

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Метою статті є аналіз впливу умов, режимів експлуатації і конструкції високовольтних вводів на значення тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів. Для аналізу використовується модель двохфакторного перехресного дисперсійного аналізу, яка дозволяє одночасно виконати оцінку впливу двох чинників і оцінити ефект їх взаємодії. У використовуваній моделі передбачається неадитивність ефектів зміни рівнів факторів, тобто різниця математичних очікувань між будь-якими двома рівнями одного фактора не однакова при будь-яких рівнях іншого. Перевірка гіпотези про значущість впливу факторів і їх взаємодій виконується за допомогою критерію Фішера. Результати. Даний метод був реалізований у вигляді авторської програми «двохфакторний дисперсійний аналіз». В якості вихідних даних були використані результати періодичного контролю стану високовольтних вводів напругою 110, 220 і 330 кВ з ізоляцією різного типу. Використовуючи модель двохфакторного перехресного дисперсійного аналізу, встановлено, що на інтенсивність старіння основної ізоляції вводів впливають як умови експлуатації, так і особливості конструктивного виконання вводів. Нові положення, в порівнянні з відомими рішеннями, полягають у тому, що гранично допустимі значення діагностичних ознак високовольтних вводів слід нормувати з урахуванням таких факторів, як номінальна напруга, тип захисту і тип ізоляції, завантаження вводів і склад споживачів. Отримані результати можуть бути алгоритмічно реалізовані у вигляді окремого модуля інформаційно-аналітичної системи (ІАС) для діагностики стану високовольтного маслонаповненого обладнання. Бібл. 24, табл. 7, рис. 14.

Ключові слова: високовольтний ввід, ізоляція, двохфакторний перехресний дисперсійний аналіз, показники ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат.

Целью статьи является анализ влияния условий, режимов эксплуатации и конструкции высоковольтных вводов на значения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции конденсаторного типа высоковольтных вводов. Для анализа используется модель двухфакторного перекрестного дисперсионного анализа, которая позволяет одновременно выполнять оценку влияния двух факторов и оценить эффект их взаимодействия. В используемой модели предполагается неаддитивность эффектов изменения уровней факторов, т.е. разность математических ожиданий между любыми двумя уровнями одного фактора не одинакова при любых уровнях другого. Проверка гипотезы о значимости влияния факторов и их взаимодействий выполняется с помощью критерия Фишера. Данный метод был реализован в виде авторской программы «двухфакторный дисперсионный анализ». В качестве исходных данных были использованы результаты периодического контроля состояния высоковольтных вводов напряжением 110, 220 и 330 кВ с изоляцией разного типа. Используя модель двухфакторного перекрестного дисперсионного анализа, установлено, что на интенсивность старения основной изоляции вводов оказывают влияние как условия эксплуатации, так и особенности конструктивного исполнения вводов. Новые положения, по сравнению с известными решениями, состоят в том, что предельно допустимые значения диагностических признаков высоковольтных вводов следует нормировать с учетом таких факторов, как номинальное напряжение, тип защиты и тип изоляции, нагрузка вводов и состав потребителей. Полученные результаты могут быть алгоритмически реализованы в виде отдельного модуля информационно-аналитической системы (ИАС) для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования. Библ. 24, табл. 7, рис. 14.

Ключевые слова: высоковольтный ввод, изоляция, двухфакторный перекрестный дисперсионный анализ, показатели изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь.

Постановка проблемы. Решение о возможном состоянии высоковольтных вводов, при проведении периодических испытаний, принимается путем сравнения измеренных значений показателей изоляции с их предельно допустимыми значениями. Очевидно, что чем адекватней предельно допустимые значения показателей вводов будут отражать условия реальной эксплуатации вводов, тем выше будет достоверность решений, принимаемых с их использованием. В настоящее время, согласно [1], предельно допустимые значения показателей основной изоляции вводов (значения тангенсов угла диэлектрических потерь основной изоляции и изоляции измерительного конденсатора) нормируются только с учетом номинального напряжения и типа изоляции. Однако исследование законов распределения показателей изоляции вводов, выполненные в [2], показали, что даже для вводов одного класса напряжения с одинаковым типом изоляции, имеет место смещение математических ожиданий плотностей распределения показателей.

Это обусловлено влиянием эксплуатационных факторов, учет которых не регламентирован в [1]. Наличие подобного смещения свидетельствует о том, что оптимальные предельно допустимые значения показателей, полученные для массивов показателей с разными параметрами законов распределений, будут существенно отличаться. А это значит, что при определении предельно допустимых значений необходимо учитывать большее число факторов, чем регламентировано в [1]. В связи с этим, анализ факторов, влияющих на значения диагностических показателей высоковольтных вводов в процессе длительной эксплуатации, является актуальной и практически значимой задачей.

Анализ основных достижений и литературы. В настоящее время в открытых литературных источниках приведено значительное количество публикаций, посвященных повышению эксплуатационной надежности высоковольтных вводов. Так, например, в

работах [3-7] выполнен детальный анализ основных причин повреждаемости и наиболее характерных дефектов высоковольтных вводов. Показано, что для вводов с разным типом изоляции имеют место различные характерные дефекты. Согласно международным и национальным стандартам [1, 8, 9] при проведении периодических испытаний состояния изоляции высоковольтных вводов контролируются значения следующих показателей: тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции ($\text{tg}\delta_1$), емкость основной изоляции (C_1), тангенс угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора ($\text{tg}\delta_2$), емкость измерительного конденсатора (C_2), и сопротивления изоляции вывода для измерения (R). В работах [10, 11] приведены примеры повреждения высоковольтных вводов с разным типом изоляции. Показано и обосновано, что наиболее информативным показателем как для вводов с бумажно-масляной, так и с RIP – изоляцией (*resin impregnated paper* – бумага, пропитанная смолой) является тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции. При этом контроль данного показателя целесообразно выполнять с использованием систем непрерывного контроля. Анализ влияния наиболее характерных дефектов высоковольтных вводов на значения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции посвящено достаточное число публикаций [12-14]. В тоже время вопросы оценки факторов, влияющих на значения $\text{tg}\delta_1$ исправных высоковольтных вводов в процессе длительной эксплуатации, освещены недостаточно. Так в [15] приведены результаты дисперсионного анализа эксплуатационных факторов на значения показателей вводов. Установлено, значимое влияние на значения показателей оказывают тип ввода и продолжительность эксплуатации. Однако приведенные исследования выполнялись на ограниченном объеме выборочных данных и не учитывали влияния загрузки вводов. Последнее обстоятельство и послужило основанием для выполнения данных исследований.

Цель статьи – анализ влияния условий, режимов эксплуатации и конструкции на техническое состояние основной изоляции высоковольтных вводов по результатам профилактических измерений тангенса угла диэлектрических потерь при частоте 50 Гц.

Методы исследования. В настоящее время для проведения факторного анализа разработаны и широко используются несколько моделей дисперсионного анализа [16, 17]. Следует отметить, что выбор той или иной модели анализа требует достаточно глубокого обоснования. Например, в [18] для формирования статистически однородных массивов концентраций газов была использована модель однофакторного дисперсионного анализа. Данный подход позволяет выполнять дисперсионное разложение при неодинаковом количестве измерений в ячейках, но требует строгой фиксации всех факторов, кроме варьируемого фактора, на строго определенных уровнях, что не всегда возможно при работе с эксплуатационными данными. Использование моделей, основанных на латинских квадратах [19], позволяет одновременно проверить влияние нескольких факторов, но не позволяет

оценить эффекты взаимодействия между ними. В таких условиях наиболее оптимальным, по мнению авторов, является использование модели двухфакторного перекрестного анализа [15, 20, 21], который позволяет одновременно выполнить оценку влияния двух факторов и оценить эффект их взаимодействия.

Учитывая предполагаемую неаддитивность эффектов изменения уровней факторов (т.е. разность математических ожиданий между любыми двумя уровнями одного фактора не одинакова при любых уровнях другого), модель компонент дисперсии может быть представлена в виде [22]:

$$y_{ijr} = \mu + \rho_i + \gamma_j + (\rho\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijr}, \quad (1)$$

где y_{ijr} – значение показателя изоляции; μ – общее среднее; ρ_i – среднее отклонение относительно μ для i -го уровня первого фактора; γ_j – среднее отклонение относительно μ для j -го уровня второго фактора; $(\rho\gamma)_{ij}$ – составляющая, характеризующая взаимодействие между факторами; ε_{ijr} – остаточная случайная величина; i – уровень первого фактора; j – уровень второго фактора; порядок появления одного из m_{ij} наблюдений для сочетания i -го уровня первого с j -м уровнем второго фактора.

Известно [22], что выражение для полной суммы квадратов отклонений от общего среднего для модели (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2 &= k \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \\ &+ n \cdot m \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2 + m \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2 + \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (\bar{y}_{ijr} - \bar{y}_{ij})^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{или} \quad Q_{tot} = Q_A + Q_B + Q_{AB} + Q_\varepsilon, \quad (3)$$

где $Q_{tot} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2$ – полная сумма квадратов отклонений от общего среднего;

$Q_A = k \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений, характеризующая рассеяние средних по строкам относительно общего среднего;

$Q_B = n \cdot m \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений от общего среднего между столбцами, характеризующая рассеяние средних по столбцам;

$Q_{AB} = m \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений, характеризующая эффект взаимного влияния;

$Q_\varepsilon = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (\bar{y}_{ijr} - \bar{y}_{ij})^2$ – сумма квадратов отклонений внутри серии, характеризующая рассеяние отдельных наблюдений в серии относительно среднего серии, обусловленное влиянием только случайных величин.

Проверка гипотезы о значимости влияния факторов и их взаимодействий осуществлялись с помощью критерия Фишера. Для этого сначала были найдены оценки средних квадратов.

Общая:

$$\bar{Q}_{tot}^2 = \frac{Q_{tot}}{n \cdot k \cdot m - 1} = \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{AB}^2; \quad (4)$$

межстрочная:

$$\bar{Q}_A^2 = \frac{Q_A}{n-1} = \sigma_{\varepsilon}^2 + k \cdot m \cdot \sigma_A^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2; \quad (5)$$

между столбцами:

$$\bar{Q}_B^2 = \frac{Q_B}{k-1} = \sigma_{\varepsilon}^2 + n \cdot m \cdot \sigma_B^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2; \quad (6)$$

взаимодействия:

$$\bar{Q}_{AB}^2 = \frac{Q_{AB}}{(n-1) \cdot (k-1)} = \sigma_{\varepsilon}^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2; \quad (7)$$

остаточная:

$$\bar{Q}_{\varepsilon}^2 = \frac{Q_{\varepsilon}}{n \cdot k \cdot (m-1)} = \sigma_{\varepsilon}^2. \quad (8)$$

Значения F -критериев вычислялись как отношения соответствующих средних квадратов к остаточному среднему квадрату:

$$F_A = \frac{\bar{Q}_A^2}{\bar{Q}_{\varepsilon}^2}, \quad F_B = \frac{\bar{Q}_B^2}{\bar{Q}_{\varepsilon}^2}, \quad F_{AB} = \frac{\bar{Q}_{AB}^2}{\bar{Q}_{\varepsilon}^2}. \quad (9)$$

Гипотеза об отсутствии влияния фактора или эффекта взаимодействия не отвергалась, если расчетное значение F -критерия не превышало критического значения, при соответствующих значениях числа степеней свободы и уровне значимости $\alpha=0,05$. Данный метод был реализован в виде авторской программы «DDA» (Двухфакторный Дисперсионный Анализ), описание которой приведено в [23].

В качестве исходных данных были использованы результаты периодического контроля состояния высоковольтных вводов напряжением 110, 220 и 330 кВ, с изоляцией разного типа, которые эксплуатируются в Харьковской, Полтавской и Луганской областях Украины. В качестве отклика анализировались значения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов.

Результаты численного моделирования. Ниже приведены результаты проверки влияния различных факторов.

Анализ значимости различий значений $\text{tg} \delta_1$ высоковольтных вводов, которые эксплуатируются с разными значениями тока нагрузки. Рабочая температура изоляции является одним из основных факторов, определяющих интенсивность ее старения [24]. В [20] показано, что интенсивность старения трансформаторных масел во многом зависит от загрузки трансформаторов. В высоковольтных вводах значения рабочей температуры во многом определяется как значением рабочего тока (тока нагрузки), так и температурой окружающей среды. Для нивелирования влияния температуры окружающей среды и других факторов, при оценке влияния загрузки вводов, были использованы результаты периодических испытания для высоко-

вольтных вводов напряжением 110 кВ герметичной конструкции с бумажно-масляной изоляцией типа ГБМТ-110/630 У1, которые введены в эксплуатацию в 80-ые годы и эксплуатируются в Харьковской области. Объем выборки составил 144 значений: 3 столбца, объемы выборочных значений по ячейкам равно 6, ячеек – 24. В качестве первого фактора рассматривалась загрузка трансформатора (kz), для которого выделено три уровня варьирования: до 25 %, 25-50 % и свыше 50 %. В качестве второго фактора анализировалось влияние длительности эксплуатации. Рассматривался интервал времени от 0 (момент ввода в эксплуатацию) до 21 года. Результаты испытаний, по фактору длительность эксплуатации (по строкам), были разбиты на 7 уровней, с шагом 3 года. Динамика изменения $\text{tg} \delta_1$ основной изоляции высоковольтных вводов с разным значением коэффициента загрузки kz в процессе эксплуатации приведена на рис. 1.

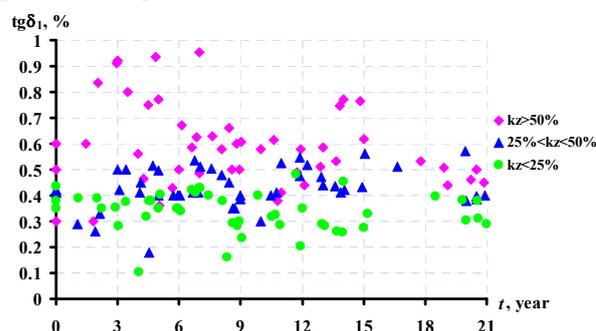


Рис. 1. Динамика изменения $\text{tg} \delta_1$ основной изоляции высоковольтных вводов с разным значением коэффициента загрузки kz в процессе эксплуатации

В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов. Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов, по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 2. Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, гипотеза об отсутствии влияния длительности эксплуатации на значения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов была отвергнута ($F_A > F_{cr}$). Это значит, что значения $\text{tg} \delta_1$ изменяются с течением длительности эксплуатации. Гипотеза об отсутствии влияния тока нагрузки на значения тангенса угла диэлектрических потерь изоляции вводов также была отвергнута ($F_B > F_{cr}$). Это свидетельствует о наличии значимых различий в значениях $\text{tg} \delta_1$ исправных высоковольтных вводов, которые эксплуатируются с разным значением загрузки.

Достаточно интересным является тот факт, что по результатам анализа установлено взаимное влияние длительности эксплуатации и загрузки на значения тангенса угла диэлектрических потерь ($F_{AB} > F_{cr}$). Это свидетельствует о том, что эффекты изменения уровней факторов неаддитивны, т.е. эффект от изменения уровня воздействия одного фактора приводит к изменению эффекта от уровня воздействия другого. Другими словами, процесс старения носит кумулятивный характер, т.е. близкие значения $\text{tg} \delta_1$, могут быть получены при высоких нагрузках на относительно коротком

промежутке эксплуатации, или при более низких нагрузках, но за более длительный период эксплуатации.

Таблица 1

Результаты проверки влияния загрузки вводов и продолжительности эксплуатации на значения $\operatorname{tg} \delta_1$

Суммы дисперсионного разложения		Число степеней свободы		F-критерий		
				F	расчетный	критический
Q_{tot}	4.04	v_{tot}	143	F		
Q_A	0.20	v_A	7	F_A	3.090	2.408
Q_B	1.54	v_B	2	F_B	81.92	3.804
Q_{AB}	0.45	v_{AB}	14	F_{AB}	3.416	1.981
Q_ε	1.13	v_ε	120	–	–	–

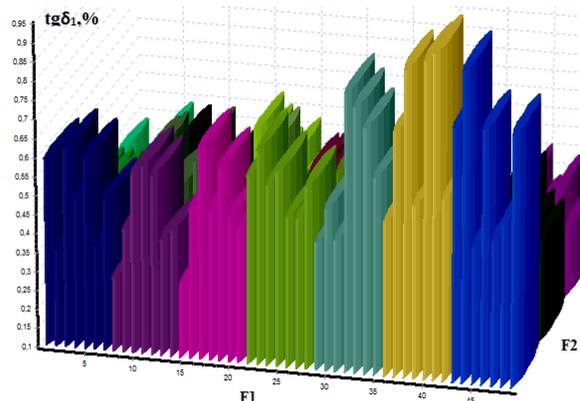


Рис. 2. Распределение средних значений $\operatorname{tg} \delta_1$ основной изоляции в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) и тока загрузки (фактор F2) высоковольтных вводов. Значимое влияние фактора загрузки было подтверждено и для вводов классом напряжения 220 и 330 кВ с разным типом изоляции

Анализ значимости различий значений $\operatorname{tg} \delta_1$ в исправных высоковольтных вводах, с разным типом изоляции. Действующим в Украине нормативным документом [1] регламентируется нормирование значений диагностических показателей в зависимости от типа изоляции вводов (бумажно-масляная, маслобарьерная, бумажно-бакелитовая изоляция ввода с мастичным заполнением, твердая изоляция ввода с масляным заполнением и т.д.).

Для проверки предполагаемого влияния типа изоляции ввода на значения диагностических показателей был выполнен двухфакторный дисперсионный анализ значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции для вводов с бумажно-масляной изоляцией, типа ГМТА 110 кВ и вводов типа ГТТА 110 кВ (остов изготавливается намоткой на трубу кабельной крепированной бумагой и пропитывается эпоксидным компаундом).

Анализируемые вводы введены в эксплуатацию в середине 80-х годов и эксплуатируются в Харьковской области. Средняя нагрузка этих вводов составила 25-50 % от значения номинального тока. Как и в предыдущем случае, в качестве второго фактора анализировалось влияние длительности эксплуатации, рассматривался интервал времени от 0 (момент ввода в эксплуатацию) до 24 лет. Результаты испытаний, по фактору длительность эксплуатации (по строкам), были разбиты на 6 уровней, с шагом 4 года. Объем проанализированной выборки составил 156 значений:

6 строк, 2 столбца, по 13 значений в ячейке. Динамика изменения $\operatorname{tg} \delta_1$ в процессе эксплуатации для вводов с изоляцией разного типа приведена на рис. 3.

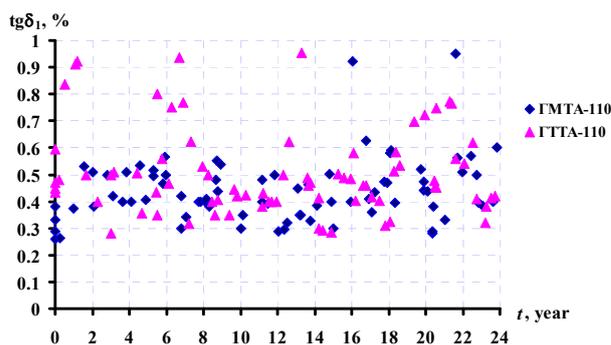


Рис. 3. Динамика изменения $\operatorname{tg} \delta_1$ в процессе эксплуатации для вводов с изоляцией разного типа

Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 2. В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов. Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 4. Как видно из табл. 2, расчетное значение критерия F_A не превышает критическое а, следовательно, для анализируемых данных изменение значений $\operatorname{tg} \delta_1$ в процессе эксплуатации является статистически не значимым. В тоже время имеет место значимое различие в значениях $\operatorname{tg} \delta_1$ во вводах с изоляцией разного типа ($F_B > F_{cr}$). При этом дисперсионный анализ не позволил выявить значимых различий в значениях $\operatorname{tg} \delta_1$, обусловленных взаимным влиянием продолжительности эксплуатации и типом изоляции.

Таблица 2

Результаты проверки влияния типа изоляции вводов и продолжительности эксплуатации на значения $\operatorname{tg} \delta_1$

Суммы дисперсионного разложения		Число степеней свободы		F-критерий		
				F	расчетный	критический
Q_{tot}	3.31	v_{tot}	155	F		
Q_A	0.13	v_A	5	F_A	1.34	2.56
Q_B	0.17	v_B	1	F_B	8.97	5.02
Q_{AB}	0.16	v_{AB}	5	F_{AB}	1.65	2.56
Q_ε	2.84	v_ε	144	–	–	–

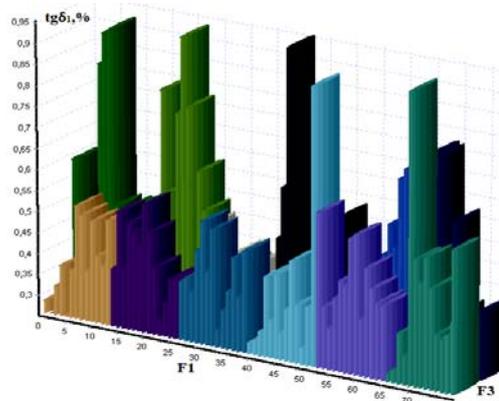


Рис. 4. Распределение средних значений $\operatorname{tg} \delta_1$ основной изоляции вводов в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) и типа изоляции (фактор F3)

Результаты проверки влияния продолжительности эксплуатации и типа ввода и на значения $\operatorname{tg} \delta_1$

Суммы дисперсионного разложения	Число степеней свободы	F-критерий				
		F	расчетный	критический		
Q_{tot}	10,89	ν_{tot}	119	–	–	–
Q_A	0.76	ν_A	5	F_A	1.715	2.69
Q_B	0.002	ν_B	1	F_B	0.023	5.17
Q_{AB}	0.43	ν_{AB}	5	F_{AB}	0.962	2.69
Q_c	9.68	ν_c	108	–	–	–

Как видно из табл. 3, для анализируемых данных изменение значений $\operatorname{tg} \delta_1$ во времени является статистически не значимым ($F_A < F_{cr}$). Также не выявлено значимых различий в значениях $\operatorname{tg} \delta_1$ для высоковольтных вводов разного типа ($F_B < F_{cr}$). Кроме того, различия в значениях $\operatorname{tg} \delta_1$, которые обусловлены взаимным влиянием типов вводов и продолжительности эксплуатации, не являются статистически значимыми ($F_{AB} < F_{cr}$).

Следует отметить, что аналогичные результаты получены для вводов типа ГТБТУ-110, ГТТБ-110 и ГТТА-110.

Анализ значимости различий значений $\operatorname{tg} \delta_1$ в исправных высоковольтных вводах с разным типом защиты вводов. Помимо загрузки вводов, определяющих рабочую температуру изоляции, существенное влияние на интенсивность процессов старения изоляции оказывает содержание химически агрессивных сред (влага, атмосферный кислород). Очевидно, что степень влияния химически агрессивных сред на интенсивность старения изоляции во многом будет зависеть от типа защиты изоляции вводов (герметичные или негерметичные). Для оценки влияния типа защиты проведен дисперсионный анализ значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции для вводов герметичного исполнения типа ГБМТ и вводов негерметичного исполнения типа БМТ номинальным напряжением 110 кВ. Данные вводы введены в эксплуатацию в конце 70-х годов и эксплуатируются в Харьковской области. Среднее значение токов загрузки на анализируемом промежутке времени (до 20 лет) превышало 50 % от значения номинального тока вводов. Объем выборки составил 200 значений: 10 строк, 2 столбца, 10 измерений в ячейке. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов негерметичной и герметичной конструкции в процессе эксплуатации отражена на рис. 7.

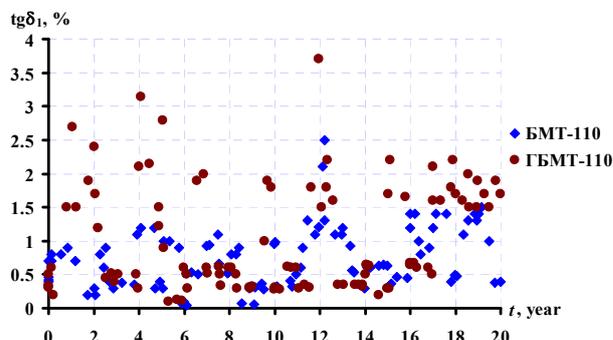


Рис. 7. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов негерметичной и герметичной конструкции в процессе эксплуатации

Анализ значимости различий значений $\operatorname{tg} \delta_1$ в исправных высоковольтных вводах разного типа. Поскольку в результате анализа выявлено значимое влияние типа изоляции высоковольтных вводов на значения $\operatorname{tg} \delta_1$, то логично было бы проверить, оказывает ли аналогичное влияние тип вводов.

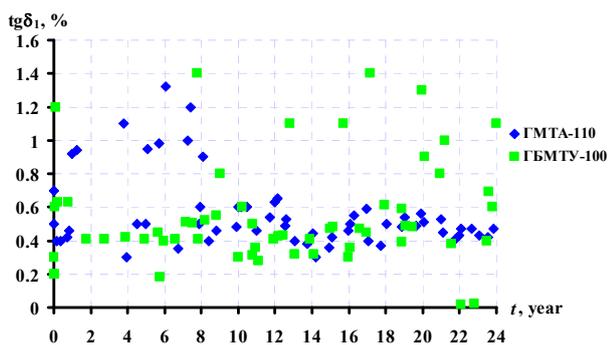
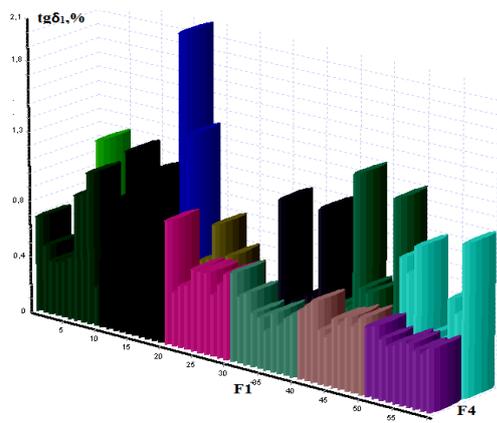
Для проверки гипотезы о влиянии типа ввода были проанализированы значения тангенса угла диэлектрических потерь для герметичных вводов с бумажно-масляной изоляцией двух типов: ГМТА и ГБМТУ.

В качестве второго фактора анализировалось влияние продолжительности эксплуатации вводов. Как и в предыдущем случае анализировались значения $\operatorname{tg} \delta_1$ на интервале эксплуатации до 24 лет, с шагом 4 года.

Анализируемые вводы эксплуатируются в Харьковской области, и были введены в эксплуатацию в 80-х годах. Средняя загрузка высоковольтных вводов превышала 50 %. Общий объем выборки составил 120 значений: 6 строк, 2 столбца, 10 значений в ячейке.

На рис. 5 приведена зависимость $\operatorname{tg} \delta_1$ от длительности эксплуатации для вводов разного типа.

В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов. Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 6.

Рис. 5. Динамика изменения $\operatorname{tg} \delta_1$ от продолжительности эксплуатации для вводов разного типаРис. 6. Распределение средних значений $\operatorname{tg} \delta_1$ основной изоляции в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) и типа (фактор F4) высоковольтных вводов

Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 3.

Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 8. В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов. Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 4. Как видно из табл. 4, для данной выборки расчетное значение критерия F_A превышает критическое значение, а, следовательно, изменения значений $\text{tg}\delta_1$ во времени являются статистически значимыми. Кроме того, выявлены существенные различия в значениях $\text{tg}\delta_1$ для вводов герметичной и негерметичной конструкции ($F_B > F_{cr}$). В то же время, в отличие от вводов с разным значением коэффициента загрузки, для вводов с разным типом защиты отсутствуют значимые различия в значениях $\text{tg}\delta_1$, которые обусловлены взаимным влиянием типа защиты ввода и длительности эксплуатации ($F_{AB} < F_{cr}$).

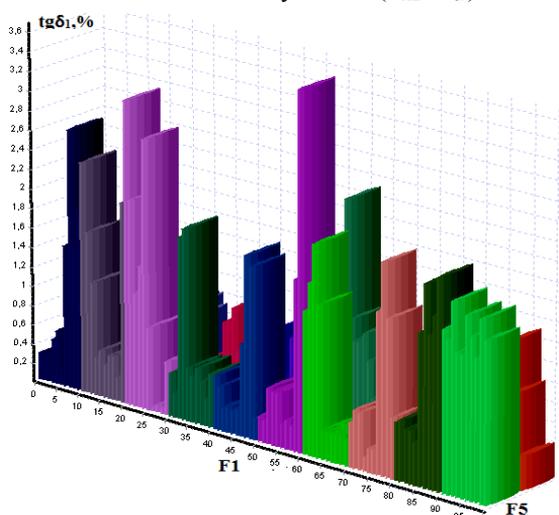


Рис. 8. Распределение средних значений $\text{tg}\delta_1$ основной изоляции в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) и типа защиты (фактор F5) высоковольтных вводов

Таблица 4

Результаты проверки влияния продолжительности эксплуатации и типа защиты вводов на значения $\text{tg}\delta_1$

Суммы дисперсионного разложения		Число степеней свободы		F -критерий		
				F	расчетный	критический
Q_{tot}	86.3	v_{tot}	199			
Q_A	9.42	v_A	9	F_A	2.706	2.11
Q_B	4.16	v_B	1	F_B	10.77	5.02
Q_{AB}	3.19	v_{AB}	9	F_{AB}	0.917	2.11
Q_ε	69.5	v_ε	180	–	–	–

Анализ значимости различий значений $\text{tg}\delta_1$ в исправных высоковольтных вводах, установленных на разных фазах трансформаторов. Как правило, электрические сети работают в симметричном режиме, т.е. значения тока загрузки в разных фазах должны совпадать а, следовательно, и значения диагностических признаков в исправных, нормально работающих вводах не должны существенно отличаться. В то же время при возникновении дефекта в одном из вводов значения диагностических признаков отлича-

ются, что позволяет обнаружить дефект. На этом основан неравновесно-компенсационный метод непрерывного контроля состояния изоляции вводов [24].

Для проверки гипотезы о влиянии фазы на значения показателей были проанализированы значения $\text{tg}\delta_1$ высоковольтных вводов герметичной конструкции, напряжением 110 кВ типа ГМТА. Данные вводы были введены в эксплуатацию в начале 90-х годов. Объем выборки составил 150 значений: 10 строк, 3 столбца, 5 измерений в ячейке. Шаг разбиения по фактору длительность эксплуатации составил 2 года.

Динамика изменения $\text{tg}\delta_1$ в процессе эксплуатации высоковольтных вводов герметичной конструкции, установленных на разных фазах трансформаторов, отражена на рис. 9.

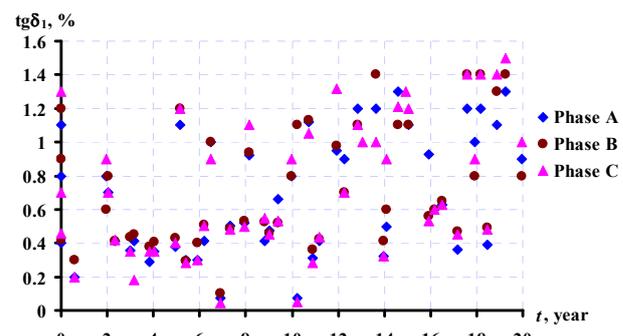


Рис. 9. Динамика изменения $\text{tg}\delta_1$ в процессе эксплуатации высоковольтных вводов герметичной конструкции, установленных на разных фазах трансформаторов

Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 10.

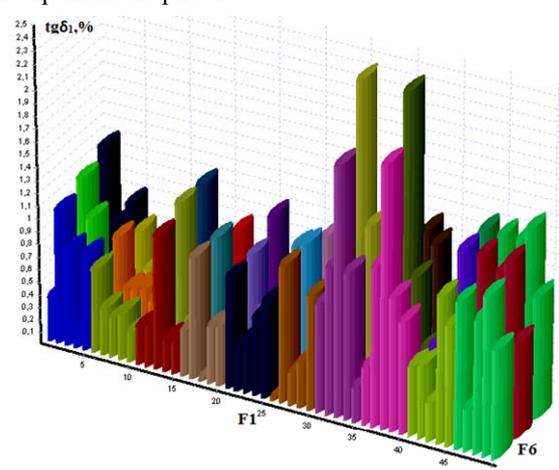


Рис. 10. Распределение средних значений $\text{tg}\delta_1$ основной изоляции в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) и фазы (фактор F6) высоковольтных вводов

В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов.

Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 5. Как видно из табл. 5, расчетное значение критерия F_A превышает критическое значение, а следовательно, изменения значений $\text{tg}\delta_1$ во времени для данной выборки являются статистически значимыми.

В тоже время отсутствуют значимые различия значений $\operatorname{tg} \delta_1$ для высоковольтных вводов, установленных на разных фазах трансформаторов ($F_B < F_{cr}$). Также не выявлено значимых различий в значениях $\operatorname{tg} \delta_1$, обусловленных взаимным влиянием фазы ввода и длительности эксплуатации ($F_{AB} < F_{cr}$).

Таблица 5

Результаты проверки влияния продолжительности эксплуатации и номера фазы вводов на значения $\operatorname{tg} \delta_1$

Суммы дисперсионного разложения		Число степеней свободы		F-критерий		
				F	расчетный	критический
Q_{tot}	29,6	v_{tot}	149	F_A	5.59	2.22
Q_A	8.54	v_A	9	F_B	0.43	3.68
Q_B	0.14	v_B	2	F_{AB}	0.20	1.87
Q_{AB}	0.63	v_{AB}	18	–	–	–
Q_ε	20.3	v_ε	120	–	–	–

Следует отметить, что аналогичные результаты получены и для вводов типа ГТБТУ-110, ГТТА-110, а также для вводов класса напряжения 220 и 330 кВ.

Анализ значимости различий значений $\operatorname{tg} \delta_1$ в исправных высоковольтных вводах с разным классом номинального напряжения. Действующим в Украине нормативным документом [1] предусмотрено нормирование значений диагностических признаков в зависимости от номинального напряжения вводов, что предполагает наличие существенных различий в значениях одного и того же признака для вводов разного класса напряжения. Для проверки наличия таких отличий был выполнен дисперсионный анализ значений $\operatorname{tg} \delta_1$ для вводов с бумажно-масляной изоляцией герметичной конструкции номинальным напряжением 110, 220 и 330 кВ. Данные вводы были введены в эксплуатацию в начале 90-х годов и эксплуатируются с нагрузкой выше 50 % от номинального значения тока. Объем выборочных значений составил 108 значений: 3 столбца, 6 строк, по 6 измерений в ячейке. Шаг разбиения по фактору длительность эксплуатации (по строкам) составил 4 года на интервале наблюдений до 24 лет. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь вводов герметичной конструкции класса напряжения 110, 220 и 330 кВ в процессе эксплуатации приведена на рис. 11.

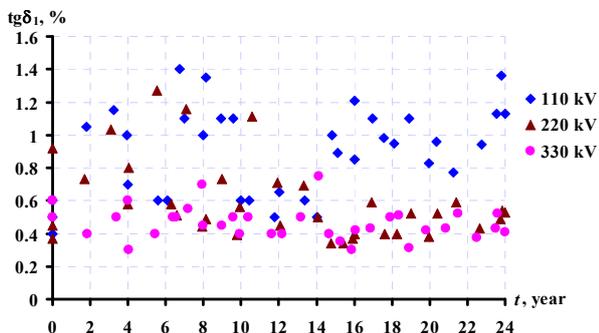


Рис. 11. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь вводов герметичной конструкции класса напряжения 110, 220 и 330 кВ в процессе эксплуатации

Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов, по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 12.

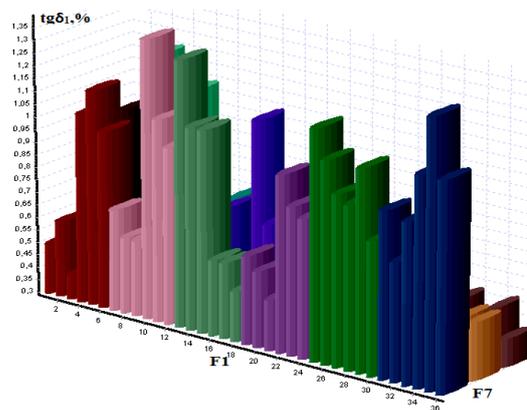


Рис. 12. Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) и класса напряжения (фактор F7) высоковольтных вводов

В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов. Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты проверки влияния продолжительности эксплуатации и номинального напряжения вводов на значения $\operatorname{tg} \delta_1$

Суммы дисперсионного разложения		Число степеней свободы		F-критерий		
				F	расчетный	критический
Q_{tot}	8,48	v_{tot}	107	F_A	1.45	2.730
Q_A	0.31	v_A	5	F_B	41.0	3.865
Q_B	3.52	v_B	2	F_{AB}	1.83	2.213
Q_{AB}	0.78	v_{AB}	10	–	–	–
Q_ε	3.86	v_ε	90	–	–	–

Как видно из табл. 6, выполненный анализ выявил существенные различия в значениях тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов разного класса напряжения ($F_B > F_{cr}$).

Но при этом значимое изменение во времени значений $\operatorname{tg} \delta_1$ для данной выборки не установлено ($F_A < F_{cr}$). Также отсутствует значимое различие в значениях $\operatorname{tg} \delta_1$, которое обусловлено взаимным влиянием номинального напряжения вводов и длительности их эксплуатации ($F_{AB} < F_{cr}$).

Анализ значимости различий значений $\operatorname{tg} \delta_1$ в исправных высоковольтных вводах, которые эксплуатируются в разных регионах Украины. В некоторых работах, например, [18] приведены результаты, указывающие о наличии значимого влияния региона, в котором эксплуатируется оборудование на значения диагностических признаков. Такое влияние может быть обусловлено как различными климатическими условиями, так и разным составом потребителя и, как следствие, различиями в плотности суточных графиков нагрузки.

Для проверки влияния региона Украины на изменение значений диагностических признаков высоковольтных вводов был выполнен анализ значений $\operatorname{tg} \delta_1$ для вводов напряжением 110 кВ негерметичного исполнения типа БМТ-110, которые эксплуатируются в Харьковской, Луганской и Полтавской областях Украины.

Учитывая, что вводы находятся приблизительно в одной климатической зоне, основным фактором,

влияющим на возможные различия в значениях тангенса угла диэлектрических потерь изоляции вводов, будет являться состав потребителей, и как следствие, разная плотность суточных графиков нагрузки. Анализируемые вводы были введены в эксплуатацию в конце 70-х годов и эксплуатировались с нагрузкой выше 50 % от номинального значения. Объем выборочных значений составил 108 значений: 3 столбца, 6 строк, по 6 измерений в ячейке. Шаг разбиения по фактору длительность эксплуатации (по строкам) составил 4 года на интервале наблюдений до 24 лет. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов из разных регионов Украины в процессе эксплуатации приведена на рис. 13.

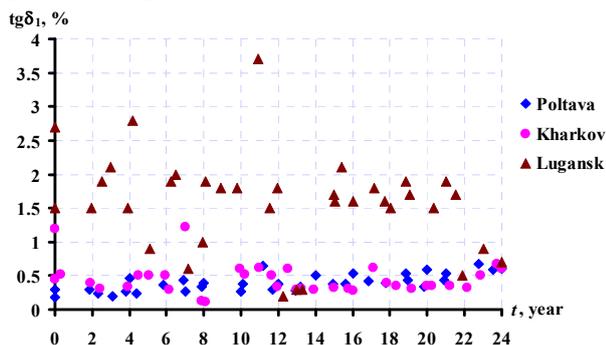


Рис. 13. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов из разных регионов Украины в процессе эксплуатации

Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов по уровням воздействующих факторов отражено на рис. 14.

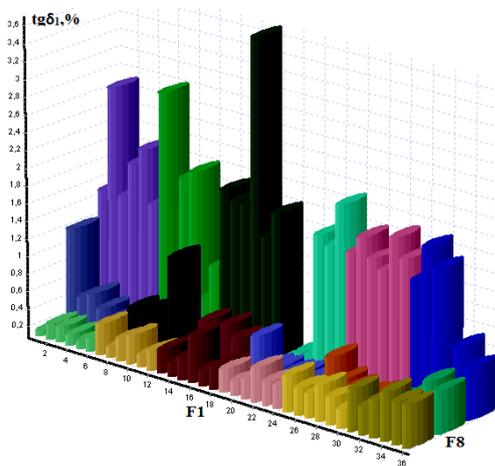


Рис. 14. Распределение средних значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции в зависимости от продолжительности эксплуатации (фактор F1) высоковольтных вводов и региона Украины (фактор F8)

В качестве основной гипотезы принималось предположение об отсутствии значимого влияния данных факторов. Результаты дисперсионного разложения приведены в табл. 7. Как видно из табл. 7, для данной выборки значимое изменение значений $\text{tg}\delta_1$ в процессе эксплуатации не установлено ($F_A < F_{cr}$). Но при этом выявлены значимые различия в значениях $\text{tg}\delta_1$ для вводов, которые эксплуатируются в разных регионах Украины ($F_B > F_{cr}$). Как и в предыдущих слу-

чаях, отсутствуют значимые различия в значениях $\text{tg}\delta_1$, обусловленных взаимным влиянием региона Украины, в котором эксплуатируются вводы, и длительностью их эксплуатации ($F_{AB} < F_{cr}$). Вывод о значимом влиянии плотности суточного графика нагрузки на интенсивность старения основной изоляции вводов был подтвержден и для вводов герметичной конструкции типа ГМТА -110.

Таблица 7

Результаты проверки влияния на значения $\text{tg}\delta_1$ продолжительности эксплуатации и региона Украины

Суммы дисперсионного разложения		Число степеней свободы		F-критерий		
				F	расчетный	критический
Q_{tot}	51.90	v_{tot}	107			
Q_A	1.54	v_A	5	F_A	1.81	2.73
Q_B	31.39	v_B	2	F_B	92.5	3.86
Q_{AB}	15.26	v_{AB}	10	F_{AB}	2.18	2.21
Q_ε	0.00	v_ε	90	—	—	—

В результате выполненного анализа установлено, что на интенсивность старения основной изоляции вводов оказывают значимое влияние как условия эксплуатации (значение тока нагрузки вводов и состав потребителя), так и особенности конструктивного исполнения вводов: значение номинального напряжения, тип изоляции и тип защиты вводов. Часть из этих факторов, а именно номинальное напряжение и тип изоляции, учитываются в действующем в Украине [1] нормативном документе при нормировании предельно-допустимых значений показателей. В то же время такие факторы как значение тока загрузки, состав потребителя и тип защиты не учитываются при нормировании предельно допустимых значений показателей.

Полученные выше результаты не позволяют однозначно оценить наличие либо отсутствие влияния продолжительности эксплуатации на значения $\text{tg}\delta_1$. Из семи приведенных примеров гипотеза об отсутствии влияния продолжительности эксплуатации на значения $\text{tg}\delta_1$ была отвергнута только в трёх случаях. Здесь следует отметить, что подобные расхождения выявлены только для фактора продолжительность эксплуатации. Для других факторов при проверке гипотезы об отсутствии их влияния, полученные результаты идентичны для разных выборок. Выявленные различия могут быть обусловлены как отсутствием влияния длительности эксплуатации на значения диагностических признаков для исправных вводов, так и немонокотонным характером изменения значений $\text{tg}\delta_1$ во времени. Решение о значимости влияния продолжительности эксплуатации на значения диагностических признаков высоковольтных вводов можно будет принять после проведения дополнительных исследований, в частности дисперсионного анализа линейных моделей диагностических признаков на длительность эксплуатации.

Выводы.

1. Предельно допустимые значения диагностических признаков высоковольтных вводов следует нормировать с учетом таких факторов как номинальное напряжение, тип защиты и тип изоляции, загрузка вводов и состав потребителей. Поскольку на основании выполненного анализа установлено, что эти фак-

торы оказывают значимое влияния на значения диагностических показателей.

2. По результатам анализа установлено, что такие факторы как тип ввода и фаза, не оказывают значимого влияния на изменение значений диагностических признаков высоковольтных вводов, а, следовательно, их можно не учитывать при определении предельно-допустимых значений показателей.

3. Полученные результаты анализа не подтвердили известные из литературных источников рекомендации относительно влияния некоторых факторов на значения диагностических показателей вводов.

4. В качестве дальнейших исследований целесообразно выполнить оценку влияния продолжительности эксплуатации вводов на значения их диагностических признаков с использованием других моделей дисперсионного анализа. При этом представляет научный и практический интерес выполнить подобную оценку, как для исправных вводов, так и вводов с развивающимися дефектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – К.: ОЕП «ГРИФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 262 с.
2. Shutenko O., Zagaynova A., Serdyukova G. Analysis of distribution laws of insulation indicators of high-voltage oil-filled bushings of hermetic and non-hermetic execution // *Technology audit and production reserves*. – 2018. – vol.4. – no.1(42). – pp. 30-39. doi: 10.15587/2312-8372.2018.140873.
3. 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. – no.6. – pp. 791-796.
4. Anglhuber M., Juan L. Contreras Velásquez. Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method // *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*. – 2017. – pp. 126-132.
5. Septyani H.I., Arifianto I., Purnomoadi A.P. High voltage transformer bushing problems // *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Jul. 2011. doi: 10.1109/iceei.2011.6021566.
6. Metwally I. Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers // *IEEE Potentials*. – 2011. – vol.30. – no.3. – pp. 36-43. doi: 10.1109/mpot.2011.940233.
7. Рубаненко О.Є., Гуменюк О.І. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт: монографія. – Вінниця: ВНТУ. – 2011. – 183 с.
8. IEC – 60137, Edition 7.0 2017-06, International Electrotechnical Commission Standard for Insulated bushings for Alternating Voltages Above 1000 V.
9. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
10. Андриенко П.Д., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Скрупская Л.С. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока // *Электротехника та електроенергетика*. – 2014. – №1. – С. 43-48. doi: 10.15588/1607-6761-2014-1-7.
11. Аникеева М.А., Арбузов Р.С., Живодерников С.В., Лазарева Е.А., Овсянников А.Г., Панов М.А. Диагностические признаки для отбраковки вводов высокого напряжения с бумажно-масляной изоляцией // *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2009. – №1. – С. 22-25.

12. Львов М.Ю. Коллоидно-дисперсные процессы в высоковольтных герметичных вводах трансформаторов // *Электрические станции*. – 2000. – №4. – С. 49-52.

13. Снеткова О.В. Опыт диагностики маслонаполненных вводов 110-500 кВ в ОАО «Мосэнерго» // *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2004. – №2. – С. 39-42.

14. Осотов В.Н. Ошибки при измерении диэлектрических характеристик и оценке состояния высоковольтных вводов: Материалы 10-ой ежегодной конференции «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования». – Пермь: ООО «Димрус», 2013.

15. Загайнова А.А. Анализ влияния различных факторов на интенсивность старения изоляции конденсаторного типа высоковольтных вводов // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2015. – №10(141). – С. 17-25.

16. Шеффер Г. Дисперсионный анализ. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

17. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

18. Давиденко И.В. Исследование показателей, описывающих рабочее состояние маслонаполненных вводов, методами математической статистики // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2006. – №15. – С. 31-33.

19. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.

20. Шутенко О.В. Оценка влияния условий эксплуатации на интенсивность старения трансформаторных масел // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2010. – №1. – С. 171-179.

21. Шутенко О.В., Абрамов В.Б., Баклай Д.Н. Анализ факторов, влияющих на однородность массивов концентраций растворенных в масле газов // *Энергетика та електрифікація*. – 2013. – №6. – С. 39-50.

22. Давыденко А.П. Организация и планирование научных исследований, патентоведение. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – 320 с.

23. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – 268 с.

24. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 128 с.

REFERENCES

1. SOU-N EE 20.302: 2007. *Normy vyprovuvannja elektroobladnannja* [Norms of testing of electrical equipment]. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 262 p. (Ukr).
2. Shutenko O., Zagaynova A., Serdyukova G. Analysis of distribution laws of insulation indicators of high-voltage oil-filled bushings of hermetic and non-hermetic execution. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol.4, no.1(42), pp. 30-39. doi: 10.15587/2312-8372.2018.140873.
3. 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, no.6, pp. 791-796.
4. Anglhuber M., Juan L. Contreras Velásquez. Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*, 2017, pp. 126-132.
5. Septyani H.I., Arifianto I., Purnomoadi A.P. High voltage transformer bushing problems. *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Jul. 2011. doi: 10.1109/iceei.2011.6021566.
6. Metwally I. Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers. *IEEE Potentials*, 2011, vol.30, no.3, pp. 36-43. doi: 10.1109/mpot.2011.940233.

7. Rubanenko A.E., Gumenyuk A.I. *Vysokovoltni vvody. Konstruktsiia, ekspluatatsiia, diahnostyka i remont* [High-voltage bushings. Design, operation, diagnostics and repair]. Vinnitsa: VNTU Publ., 2011. 183 p. (Ukr).
8. IEC – 60137, Edition 7.0 2017-06. International Electrotechnical Commission Standard for Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V.
9. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
10. Andrienko P.D., Sakhno A.A., Konogray S.P., Spitsa A.G., Skrupskaya L.S. Features of monitoring the technical condition of the main insulation of high-voltage bushings and current transformers. *Electrical engineering and power engineering*, 2014, no.1, pp. 43-48. (Rus). doi: 10.15588/1607-6761-2014-1-7.
11. Anikeeva M.A., Arbuzov R.S., Zhivodernikov S.V., Lazareva E.A., Ovsyannikov A.G., Panov M.A. Diagnostic signs for rejection of high-voltage bushings with oil-paper insulation. *ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2009, no.1, pp. 22-25. (Rus).
12. Lvov M.Yu. Colloid-dispersed processes in high-voltage sealed bushings of transformers. *Electric stations*, 2000, no.4, pp. 49-52. (Rus).
13. Snetkova O.V. Experience of diagnostics of 110-500 kV oil-filled bushings in Mosenergo. *ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2004, no.2, pp. 39-42. (Rus).
14. Osotov V.N. Errors in measuring dielectric characteristics and assessing the state of high-voltage bushings. *Proceedings of the 10th annual conference «Methods and means of insulation control of high-voltage equipment»*. Perm: Dimirus Publ., 2013. (Rus).
15. Zahaynova O.A. Analysis of the influence of different factors on the aging of the insulation capacitor type high-voltage input. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2015, no.10(141), pp. 17-25. (Rus).
16. Scheffé G. *Dispersionnyi analiz* [Dispersion analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 512 p. (Rus).
17. Johnson N. *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke* [Statistics and Experiment Planning in Engineering and Science]. Moscow: Mir Publ., 1981. 520 p. (Rus).
18. Davidenko I.V. Investigation of indicators describing the operational state of oil-filled bushings, using mathematical statistics. *University news. North-Caucasian region. Technical sciences series*, 2006, no.15, pp. 31-33. (Rus).
19. Gmurman V.E. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, High school Publ., 1977. 479 p. (Rus).
20. Shutenko O.V. Evaluation of the influence of operating conditions on the intensity of aging of transformer oils. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2010, no.1. pp. 171-179. (Rus).
21. Shutenko O.V., Abramov V.B., Baklay D.N. Analysis of factors affecting the homogeneity of arrays of concentrations of gases dissolved in oil. *Energetic and electrification*, 2013, no.6, pp. 39-50. (Rus).
22. Davydenko A.P. *Organizatsiia i planirovanie nauchnykh issledovaniy, patentovedenie* [Organization and planning of scientific research, patent science]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2004. 320 p. (Rus).
23. Shutenko O.V., Baklay D.N. *Planirovanie eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh* [Planning of experimental research in the electric power industry. Methods for processing experimental data]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2013. 268 p. (Rus).
24. Svi P.M. *Kontrol' izoliatsii oborudovaniia vysokogo napriazheniia* [Insulation control of high voltage equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 128 p. (Rus).

Поступила (received) 25.10.2018

O.V. Шутенко¹, к.т.н., доц.,
A.A. Загайнова¹, ассистент,
Г.Н. Сердюкова¹, к.т.н., доц.,
¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: o.v.shutenko@gmail.com, zagaynova@gmail.com,
serdukova.galina@gmail.com.

O.V. Shutenko¹, A.A. Zagaynova¹, G.N. Serdyukova¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Analysis of operating conditions and modes influence on technical state of main insulation of high-voltage bushings of different design.

The results of the analysis of the influence of operating conditions and design of high-voltage bushings on the values of dielectric loss tangent of high-voltage bushing basic insulation. For analysis a model of two-factor cross-sectional dispersion analysis, which allows to simultaneously evaluate the influence of two factors and evaluate the effect of their interaction is used. In the model used, it is assumed that the effects of changes in the levels of factors are non-additive, that is, the difference in mathematical expectations between any two levels of one factor is not the same for any levels of the other. Testing the hypothesis of the significance of the influence of factors and their interactions is performed using the Fisher criterion. This method was implemented in the form of the author's program «two-factor dispersion analysis». The results of periodic monitoring of the state of high-voltage bushings of 110, 220 and 330 kV with different types of insulation were used as initial data. Using the model of two-factor cross-sectional dispersion analysis, it was found that the aging intensity of the main insulation of bushings is influenced by both the operating conditions and the design features of the bushings. Maximum permissible values of diagnostic indicators of high-voltage bushings should be normalized taking into account such factors as nominal voltage, type of protection and type of insulation, load of bushings and the composition of consumers. Since, based on the analysis performed, it was established that these factors have a significant impact on the values of diagnostic indicators of insulation of bushings. According to the results of the analysis performed, it was established that such factors as the type of bushing and phase do not have a significant effect on the change in the values of diagnostic indicators of high-voltage bushings, and, therefore, they can be ignored when determining the maximum permissible values of the indicators. References 24, tables 7, figures 14.

Key words: high-voltage bushing, insulation, two-factor cross-sectional dispersion analysis, insulation indicators, dielectric loss tangent.