

УДК 621.315.626

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ**

Жорняк Л.Б., к.т.н., доц., Райкова Е.Ю., Осинская В.И.
Запорожский национальный технический университет
69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64
E-mail: zporoton@zntu.edu.ua

Досліджені питання надійності і експлуатації електричної ізоляції високовольтних вводів, які знаходяться в експлуатації на різних енергозабезпечуючих системах, методи підвищення строку служби електротехнічних пристроїв.

Ключові слова: надійність, електрична ізоляція, високовольтний ввід.

The questions of reliability and maintenance of electrical insulation in high voltage networks were investigated; technical decisions that allow either to increase service life or to decrease prime cost of the device were given.

Key words: reliability, electrical insulation, high voltage networks.

Введение. Мировая энергетика в настоящее время развивается комплексно в рамках единой сбалансированной системы энергетика – экономика – природа - общество. В этой системе стратегия развития энергетика должна обуславливаться стратегией развития экономики, где главным критерием энергетической политики в мире является надежность энергоснабжения, экологическая совместимость и рентабельность. Энергоснабжение должно быть доступным, надежным, экономически выгодным и экологически приемлемым [1].

Электроэнергетика является базовой отраслью, которая обеспечивает потребности страны в электрической энергии и может производить значительный объем электроэнергии для экспорта. Основной электроэнергетики страны является Объединенная электроэнергетическая система (ОЭС), которая осуществляет централизованное электрообеспечение внутренних потребителей, взаимодействует с энергосистемами смежных стран, обеспечивает экспорт, импорт и транзит электроэнергии. Она объединяет энергогенерирующие мощности, распределительные сети регионов Украины и межгосударственные линии электропередачи, которые связаны между собой системообразующими линиями электропередачи напряжением 220-750 кВ и межгосударственными магистральными линиями электропередачи. Магистральные электрические сети - это одна из основных составляющих ОЭС Украины, которая насчитывает 22,3 тыс. км линий электропередачи, из них напряжением 330 кВ - 13,2 тыс. км. Состояние магистральных электрических сетей из года в год ухудшается. Поскольку основное оборудование трансформаторных подстанций отработало свой расчетный технический ресурс, то отсутствие мероприятий по модернизации и реконструкции действующих электрических сетей и подстанций и строительства новых линий приводит к снижению надежности работы ОЭС.

Одним из главных путей поддержания эксплуатационной надежности и продления рабочего ресурса основного оборудования на станциях является организация эффективного контроля его состояния в процессе эксплуатации. Поэтому при определении перспективных задач и программ развития первоочередное внимание необходимо уделять разработкам, направленным на повышение эффективности и надежности работы всего оборудования станций и подстанций, создание новых методов диагностирования, которые дают возможность организовать контроль электрооборудования без его отключения, под рабочим напряжением, а также на модернизацию оборудования, находящегося в эксплуатации. При этом необходимо учитывать современные требования и тенденции мировой электротехники и электроэнергетики.

Анализ предыдущих исследований. В электроэнергетике Украины, также как и в других странах, в настоящее время в эксплуатации находится около 70 % силовых трансформаторов и выключателей с длительным сроком службы, который в основном составляет 25 лет, и значительная часть этого оборудования уже отработала этот нормативный срок [1, 17]. Замена такого оборудования требует существенных финансовых вложений и не всегда целесообразна с точки зрения технических и экономических затрат.

Анализ статистических данных по работе электрооборудования на различных станциях показывает, что большая часть отказов и повреждений приходится на высоковольтные маслonaполненные вводы (МНО) до 53 %, причем – 76 % на вводы трансформаторов (рис. 1). Более низкая надежность трансформаторных вводов отчасти объясняется условиями их работы, влиянием температуры верхних слоев масла, которая может достигать 80 °С, а также заводскими дефектами их изготовления.



Рисунок 1 – Показатели доли отказов и повреждений оборудования энергосистем

Как правило, наибольшее число отказов и повреждений высоковольтных вводов наблюдается после 15 и 30 лет эксплуатации, что отражено на рис. 2. Статистика показывает, что повреждаемость в первые 10...15 лет работы объясняется проявлением в основном заводских дефектов изготовления и составляет 15..20 %. Рост повреждаемости различных вводов после 30 лет эксплуатации свидетельствует о несовершенстве действующей в настоящее время системы профилактических испытаний.

Анализ отказов и повреждений высоковольтных вводов трансформаторов и масляных выключателей напряжением 110 и 220 кВ показывает, что чаще всего во вводах возникают: нарушение герметизации ввода, что приводит к утечке масла (14,6 %); разрушение нижней фарфоровой крышки, что приводит к недопустимому ухудшению диэлектрических характеристик оборудования в целом (12,2 %); пробой и разрушение остова (14,6 %); снижение качества масла, что подтверждается результатами хроматографического анализа (14,6 %) [18].

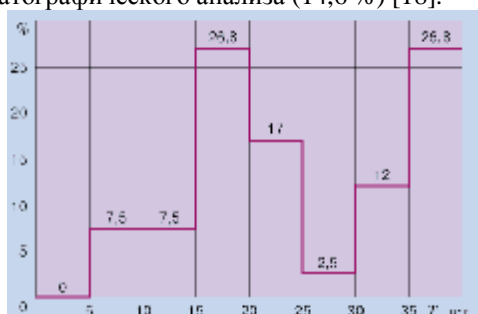


Рисунок 2 – Распределение отказов и повреждений высоковольтных вводов по периодам эксплуатации

Цель работы – сравнительный анализ различных способов повышения надежности высоковольтных вводов.

Материалы и результаты исследования. Повышение надежности высоковольтных вводов можно достичь за счет усовершенствования, как конструкции самих вводов, так и технологии их изготовления. Например, ведущие мировые фирмы и предприятия предложили наряду с вводами с бумажно-масляной изоляцией, которые имеют вполне удовлетворительные характеристики при работе с энергооборудованием до 750 кВ и выше, применять вводы с твердой изоляцией, изготовленной по RBP- и RIP-технологиям [4, 17].

Применение RBP-изоляции (resin bounded paper, бумага, покрытая смолой) исключает вытекание масла через поврежденный ввод, что позволяет избежать таких последствий, как загрязнение окружающей среды и возможные возгорания трансформаторов в случае использования БМИ. Это позволяет снизить рабочую напряженность электрического поля до 1,6-2,0 кВ/мм (тогда как для БМИ она составляет 3,6-4,0 кВ/мм). Следует отметить, что технология изготовления RBP-изоляции приводит к дефектам, которые повышают уровень частичных разрядов во вводах до 250 пКл (как правило, для БМИ он составляет 10 пКл). Это объясняется тем, что при нанесении смолы на бумагу в слоях изоляции остаются газы включения. Такое несовершенство технологии изготовления вводов с RBP-изоляцией сужает их область применения в оборудовании до 110 кВ [7,16,17].

Улучшить изоляционные характеристики вводов также позволяет RIP-изоляция (resin impregnated paper, бумага пропитанная смолой), сущность которой состоит в том, что электроизоляционная бумага наматывается на остов и пропитывается специальным эпоксидным компаундом под вакуумом. Такая технология позволяет получить оптимальное распределение электрического поля и напряженности. Высоковольтные вводы с RIP-изоляцией обладают высокой огнеупорностью и практически устраняют риск пожара. Даже при пробое внутри бака силового трансформатора или бакового масляного выключателя высоковольтный ввод с RIP-изоляцией, являясь "пробкой", препятствует поступлению кислорода внутрь бака и, соответственно, возгоранию трансформаторного масла. Основными преимуществами вводов с внутренней RIP-изоляцией являются: низкие диэлектрические потери (менее 0,5 %) и уровень частичных разрядов при двойном наибольшем фазном напряжении (менее 5 пКл); рабочая напряженность электрического поля 4,0-6,0 кВ/мм; высокая механическая стойкость; высокая термическая стойкость; отсутствие нижней фарфоровой крышки; уменьшение затрат при техническом обслуживании; огнестойкость и взрывоустойчивость; отсутствие ограничений по углу наклона при установке; возможность их использования при очень низких температурах окружающей среды; высокий уровень

безопасности для обслуживающего персонала; малая масса и габариты. Такие вводы экологичны из-за отсутствия утечки масла. Конструкция вводов с RIP-изоляцией позволяет использовать как фарфоровые, так и полимерные покрышки, что позволяет применять их в районах с повышенной сейсмоопасностью [4, 5, 14, 15, 17]. Хотя область их применения ограничена напряжением 330 кВ, однако можно сделать вывод, что вводы с RIP-изоляцией являются на сегодняшний день наиболее перспективными для трансформаторов, выключателей и реакторов до 330 кВ.

ОАО «Украинский институт трансформаторостроения» предлагает для повышения эксплуатационной надежности вводов применять сильфон, который выполнен из двух концентрично расположенных гофрированных поверхностей, охватывающих стягивающую трубу по периметру и соединенных сверху по торцам общим фланцем (рис. 3) [12]. В предложенной конструкции каждая торцевая поверхность сильфона снизу соединена отдельным фланцем, при этом фланец внутренней поверхности герметично соединен со стягивающей трубой. Фланец наружной поверхности герметично соединен с фланцем, связанным с верхней крышкой, причем в последнем выполнены отверстия для свободного прохода масла в полость сильфона.

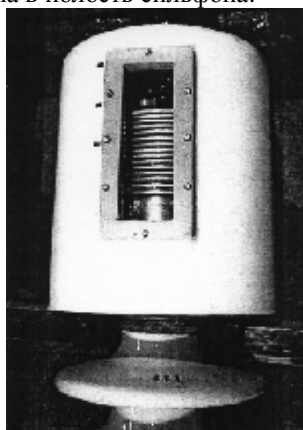


Рисунок 3 – Верхняя часть трансформаторного ввода со специальным сильфонным компенсатором

При температурном увеличении объема масла, давление внутри ввода и сильфона практически не увеличивается и в пределах естественного изменения атмосферного давления, что исключает возможность образования пузырьков газа даже при потере герметичности. Данная конструкция ввода обладает повышенной эксплуатационной надежностью, т.к. уменьшение давления масла снижает вероятность его разгерметизации и попадания пузырьков воздуха в полость ввода, т.е. повышается электрическая прочность ввода.

Кроме того, такая конструкция ввода герметичных маслонаполненных высоковольтных (рис. 4) позволяет отказаться от гибкой герметичной диафрагмы, компенсирующей разницу линейных расширений между стягивающей трубой и фарфоровой

покрышкой, а поверхность сильфона выполнить из материала меньшей жесткости [12].

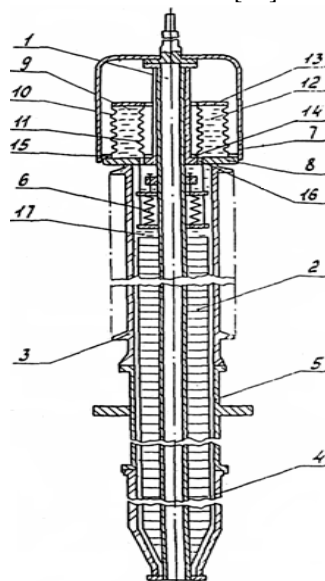


Рисунок 4 – Конструкция герметичного ввода с сильфонным компенсатором [12]:

- 1 – стягивающая труба; 2 – БМИ; 3 – верхняя фарфоровая покрышка; 4 – нижняя фарфоровая покрышка; 5 – соединительная втулка; 6 – пружинный узел; 7 – защитный кожух; 8 – фланец; 9 – сильфон; 10 – внешняя гофрированная поверхность; 11 – нижняя гофрированная поверхность; 12 – полость; 13 – общий фланец; 14, 15 – фланцы; 16 – отверстия; 17 – полость

Для оборудования напряжением до 1100 кВ рекомендуется применять вводы с элегазовой изоляцией, которые могут быть расположены вертикально, горизонтально и под углом (рис. 5). Поскольку элегаз инертен и обладает высокими электроизолирующими свойствами, то вводы с элегазовой изоляцией имеют высокую электрическую прочность, долговечны и надежны при эксплуатации. Однако, нужно отметить, что такие вводы имеют большие эксплуатационные расходы, а элегаз в результате действия разрядов токсичен, и на данный момент вводы с элегазовой изоляцией не нашли широкого распространения [6].

Наряду с конструктивными методами повышения надежности вводов, существуют также технологические методы. Так, от улучшения качества трансформаторного масла, залитого в маслосистемы высоковольтного оборудования, зависит надежность работы всего оборудования. Поскольку на протяжении эксплуатации всего оборудования подстанций необходимо проводить постоянный мониторинг качества масла и, по статистике, через год оно требует очистки, а через 4 - 5 лет – регенерации, то актуален вопрос повышения качества масла различными способами. Одним из таких способов является ингибирование трансформаторных масел антиокислительной присадкой.

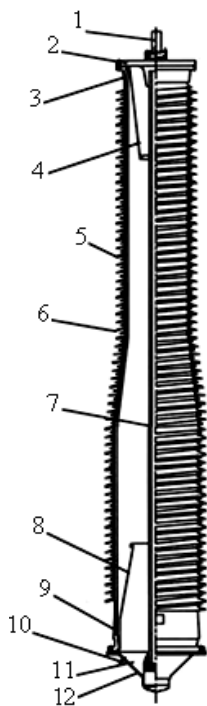


Рисунок 5 – Конструкция ввода с элегазовой изоляцией

Наиболее перспективным представляется,

предложенный белорусскими исследователями, метод вводить в трансформаторное масло фторорганических жидкостей взамен органическим на стадии производства новых вводов [16]. Поскольку фтор является самым сильным окислителем, более сильным, чем кислород, а фторорганическая жидкость инертна по отношению к любым воздействиям, в т.ч. стабильна под действием электрического поля и температуры, то фторорганические жидкости выступают как пожаробезопасные жидкие диэлектрики. Это в перспективе позволяет значительно улучшить удельное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическую мощность масла. Кроме того, оно обладает новыми свойствами и возможностями, такими как: негорючесть; высокая термическая и химическая стабильность; инертность по отношению к металлам, твердым диэлектрикам и резинам; нетоксичность, отсутствие цвета и запаха; возможность подбора жидкостей с различными точками кипения и замерзания; низкая растворимость воды и высокая растворимость газов; отсутствие растворимости любых нефторированных материалов; высокий коэффициент температурного расширения.

Проведенные исследования поведения некоторых масел при постоянном и переменном напряжении позволили составить сравнительную таблицу 1 [16, 19].

Таблица 1 – Характеристики трансформаторных масел

Показатели		Марка масла							
		ТКп	Маслоселек- тивной очи- стки	T-1500У	ГК	ВГ	АГК	МВТ	Перфтор- трансформа- торное масло
Кинематическая вязкость, мм ² /с, при температу- ре	50 °С	9	9	-	9	9	5	-	-
	40 °С	-	-	11	-	-	-	3,5	-
	20 °С	-	28	-	-	-	-	-	-
	-30 °С	1500	1300	1300	1200	1200	-	-	-
	-40 °С	-	-	-	-	-	800	150	-
Температура в закрытом тигле, °С	вспышки, не ниже	135	150	135	135	135	125	95	400
	застывания, не выше	-45	-45	-45	-45	-45	-60	-65	-70 и ниже
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С, %, не более		2,2	1,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,001
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более		895	-	885	895	895	895	-	-
Диэлектрическая проницае- мость		2,1	-	2,2	2,4	2,2	2,1	-	1,8-2
Коррозия на медной пластин- ке		Выдерживает	-	Выдерживает					-
Удельное сопротивление, Ом·м		5·10 ¹⁰	5·10 ¹⁰	5·10 ¹⁰	5·10 ¹⁰	-	-	-	1·10 ¹² - 10 ¹⁵
Показатель преломления, не более		1,505	-	-	-	-	-	-	-
Электрическая прочность, кВ/см		-	-	280	-	-	-	-	500

Из табл. 1 видно, что по электрофизическим па- раметрам (удельному сопротивлению, тангенсу угла

диэлектрических потерь, электрической прочности) перфтортрансформаторное масло значительно превосходит аналогичные показатели любых других масел, к тому же оно имеет низкую вязкость, в том числе в низкотемпературной области, из чего можно сделать вывод, что оно является наиболее перспективным как при новых разработках, так и при модернизации уже существующего высоковольтного оборудования. К сожалению, следует отметить, что в настоящее время это масло еще не нашло широкого применения, т.к. имеет высокую цену, поэтому активно ведутся разработки по созданию новой, более дешевой технологии получения жидкости для перфтортрансформаторного масла.

Выводы. Анализ проведенных исследований по повышению надежности и долговечности вводов различного высоковольтного оборудования энергосистем показывает, что перспективным направлением все же является повышение качества изолирующих материалов, в частности, масла. Применение новых технологий позволяет качественно изменять свойства трансформаторного масла, а темпы развития этих технологий позволяют сделать вывод о том, что стоимость таких усовершенствований будет уменьшаться, а значительное снижение эксплуатационных расходов сможет многократно окупить вложения в производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетика світу та України. Цифри та факти. - Київ: Українські енциклопедичні знання, 2005. – 404 с.
2. Зеличенко А.С. Устройство и ремонт воздушных линий электропередачи и высоковольтных вводов. – М.: Высшая школа, 1985. – 400 с.
3. Шейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
4. Жорняк Л.Б. Проблемы надежности и способы повышения эффективности работы высоковольтных вводов // Электротехника и электроэнергетика. Научный журнал. ЗНТУ, 2005.
5. Бажанов С.А. Техническое обслуживание и ремонт вводов изоляторов высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 293 с.
6. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1975. – 648 с.
7. Славинский А.З. Новые программы и перспективные разработки ЗАО «Мосизолятор» // Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение - 2005».
8. Соколов В.В. Проблемы надежности мощных трансформаторов после длительной эксплуатации // Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение - 2005».
9. Вводы герметичные на класс напряжения 110-220 кВ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОИВ.463.004.
10. Технологическая инструкция 5755565.25207.00001. Контроль и испытания трансформаторного масла.
11. ГҚД 34.20.302-2002. Приемання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Методичні вказівки. НД/Енергетики: Київ, 1998.
12. Опис до патенту на винахід ВАТ «ВІТ» 95083730 от 15.02.2001 г.
13. <http://vvod-kulikov.ru> - ТД «Калуга-энергопоставка».
14. <http://www.marketelectro.ru> - Московский завод «Изолятор» им. А. Баркова.
15. <http://www.sermir.narod.ru/tryd/Posob> - журнал «Электрофизика».
16. <http://www.abb.ru> – Концерн АБВ.
17. Николаев Г.А., Кузнецов А.В. Техническое состояние маслонеполненного оборудования тяговых подстанций и система его комплексного диагностирования. – Вестник <http://www.css-rzd.ru/vestnik-vniizht/v2003-4>.
18. <http://www.belenergo.by> – НПП «БелЭнергоСпецОбор».
19. <http://master-oil.com/theory/3/>.

Стаття надійшла 8.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.