

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Жорняк Л.Б., к.т.н., доц., Осинская В.И., Райкова Е.Ю., Снигирев В.М., к.т.н., доц.
Запорожский национальный технический университет
Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра электрических аппаратов
тел. (0612) 64-46-25, факс: 64-21-41, E-mail: zporoton@zntu.edu.ua

Досліджені питання надійності та експлуатації електричної ізоляції високовольтних вводів, що знаходяться в експлуатації на різних енергозабезпечуючих системах, засоби підвищення терміну використання електротехнічних пристроїв.

Исследованы вопросы надежности и эксплуатации электрической изоляции высоковольтных вводов, которые находятся в эксплуатации на различных энергообеспечивающих системах, методы повышения срока службы электротехнических устройств.

Современное общество требует надежного и бесперебойного электроснабжения. Задачей энергосистем является выработка, передача и распределение электроэнергии требуемого качества и стоимости с минимальным риском для людей и окружающей среды. Наиболее распространенная причина аварийной ситуации на подстанциях с различными мощностями во время эксплуатации – это повреждение силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и реакторов, которые являются одними из главных элементов в системе передачи и распределения электрической энергии. В электроэнергетике Украины, также как и в других странах, в настоящее время в эксплуатации находится большое количество силовых трансформаторов, выключателей и реакторов с длительным сроком службы, который в основном составляет 25 лет, и значительная часть этого оборудования уже отработала этот нормативный срок [1, 16]. Замена такого оборудования требует существенных финансовых вложений и не всегда целесообразна с точки зрения технических и экономических затрат.

Анализ работы электрооборудования на различных станциях показывает, что большая часть отказов и повреждений приходится на высоковольтные маслонаполненные вводы (МНО) до 53%, причем - 76% в основном на вводы трансформаторов (рис. 1). Более низкая надежность трансформаторных вводов отчасти может быть объяснена условиями их работы, влиянием температуры верхних слоев масла, которая может достигать 80°C, существенными заводскими дефектами конструкций и изготовления. Исходя из опыта эксплуатации энергосистем разных стран, имеется возможность существенно продлить срок эксплуатации МНО при условии проведения качественного и полного диагностирования, раннего устранения обнаруженных дефектов путем недорогого восстановительного ремонта. В [17] отмечается, что в российских энергосистемах с оборудованием 110 и 220 кВ наибольшее число повреждений пришлось на 1997...1999 гг. Некоторое снижение числа повреждений вводов и трансформаторов после 2000 г. объясняется упомянутым выше изъятием из эксплуатации дефектного оборудования, произведенного в предыдущие годы. Более вероятно, что это снижение повреждаемости является временным явлением и если не принять мер, то в дальнейшем и у нас на Украине

число повреждений электрооборудования с учетом его массового старения и низких темпов технического перевооружения будет расти. Поэтому весьма актуальна проблема обеспечения надежности и продления срока службы этого оборудования, за счет улучшения качества работы высоковольтных вводов [2, 16, 17].

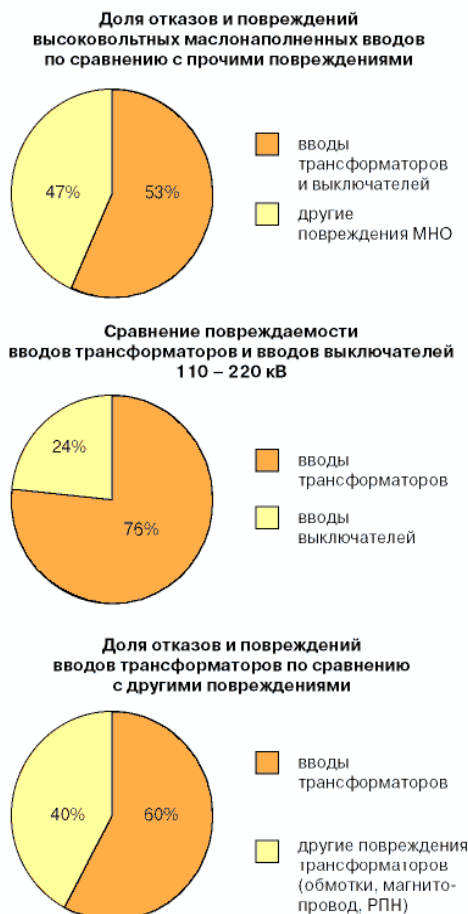


Рис. 1. Показатели доли отказов и повреждений оборудования энергосистем

Классификация отказов и повреждений высоковольтных вводов, трансформаторов и масляных выключателей 110, 220 кВ свидетельствует о том, что во вводах наиболее частыми являются: недопустимое ухудшение диэлектрических характеристик (39,2%); пробой и разрушение остова (14,6%), неудовлетворительные ре-

зультаты хроматографического анализа (14,6%); нарушение герметизации ввода, течь масла (14,6%); разрушение нижней фарфоровой покрывки (12,2%), что приводит к недопустимому ухудшению диэлектрических характеристик оборудования в целом [17].

Анализ распределения отказов и повреждений высоковольтных вводов и силовых трансформаторов в зависимости от периода их эксплуатации позволяет сделать следующее заключение, что наибольшее количество отказов и повреждений высоковольтных вводов наблюдается после 15 и 30 лет эксплуатации, а силовых трансформаторов — после 10 и 30 лет. Повреждаемость МНО на уровне 15...20% в первые 10...15 лет работы объясняется проявлением в основ-

ном существенных заводских дефектов конструкции и изготовления.

Ведущие мировые фирмы и предприятия для решения проблемы повышения надежности высоковольтных вводов и для улучшения, в конечном счете, качества работы потребителей предлагают различные варианты. Широко распространены высоковольтные вводы с такими видами изоляции как, бумажно-масляная изоляция (БМИ), RBP-изоляция (resin bounded paper, бумага, покрытая смолой) и RIP-изоляцией (resin impregnated paper, бумага пропитанная смолой). Данные виды изоляции обеспечивают необходимые характеристики, которые указаны в таблицах 1 и 2 [2, 14, 16 18, 19]

Таблица 1

Требования к изоляции вводов с твердой, бумажно-масляной и RIP-изоляцией (класс напряжения 110 кВ)

Вводы с бумажно-масляной изоляцией			Вводы с твердой RBP-изоляцией			Вводы с твердой RIP-изоляцией		
Нормы по ГОСТ 10693-81	Нормы по IEC 137	Нормы "АББ ЭИ Бушинг"	Нормы по ГОСТ 10693-81	Нормы по IEC 137	Нормы "АББ ЭИ Бушинг"	Нормы по ГОСТ 10693-81	Нормы по IEC 137	Нормы "АББ ЭИ Бушинг"
Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции								
Не выше 0,7% при напряжении 107 кВ	Не выше 0,7% при напряжении 74,6 кВ	Не выше 0,55% на всех ступенях напряжения от 10 кВ до однофазного испытательного 265 кВ	Не выше 1,0% при напряжении 76 кВ	Не выше 1,5% при напряжении 74,6 кВ	Не выше 0,75% при напряжении 76 кВ	Нормы на RIP изоляцию в ГОСТ не установлены	Не выше 0,7% при напряжении 74,6 кВ	Не выше 0,5% на всех ступенях напряжения от 10 кВ до однофазного испытательного 265 кВ
Прирост тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции								
Не выше 0,3% при изменении напряжения от 38 кВ до 108 кВ	Не выше 0,1% при изменении напряжения от 74,6 кВ до 123 кВ	Не выше 0,03% при изменении напряжения от 10 кВ до 170 кВ	Не выше 0,3% при изменении напряжения от 38 кВ до 108 кВ	Не выше 0,4% при изменении напряжения от 74,6 кВ до 123 кВ	Не выше 0,05% при изменении напряжения от 38 кВ до 109 кВ	Нормы на RIP изоляцию в ГОСТ не установлены	Не выше 0,1% при изменении напряжения от 74,6 кВ до 123 кВ	Не выше 0,05% при изменении напряжения от 38 кВ до 123 кВ
Уровень частичных разрядов								
Не выше 10 пКл при напряжении 109 кВ	Не выше 10 пКл при напряжении 107 кВ. Не выше 5 пКл при напряжении 74,6 кВ	Не выше 5 пКл при напряжении 109 кВ после выдержки при испытательном напряжении	Не выше 10 пКл при напряжении 109 кВ	Не выше 250 пКл при напряжении 107 кВ. Не выше 100 пКл при напряжении 74,6 кВ	Не выше 250 пКл при напряжении 109 кВ. Не выше 100 пКл при напряжении 76 кВ	Нормы на RIP изоляцию в ГОСТ не установлены	Не выше 10 пКл при напряжении 107 кВ. Не выше 5 пКл при напряжении 74,6 кВ	Не выше 5 пКл при напряжении 142 кВ.

Таблица 2

Требования к изоляции вводов с твердой, бумажно-масляной и RIP-изоляцией (класс напряжения 220 кВ)

Вводы с бумажно-масляной изоляцией			Вводы с твердой RIP-изоляцией		
Нормы по ГОСТ 10693-81	Нормы по IEC 137	Нормы "АББ ЭИ Бушинг"	Нормы по ГОСТ 10693-81	Нормы по IEC 137	Нормы "АББ ЭИ Бушинг"
Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции					
Не выше 0,7%	Не выше 0,7%	Не выше 0,55%	Нормы на RIP изоляцию в ГОСТ не установлены	Не выше 0,7% при напряжении 74,6 кВ	Не выше 0,5% на всех ступенях напряжения от 10 кВ до однофазного испытательного 265 кВ
Прирост тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции					
Не выше 0,3%	Не выше 0,1%	Не выше 0,03%	Нормы на RIP изоляцию не установлены	Не выше 0,1%	Не выше 0,05%
Уровень частичных разрядов					
Не более 10 пКл при $U=1,5 U_{ф}$	Не более 10 пКл при $U=U_{ф}$ Не более 5 пКл при $U=1,05U_{ф}/\sqrt{3}$	Не более 5 пКл при $U=3 U_{ф}$	Нормы на RIP изоляцию в ГОСТ не установлены	Не более 10 пКл при $U=U_{ф}$ Не более 5 пКл при $U=1,05U_{ф}/\sqrt{3}$	Не более 5 пКл при $U=2U_{ф}$

КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ДАННОЙ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время несколько сот тысяч вводов, находящихся в эксплуатации в энергосистемах различных стран, – это вводы с бумажно-масляной изоляцией (БМИ). БМИ имеет целый ряд достоинств, таких как: достаточно высокая электрическая прочность (кратковременная и длительная), относительно низкий уровень диэлектрических потерь, область применения до 750 кВ, хорошая совместимость с изоляцией силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов. Во вводах с БМИ трансформаторное масло осуществляет одновременно две функции: диэлектрика и теплоотводящей среды. Однако, известны и существенные недостатки БМИ и, как следствие, проблемы эксплуатации вводов, что приводит к относительно высоким затратам при обслуживании. Изменение качества масла и его диэлектрических характеристик, и как следствие ухудшение общих изоляционных характеристик оборудования, приводит к необходимости постоянного мониторинга герметичности вводов и давления масла в них, периодическому отбору масла для определения его характеристик. В связи с этим предъявляются повышенные требования к качеству масла, такие как обеспечение необходимого охлаждения ввода, за счет малых динамической вязкости, температуры застывания при снятой нагрузке в условиях холодного климата. Другими словами, трансформаторное масло не должно изменять свой химический состав в течение длительного времени, ухудшая тепловую изоляцию и вызывая перегрев ввода, за счет выделенных осадков [3,7,8,10,16]. Интенсивная работа по созданию новых видов изоляции ведется, поскольку при эксплуатации маслonaполненных вводов часто возникает потенциальная опасность пробоя ввода и возможная утечка масла из него, трансформатора, выключателя или реактора. При этом реальна опасность загрязнения окружающей среды, а пробой изоляции или перекрытие бумажного остова на вводе, как правило, влекут за собой разрушение нижней фарфоровой покрывки и возможные последующие пожары трансформаторов, выключателей или реакторов.

Альтернативой вводам с масляной изоляцией является применение вводов с твердой изоляцией, изготовленной по RBP- и RIP-технологиям (рис. 2).

Сущность RBP-изоляции заключается в том, что основой ввода является твердое изоляционное тело, состоящее из электроизоляционной лакированной бумаги, намотанной на латунную трубу. При намотке тела на бумагу наносятся графитовые обкладки для выравнивания электрического поля. Для защиты изоляционного тела от увлажнения между ним и фарфоровым изолятором находится упругий наполнитель "Микагель" [13, 15]. Применение такой изоляции исключает вытекание масла через поврежденный ввод, поэтому не приводит к таким тяжелым последствиям, как при использовании БМИ. Однако технология производства вводов с RBP-изоляцией несовершенна. Так, смола, которая наносится на бумагу при намотке, проникает только в поверхностный слой, отсюда значительная часть объема бумаги остается непропитанной, т. е. в итоге содержит большое количество

газовых включений. А это в свою очередь приводит к ухудшению диэлектрических характеристик по сравнению с БМИ, несмотря на снижение рабочих напряженностей электрического поля с 3,6-4,0 кВ/мм, для БМИ, до 1,6-2,0 кВ/мм, для RBP-изоляции. Так, уровень частичных разрядов во вводах с RBP-изоляцией достигает 250 пКл, в то время как во вводах с БМИ этот уровень составляет 10 пКл.

Поэтому область применения RBP-изоляции ограничена (не более 110 кВ), т.к. новые методики диагностики, внедряющиеся на силовых трансформаторах и высоковольтных выключателях, предполагают проведение исследований под рабочим напряжением, а наличие ввода с уровнем частичных разрядов до 250 пКл создает серьезные проблемы для выполнения диагностических работ [6, 15, 16].

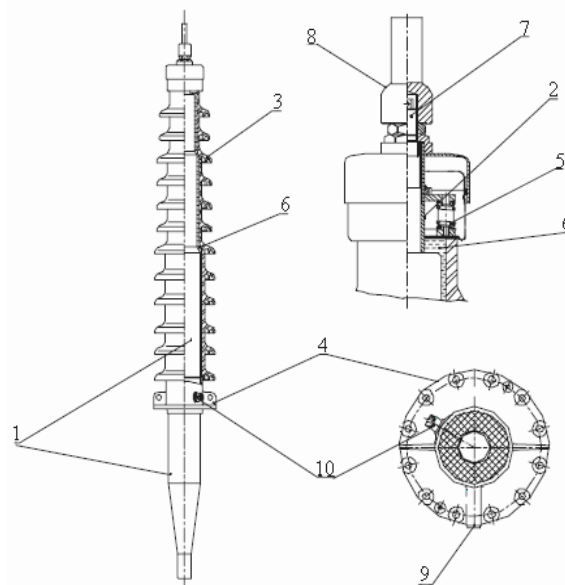


Рис. 2. Конструкция вводов с RBT- и RIP- изоляцией:
1 – тело ввода; 2 – латунная труба; 3 – фарфоровый изолятор; 4 – фланец; 5 – пружинная система; 6 – наполнитель "Микагель"; 7 – внутренняя контактная шпилька; 8 – внешняя контактная шпилька; 9 – деаэрационное отверстие; 10 – тест-вывод

Сущность RIP-изоляция заключается в том, что остов, намотан из электроизоляционной бумаги и пропитан специальным эпоксидным компаундом под вакуумом. Ввод с такой изоляцией иначе еще можно назвать вводом конденсаторного типа с твердой RIP-изоляцией. Основной конструктивной частью этого ввода является его изоляционный остов, который изготавливается из специальной крепированной бумаги с пропиткой эпоксидной смолой и конденсаторными обкладками из алюминиевой фольги [6, 13, 14, 16].

Применение вводов с RIP-изоляцией значительно улучшают изоляционные характеристики, за счет отсутствия газовых включений в остовах, позволяет получить оптимальное распределение электрического поля и напряженности. Также 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 поступле-

нию кислорода внутрь бака и, соответственно, возгоранию трансформаторного масла. Основными преимуществами вводов с внутренней RIP-изоляция и полимерной наружной изоляцией являются:

- низкие диэлектрические потери, менее 0,5%;
- низкий 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;
- отсутствие необходимости технического обслуживания;
- абсолютно сухая конструкция, отсутствие изоляционного масла выше опорного фланца ввода;
- огнестойкость. Исключена опасность взрыва и пожара трансформатора из-за отсутствия утечек масла через ввод;
- взрывоустойчивая конструкция. В случае повреждения фарфорового изолятора в результате внешних воздействий сухой RIP-ввод остается работоспособным. При использовании внешней полимерной изоляции отсутствует разброс осколков;
- пригодность для эксплуатации в местах с повышенной сейсмичностью, за счет использования эластичных материалов с хорошей ударпрочностью;
- превосходные характеристики при работе в условиях загрязнения за счет гидрофобной силиконовой поверхности полимерной крышки;
- не разбивается при погрузке-разгрузке, транспортировке и монтаже;
- отсутствуют ограничения по углу наклона при установке;
- может использоваться при очень низких температурах окружающей среды;
- высокий уровень безопасности для обслуживающего персонала;
- малая масса и габариты;
- вводы экологичны, т.к. нет опасности загрязнения окружающей среды по причине утечек масла.

Применение вводов с RIP-изоляцией позволяет использовать, как альтернативы фарфоровым крышкам, полимерные изоляторы. Такие изоляторы представляет собой стеклоэпоксидную трубу с нанесенными резиновыми ребрами и двумя металлическими фланцами для крепления к соединительной втулке и верхнему фланцу ввода. Пространство между изоляционным остовом и полимерным изолятором заполняется либо трансформаторным маслом, либо вспененным полиуретаном. Полимерные изоляторы имеют ряд преимуществ, таких как, повышенную стойкость к воздействию окружающей среды, меньший вес, а также меньший риск повреждений во время транспортировки. Это позволяет применять такие вводы в сейсмонеустойчивых районах [4, 5, 13, 14, 16]. В эксплуатации высоковольтные вводы с RIP-изоляцией требуют минимального ухода, а именно, чистка фарфора по мере его загрязнения и измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости периодически один раз в шесть лет. Таким образом, вводы с RIP-изоляцией являются на сегодняшний

день наиболее перспективными для трансформаторов, выключателей и реакторов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВВОДОВ С БМИ

Ведущие разработчики высоковольтных вводов, такие как ЗАО "Мосизолятор", предлагают применить специальные металлические сильфонные компенсаторы для надежной герметизации конструкции вводов. Сильфонные компенсаторы обладают малой жесткостью и компенсируют непропорциональность температурных изменений соединительной трубы, фарфоровых крышек и масла. В этом случае нет необходимости в применении манометров, соединительных трубок и диафрагм, а также не требуется постоянный контроль и регулировка давления масла [14].

Концерн АВВ предлагает взамен сильфонного компенсатора температурных изменений применить азотную подушку. Это позволяет устранить избыточное давление масла во вводе, снизить массу всей конструкции, упростить технологический процесс изготовления электротехнического устройства и, следовательно, снизить себестоимость изделия. Улучшение системы индикации уровня масла во вводе позволяет вовремя определить аварийное состояние аппарата и принять соответствующие меры [4, 5]. Недостатком такого технического решения является то, что при недостаточном объеме азота в зимнее время может образоваться вакуум в верхней части ввода, а отсутствие надежной герметизации может привести к попаданию воды во ввод с последующим его пробоем [5, 16].

Уменьшить уровень частичных разрядов до 5 Кл, а также тангенс угла диэлектрических потерь до 0,005, шведские разработчики предлагают за счет применения ввода типа ВОИТ (ввод oil impregnated paper) (рис.3). Такие вводы состоят из электроизоляционной бумаги, намотанной на трубу из алюминиевого сплава. В бумагу вложены алюминиевые обкладки для выравнивания электрического поля. Верхний и нижний фарфоровые изоляторы и монтажный фланец закреплены концевыми гайками на центральной трубе, уплотнения выполнены маслостойкими резиновыми прокладками, что обеспечивает длину пути утечки, которая соответствует условиям зон с сильной степенью загрязнения. Кольцевое пространство между телом ввода и фарфоровыми изоляторами заполнено очищенным дегазированным трансформаторным маслом, которое обладает хорошими диэлектрическими свойствами, высокой стабильностью против окисления [16].

Российские исследователи предлагают вводить в трансформаторное масло фторорганические жидкости взамен органических на стадии производства новых вводов [15]. 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.

Замена атома водорода на атом фтора позволяет использовать перфтортрансформаторное масло в ка-

честве морозостойкой смазки, поскольку при нормальных условиях оно становится твердым веществом. Применение перфтортрансформаторного масла в перспективе позволит значительно улучшить удельное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическую мощность, поскольку обладает новыми свойствами и возможностями, такими как:

- негорючесть;
- высокая термическая и химическая стабильность;
- инертность по отношению к металлам, твердым диэлектрикам и резинам;

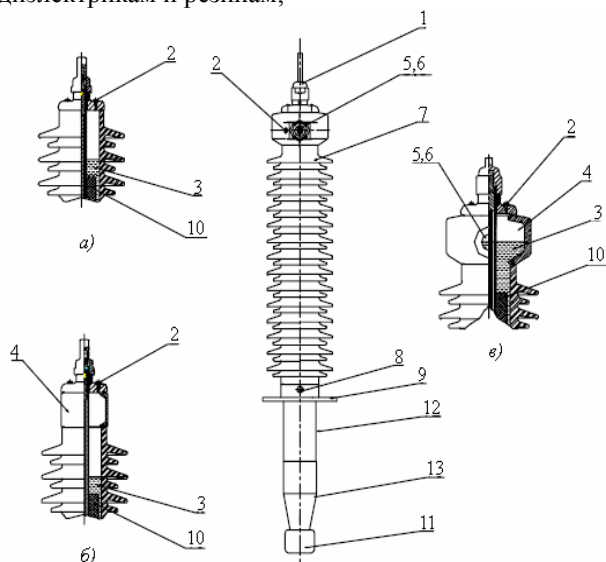


Рис. 3. Конструкция ввода типа ВОИТ [15]:

а), б) - без указателя масла; в) - с указателем масла;
 1 - внешняя контактная шпилька; 2 - отверстие для залива масла, герметизирующееся болтом с шайбой и резиновым уплотнением; 3 - масло; 4 - расширитель; 5 - стекло маслоуказателя; 6 - резиновое уплотнение; 7 - фарфоровый изолятор; 8 - тест-вывод; 9 - фланец; 10 - остов ввода; 11 - экран; 12 - удлинение фланца; 13 - фарфоровый изолятор

- 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.

Следует отметить, что в настоящее время в энергетике эти жидкости еще не нашли широкого применения, т.к. обладают высокой ценой, потому активно ведутся разработки по созданию новой, более дешевой, технологии получения жидкости для перфтортрансформаторного масла.

Рассмотренные технические решения позволяют повысить эффективность работы трансформаторов, выключателей и реакторов, и, как следствие, повысить надежность работы энергообеспечивающих систем в целом. Одним из главных путей поддержания эксплуатационной надежности и продления рабочего ресурса оборудования является организация эффек-

тивного контроля его состояния в процессе эксплуатации. Поэтому при определении перспективных задач и программ развития первостепенное 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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Энергетика світу та України. Цифри та факта. - 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] Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. 3-е издание - М.; Энергоатомиздат, 1983 г. - 296 с.
- [4] Жорняк Л.Б. Проблемы надежности и способы повышения эффективности работы высоковольтных вводов. Электротехника и электроэнергетика. Научный журнал. ЗНТУ, 2005.
- [5] Славинский А.З. Новые программы и перспективные разработки ЗАО "Мосизолятор". Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции "Трансформато-ростроение - 2005".
- [6] Соколов В.В. Проблемы надежности мощных трансформаторов после длительной эксплуатации. Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции "Трансформато-ростроение - 2005".
- [7] Вводы герметичные на класс напряжения 110-220 кВ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОИВ.463.00.
- [8] Инструкция по монтажу трансформаторов ВБИЕ.672834.025 ИМ.
- [9] Технологическая инструкция 5755565.25207.00001. Контроль и испытания трансформаторного масла.
- [10] ГКД 34.20.302-2002. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Методичні вказівки. НД/Енергетики, Київ 1998 г.
- [11] ГКД 34.20.302-2002. Норми випробування електрообладнання. Видання офіційне. Київ, Міністерство палива та енергетики України, Об'єднання "Інвестиційний фонд розвитку енергетики", 2002 г.
- [12] МЭК 60076-1 Изд.2.1.2000-04. Международный стандарт. Силовые трансформаторы. Часть 1: общие положения.
- [13] <http://vvod-kulikov.ru> - ТД "Калуга-энерго-поставка".
- [14] <http://www.marketelectro.ru> - Московский завод "Изолятор" им. А. Баркова.
- [15] <http://www.sermir.narod.ru/tryd/Posob> - журнал "Электrofизика".
- [16] <http://www.abb.ru> - Концерн АБВ.
- [17] Г.А. Николаев, А.В. Кузнецов. Техническое состояние маслонаполненного оборудования тяговых подстанций и система его комплексного диагностирования. - Вестник <http://www.css-rzd.ru/vestnik-vniizht/v2003-4>.
- [18] <http://www.belenergo.by> - НИП "БелЭнергоСпецОбор".

Поступила 18.10.2007