

## ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА 330-750 КВ НА БЛОКАХ АЭС РОССИИ

*Соколов В.В.,  
Технический директор НИЦ ЗТЗ-Сервис,  
руководитель рабочей группы СИГРЭ 12.18 «Регулирование жизни трансформаторов»*

### **Общие тенденции повреждаемости.**

Исследования СИГРЭ показывают, что на долю трансформаторов 220-750 кВ приходится более 50% от общего числа отказов всех измерительных трансформаторов. Серьезные повреждения ТТ отмечались во многих энергосистемах (Канада, США, Франция, Финляндия и др.). Удельная повреждаемость ТТ в среднем в мире составляет 0.4-0.6% с тенденцией увеличения с повышением класса напряжения. СИГРЭ отмечает, что внедрение мониторинга ТТ под напряжением позволяет значительно уменьшить число отказов.

Удельная повреждаемость ТТ в странах СНГ в среднем не выше указанных цифр. Однако на отдельных объектах повреждаемость превышает 5-10%. Кроме того, каждый случай повреждения вызывает особое внимание, поскольку взрыв ТТ представляет серьезную опасность для персонала и соседнего оборудования.

В последнее время вызывают озабоченность участвовавшие случаи повреждений ТТ серии ТФРМ (особенно ТФРМ-500). Отказы имеют избирательный характер по месту эксплуатации ТТ, а также по времени выпуска и длительности хранения в транспортном состоянии. Отмечается возникновение характерных «холодных» отказов в зимнее время, связанных преимущественно с развитием ионизационного пробоя конденсаторной изоляции, и «горячих» отказов в наиболее жаркое время года, связанных в основном с развитием теплового пробоя

### **Особенности конструкции ТТ**

Имеются три вида конструкций ТТ:

**Звеньевая – ТФНК, ТФЗМ**, с изоляцией обмоток бумажно-масляного типа.

Конструкция имеет большие запасы электрической прочности и, соответственно высокую надежность изоляции. Недостатками являются повышенная металлоемкость, большой вес и габариты, а также ограничения по току и мощности обмоток.

**U-образная – ТФКН, ТФУМ**, с изолированной первичной обмоткой. Составляет основу парка ТТ 220-330 кВ, выпущенных в 60-х – начале 70-х. Недостатками являются ограничения по току и чувствительность к воздействиям токов КЗ.

Летом 2001 произошли 4 повреждения аппаратов 330 кВ из-за развития теплового пробоя.

**Рымовидная – ТРН, ТФРМ, ТФРМ** с изолированной вторичной обмоткой признана во всем мере как оптимальная с точки зрения технических характеристик. В 70-е годы заменила U-образную конструкцию.

Обе последние конструкции имеют бумажно-масляную изоляцию конденсаторного типа. Основы выбора конденсаторной изоляции и методика её расчета были разработаны еще в 60е годы и достоверность разработок проверена длительной эксплуатацией соответствующих аппаратов: вводов и трансформаторов тока. Во всех изделиях рабочие напряженности выбраны по условию недопущения начальной ионизации при рабочем напряжении. Величины напряженности электрического поля в герметичных вводах и ТТ серии ТФРМ практически одинаковые.

ТФРМ-500 имеют наибольшую толщину изоляции и соответственно требуют более тщательных и трудоемких процессов сушки и пропитки маслом.

Конструкции ТТ имеют существенно отличающиеся узлы герметизации. До 1976 г. (ТФРМ-330) и до 1978 г. (ТФРМ-500) защита масла осуществлялась с помощью силикагелевого осушителя. Далее до 1983 г. был применен узел герметизации в виде "мешка" из фторолоновой локоткани в металлическом баке (тип I). Впоследствии, до 1987-88г.г. применялась "мембрана" (диафрагма) из фторолоновой локоткани или литой резины на масле (тип II). Далее, до 1992 г. была установлена «резиновая диафрагма между металлическими баками, причем масло под и над диафрагмой сообщается через патрубки» (тип III). С 1992 г. был увеличен объём расширителя, а также значительно расширено отверстие, через которое сообщается масло под и над диафрагмой. Имеются также отличия в конструкции маслоотборных устройств. Идентификация узла герметизации существенна для определения уровня надежности.

### **Виды и причины отказов**

Некоторые данные о повреждениях ТТ серии ТФРМ показаны в табл.

Повреждаемость ТТ серии ТФРМ в период 1990 – 1999 г.г. приведена ниже

	ТФРМ-330	ТФРМ-500	ТФРМ-750
Начало выпуска	1971	1977	1974
Выпущено до 1999 г.	3764	883	836
Число повреждений	32	27	16
Отказы в приработочный период	18 (56 %)	16 (64 %)	8 (50 %)
Отказы, связанные со старением	15 (47 %)	нет	3

Летом 2001 г. произошла серия отказов ТТ, большая часть которых связана со старением изоляционной структуры.

### **СЕРИЯ ТФРМ-500**

Повреждаемость включительно до 1986 г. имела исключительно приработочный характер, и была обусловлена в основном недостаточной пропиткой или нарушением пропитки. Происходил пробой изоляции тора в зимнее время, часто непосредственно после включения.

Эти причины были эффективно устранены путём улучшения технологии.

**В период 1990 - 1999 г.г. зарегистрировано 26 отказов.**

Аварии избирательно сосредоточены на нескольких объектах и часто происходят в одних и тех же ячейках: ПС «Итатская 1150 кВ» - 12, «Экибастузская» - 5, ПС «Костромская АЭС» - 3, Балаковская АЭС - 3, Ново-Воронежская АЭС - 2.

Из 27 отказов 16 произошли в очевидно приработочный период. В ряде случаев отмечалось длительное хранение повредившихся ТТ в горизонтальном положении до ввода в эксплуатацию. Наибольшая повреждаемость имеет место на ПС «Итатская 1150 кВ», где отмечаются частые коммутации разъединителями (648 операций в 1998 г.).

Все повредившиеся ТТ были залиты маслом ПС.

Причины повреждения не связаны с проблемами старения. Так, например, 360 ТТ, (выпуск по 1984 г.) работают без повреждений более 16 лет. Большая часть аварий произошла в холодное время года при резких перепадах температур и с ТТ, имеющих узел герметизации типа III.

Не отмечено повреждений ТТ, имеющих узел герметизации с «мешком». Из 3-х повреждений ТТ, имеющих узел герметизации «мембрана» (табл.2, тип II, выпуск 1983 – 1987 г.г.) два были инициированы ревизией узла герметизации (аварии через 1-6 месяцев после ремонта).

Общими чертами повреждаемости являются:

- Особая конструкция узла герметизации
- Масло ПС

- Холодное время при развитии отказа
- Прирабочный период
- Ионизационный пробой изоляции тора
- Избирательные объекты эксплуатации (возможные повышенные воздействия).

Надежная работа более 800 ед. ТФРМ-500 доказывает, что причины повреждения связаны с некоторыми особыми условиями в отношении исходного состояния после транспортировки и хранения, состояния узла герметизации, а также условий работы (Итат).

Одной из наиболее вероятных причин повреждений может быть повышенное содержание воздуха (прямое попадание воздуха) и образование вакуума при резком понижении температуры в зимнее время.

Вероятно, что определенная часть ТТ имеет ухудшенное состояние и нуждается в доработке (дегазация, перезаливка и перепропитка маслом), а также в реконструкции узла герметизации.

Замена (доработка) ТТ представляется обоснованной только в отношении отдельных групп, имеющих ухудшенное состояние.

В качестве резерва может быть использована основная конструкция ТРФМ-500 с улучшенным узлом герметизации, с дополнительными требованиями в отношении напряжения и длительности испытаний на частичные разряды, а также в отношении контроля состояния в процессе хранения, после монтажа и в первый период работы, в частности с измерением содержания воздуха и других газов.

### **СЕРИЯ ТФРМ-330**

Отмечается две тенденции повреждаемости: развитие теплового пробоя после 20-25 лет работы ТТ, которые ранее работали почти безотказно, и развитие ионизационных процессов в начальный период эксплуатации некоторых ТТ. Около 50 % отказов связаны со старением материалов. Они произошли в жаркое время года и, вероятно, обусловлены диэлектрическим перегревом изоляции 52% отказов ТТ, имеют выраженный прирабочный характер (несколько аварий произошли сразу же после включения). В ряде случаев отмечается длительное (1,5 - 6 лет) хранение ТТ в горизонтальном положении, а также перевозка между объектами.

Наиболее вероятным видом повреждений в начальный период работы является развитие ионизационного пробоя, из-за - ухудшения состояния изоляции, в частности из-за депропитки во время хранения, а также попадания воздуха. Эти причины подтверждаются специальными испытаниями в НИИПТ ТТ, перевезенных на другой объект после длительного хранения. Из 12 ед. 3 не выдержали испытания, а в одном, примерно через 100 час. испытаний начал развиваться ионизационный пробой.

### **ТФРМ-750**

Удельная повреждаемость в последние 10 лет составляет около 0.04 %; в последние два года в парке ТТ в 836 ед. отмечено два отказа. **8 повреждений произошли с ТТ., изготовленных в 1988-1989г.г.**

Из 13 повреждений изоляции: 8 произошли в прирабочный период в основном в зимнее время (6 отказов); 9 произошли с верхней ступенью ТТ; 9 в ТТ, имеющих узел герметизации типа III; 3 случая относятся к числу "жарких" аварий, и предположительно связаны с проблемами старения, что вызывает особую озабоченность.

Следует отметить, что вышеуказанные повреждения непосредственно не связаны с увлажнением изоляции.

### **Механизм повреждения**

Низкая эффективность применяемых методов диагностики обусловлена в значительной мере недостаточным пониманием механизма возникновения и развития повреждений и,

соответственно, применением неадекватных методов для выявления дефектов и предупреждения отказов. Различаются два типичных механизма:

### **Ионизационный пробой**

Возникает в ослабленном месте, чаще всего из-за наличия пузырьков воздуха, в виде критической ионизации. При наличии достаточно большой энергии происходит разрушение материалов, выделение газов. Потери на ионизацию обуславливают рост тангенса угла потерь с увеличением напряжения. В то же время измерения при напряжении 10 кВ обычно не указывают на наличие дефекта. Пробой развивается в течение десятков (иногда нескольких сотен) часов. Эффективные диагностические характеристики: величина кажущегося заряда ЧР, частота их повторения и особенно энергия ЧР при непрерывном контроле; ХАРГ, особенно пробы с верхней части, а также измерение  $\text{tg}\delta$  и емкость изоляции остова при рабочем напряжении и прироста  $\text{tg}\delta$  при увеличении напряжения

### **Тепловой пробой**

Возникает в зоне повышенных диэлектрических потерь из-за термической нестабильности бумажно-масляной массы, обусловленной наличием остаточной влаги или её образованием, а также образованием полярных продуктов старения. Процесс вызывает повышение диэлектрических потерь, особенно при повышении температуры, а также рост температуры.

Сигрэ считает что внутренняя температура 140-150°C может рассматриваться как граница между работоспособным и опасным состояниями. Повреждение может развиваться годами, но резко интенсифицироваться после изменения условий (например, повышения температуры) и затем развиваться до пробоя в течение сотен (десятков) часом.

Развитие повреждения сопровождается выделением продуктов перегрева изоляции. Ионизация и сопутствующие явления (рост интенсивности ЧР, газовыделение) возникают преимущественно на завершающей стадии.

Соответственно, наиболее эффективными диагностическими характеристиками являются:

Изменение тангенса угла потерь при рабочих условиях; увеличение температуры, а также продукты старения и пиролиза масла и перегрева изоляции.

### **Опыт диагностики состояния ТФРМ на Запорожской АЭС**

Установлены 51 фаза ТФРМ-750 и три фазы ТФРМ-330.

НИЦ ЗТЗ-Сервис совместно с ЗЗВА начал работы по обеспечению надежной работе ТТ с 1998 г.

За период по октябрь 2001 г. выполнены следующие работы.

Идентифицированы конструкции и типы узлов герметизации

Оценка состояния оборудования посредством измерения диэлектрических характеристик при рабочим напряжением.

Освоение метрологически достоверной методики измерения  $\text{tg}\delta$  и емкости под рабочим напряжением по схеме сравнения.

Разработана комплексная программа обследования состояния ТТ, включающая расширенный анализ масла, термовизионное обследование, измерение диэлектрических характеристик под напряжением, а также комплекс испытаний после отключения ТТ.

Разработана программа по дополнительным проверкам и испытаниям выбракованным ТТ.

По результатам испытаний выявлена очевидная тенденцию аномального старения масла в верхних ступенях ТТ залитых маслом Т-750 с повышенной ароматикой после 15-16 лет работы. Обнаружено появление большого количества полярных продуктов и поверхностно активных веществ, недопустимый рост тангенса угла потерь, наличие коллоидов. В некоторых ТТ отмечается рост тангенса угла потерь с тенденцией увеличения с повышением температуры.

Сняты с эксплуатации и восстанавливаются за ЗЗВА четыре верхних ступени 750 кВ вследствие роста диэлектрических потерь.

Определены ТТ, требующие повышенного контроля.

В настоящее время разрабатывается методика автоматизированного контроля диэлектрических характеристик под рабочим напряжением и продолжаются работы по выяснению фактического состояния ТТ, снятых с эксплуатации.

За период с 1997 г. по 2001 г. имел место один случай отказа вследствие перекрытия внешней изоляции из-за сильного гололеда.

#### **Предложения по повышению надежности**

1) Выполнить объективный анализ причин повреждений ТТ 33-750 кВ, установленных в СНГ, а также обзор повреждаемости ТТ за рубежом, с учетом данных Сигрэ, комитетов Doble и EPRI.

2) С учетом опыта Запорожской АЭС выполнить однократное обследование состояние ТТ, включая идентификацию конструкций и узлов герметизации и залитого масла, оценку состояния по результатам эксплуатации, расширенный анализ масла, а также измерение диэлектрических характеристик при рабочем напряжении. По результатам обследования определить ТТ, имеющие опасные симптомы старения либо ухудшения состояния изоляционной системы, и соответственно требующих специального контроля; оценить количество ТТ требующих замены или доработки.

3) Разработать технические требования к конструкциям ТТ, включая учет реального уровня напряжений и перенапряжений, условий хранения, требований к системе герметизации, устройствам контроля и мониторинга в эксплуатации, технической документации по эксплуатации, а также сервисному обслуживанию.

4) Для обеспечения страхового резерва целесообразно заказать однотипные конструкции, и выполненные по дополнительным требованиям, с дополнительными гарантиями, учитывающими подтверждения гарантированных характеристик в течение определенного времени.

5) Стратегическую замену следует планировать на основе тендерных условий, которые должны включать специально разработанные спецификации, а также объективный анализ предлагаемых конструкций и технологии их изготовления соответствующими экспертами, а также приемку изделий на заводе.