

# К диагностике технического состояния обмоток силовых трансформаторов после воздействия токов коротких замыканий

**В.И. Завидей**

д.т.н., главный научный сотрудник<sup>1</sup>  
zavideyvi@mail.ru

**В.С. Ларин**

к.т.н., начальник отдела<sup>1</sup>

**А.Ю. Волков**

начальник группы<sup>1</sup>

**С.А. Дробышевский**

директор по развитию<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ВЗИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИФ имени академика Е.И. Забахина», Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Энергоскан», Москва, Россия

**В статье рассмотрены вопросы технического диагностирования состояния обмоток силовых трансформаторов. Представлены результаты оценки состояния обмоток с помощью измерений сопротивления короткого замыкания, анализа частотных характеристик и измерений фазовых параметров на фиксированных частотах. Отмечено, что метод оценки состояния по фазовым параметрам из-за оперативности анализа, простоты и наличия числового критерия имеет определенные перспективы для применения в полевых условиях.**

## Материалы и методы

Силовые трансформаторы и методы определения их технического состояния.

## Ключевые слова

трансформаторы, диагностика дефектов, обмотки, частотные характеристики, метод частотных характеристик, фазовые параметры

Силовые трансформаторы являются важными и дорогостоящими элементами электроэнергетических систем. Наиболее опасными являются внутренние повреждения обмоток трансформаторов, которые приводят к значительным финансовым потерям, связанных с их восстановлением или заменой [1]. Одной из причин таких повреждений может быть пробой внутренней изоляции в результате деструкции изоляции под воздействием эксплуатационных факторов и частичных разрядов, которые развиваются под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений [2]. Другая причина повреждений обмоток — недостаточная электродинамическая стойкость при коротких замыканиях и ослабление прессовки обмоток. Деформация обмоток, повреждение или ослабление изоляции в месте остаточных деформаций могут привести к витковым замыканиям, особенно трансформаторов, выработавших свой эксплуатационный ресурс [3, 4]. Для предотвращения повреждений и снижения возможных ущербов, связанных с недоотпуском электроэнергии, и недовыпуском продукции большую актуальность имеет контроль состояния обмоток трансформаторов в эксплуатации. Исключительно важное значение имеет решение этой проблемы для трансформаторного оборудования, установленного на нефтегазовых промыслах и транспортных магистралях.

Не менее актуален контроль состояния обмоток и для испытательных трансформаторов ударных стендов для проведения испытаний на стойкость при коротких замыканиях. Как правило, обмотки таких трансформаторов рассчитаны на ударные воздействия токов коротких замыканий. Однако и они подвержены риску повреждений из-за многочисленных ударных нагрузок и старения внутренней изоляции.

Наиболее распространенным методом диагностики состояния обмоток силовых трансформаторов является измерение сопротивления короткого замыкания  $Z_k$ . Сопротивление короткого замыкания является интегральной характеристикой, определяемой как механическим, так и электрическим состоянием обмоток. Контроль основных электрических и изоляционных характеристик обмоток (сопротивления изоляции обмоток, тангенса угла диэлектрических потерь, сопротивления обмоток постоянному току, потерь холостого хода и др.) в совокупности с измерением  $Z_k$  позволяют оценить общее техническое состояние трансформаторов. Вместе с тем, хорошо известно, что измерение сопротивления  $Z_k$  эффективно лишь при значительных изменениях индуктивности обмоток, когда остаточные деформации охватывают большое число витков. К дополнительным методам диагностики состояния активной части силовых трансформаторов также можно отнести измерение уровня вибраций трансформатора с целью оценки состояния прессующей системы и степени запрессовки обмоток. Достаточно

информативными являются метод тепловизионного контроля температурного поля бака, системы охлаждения, контроль уровня частичных разрядов в изоляции трансформатора, физико-химический и хроматографический методы анализа трансформаторного масла и вводов. Применение комплексных систем диагностики электрических аппаратов и машин позволяет реализовать технологию обслуживания оборудования по фактическому состоянию, снизить издержки от аварийных отказов за счет раннего обнаружения дефектов и контроля их развития, а также своевременно планировать проведение ремонта.

В последнее время все большее применение для оценки электрического и механического состояния обмоток трансформаторов находит метод частотных характеристик (МЧХ, в зарубежной литературе — Frequency Response Analysis, далее — FRA). В отличие от измерения сопротивления  $Z_k$  метод частотных характеристик позволяет интерпретировать тип дефекта (механические деформации, внутреннее короткое замыкание), локализовать (для непрерывных катушечных обмоток) внутреннее витковое или межкатушечное замыкание [5, 7], а также выявлять наличие экранов с плавающим потенциалом [8]. Данный метод можно отнести к разряду экспертных, поскольку из-за отсутствия в настоящее время четких критериев определения степени развития повреждений, его применение требует высокой квалификации инженеров-диагностов. В настоящее время по линии Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) ведет работу группа A2.53, целью которой является разработка объективной методики оценки состояния обмоток с помощью анализа частотных характеристик. Эта группа начала свою работу совсем недавно, и о каких-либо результатах говорить преждевременно. Ожидается, что группа закончит свою работу и подготовит технический отчет в 2019–2020 гг.

К этому же направлению развития методологии диагностирования электрооборудования можно отнести многопараметрический метод, представленный в работах [9, 10], где отмечалась эффективность использования таких нетрадиционных диагностических параметров, как значения фазовых сдвигов и значений токов через обмотки на фиксированных частотах. Данный многопараметрический метод контроля апробирован на асинхронных электродвигателях мощностью до нескольких МВт и показал эффективность при определении повреждения обмоток статора и ротора [9, 10]. Очевидно, что отклонение этих параметров зависят от изменений индуктивных и емкостных параметров обмотки при ее деформации. Вместе с тем последний метод требует рационального выбора частот для диагностики, которые должны выбираться вне резонансных частот обмотки.

Целесообразность выбора того или иного метода для контроля геометрии обмоток

зависит от чувствительности, наличия четких и обоснованных критериев браковки.

К сравнительно новым направлениям работ по контролю состояния активной части можно отнести метод механических ударных воздействий на бак и обмотку силовых трансформаторов с последующим частотным анализом генерируемой в обмотке ЭДС и оценкой механических собственных частот прессующей системы и обмоток [11]. Данный метод принципиально позволяет определить степень прессовки обмоток, однако перспективы применения этого метода, по-видимому, прояснятся после наработки необходимого экспериментального материала.

Целью настоящей работы являлось сопоставление существующих методов диагностирования технического состояния обмоток силовых трансформаторов, после воздействия ударных нагрузок и токов короткого замыкания.

Представлены практические результаты определения состояния обмоток распределительных трансформаторов, а также испытательных ударных трансформаторов с признаками повреждения обмоток. В опытах использованы классический метод измерения  $Z_k$ , метод FRA и упрощенный метод частотного анализа фазовых и токовых параметров обмотки трансформатора на фиксированных частотах с целью определения возможности его применения в полевых условиях.

#### Результаты измерений на распределительных трансформаторах

Обработка методик определения состояния обмоток проводилась на трансформаторах в испытательной высоковольтной лаборатории завода ОАО «Трансформер». Контролю подвергались трансформаторы мощностью 400–2500 кВА, прошедшие процедуру штатных заводских испытаний. Анализ амплитудных и фазовых характеристик выполнялся на частотах  $f_1=400$  Гц и  $f_2=800$  Гц. В измерениях электрических параметров применялся многопараметрический измеритель ALL TestPro [10] с погрешностью измерений сопротивлений, индуктивности, емкости, токов и фазовых углов не более 1,0%. Следует отметить, что все параметры контроля определялись прибором в автоматическом режиме. Полное время процесса проведения измерительных операций на одном трансформаторе не превышало 5 минут.

Ниже приведены результаты первоначальных опытов диагностики и измерений электрических параметров обмоток высшего и низшего напряжений (ВН и НН, соответственно) нового исправного трансформатора мощностью 1500 кВА, группа соединений — треугольник — звезда. В первых опытах обмотки на противоположной стороне вводов не замыкались. При этом результаты измерений по всем контролируемым параметрам, от опыта к опыту, практически не воспроизводились. Из-за огромного разброса измерений, от опыта к опыту, сопротивления обмоток постоянному току, можно было предположить о наличии источника возмущения, влияющего на результаты измерений (таб. 1).

Заземление всех выводов вторичной обмотки привело к хорошей воспроизводимости результатов измерений (таб. 2), что было обусловлено уменьшением влияния электромагнитных помех на открытые выводы разомкнутых обмоток трансформатора, а также результатом индуцирующего воздействия питания измерительного прибора на обмотку и магнитную систему трансформатора.

#### Сопротивление изоляции обмоток ВН и НН превышало 100 МОм.

Значения критериальных токовых параметров  $I(f_1) / I(f_2)$  и угловых  $\varphi(f_1)$ , характеризующих состояние обмотки, получено из численной модели трансформатора без потерь.

Один из испытуемых трансформаторов в процессе эксплуатации получил повреждение обмотки, вызванное коротким замыканием на линии. В таб. 3 приведены данные измерений трансформатора типа ТМГ мощностью 500 кВА напряжением 6/0,4 кВ (рис. 1), который прошел все заводские приемо-сдаточные испытания и процедуры, включая тепловые испытания и контроль частичных разрядов.

Результаты исследований на трансформаторах показали, что для корректных измерений цепи вторичных обмоток должны быть замкнуты накоротко и заземлены. При сопротивлении обмоток менее 0,01 Ом в автоматическом режиме измерений в измерительной цепи необходимо использовать последовательное добавочное сопротивление величины порядка 0,2–0,3 Ом. Контроль данного силового трансформатора из-за низкого сопротивления вторичной обмотки проводился с включением последовательно с обмоткой добавочного сопротивления 0,3 Ом и последующей автоматической корректировкой измеряемого сопротивления.

В таб. 4 приведены результаты, полученные на трансформаторе типа ТМГ мощностью 500 кВА напряжением 6/0,4 кВ, который повредился в условиях эксплуатации. Одна из вероятных причин повреждения — близкое короткое замыкание.

Сопротивление изоляции обмотки ВН относительно земли составило 9,132 МОм, а обмотки НН — 0,0 МОм. Установлено, что данный трансформатор имеет повреждение между первичной и вторичной обмоткой и пробой на землю. Общий вид трансформатора после разбора приведен на рис. 2.

Как следовало из данных измерений, наибольший дисбаланс между фазами в поврежденном трансформаторе, наблюдался по параметрам  $I(f_1) / I(f_2)$  и сдвигу фаз  $\varphi(f_1)$  для обмотки НН. Согласно установленным критериям, для обмоток электрических машин и аппаратов, значения отношения  $I(f_1) / I(f_2)$  при двукратно разнесенных частотах не должны выходить за границы  $15\% < I(f_1) / I(f_2) < 50\%$ , а угловых сдвигов между током и напряжением — превышать  $1^\circ$ . Для обмотки ВН значения токового параметра  $I(f_1) / I(f_2)$  находятся в допустимых пределах. Для обмотки НН значения токов на двукратно разнесенных частотах выходят за допустимые пределы. О наличии проблемы в обмотке НН говорит и значительный и

Наименование параметра	Обмотка ВН			Обмотка НН		
	A-B	A-C	B-C	a-n	b-n	c-n
Сопр. обм. пост. току $R_0$ , Ом	258.5	48.45	153.3	0.198	0.125	0.132
Полное сопротивление обмотки $Z_k$ , Ом	13632	12038	11135	560	391	405
Индуктивность $M$ , мГн	24878	17552	17562	902	655	669
$I(f_1) / I(f_2)$ , % ( $f_1=400$ Гц, $f_2=800$ Гц)	-50	-23	-18	-44	-46	-44
Сдвиг фаз $\varphi(f_1)$ , град	9	90	90	90	84	90

Таб. 1 – Результаты измерений на трансформаторе мощностью 1500 кВА (выводы неизмеряемых обмоток не заземлены)

Tab. 1 – Results of measurements on 1500 kVA power transformer (terminals of unmeasured winding are not earthed)

Наименование параметра	Обмотка ВН			Обмотка НН		
	A-B	A-C	B-C	a-n	b-n	c-n
Сопр. обм. пост. току $R_0$ , Ом	3,703	3,623	3,648	0,102	0,100	0,097
Полное сопротивление обмотки $Z_k$ , Ом	220	217	218	15	14	14
Индуктивность $M$ , мГн	87	86	86	2	2	2
$I(f_1) / I(f_2)$ , % ( $f_1=400$ Гц, $f_2=800$ Гц)	-49	-49	-49	-48	-48	-49
Сдвиг фаз $\varphi(f_1)$	88	88	88	75	75	75

Таб. 2 – Результаты измерений на трансформаторе мощностью 1500 кВА при заземлении выводов неизмеряемой обмотки

Tab. 2 – Results of measurements on 1500 kVA power transformer with earthing of terminals of unmeasured winding

Наименование параметра	Обмотка ВН			Обмотка НН		
	A-B	A-C	B-C	a-n	b-n	c-n
Сопр. обм. пост. току $R_0$ , Ом	2,30	2,27	2,24	0,008	0,007	0,007
Полное сопротивление обмотки $Z_k$ , Ом	119	120	121	1	1	1
Индуктивность $M$ , мГн	23	24	24	0	0	0
$I(f_1) / I(f_2)$ , % ( $f_1=400$ Гц, $f_2=800$ Гц)	-49	-49	-49	-11	-11	-11
Сдвиг фаз $\varphi(f_1)$	$84^\circ$	$84^\circ$	$84^\circ$	$8^\circ$	$8^\circ$	$8^\circ$
Сопротивление изоляции $R_i$ , МОм	$\geq 100$					
Оценка состояния	Норма			Норма		

Таб. 3 – Результаты измерений на исправном трансформаторе 500 кВА

Tab. 3 – Results of measurements on 500 kVA power transformer in good condition



Рис. 2. Поврежденный трансформатор с дефектами обмоток и изоляции  
Fig. 2 – Damaged transformer with faults in windings and its insulation

недопустимый дисбаланс по угловым сдвигам. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что значения фазового сдвига, как и отношение токов на кратно разнесенных частотах, являются достаточно информативными параметрами к обнаружению дефектов на силовых трансформаторах, как это было получено на обмотках синхронных электродвигателей [9, 10].

#### Результаты измерений на испытательных ударных трансформаторах

Далее представлены результаты обследования трех однофазных ударных испытательных трансформаторов мощностью 33 МВА напряжением 12/24 кВ. Каждый трансформатор имеет по две обмотки НН и две обмотки ВН (с параллельными полуветвями). Один из трансформаторов имел признаки повреждения обмоток. Определение состояния обмоток проводилось методом FRA. На рис. 3 показаны частотные характеристики обмоток ВН1 и ВН2

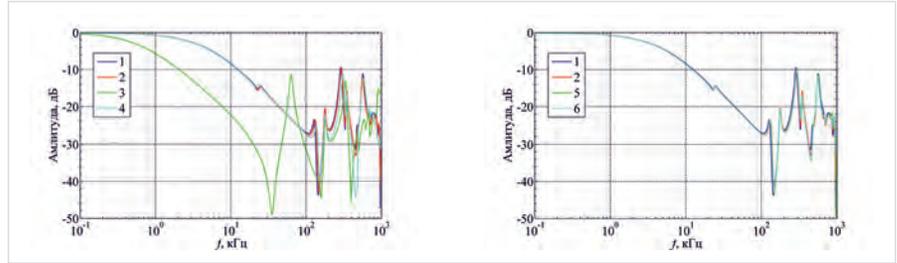


Рис. 3. Частотные характеристики обмоток ВН1 и ВН2 при закороченных НН1 и НН2 трех трансформаторов: 1 и 2 – обмотки ВН1 и ВН2 фазы А; 3 и 4 – обмотки ВН1 и ВН2 фазы В; 5 и 6 – обмотки ВН1 и ВН2 фазы С  
Fig. 3 – Frequency responses of HV1 and HV2 winding with shorted LV1 and LV2 windings of three transformers: 1 and 2 – windings HV1 and HV2 of phase A; 3 and 4 – windings HV1 and HV2 of phase B; 5 and 6 – windings HV1 and HV2 of phase C

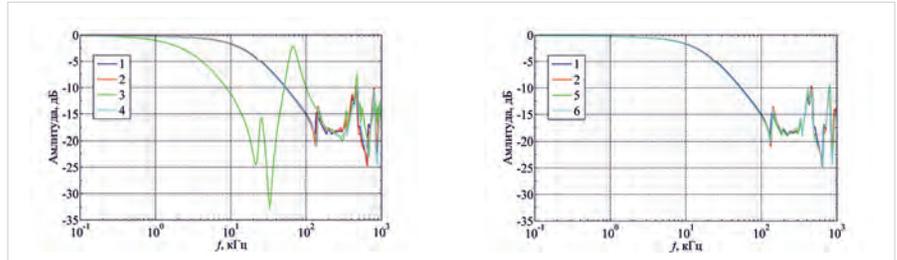


Рис. 4. Частотные характеристики обмоток НН1 и НН2 при закороченных ВН1 и ВН2 трех трансформаторов: 1 и 2 – обмотки НН1 и НН2 фазы А; 3 и 4 – обмотки НН1 и НН2 фазы В; 5 и 6 – обмотки НН1 и НН2 фазы С  
Fig. 4 – Frequency responses of LV1 and LV2 winding with shorted HV1 and HV2 windings of three transformers: 1 and 2 – windings LV1 and LV2 of phase A; 3 and 4 – windings LV1 and LV2 of phase B; 5 and 6 – windings LV1 and LV2 of phase C

трех трансформаторов при закороченных обмотках НН1 и НН2, а на рис. 4 – обмоток НН1 и НН2 при закороченных обмотках ВН1 и ВН2. Из рис. 3 и 4 видно, что частотные характеристики обмоток ВН1 и ВН2, НН1 и НН2 трансформаторов «фаза А» и «фаза С» практически идентичны. При этом частотная характеристика обмотки ВН1 трансформатора «фаза В» отличается от одноименной обмотки двух других

трансформаторов.

В работе была выполнена оценка состояния обмоток трансформаторов по методике DL/T 911 [12], в которой в зависимости от степени различия частотных характеристик одноименных обмоток различают четыре уровня отклонений (таб. 5). По стандарту DL/T 911 по частотным характеристикам обмоток ВН1 и ВН2 при закороченных НН1 и НН2, а также обмоток НН1 и НН2 при закороченных ВН1 и ВН2 состояние обмоток трансформаторов «фаза А» и «фаза С» можно оценить, как «норма», а трансформатора «фаза В» – «сильные отклонения» (таб. 6).

На всех трансформаторах также были выполнены измерения сопротивления короткого замыкания  $Z_k$  пар обмоток ВН–НН по стандартным и дополнительным схемам (таб. 7).

Отклонение сопротивления короткого замыкания пар обмоток ВН1–НН1 на фазе В составило 476%, что указывает на серьезное повреждение обмоток. Вероятной причиной такого изменения  $Z_k$  может быть перегорание одной из двух параллельных ветвей обмотки ВН1, а также значительная деформация второй полуобмотки ВН1. Это также подтверждается увеличением сопротивления короткого замыкания пар обмоток ВН1–НН2 по сравнению с парой ВН2–НН1. Отклонение сопротивления короткого замыкания пар обмоток ВН2–НН2 не превышает 3%, нормированные по РД 34.45-51.300-97.

Также была выполнена оценка состояния обмоток фаз трансформаторов по амплитудным и фазовым параметрам при различном соединении обмоток. Измерения амплитуд и угловых сдвигов проводились на частотах  $f_1=400$  Гц и  $f_2=800$  Гц. Для каждого трансформатора и схемы измерений определялось отношение токов на выбранных частотах и значение угла сдвига  $\Delta\phi$  (таб. 8).

Анализ последнего столбца таблицы 8 со значениями разности  $\Delta\phi$  между фазой А

Наименование параметра	Обмотка ВН			Обмотка НН		
	A-B	A-C	B-C	a-n	b-n	c-n
Сопр. обм. пост. току $R_0$ , Ом	116,1	98,2	48,5	0	0,005	0,005
Полное сопротивление обмотки $Z_k$ , Ом	4972	1427	2237	0	1	1
Индуктивность $M$ , мГн	7911	2267	2237	0	0	0
$I(f_1) / I(f_2)$ , % ( $f_1=400$ Гц, $f_2=800$ Гц)	-23	-21	-20	0	-20	-20
Сдвиг фаз $\phi(f_1)$	23	21	20	0	5	5
Сопротивление изоляции $R_i$ , МОм	9,1			0		

Таб. 4 – Результаты измерений на поврежденном трансформаторе 500 кВА  
Tab. 4 – Results of measurements on damaged 500 kVA power transformer

Граничные значения коэффициентов R	Оценка состояния обмотки
$RLF < 0,6$	Сильные отклонения
$0,6 \leq RLF \leq 1,0$ или $RMF < 0,6$	Заметные отклонения
$1,0 \leq RLF \leq 2,0$ или $0,6 \leq RMF < 1,0$	Незначительные отклонения
$RLF \geq 2,0$ ; $RMF \geq 1,0$ и $RHF \geq 0,6$	Норма

RLF, RMF, RHF – коэффициенты для областей низких (1-100 кГц), средних (100-600 кГц) и высоких (600-1000 кГц) частот.

Таб. 5 – Оценка состояния трансформаторов по методике DL/T 911  
Tab. 5 – Transformer condition assessment using DL/T-911

и фазой С при тождественных схемах соединения дает близкие к нулю значения разности  $\Delta\varphi$ , не превосходящие по величине  $1,0^\circ$ . Последнее свидетельствует об идентичности обмоток фазы А и фазы С. Значительная разница в фазовых параметрах наблюдается при сравнении обмоток фазы В с фазами А и С. Последнее и указывает на наличие дефектов в обмотках НН1 и ВН1 фазы В, независимо от схемы соединения (строки 6 и 7 таб. 8).

Данный пример иллюстрирует целесообразность совместного использования нескольких диагностических методов, а именно метода FRA и измерения Zk для повышения достоверности постановки «диагноза» о повреждении трансформатора. Показана возможность метода экспресс-оценки состояния обмоток путем сравнения отношения токов на выбранных частотах и значения фазового угла  $\Delta\varphi$  между током и напряжением на выбранной частоте. Признаком серьезного дефекта обмотки является отклонения фазового сдвига на величину, превышающую 3 угловых градуса между различными однотипными обмотками.

Необходимо отметить, что метод FRA и метод измерения Zk основаны на сравнении с результатами предыдущих измерений, выполненных на заводе и в эксплуатации. При этом, как правило, на заводе измерения напряжения короткого замыкания трехфазных трансформаторов выполняются при трехфазном питании, при этом значение напряжения короткого замыкания, приводимое в паспорте трансформатора, является средним по трем фазам. Измерения частотных характеристик в объеме заводских приемосдаточных испытаний все еще является большой редкостью для отечественной практики. Очевидно, что для повышения достоверности диагностики трансформаторов в эксплуатации целесообразно включать в заводской паспорт трансформатора, в том числе, фазные значения напряжения короткого замыкания, а также измеренные частотные характеристики обмоток (для удобства последующей обработки наиболее предпочтительно помимо графиков приводить также данные в текстовом виде). В дополнение к этому включение в состав эксплуатационной документации термограмм тепловизионного контроля или графических образов термограмм (рассматриваемых трансформаторов или их головных образцов), как это рекомендовалось в работе [9, 13], поможет в значительной степени ускорить и повысить качество технического диагностирования.

#### Итоги

Проведено определение повреждений обмоток силовых трансформаторов с использованием частотного и фазового анализа.

#### Выводы

Для оценки механического и электрического состояния обмоток трансформаторов целесообразно наряду с традиционным измерением сопротивления короткого замыкания использовать метод FRA.

Показана возможность экспресс-оценки состояния обмоток с помощью метода, основанного на сравнении отношения токов на выбранных частотах. Также показана достаточно высокая чувствительность к деформациям и повреждениям обмотки фазового метода, основанного на сравнении фазового угла между током и напряжением обмотки на фиксированных частотах.

#### Литература

1. Хренников А.Ю. Основные причины

Трансформатор	Обмотки	RLF	RMF	RHF	Оценка состояния
Фаза А	ВН1-ВН2	4,32	1,41	1,47	Норма
	НН1-НН2	5,29	1,23	1,26	Норма
Фаза В	ВН1-ВН2	0,38	0,41	-0,27	Сильные отклонения
	НН1-НН2	0,07	0,54	0,40	Сильные отклонения
Фаза С	ВН1-ВН2	5,94	2,36	0,61	Норма
	НН1-НН2	4,58	1,75	1,59	Норма

Таб. 6 – Результаты оценки состояния трансформатора ОМГИ-50000/220 по методике DL/T 911

Tab. 6 – Results of condition assessment of transformer OMGI-50000/220 using DL/T-911

Схема	Напряжение подано	Закорочены выводы	Zk, Ом (измерено)	Zk, Ом (паспортное)	Отклонение, %
ВН1–НН1	A1 – X1	a1 – x1	4,779	0,795	476
ВН2–НН2	A2 – X2	a2 – x2	0,818	0,795	1,33
ВН1–НН2	A1 – X1	a2 – x2	22,15	---	---
ВН2–НН1	A2 – X2	a1 – x1	18,27	---	---

Таб. 7 – Измеренные значения сопротивлений короткого замыкания трансформатора ОМГИ-50000/220

Tab. 7 – Measured short-circuit impedances of transformer OMGI-50000/220

№	Обозначение схемы измерений	If2 / If1 (f1=400 Гц; f2=800 Гц)			Δφ, град (400 Гц)			Отличие Δφ между фазами, град		
		Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	фВ -фА	фВ -фС	фА -фС
1	A1-X1	0,506	0,511	0,504	-84,6	-82,3	-84,6	2,3	2,3	0
2	A2-X2	0,512	0,511	0,506	-83,9	-82,3	-84,3	1,6	2	0,4
3	a1-x1	0,512	0,530	0,512	-76,1	-69,5	-76,7	6,6	7,2	0,6
4	a2-x2	0,514	0,530	0,510	-77,0	-69,7	-76,7	7,3	7	-0,3
5	a2-x2 (закорочены A2+X2)	0,996	0,994	0,995	-1,8	-1,8	-1,7	0	-0,1	-0,1
6	a1-x1 (закорочены A1+X1)	0,992	0,955	0,994	-1,8	-8,6	-1,7	-6,8	-6,9	-0,1
7	A1-X1 (закорочены a1+x1)	0,966	0,754	0,964	-6,9	-30,5	-7	-23,6	-23,5	0,1
8	A2-X2 (закорочены a2+x2)	0,964	0,964	0,966	-7	-7	-7	0	0	0,0
9	A1-a1	2,051	2,027	2,053	89,6	89,7	89,6	0,1	0,1	0,0
10	A2-a2	2,053	2,030	2,065	89,6	89,7	89,7	0,1	0	-0,1
11	X2-A2	0,505	0,510	0,497	-84,4	-82,3	-84,4	2,1	2,1	0,0
12	X1-A1	0,506	0,510	0,512	-84,5	-82,4	-84,6	2,1	2,2	0,1
13	x1-a1	0,512	0,530	0,514	-76,6	-69,7	-76,8	6,9	7,1	0,2
14	x2-a2	0,518	0,530	0,511	-77	-69,5	-76,7	7,5	7,2	-0,3

Таб. 8 – Оценка состояния трансформатора ОМГИ-50000/220 по амплитудно-фазовым параметрам

Tab. 8 – Condition assessment of transformer OMGI-50000/220 using amplitude-phase parameters

повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в процессе эксплуатации // Промышленная энергетика. 2006. №12. С. 12–14.

2. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Дементьев Ю.А., Антипов К.М., Сурба А.С. и др. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей // Электрические станции. 2005. №11. 69–75.

3. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов // Электричество. 2010. №2. С. 27–31.

4. А.И. Лурье. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. М.: Знак, 2005. 520 с.

5. Ларин В.С., Волков А.Ю. О локализации внутренних коротких замыканий в обмотках силовых трансформаторов с помощью частотного анализа реакции // Электро. Электротехника, электроэнергетика,

электротехническая промышленность. 2015. № 6. С. 13–20.

6. Volkov A.Yu., Drobyshevski A.A., Larin V.S., Matveev D.A., Drobyshevski S.A. Interpretation of Results of Diagnostics of Power Transformers by Using the Frequency Response Analysis. CIGRE Session, 2016, Paris, France.

7. Larin V.S. Internal short-circuits faults localization in transformer windings using FRA and natural frequencies deviation patterns. CIGRE Study Committee A2 COLLOQUIUM, 2017, Cracow, Poland.

8. Larin V.S., Matveev D.A. Analysis of transformer frequency response deviations using white-box modelling. CIGRE Study Committee A2 COLLOQUIUM, 2017, Cracow, Poland.

9. Завидей В.И., Милованов С.В. Комплексный подход в оперативной диагностике электрических машин // Экспозиция Нефть Газ. 2012. №5. С. 121–124.

10. Завидей В.И., Милованов С.В. Методы

и средства оперативной диагностики электрических машин // Контроль. Диагностика. 2013. №4. С. 72–78.

11. Осотов В.Н., Рушинский В.Н., Рушинский В.В., Смыслов В.П., Ульянов А.М. Оценка механического состояния обмоток крупных трансформаторов без их разборки // Электрические станции. 2003. №6. С. 51–57.

12. DL/T 911–2004 Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers. The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China. 2005.

13. Завидей В.И., Крупенин Н.В., Ваньков С.М., Печенкин В.И., Каланчин С.В. Критерий Колмогорова-Смирнова и возможности его применения в диагностике электрооборудования методами ИК-термографии. Вестник РАЭН, 2012.

ENGLISH

ELECTRICAL ENGINEERING

UDC 621.3

## Technical condition assessment of power transformer windings after impact of short-circuit current

### Authors:

**Viktor I. Zavidyev** — Sc.D, chief researcher<sup>1</sup>; zavideyvi@mail.ru

**Vasily S. Larin** — Ph.D., head of department<sup>1</sup>

**Aleksey Yu. Volkov** — head of group<sup>1</sup>

**Sergey A. Drobyshevskiy** — development director<sup>2</sup>

<sup>1</sup>VEI — branch Academician E.I. Zababakhin FSUE “RFNC-VNIIT”, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC “Energoskan”, Moscow, Russian Federation

### Abstract

In the article the issues of technical diagnostics of power transformers windings are considered. Results of windings condition assessment using impedance measurements, frequency-response analysis and fixed-frequency phase parameters measurement are presented. It is noted that the method for winding condition assessment based on phase-parameters measurement has potential for application on-site due to the rapidity of analysis, simplicity and availability of numeric criterion.

### Materials and methods

Power transformers and methods for its condition assessment.

### Results

Assessment of transformer winding fault was conducted using frequency and phase analysis.

### Conclusions

To evaluate mechanical and electrical condition of the transformer windings, it is advisable to use frequency response analysis (FRA) along with traditional measurement of short-circuit impedance.

The possibility of quick condition assessment of the windings using the method based on comparison of currents ratio at selected frequencies is shown. Also it is shown that phase method based on comparison of phase angle between winding current and voltage at the fixed frequencies has sufficiently high sensitivity to winding deformation and faults.

### Keywords

Transformers, diagnosis of defects, winding, frequency responses, frequency-response analysis, phase parameters

### References

- Khrennikov A.Yu. *Osnovnye prichiny povrezhdeniya obmotok silovykh transformatorov napryazheniem 110–500 kV v protsesse ekspluatatsii* [Main causes of damage to the power transformer with voltage of 110–500 kV during operation]. Industrial power engineering, 2006, issue 12, pp. 12–14.
- L'vov M.Yu., L'vov Yu.N., Dement'ev Yu.A., Antipov K.M., Surba A.S. and others. *O nadezhnosti silovykh transformatorov i avtotransformatorov elektricheskikh setey* [On reliability of power transformers and autotransformers of electrical networks] Elektricheskie stantsii, 2005, issue 11, pp. 69–75.
- L'vov M.Yu. *Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov* [Analysis of damageability of power transformers]. Electricity, 2010, issue 2, pp. 27–31.
- A.I. Lur'e. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh* [Electrodynamic withstandability of transformers and reactors at short-circuits]. М.: Знак, 2005, 420 p.
- Larin V.S., Volkov A.Yu. *O lokalizatsii vnutrennikh korotkikh zamykaniy v obmotkakh silovykh transformatorov s pomoshch'yu chastotnogo analiza reaktsii* [Localization of internal short circuits in power transformer windings using frequency-response analysis]. Electro. Electrical engineering, electrical, electrotechnical industry. 2015, issue 6. pp. 13–20.
- Volkov A.Yu., Drobyshevski A.A., Larin V.S., Matveev D.A., Drobyshevski S.A. Interpretation of Results of Diagnostics of Power Transformers by Using the Frequency Response Analysis. CIGRE Session, 2016, Paris, France.
- Larin V.S. Internal short-circuits faults localization in transformer windings using FRA and natural frequencies deviation patterns. CIGRE Study Committee A2 COLLOQUIUM, 2017, Cracow, Poland.
- Larin V.S., Matveev D.A. Analysis of transformer frequency response deviations using white-box modelling. CIGRE Study Committee A2 COLLOQUIUM, 2017, Cracow, Poland.
- Zavidyev V.I., Milovanov S.V. *Kompleksnyy podkhod v operativnoy diagnostike elektricheskikh mashin* [Integrated approach operational Diagnostics of electrical machines]. Exposition Oil Gas, 2012 issue 5, pp. 121–124.
- Zavidyev V.I., Milovanov S.V. *Metody i sredstva operativnoy diagnostiki elektricheskikh mashin* [Methods and tools for operational Diagnostics of electrical machines]. Controls. Diagnostics, 2012, issue 4, pp. 72–78.
- Oсотov V.N., Rushchinskiy V.N., Rushchinskiy V.V., Smyslov V.P., Ul'yanov A.M. *Otsenka mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok krupnykh transformatorov bez ikh razborki* [Mechanical winding condition assessment of large transformers without disassembling]. Electric power stations, 2003, issue 6, pp. 51–57.
- DL/T 911–2004 Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers. The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China. 2005.
- Zavidyev V.I., Krupenin N.V., Van'kov S.M., Pechenkin V.I., Kalanchin S.V. *Kriteriy Kolmogorova-Smirnova i vozmozhnosti ego primeneniya v diagnostike elektrooborudovaniya metodami IK-termografii* [Criterion Kolmogorov-Smirnov and the possibility of its application in the diagnosis of electrical equipment by IR-thermography]. Vestnik RAEN, 2012.