

## **АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ 110-750 КВ**

В.М. Погостин, А. Дробышевский, Е.И. Остапенко, ГУП ВЭИ, г. Москва  
В.В. Соколов, В.А. Горобец, ЗТЗ - Сервис, Украина

Глобальной задачей электроэнергетики на современном этапе является поддержание работоспособности электрооборудования в частности трансформаторов тока (ТТ) после расчетного срока службы (25-30 лет). В связи с этим ВЭИ и НИЦ ЗТЗ-Сервис с участием ЗЗВА в течение нескольких лет осуществляет программы, направленные на определение фактического состояния ТТ и их остаточного ресурса, исследование механизма повреждений, выявление оборудования, требующего особого внимания или замены, внедрение эффективной системы контроля без отключения от сети, а также на разработку технологий по восстановлению состояния изоляционной системы, особенно в полевых условиях.

### **Парк трансформаторов тока**

Основу парка ТТ в СНГ составляют U-образные ТТ с изолированной первичной обмоткой типа ТФКН и ТФУМ, находящиеся в работе с 60х годов, а также рывовидные ТТ с изолированной вторичной обмоткой типа ТРН, ТФРМ. Серия ТФРМ-330 находится в работе с 1971г., ТФРМ 500-с 1977г., ТФРМ 750-с 1974г. С 1976 г. конструкции были герметизированы; имеются 4 вида узлов герметизации.

ТФРМ-750 совмещены с неподвижным контактом подвесного разъединителя, закрепленным в верхней части и непосредственно подвергаются воздействиям коммутаций разъединителя. Возможны причины отказов и диагностические характеристики для разных конструкций отличаются.

### **Особенности эксплуатации:**

Сравнительно низкие нагрузки. Высокий уровень напряжения особенно в некоторых сетях 500кВ и 750 кВ, где длительное повышение напряжения превышает максимально допустимые величины до 10-20 %. Так, например, на КаАЭС коммутация ЛЭП-750 сопровождается длительными повышением фазного напряжения до 510-537 кВ при максимальном допустимом 455 кВ.

### **Виды и причины отказов**

Превалируют два типа отказов: 1) «холодные» отказы в зимнее время либо после резкого понижения температуры ТТ, обусловленные в основном нарушением пропитки изоляции в процессе хранения, проникновением воздуха и образованием вакуума при охлаждении, и в конечном счете развитием ионизационного пробоя. Первый тип отказов и возникает в основном в начальный период эксплуатации ТТ, имеющих характерный узел герметизации. 2) «горячие» отказы возникают в наиболее жаркое время года, и связаны в основном с развитием теплового пробоя после длительной эксплуатации.

Надежность ТТ заметно зависит от методов обслуживания. Например, на АЭС Украины в серии ТФРМ-750 (192 фазы), где широко внедрена диагностика под рабочим напряжением, в последние 8-10 лет не отмечено ни одного отказа. В то же время на АЭС России (165 фаз) произошло 5 отказов.

## Методология и методы диагностики

Разработана функциональная методология, направленная на выявление наиболее вероятных дефектов в рабочих условиях. Методы диагностики включают измерение  $\text{tg}\delta$  и емкости под напряжением с учетом вариации температуры, термовизионное обследование, специальный анализ малых проб масла, контроль изоляции линейных выводов, а также измерение параметров ЧР и  $\text{tg}\delta$  в зависимости от напряжения.

### Измерение $\text{tg}\delta$ под рабочим напряжением

Техника измерения позволяет получать точность на уровне 0,1%

Для ТФРМ определены следующие характеристики нормального состояния:

$\text{tg}\delta \leq 0,5\%$  при  $t=20-30\text{C}$  и прирост при повышении температуры

$$\text{tg}\delta(t) \leq \text{tg}\delta(t_0) \cdot e^{-0,015(t-t_0)}$$

$$\text{tg}\delta(t) \leq \text{tg}\delta(t_0) \cdot e^{0,015(t-t_0)}$$

### Характеристики ЧР

Измерение ЧР целесообразно при наличии симптомов дефектного состояния, а также для проверки качества ремонтных работ. В полевых условиях получен минимальный уровень сигналов над уровнем помех менее 10 пК при испытании от отдельного источника, что позволяет осуществить качественную проверку состояния оборудования. Показана необходимость измерения, кроме максимального заряда ЧР, также частоту повторения сигналов и среднюю мощность.

### Характеристики масла

Эффективные показатели, с учетом ограниченных объемов проб, отличаются от нормируемых. Состояние электрической прочности характеризует растворенная и связанная влага, а также содержание воздуха (герметичность). Старение характеризуется образованием проводящих и полярных примесей (увеличение  $\text{tg}\delta$ ,  $\Delta\epsilon$  и снижение  $\rho_v$ ), а также увеличение показателя мутности, числа омыления при относительно небольших величинах кислотного числа, снижением поверхностного натяжения. ХАРГ, за исключением анализа воздуха,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , эффективен на стадии развития повреждения. Измерение фуранов целесообразно при симптомах диэлектрического перегрева.

### Термовизионный контроль

Эффективен при повышенных диэлектрических потерях особенно в ТФКН и ТФУМ. Эффективность метода ограничена при контроле ТФРМ, где все основные потери сосредоточены в «голове». Данные обследования показывают ошибочность нормированной величины допустимого отличия температур в аналогичных зонах ТТ трех фаз - 0.3 °С. Разница температур ТТ разных фаз находится в диапазоне от 0.4 до 2.6 °С. В зависимости от времени суток разница температур на одной и той же группе колеблется от 0.08 до 2.9 °С.

### Результаты обследования

Выявлено, что срок службы изоляции ТТ может существенно превышать 25-30 лет. После длительной эксплуатации даже негерметизированных конструкций состояние масла и изоляции может соответствовать требованиям к новому оборудованию. Симптомы дефектного состояния определяются в 10-15% парка. Соответственно, вместо традиционно нормированного периодического контроля всего парка целесообразно проведение комплексного обследования и выявление части оборудования, требующего специального контроля и мер по продлению срока службы.

### Выявленные типовые дефекты

- Снижение сопротивления изоляции первичной обмотки по отношению к маслорасширителю, вызванное попаданием влаги, разрядами и выгоранием уплотнения

проходного изолятора и изоляционной втулки. Возможно образование течи масла в зоне выгорания.

- Нарушение герметичности (повышенное содержание воздуха, наличие влаги).
- Старение масла с образованием проводящих и полярных продуктов и поверхностно активных веществ; особая тенденция аномального старения масла в верхних ступенях ТФРМ-750, залитых маслом с повышенным содержанием ароматических углеводородов.
- В некоторых ТТ рост  $tg\delta$  масла сопровождается ростом  $tg\delta$  изоляции с тенденцией увеличения при повышении температуры.

**Повышенная чувствительность ТФРМ к любым процедурам, приводящих к попаданию воздуха, особенно при доливке маслом.**

Проверка ТТ-750 после «типовой» доливки масла показала увеличение интенсивности ЧР от 30 до 1000-1600 пК и содержания воздуха от 0,8 до 9,9%. Значительное увеличение уровня ЧР выявлено также после транспортировки без расширителя.

**Запорожская АЭС (51 фаза ТФРМ-750 и три фазы ТФРМ-330)**

НИЦ ЗТЗ-Сервис совместно с ЗЗВА начал работы по обеспечению надежной работы ТТ с 1998 г. по схеме: диагностика и мониторинг состояния - восстановление дефектных на ЗЗВА и в полевых условиях. Идентифицированы конструкции и типы узлов герметизации. Выполнено обследование по специально разработанной комплексной программе.

Освоена метрологически достоверная методика измерения  $tg\delta$  и емкости под рабочим напряжением. Разрабатывается методика автоматизированного контроля диэлектрических характеристик под рабочим напряжением. Симптомы дефектов в основном обратимого характера, но требующие принятия мер по восстановлению состояния, обнаружены примерно на 15% парка.

Выявлены 12 фаз, имеющих снижение и в некоторых случаях повреждение изоляции линейных выводов; 7 фаз, имеющих повышенное старение масла, в том числе в 6-ти фазах значение  $tg\delta$  масла превышает нормы. Старение масла не приводит к появлению ЧР, но вызывает рост потерь в остоле. 3 ступени выведены из работы из-за повышения  $tg\delta$  изоляции. В 5 ступенях обнаружена повышенная влажность. Отказов в работе не было.

**Характеристики изоляции и масла в отбракованной ступени ТФРМ-750**

Показатели масла		Показатели изоляции	
Кислотное число мг КОН/г*	0,047		
Поверхностное натяжение мН/м	29,8	$tg\delta$ % при $U_{раб}$ и 25С	0,61
Коэффициент полярности	0,07	$tg\delta$ % при $U_{раб}$ и 60С	1,1
Влагосодержание масла ppm	14,2	$q_{чр}$ при $U_{раб}$ , пК	9,3
$tg\delta$ 90°С*	7,75	$R_{из}$ «расширитель-Л», КОм	15
$\rho_v$ при 90°С ГОм·м*	6		
Газосодержание, %	9,4		

**Запорожская ГРЭС 69 фраз ТРН-ТФРМ-330 после 27-30 лет работы**

Состояние изоляции удовлетворительное, величина  $tg\delta$  при рабочем напряжении не превышает 0,5%. Результаты измерения при напряжении 10 кВ в большинстве случаев оказывались недостоверными из-за больших помех. На 22 обнаружено выгорание изоляции линейного вывода, на 17 ед. маслорасширитель находился под «плавающим» потенциалом.

В 3-х фазах обнаружено аномальное старение масла

Показатель	ТРН-330		
	№178	№89	№730
$tg\delta$ , % при 90 °С	3,62	5,6	8,2
$\rho_v$ ГОм·м при 90С	5	4	4
Кислотное число, мг КОН/г	0,056	0,058	0,068

Показатель	ТРН-330		
	№178	№89	№730
Поверхностное натяжение при 25С	31,8	29,8	30,9
Цвет (шкала АТSM)	2,5	2,5	2,5

### Кольская АЭС ТРН-330 (6 фаз), ТФКН-330 (12фаз), ТФЗМ-110 и 150

После 25-30 лет работы необратимых повреждений в изоляции не обнаружено. Выявлено старение масла в 3-х фазах ТРН-330 и 3-х ТФКН-330

Тип ТТ	№	Кислотное число мгКОН/г	Число омыления мгКОН/г	$\sigma$ мН/м	tg $\delta$ 90С %	$\rho_v$ ГОм·м	$\Delta\epsilon$	Мутность %
ТФКН-330	1	0,045	0,167	30,1	4,02	4	0,09	87
	2	0,034	0,253	32,3	3,91	5,3	0,09	84,5
	3	0,034	0,27	32	2,8	7,3	0,09	82,8
ТРН-330	1	0,047	0,12	31,9	8,2	3	0,08	81,8
	2	0,044	0,12	32	7,8	4	0,08	81,8
	3	0,034	0,08	35	6,8	5	0,08	76

### Восстановление ТТ в полевых условиях

Основными задачами является очистка, дегазация и регенерация масла и обработка поверхности остова.

Выявлено, что простая замена масла является недостаточной. После полного восстановления характеристик масла происходит процесс выделения продуктов старения из поверхностных слоев изоляции и постепенное ухудшение масла. Например, после достижения tg $\delta$ <sub>90</sub> 0,16%<sub>90</sub> после 45 часов отстоя произошло повторное увеличение tg $\delta$  до 5%. Разработанная технология регенерации масла в ТТ с использованием установки Fluidex позволяет восстановить состояние масла до уровня требований, предъявляемым к новому маслу, заливаемому в оборудование.

### Характеристики масла в ТФРН-750 до и после регенерации

Наименование показателей	До регенерации	После регенерации	Нормы МЭК 60422
Цвет (шкала ASTM)	1,5	1,0	2,0
Кислотное число мг КОН/г	0,047	0,011	0,08
Поверхностное натяжение мН/м	29,8	41,4	Мин.35
Коэффициент полярности	0,07	0,01	
Влагосодержание масла ppm	14,2	5,0	5
tg $\delta$ 90 °С*	7,75	0,207	1,0
$\rho_v$ при 90 °С, ГОм·м*	6	330	10

Разработаны технологические программы по замене изоляции линейных выводов, дефектных маслоуказателей, доливки масла. Для возможности эффективного контроля масла модернизирована конструкция маслоотборника.

Для контроля качества ремонтных работ следует установить нормы на характеристики масла в соответствие с нормами МЭК и определить нормы на значения интенсивности ЧР после регенерации изоляции на уровне 10-20 пК. Измерение tg $\delta$  при рабочем напряжении и прироста tg $\delta$  после повышения напряжения, например, до 1,1  $U_{\text{наиб.раб.}}$  является полезным, но не заменяет необходимости измерения ЧР.