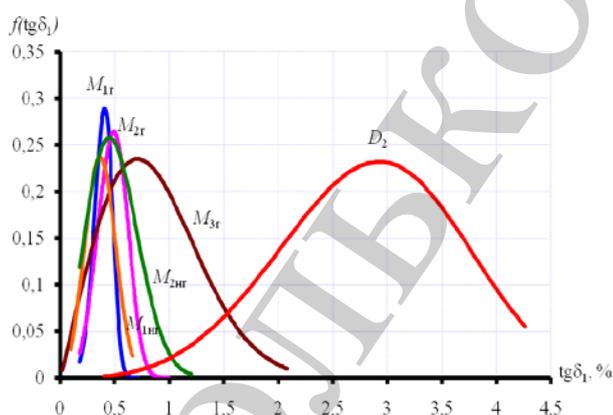
#### 6.4. Анализ полученных результатов

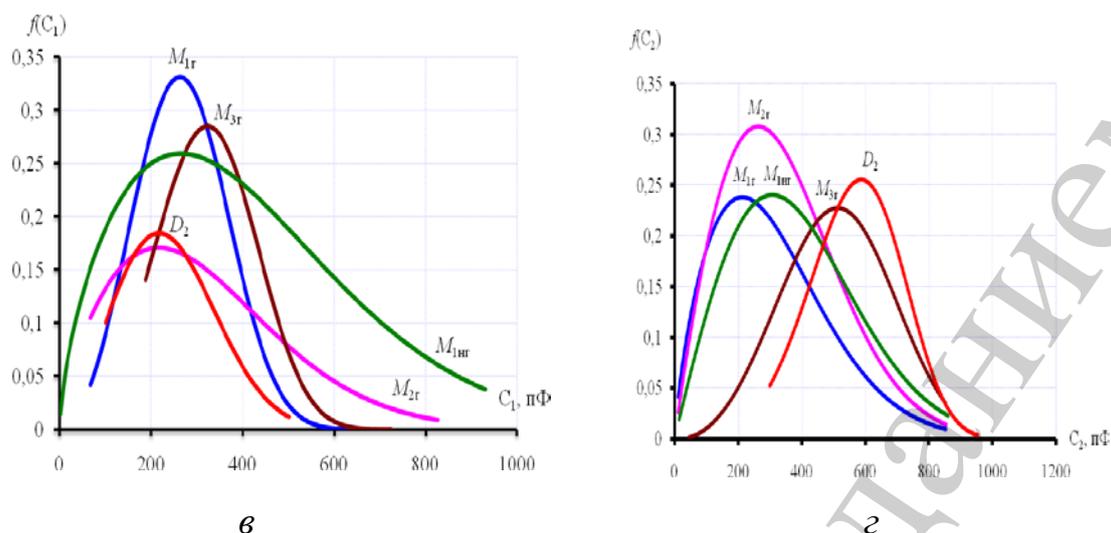
Анализируя взаимное расположение теоретических плотностей распределения параметров изоляции для исправных и дефектных вводов одного класса напряжения и одной конструкции, которые приведены на рис. 5, можно сделать ряд важных выводов:

1) значения математического ожидания для разных массивов одного и того же показателя смещены друг относительно друга. Это свидетельствует о разной степени старения изоляции высоковольтных вводов в условиях реальной эксплуатации, в связи с разной загрузкой трансформаторов, на которых установлены данные ввода, и разным сроком эксплуатации;

2) анализируя взаимное расположение плотностей распределения для исправных вводов герметичной и негерметичной конструкции, следует отметить, что данные распределения так же смещены друг относительно друга. Это свидетельствует о значимом влиянии типа защиты масла высоковольтных маслонаполненных вводов на значения показателей основной изоляции;

3) плотности распределения для исправного и дефектного состояния высоковольтных вводов пересекаются, а, следовательно, невозможно выбрать предельно допустимые значения параметров изоляции, которые бы не давали ошибочных решений.





**Рис. 5.** Плотности теоретических распределений параметров изоляции исправных герметичных ( $M_{1r}$ ,  $M_{2r}$ ,  $M_{3r}$ ), исправных негерметичных ( $M_{1nr}$ ,  $M_{2nr}$ ,  $M_{3nr}$ ), и дефектных ( $D_2$ ) вводов: *a* – для тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции; *б* – для тангенса угла диэлектрических потерь измерительного конденсатора; *в* – для емкости основной изоляции; *г* – для емкости измерительного конденсатора

Очевидно, что предельно-допустимые значения показателей изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов необходимо определять с использованием методов статистических решений и с учетом наиболее значимых эксплуатационных факторов. Известно, что условные стоимости вероятности ошибки первого рода (принимается решение о наличии дефекта в исправном вводе), будут намного ниже условной стоимости вероятности ошибки второго рода (принимается решение об исправном состоянии ввода с дефектом). Следовательно, для определения предельно-допустимых значений показателей, целесообразно использовать метод минимального риска.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Использование полученных в работе результатов, позволяет в первую очередь, повысить эксплуатационную надежность высоковольтных маслонаполненных вводов, за счет более точного и корректного определения предельно-допустимых значений показателей, с использованием полученных законов распределений. Повышение надежности вводов приведет к снижению затрат на ремонт и восстановление как самих вводов, так и оборудования, на котором они установлены, а также к снижению экономического ущерба энергетических компаний, вызванного недоотпуском электрической энергии. Несмотря на достаточное количество публикаций, посвященных проблеме усовершенствования методов контроля и диагностики состояния высоковольтных вводов, предлагаемый в работе подход, к настоящему времени не реализован и не описан ни в одном из открытых литературных источников.

*Weaknesses.* Увеличение трудовых и временных затрат персонала электроэнергетических компаний при диагностике состояния вводов, которые

вызваны необходимостью самостоятельно определять предельно-допустимые значения показателей.

*Opportunities.* Полученные результаты могут быть алгоритмически реализованы в виде отдельного модуля информационно-аналитической системы (ИАС) для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования.

*Threats.* Внедрение ИАС связано как с материальными затратами энергетических компаний, необходимых на приобретение, установку и адаптацию продукта, так и с затратами на обучение персонала.

## 8. Выводы

1. Предложен трехэтапный алгоритм статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний высоковольтных вводов. Формирование массивов с однородными значениями диагностических критериев выполняется при условии схождения законов распределений, равенства математические ожиданий и дисперсий отдельных выборок, полученных для разных вводов. Для проверки однородности данных в полученных массивах используется модель однофакторного дисперсионного анализа. Практическое использование этого алгоритма позволило существенно снизить неоднородность результатов периодических испытаний состояния изоляции высоковольтных вводов. Например, исходный массив  $M_0$  для тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg } \delta_1$ ) негерметичных вводов имеет значения  $F$ -критерия:  $F_{\text{набл}} = 23,47$ , а  $F_{\text{крит}} = 1,608$ . Для сформированных однородных массивов значения  $F$ -критерия:  $M_1$ , –  $F_{\text{набл}} = 1,716$ , а  $F_{\text{крит}} = 2,105$ , для  $M_2$  –  $F_{\text{набл}} = 1,287$ , а  $F_{\text{крит}} = 2,036$ .

2. Выполненный анализ законов распределения показателей изоляции, как в исправных, так и в дефектных вводах герметичного и негерметичного исполнения, позволил установить, что все исследуемые показатели: тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg } \delta_1$ ) и измерительного конденсатора ( $\text{tg } \delta_2$ ), емкость основной изоляции ( $C_1$ ) измерительного конденсатора ( $C_2$ ) могут быть описаны законом распределения Вейбулла.

3. По значениям коэффициентов масштаба и формы для распределений показателей изоляции в исправных и дефектных высоковольтных вводах выполнен анализ совместного расположения теоретических плотностей распределения показателей вводов с различным состоянием. Анализ показал, что значения математического ожидания для разных массивов одного и того же показателя смещены друг относительно друга. Это свидетельствует о необходимости учета загрузки трансформаторов и срока эксплуатации вводов при определении предельно-допустимых значений показателей.

4. Плотности распределения для исправного и дефектного состояния высоковольтных вводов пересекаются, а, следовательно, невозможно выбрать предельно-допустимые значения параметров изоляции, которые бы не давали ошибочных решений. Предельно-допустимые значения показателей изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов необходимо определять с

использованием методов статистических решений и с учетом наиболее значимых эксплуатационных факторов.

### Литература

1. Feilat E. A. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures // *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*. 2013. Vol. 7. P. 791–796.
2. Anghuber M., Velásquez J. L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method // *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*. 2017. P. 126–132.
3. Septyani H. I., Arifianto I., Purnomoadi A. P. High voltage transformer bushing problems // *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. 2011. doi: <http://doi.org/10.1109/iceei.2011.6021566>
4. Metwally I. Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers. *IEEE Potentials*. 2011. Vol. 30, Issue 3. P. 36–43. doi: <http://doi.org/10.1109/mpot.2011.940233>
5. Otsenka effektivnosti i tselesoobraznosti diagnostiki vysokovol'tnykh vvodov na osnove opyta ekspluatatsii / Kassikhin S. D. et. al. Ekaterinburg: Izdatel'skiy dom «Avtograf», 2010. 232 p.
6. Rubanenko O. Ye., Humeniuk O. I. Vysokovol'tni vvody. Konstruktsiia, ekspluatatsiia, diahnostyka i remont: monograph. Vinnytsia: VNTU, 2011. 183 p.
7. Sedunin A. M., Chalov I. A., Sidel'nikov L. G. Klassifikatsiya vysokovol'tnykh vvodov silovykh transformatorov i problemy ikh ekspluatatsii na predpriyatiyakh gornoy promyshlennosti // *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011. Issue 12. P. 24–30.
8. L'vov M. Yu. Kolloidno-dispersnye protsessy v vysokovol'tnykh germetichnykh vvodakh transformatorov // *Elektricheskie stantsii*. 2000. Vol. 4. P. 49–52.
9. Snetkova O. V. Opyt diagnostiki maslonapolnennykh vvodov 110–500 kV v OAO «Mosenergo» // *Elektro*. 2004. Issue 2. P. 39–42.
10. O vliyaniy masla marki GK na nadezhnost' elektrooborudovaniya / Komarov V. I. et. al. // *Materialy plenarnogo zasedaniya soвета «Vysokovol'tnye vvody, «Obshhie problemy diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya»*. 2008. URL: <http://www.myshared.ru/slide/58746/> (Last accessed: 15.09.2016)
11. Problemnoe oborudovanie i problemy diagnostirovaniya / Arbuzov R. S. et. al.; ed. by Tolchin V. M. // *Diagnostika elektricheskikh ustanovok: Materialy Sed'mogo izdaniya nauchno-prakticheskogo seminara Obshhestvennogo Soveta spetsialistov Sibiri i Vostoka po problemam diagnostiki elektricheskikh ustanovok*. Khabarovsk, 2012. P. 61–78.
12. Ovsyannikov A. G., Maryushko E. A. Problemy ekspluatatsii i diagnostirovaniya vvodov s RIP-izolyatsiy // *Energoekspert*. 2014. Issue 3. P. 22–26.
13. Davidenko I. V. Opredelenie dopustimyykh znacheniy kontroliruemykh parametrov maslonapolnennogo oborudovaniya na osnove massiva nablyudaemykh dannykh // *Elektrichestvo*. 2009. Issue 6. P. 10–21.
14. Davidenko I. V. Issledovanie pokazateley, opisyvayushhikh rabochee sostoyanie maslonapolnennykh vvodov, metodami matematicheskoy statistiki // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region: Tekhnicheskie nauki*. 2006. Issue 15. P. 31–33.

15. Zakharov A. V. Obnaruzhenie defektov silovykh maslonapolnennykh transformatorov kak protsedura proverki statisticheskikh gipotez // *Novoe v rossiyskoy energetike*. 2001. Issue 2. P. 19–28.
16. Shutenko O. V. Opredelenie znacheniy granichnykh kontsentratsiy rastvorenykh v masle gazov metodom minimal'nogo riska // *Elektrichestvo*. 2017. Issue 8. P. 50–60.
17. Shutenko O. Determine the boundary value of the concentration of gases dissolved in oil of method minimum risk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Kyiv, 2017. P. 468–472.
18. Levin M. N. Statisticheskii metod raspoznavaniya defektov v silovykh transformatorakh pri ikh tekhnicheskoy obsluzhivaniy po sostoyaniyu // *Promyshlennaya energetika*. 2013. Issue 8. P. 37–41.
19. Lin M.-J. Gaussian distribution Diagnoses in Transformer's Insulating Oil // Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference (JIMET 2015). Chongqing, 2015. P. 824–830. doi: <http://doi.org/10.2991/jimet-15.2015.154>
20. Mirowski P., LeCun Y. Statistical Machine Learning and Dissolved Gas Analysis: A Review // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012. Vol. 27, Issue 4. P. 1791–1799. doi: <http://doi.org/10.1109/tpwrd.2012.2197868>
21. 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, Issue 4. P. 7–12.
22. Shutenko O. V., Baklai D. N. Analiz zakoniv rozpodilu kontsentratsii haziv, rozchynenykh v masli vysokovoltnykh transformatoriv nehermetychnoho vykonannya // *Visnyk NTU «KhPI»*. 2014. Issue 24 (067). P. 102–117.
23. Shutenko O. V., Baklay D. N. Issledovanie zakonov raspredeleniya fiziko-khimicheskikh pokazateley transformatornykh masel // *Visnyk NTU «KHPI»*. 2012. Issue 23. P. 170–186.
24. Shutenko O. V., Baklay D. N. Osobennosti statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ekspluatatsionnykh ispytaniy pri issledovanii zakonov raspredeleniya rezul'tatov khromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov // *Visnyk NTU «KHPI»*. 2013. Issue 60 (1033). P. 136–150.
25. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1977. 479 p.
26. Shutenko O. V., Baklay D. N. *Planirovanie eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh: textbook*. Kharkiv: NTU «KHPI», 2013. 268 p.
27. Johnson N. L., Leone F. C. *Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences. Vol. 1 (Probability & Mathematical Statistics S.)*. John Wiley & Sons Inc, 1977. 618 p.
28. Scheffe H. *The Analysis of Variance*. Wiley-Interscience, 1999. 477 p.
29. Normy vyprobuvannya elektroobladnannya: SOU-N EE 20.302:2007: prykaz Minpalyvenerho 15.01.2007. No. 13. Kyiv: OEP «HRYFRE» : Ministerstvo palyva ta enerhetyky Ukrainy, 2007. 262 p.
30. Tret'yak L. N. *Obrabotka rezul'tatov nablyudeniy: textbook*. Orenburg: GOU OGU, 2004. 171 p.