РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ АБСОРБЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ.

Лазарев Е.А. (БП «Электросетьсервис»)

Введение. Для многих видов электрооборудования (трансформаторов, реакторов, трансформаторов тока и вводов с бумажно-маслянной изоляцией) важным условием надёжной работы является низкое влагосодержание твёрдой изоляции: электрокартона и электроизоляционной бумаги. Поскольку в условиях эксплуатации непосредственное определение влагосодержания невозможно, его контролируют косвенными методами: измеряют сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь, ёмкостные показатели изоляции. Эти методы позволяют выявить увлажненность изоляции при достаточно высоком объемном содержании влаги (более 3%).

За рубежом, в практике контроля увлажнения изоляции, всё большее применение находят методы измерения абсорбционных характеристик, позволяющие выявить ранние стадии увлажнения изоляции (до 0,3 %), что явилось основанием для разработки прибора аналогичного функционального назначения повышенной чувствительности. Ниже приводятся результаты эксплуатационных испытаний прибора ЦИТА-1 (цифровой измеритель токов абсорбции) оригинальной разработки, предназначенного для измерения токов абсорбции в изоляции маслонаполненного оборудования. ЦИТА-1 представляет собой помехозащищённый малогабаритный аналого-цифровой прибор, управляемый персональным компьютером. После периода пробных испытаний [1] продолжались работы по совершенствованию аппаратуры, методики измерения токов абсорбции и обработки результатов измерений.

Согласно [2] все измерения сопротивления изоляции в маслонаполненном оборудовании производятся при нормированном уровне высокого напряжения. С учетом этого произведена доработка высоковольтного источника прибора ЦИТА-1: сейчас высоковольтный источник вырабатывает строго фиксированное постоянное напряжение - 1,0 или 2,5 кВ.

В 1999 году на ПС «Итатская» был опробован прибор для измерения токов абсорбции в изоляции ТТ типа ТФРМ-500, установленных на территории ОРУ-500. Измерения произвести не удалось в связи с высоким уровнем наведённого напря-

жения на первичную обмотку ТТ (порядка 7 – 8 кВ). Исходя из полученных результатов, произведена доработка прибора с целью возможности работы с внешним источником высокого напряжения (ВН): созданы высоковольтные делители для измерительных входов прибора и контроля ВН внешнего источника, произведена доработка программы для синхронного запуска внешнего источника ВН и прибора.

Разработана программа перевода результатов измерений в формат *Excel* для большей информативности полученных результатов. Теперь, применяя возможности *Excel*, есть возможность детально наблюдать ход кривой измерения в различных масштабах и каждый канал измерения на отдельных графиках.

1. **Аппаратура и методика измерений**

Основные технические показатели измерителя ЦИТА- 1 приведены в табл. 1.

Таблица 1

НАИМЕНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ	ЗНАЧЕНИЕ
Выходное постоянное напряжение, $U_{вых}$, кВ: -внутренний источник -внешний источник (АИМ-70) *	 + 1,0 или 2,5 +/- 0,003...70
Входные сопротивления, $R_{вх}$, МОм* *	1,0
Контролируемый ток абсорбции, $I_{абс}$, мкА, * *	+0,005…. 7,0
Диапазон измерения сопротивления, $R_{изм}$, Ом * *	$(0{,}005….5{,}0)\times10^{11}$
Характерные временные показатели измерения: -нормируемое время одного измерения, t с, * * * -интервал между соседними регистрируемые значениями тока $I_{абс}$, Δt, с ****	 1800,0 0,01….15,0

Примечания.

* при подключении внешнего источника на вход каждого измерительного канала устанавливается резистивный делитель с коэффициентом деления 1:200, а на вход измерения ВН – делитель с коэффициентом деления 1:10000;

** для каждого из трех измерительных каналов измерения;

*** время одного измерения задается программой управления и может меняться вручную от 0,32 с до ∝;

**** Δt меняется по логарифмической шкале от 0,01с в начале до 15 секунд в конце измерений.

Нажатием кнопки управления на компьютере скачком включается источник ВН (до напряжения $U_{исп}$) и через Δt = 0,32с автоматически включаются три канала измерения ЦИТА-1. Динамика изменения тока $I_{абс}$ визуально контролируется на экране монитора, а также в виде графической зависимости $I_{абс} = f(t)$ и таблицы записывается в память компьютера. Табличные данные в дальнейшем обрабатывают-

ся с помощью специальной программы. Визуальный контроль позволяет оптимизировать время измерения, которое продолжаем:

-или до установления неизменного значения Iабс во времени;

-или до тех пор, когда его значение приблизится к пределу чувствительности схемы измерения.

Как видно из рис. 1, в начальный момент времени токи, протекающие через изоляцию складываются из тока сквозной проводимости (I_{∞}), тока заряда основной ёмкости изоляции ($I_{зар}$) и тока абсорбции ($I_{абс}$). В течении всего периода измерения по характеру изменений измеряемых токов и после завершения всех переходных процессов в изоляции в конце измерения по току сквозной проводимости можно судить о состоянии (увлажнённости) твердой изоляции.

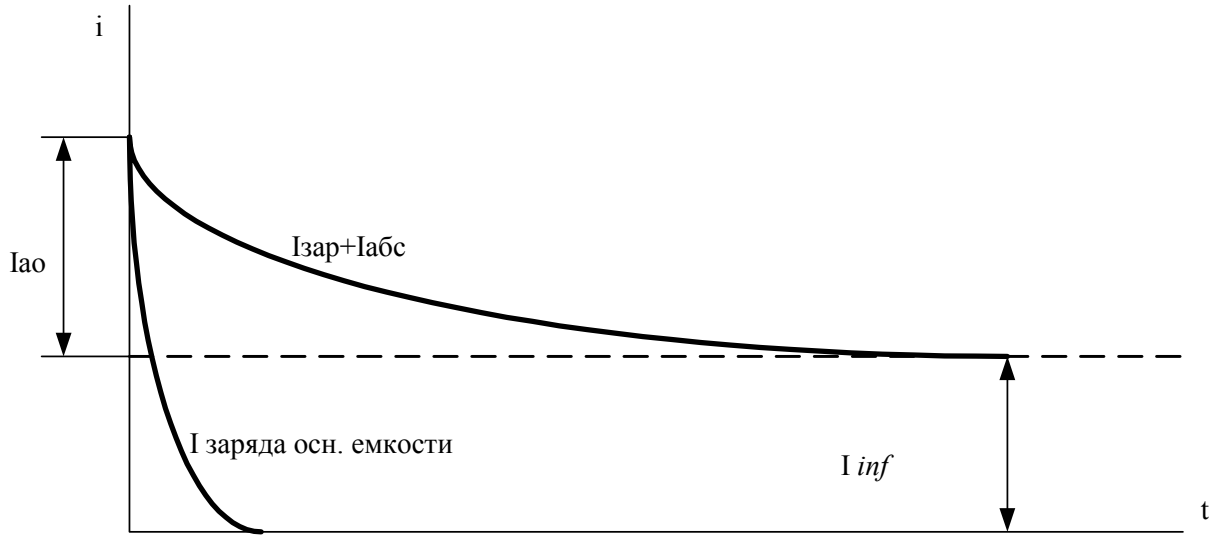


Рис. 1.

2. **Результаты измерений**

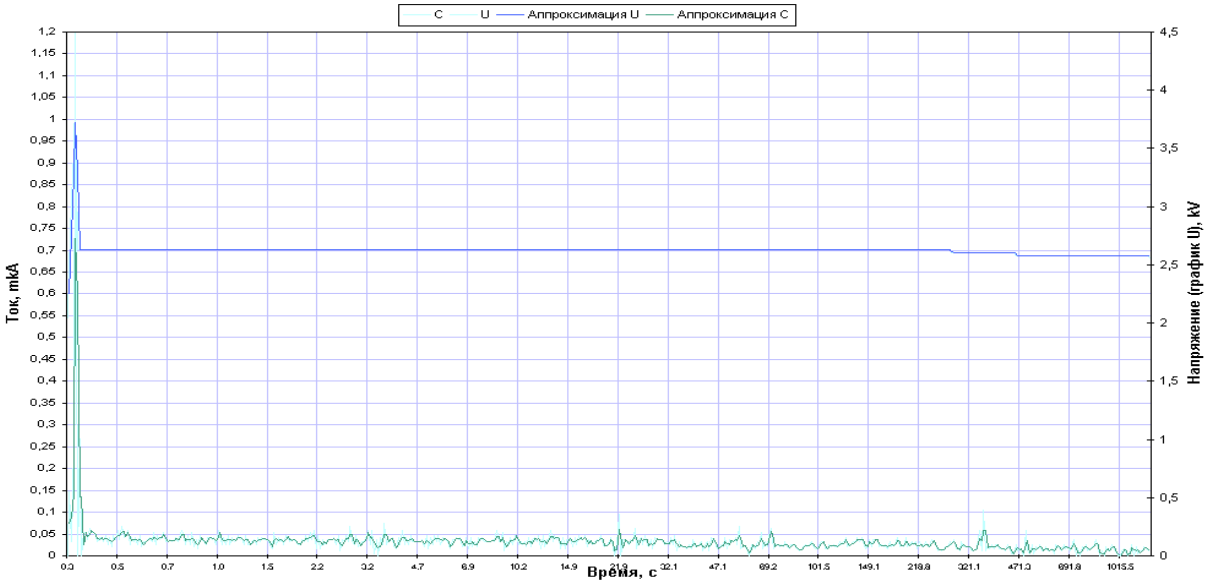
АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Ниже приводятся результаты измерения межобмоточной изоляции однотипных автотрансформаторов, установленных на разных предприятиях МЭС РАО «ЕЭС России».

МЕЖОБМОТОЧНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ АТ

Приморское ПМЭС ВОСТОКА ПС «Дальневосточная»

Межобмоточная изоляция АТГ АОДЦТН-267000/500/220 Фаза «В»

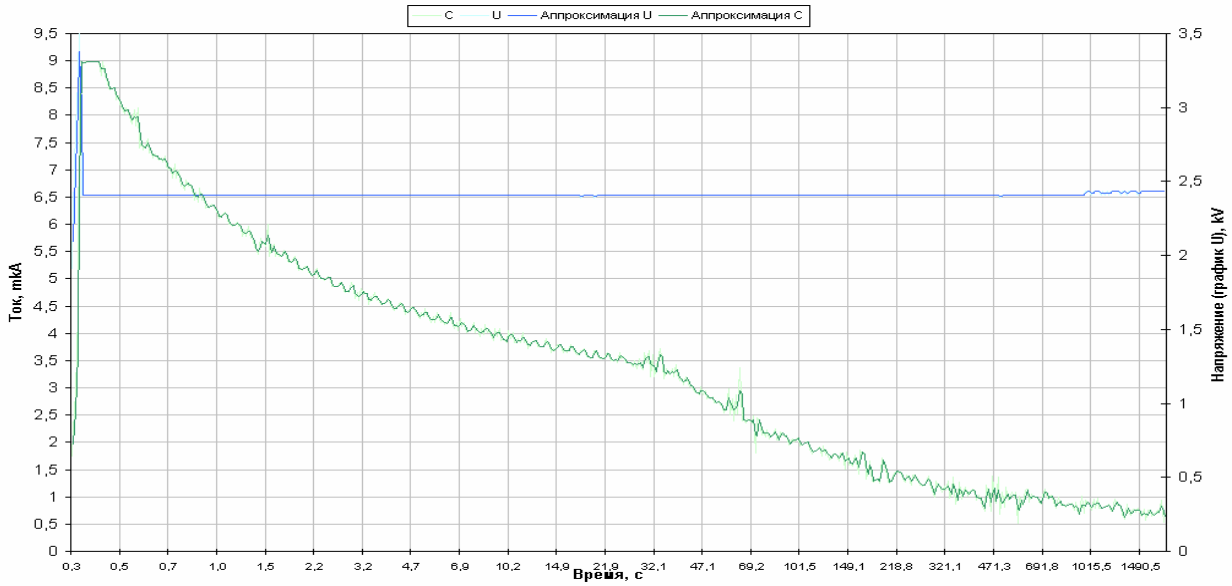


Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	*R(t)*(ГОм)
Обмотка ВН - НН	С	55,5	71,3	99,9	1,400	242,8 (1275)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	2,628	2,628	2,628	-	2,555

Омское ПМЭС СИБИРИ ПС «ЗАРЯ»

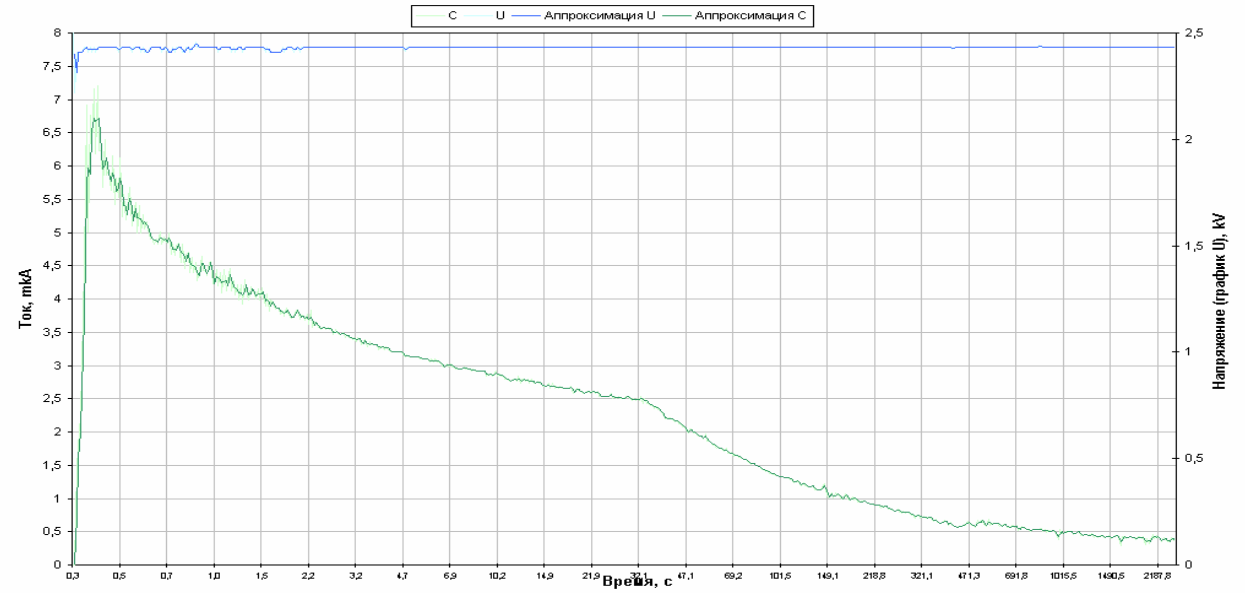
Межобмоточная изоляция АТГ АОДЦТН-267000/500/220

Резервная фаза (до регенерации масла 05.2000)



Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	*R(t)*(ГОм)
Обмотка ВН - НН	С	0,268	0,635	1,007	1,585	3,390 (1820)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	2,411	2,411	2,411	1,000	2,435

Межобмоточная изоляция АТГ АОДЦТН-267000/500/220
Резервная фаза (после регенерации масла 09.2000)



Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	$R(t)$(ГОм)
Обмотка ВН - НН	С	0,391	0,905	1,392	1,537	6,610 (2500)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	2,435	2,435	2,435	-	2,435

В настоящее время отсутствуют критерии оценки состояния твердой изоляции по динамике $I_{абс}$. По этой причине проводится качественный анализ состояния твердой изоляции АТ по её абсорбционным характеристикам, принимая за основу физические представления по прогнозируемому изменению $I_{абс}$ в увлажненной (или дефектной) по сравнению с качественной изоляцией.

На основании анализа результатов измерений токов абсорбции в изоляции резервной фазы автотрансформатора АТ1 ПС «Заря» можно сделать следующие выводы: сушка (регенерация) масла привела к снижению значений $I_{абс}$ в межобмоточной изоляции. Это, вероятнее всего, связано с уменьшением влагосодержания твердой изоляции вследствие диффузии из неё молекул воды в объем масла, менее увлажнённого (измерения в сентябре 2000г), по сравнению с находившимся ранее (измерения в мае 2000г) в баке автотрансформатора.

Измерения токов абсорбции на резервных фазах ПМЭС СИБИРИ и УРАЛА, отстоявшие несколько лет без работы, также показывали присутствие влаги в изоляции и накопление её в твёрдой изоляции во времени.

По результатам измерений 25 однотипных автотрансформаторов типа АОДЦТН-267000/500/220 представляется возможным определить критерии оценки

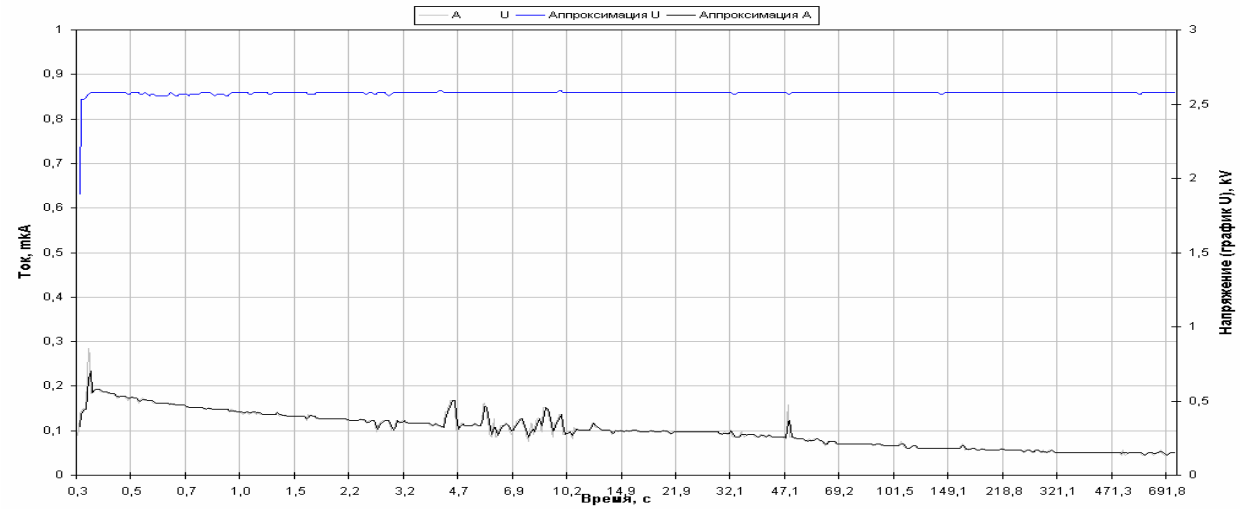
состояния межобмоточной изоляции при регистрации тока абсорбции ($U_{исп}$=2,5 кВ, время испытаний t>1200 с).

Критерии оценки состояния изоляции по сопротивлению $R_к$, ГОм ($U_{исп}$=2,5 кВ и t> 1200 с)			
Критическое	Низкое	Удовлетворительное	Хорошее
$R_к$<5,0	5,0< $R_к$ <30,0	30,0< $R_к$ <65,0	$R_к$ > 65,0

ВВОДЫ

В связи с малой ёмкостью измеряемой изоляции на данный момент пока не выработаны критерии оценки состояния изоляции вводов, но действенность метода контроля токов абсорбции на вводах проверена неоднократно. Например, можно привести график измерения ввода 110 кВ ОАО «Новосибирскэнерго», демонтированного по результатам тепловизионного контроля.

Ввод 110 кВ БМВ110/600А Зав. № 66070



Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	$R(t)$(ГОм)
Ввод 110кВ	*A*	14,097	26,710	33,833	1,267	50,751 (750)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	2,578	2,578	2,578	-	2,578

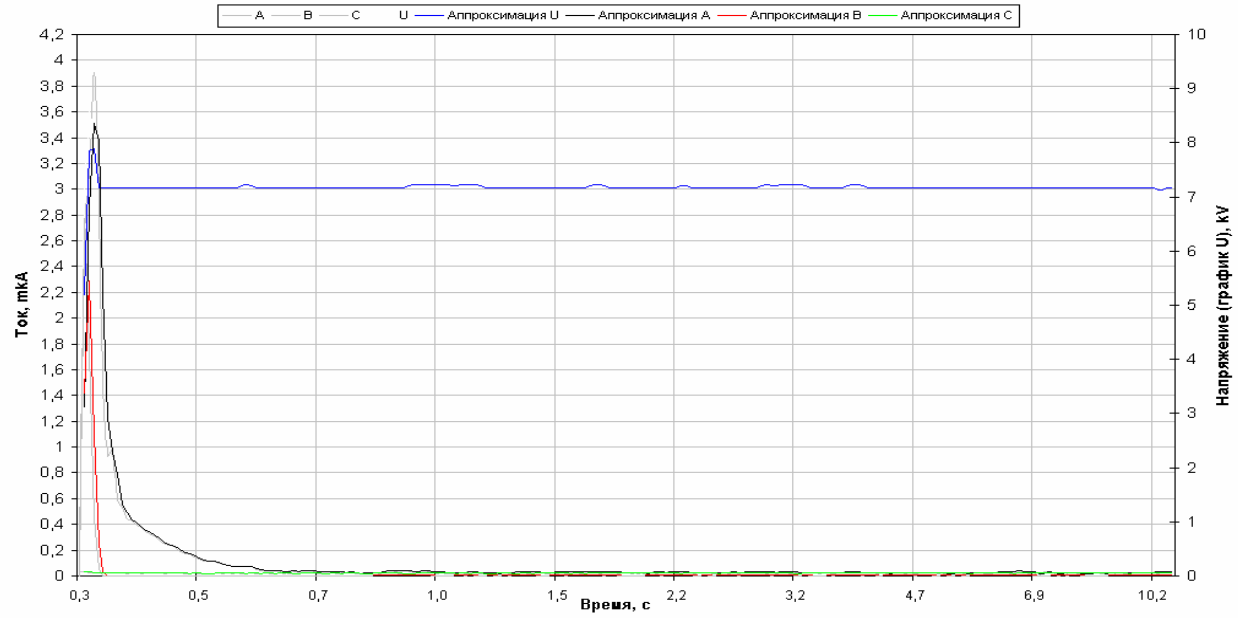
ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА.

Работы по контролю изоляции в ТТ проводились только на ПС «Итатская». В связи с большим уровнем помех на территории ОРУ-500, перед началом измерений проводился опыт по выявлению уровня наводок - при полностью собранной схеме размыкался заземляющий нож со стороны ВН и регистрировались уровни сигналов на измерительных каналах, включая канал контроля ВН, с последующей записью. Далее, после определения величины наведённого напряжения (максимальная величина составила порядка 8,2 кВ), было решено производить измерения токов абсорбции при уровне ВН, равном 40 кВ, и таким образом отстроиться от

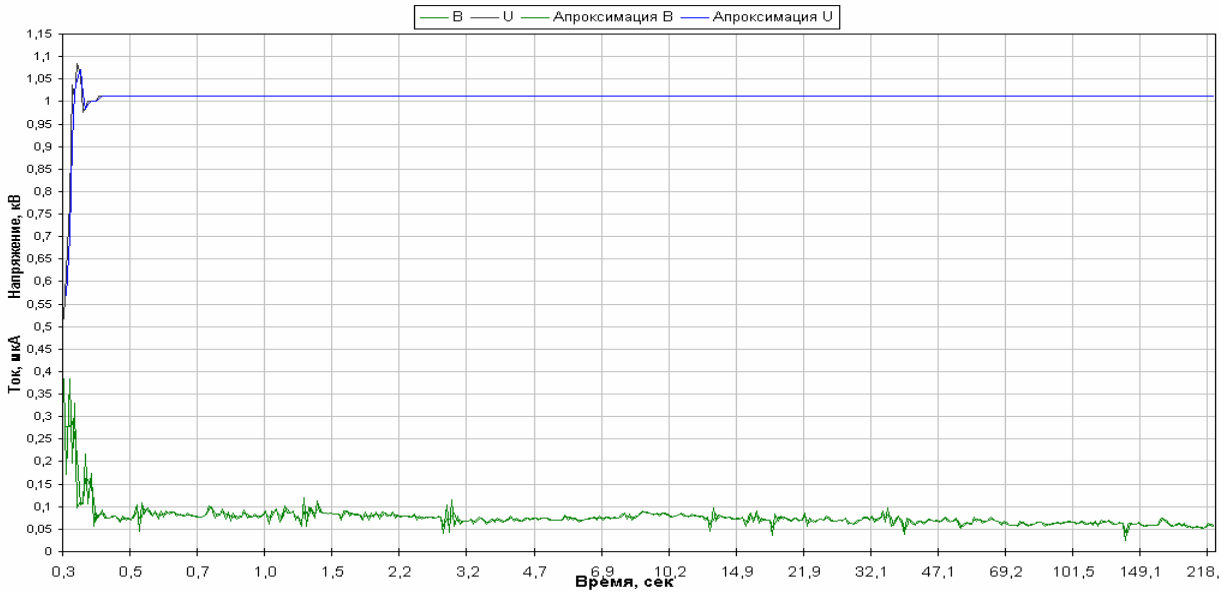
помех. Ниже на рисунке можно наблюдать величину наведённого напряжения на первичной обмотке ТТ и реакции измерительных и технологической обмоток.

Красноярское ПМЭС СИБИРИ ПС «Итатская»

Измерения при наличии на ПС высокого уровня электромагнитных помех



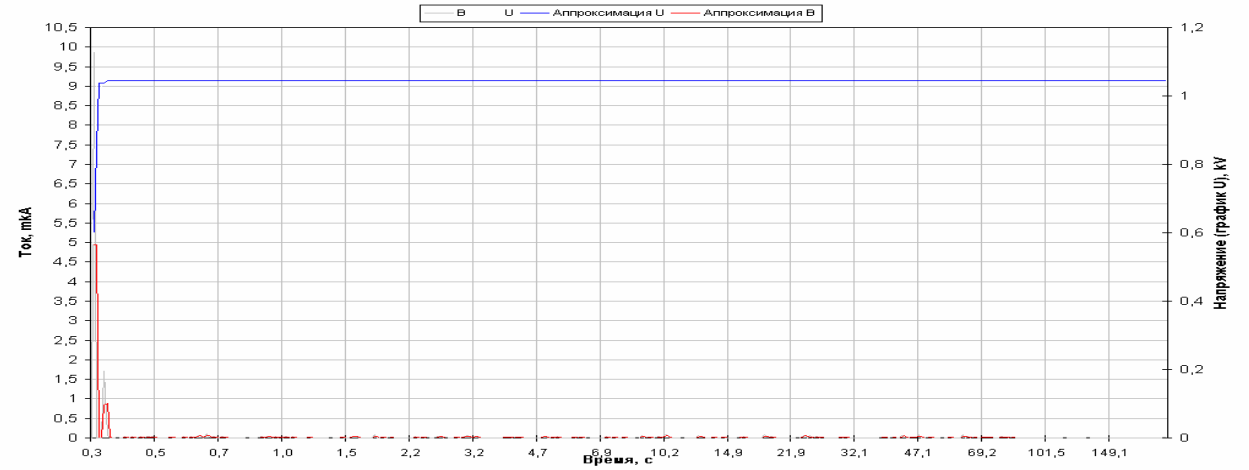
Межобмоточная изоляция «0» - «6И» ТТ **B523** ТФРМ-500Б-ПУ1 Фаза «*B*» (измерения 03.2000)



Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	*R(t)*(ГОм)
«0» - «6И»	*B*	10,9	13,8	16,0	1,16	18,7 (220)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	1,01	1,01	1,01	-	1,01

Состояние изоляции между выводом «0» (последняя емкостная обкладка первичной обмотки) и «6И» (обмотка индукционного нагрева) вызывает подозрение на наличие влаги.

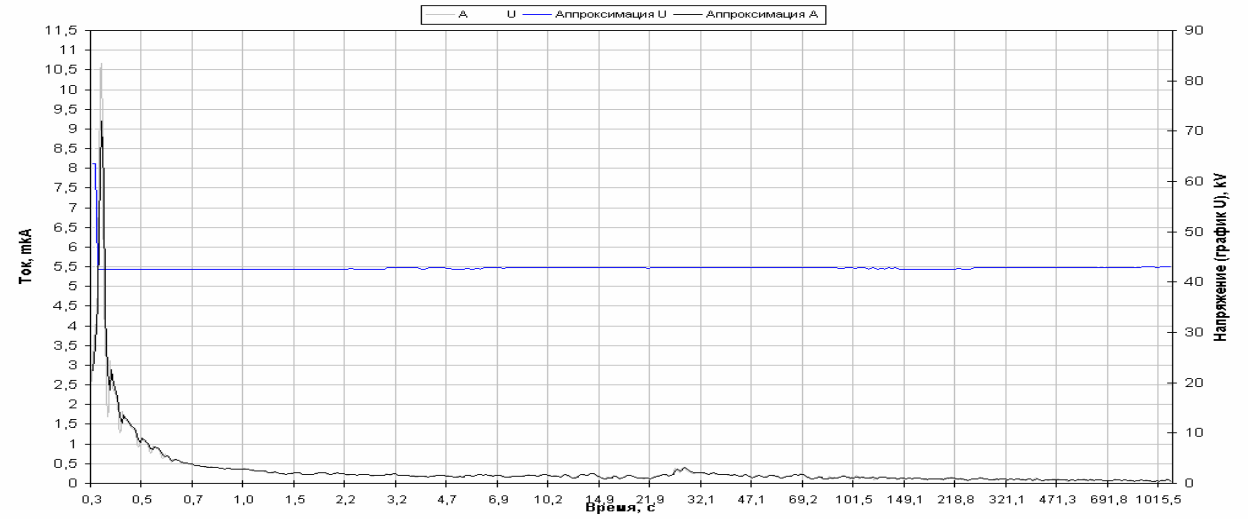
Межобмоточная изоляция «0» - «6И» ТТ **B523** ТФРМ-500Б-IIУ1 Фаза «*B*» (измерения 09.2001)



Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	*R(t)*(ГОм)
«0» - «6И»	*B*	5223,2	5223,2	5223,2	1,0	5223,2 (210)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	1,045	1,045	1,045	-	1,045

На двух последних рисунках приведены результаты измерений на одной и той же изоляции в разное время (первое измерение март 2000 года, а второе измерение – сентябрь 2001 года). Как видно в осенний период изоляция улучшила свои изоляционные свойства, это явление можно объяснить следующим образом: осенний период является наиболее вероятным временем накопления влаги в изоляции ТТ и, следовательно наиболее благоприятным временем проведения измерений является весна.

Межобмоточная изоляция «Первичная обмотка» - «0» ТТ ТФРМ-500Б-IIУ1 В526 Фаза «*A*» (измерения 09.2001)



Изоляция	Канал	$R_{0,4}$(ГОм)	R_{15}(ГОм)	R_{60}(ГОм)	$R_{60/R15}$	*R(t)*(ГОм)
«Первичная обм.» - «0»	*A*	33,0	287,9	257,6	0,895	548,1 (1100)
Напряжение, кВ	$U_{зар}$	42,468	42,800	42,800	-	43,131

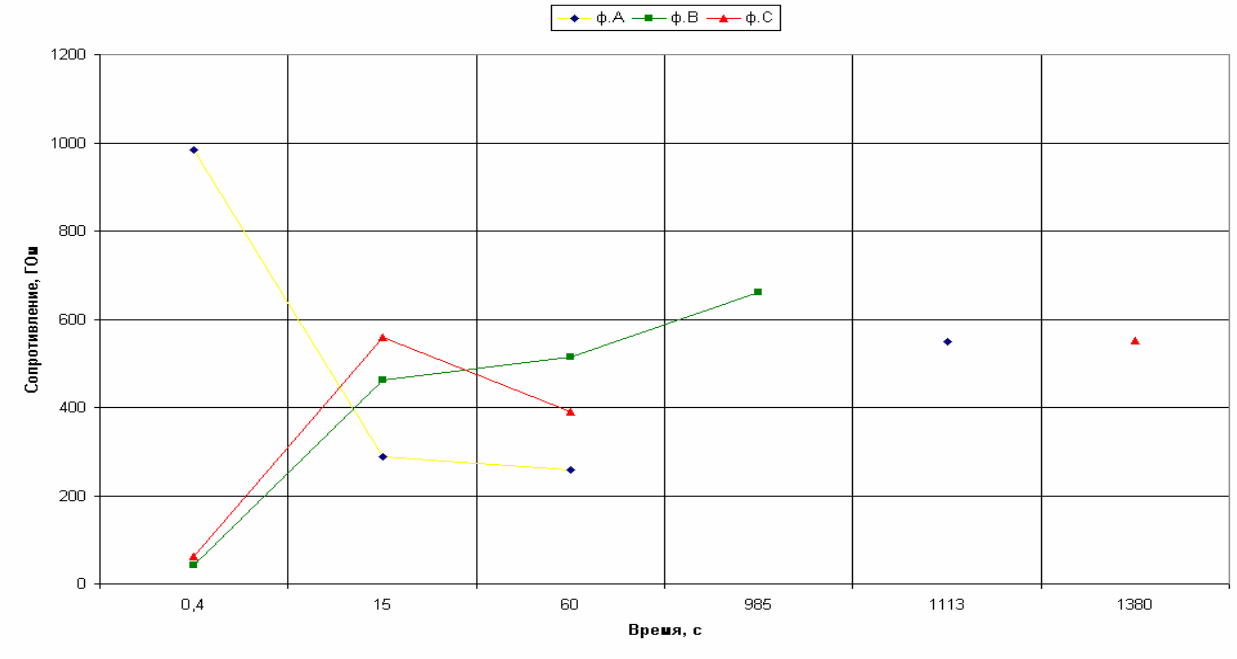
Из всех измеренных ТТ, необходимо выделить ТТ В526 ф. А,В,С. Почти вся измеренная изоляция показала повышенные величины токов абсорбции, вероятнее всего связанные с повышенным влагосодержанием.

Рекомендовано при проведении плановой замены ТТ в первую очередь произвести демонтаж ТТ В526 ф. *А,В,С* по выше указанным причинам.

Рекомендовано все объекты, в изоляции которых наблюдались повышенные величины токов абсорбции подвергнуть дополнительным испытаниям и тщательным анализам масла, а при подтверждении диагноза повышенного влагосодержания в изоляции - сушке.

Возможности Excel позволили наглядно представить изменение сопротивления изоляции во времени как в виде графика, так и в виде таблицы. Пример обработки данных приведен ниже.

ЗАВИСИМОСТЬ R ЗАВИСИМОСТЬ Rиз=f(t) ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ «ПЕРВИЧНАЯ ОБМОТКА» – «0» ТТ ***В526*** ФАЗ *А,В,С* (Uисп=40 кВ)



Результаты измерений абсорбционных характеристик изоляции трансформатора тока ***B526*** ПС «Итатская»: *ПЕРВИЧНАЯ ОБМОТКА – «0»*.

Фаза	Сопротивление $R_{0,4}$, ГОм при $U_{исп}$=40 кВ	Сопротивление R_{60},ГОм/R_{15},ГОм при $U_{исп}$ = 40 кВ	Конечный результат измерений	
			Общее время измерений, t, с	Конечное сопротивление $R_К$, ГОм
A	33,0	257,6/287,9 $K_{абс}$=0,9	1113	548,1
B	41,3	514,4/462,9 $K_{абс}$ =1,1	985	661,3
C	60,8	391,2/558,9 $K_{абс}$ =0,7	1380	552,4

Пояснение к таблице. В табл. 5.2. использованы следующие обозначения:
-$R_{0,4}$ - сопротивление изоляции через 0,4 секунды после начала опыта;
-R_{15} - сопротивление через 15 с;
-R_{60} - сопротивление через 60 с;
-$R_К$ - сопротивление непосредственно перед завершением опыта.

Заключение

В целом по результатам измерений токов абсорбции, проведённых в 1999 - 2001 годах, можно говорить о хороших диагностических возможностях этого метода. Далее хочется отметить следующий момент: осенний период является наиболее вероятным временем накопления влаги в изоляции и, следовательно, для выявления дефектной изоляции наиболее благоприятным временем проведения измерений является весна. Таким образом, максимальное влагосодержание в изоляции можно наблюдать при этом виде диагностики в первые тёплые дни после осенне-зимнего периода.

В ходе проведения эксплуатационных сравнительных испытаний с традиционными приборами аналогичного назначения было установлено, что измеритель ЦИТА-1 позволяет выявить дефекты изоляции на более ранней стадии их развития.

Литература.

1. Измерение абсорбционных характеристик изоляции маслонаполненного оборудования. Живодерников С.В., Лазарев Е.А., Овсянников А.Г. В сб. «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Выпуск 11. Современное состояние и проблемы диагностики мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов». СПб.: Изд-е ПЭИПК, 2000.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования./Под общей редакцией Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца.-6-е изд. - М.:НЦ ЭНАС, 1998.-256с.