

Анализ причин выхода из строя трансформаторов с литой изоляцией в условиях Приморского края

Ионов Федор Николаевич

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения
Студент*

Сайфутдинов Ринат Хасанович

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения
к.т.н., доцент кафедры "Электротехника, электроника и электромеханика"*

Аннотация

В статье рассмотрены причины выхода из строя трансформаторов с литой изоляцией, сделаны выводы по результатам проведенных экспериментов и даны рекомендации по повышению срока службы сухих трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, силовой трансформатор с литой изоляцией, короткое замыкание, метод частичных разрядов.

Analysis of the causes of failure of transformers with cast insulation in the Primorsky Territory

Ionov Fedor Nikolaevich

*Far Eastern State Transport University
Student*

Saifutdinov Rinat Khasanovich

*Far Eastern State Transport University
Ph.D in engineering, candidate of technical science, associate professor,
Department of "Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics"*

Abstract

The article describes the reasons for the failure of transformers with cast insulation, made conclusions on the results of the experiments and recommendations for improving the service life of dry transformers..

Keywords: power transformer, power transformer with cast insulation, short circuit, partial discharge method

За период эксплуатации БКЭС (блок-контейнеров электроснабжения) линейной части магистрального газопровода "Сахалин - Хабаровск - Владивосток" в зоне ответственности Приморского ЛПУМГ (линейное производственное управление магистральных газопроводов) зафиксированы множественные инциденты, связанные с выходом из строя сухих трансформаторов с литой изоляцией [1]. В таблице 1 приведён перечень

инцидентов с указанием марки и завода-изготовителя повреждённых трансформаторов, а также проведённых мероприятий по восстановлению электроснабжения объектов.

Таблица 1. Перечень сухих трансформаторов, вышедших из строя за период эксплуатации

№	Дата выхода из строя	Объект	Марка трансформатора	Завод-изготовитель	Проведённые мероприятия
1	09.09.2012	ГРС-1 г. Владивостока	ТС-63/10/0,4 УЗ	ООО “Завод низковольтной аппаратуры”	Замена на ТС-63/10/0,4 УЗ
2	12.12.2012	БС 63	ТСЗЛ-25/10/0,4 У1	ОАО “Электроцит”	Замена на ТСЛ-25/10/0,4 У1
3	06.03.2013	ПРС51	ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТС-25/10/0,4
4	13.01.2014	БКТП-250 (в районе ГРС-1)	ТС-250/6/10 УЗ	ОАО “Свердловский завод трансформаторов тока”	Замена обмотки по гарантии
5	20.02.2014	БКЭС 1204 км.	ТСЗЛ-25/10/0,4 У1	ОАО “Электроцит”	Замена на ТСЛ-25/10/0,4 У1
6	03.11.2014	БКЭС 1323 км.	ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТМГ-25/10/0,4
7	15.12.2014	БКТП-250 (в районе ГРС-1)	ТС-250/6/10 УЗ	ОАО “Свердловский завод трансформаторов тока”	Замена на ТМГ - 160/6/10
8	09.12.2015	ГРС-1 г. Владивостока	ТС-63/10/0,4 УЗ	ООО “Завод низковольтной аппаратуры”	Замена на ТМГ - 25/10/0,4
9	11.07.2016	БКЭС 51 км. (отвод на Владивосток)	ТЛС-16/6/0,4 УХЛ2	ОАО “Свердловский завод трансформаторов тока”	Замена на ТМГ - 16/6/0,4
10	23.12.2016	БКЭС 1324 км.	ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТМГ-25/10/0,4
11	17.04.2017	УРС 52	ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТМГ - 25/10/0,4
12	27.04.2017	БКЭС 1366 км.	ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ1
13	12.05.2017	БКЭС 25 км. (отвод на Владивосток)	ТЛС-16/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Свердловский завод трансформаторов тока”	Замена на ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ1
14	03.07.2017	БКЭС 1322 км.	ТСЗЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТМГ - 25/10/0,4
15	23.09.2017	БКЭС 115 км. (отвод на Владивосток)	ТСЛ-25/10/0,4 УХЛ2	ОАО “Электроцит”	Замена на ТМГ - 25/10/0,4

В мае 2017 года специалистами Инженерно-технического центра были произведены измерения и испытания трёх повреждённых трансформаторов. По результатам измерения у двух трансформаторов выявлено резкое снижение сопротивления обмоток постоянному току по причине короткого замыкания между витками одной обмотки одной из фаз - разница между значениями повреждённой и целой обмотки для каждого трансформатора составила соответственно 86% и 42% при допустимых 2% [2]. У третьего трансформатора зафиксировано снижение сопротивления изоляции между обмотками высшего и низшего напряжения до уровня 0,55 МОм при допустимых 500 МОм [2], что свидетельствует о резком снижении изоляционных свойств обмотки и последующем коротком замыкании между обмотками высшего и низшего напряжения.

Целью статьи является исследование выхода из строя трансформаторов с литой обмоткой

Задачами статьи являются:

- выполнить анализ полученных данных в результате диагностики обмоток методом измерения частичных разрядов;
- выполнить анализ полученных данных в результате замеров при однофазных КЗ в отходящей сети;
- сделать выводы и предложения по улучшению условий эксплуатации трансформаторов.

Основной материал. Диагностика силовых трансформаторов методом измерения частичных разрядов на объектах Приморского ЛПУМГ применялась впервые. Частичный разряд представляет собой электрический искровой заряд невысокой мощности, возникающий в теле изоляции либо на её поверхности. Данные разряды имеют тенденцию к росту, поэтому в случае высокой интенсивности с течением времени они оказывают разрушающее воздействие на состояние изоляции и могут привести к её пробое. Источниками частичных разрядов в твёрдой изоляции являются воздушные включения или посторонние частицы, внесённые в процессе изготовления электрооборудования либо при его эксплуатации в неблагоприятных условиях - резкие перепады температуры, повышенная влажность, прочие внешние факторы. Нормативная база, регламентирующая процессы производства измерений, обработки результатов и выдачи заключения, включает в себя документы [3,4,5]. Во всех указанных нормативных документах единственным критерием для оценки состояния изоляции трансформатора методом ЧР является величина максимального заряда. Анализ научной литературы по данной тематике показал неоднозначность этого подхода, поскольку он не учитывает значения напряжения зажигания и общего числа зарегистрированных разрядов и может привести к неверной интерпретации процесса развития ЧР, а, значит, и к ошибочной оценке состояния изоляции.

Таким образом, отсутствуют как нормативная база, так и исходные данные для оценки изменения состояния изоляции от момента приёмосдаточных испытаний до испытаний, произведённых в ходе данного расследования. Единственным способом, позволяющим качественно оценить состояние изоляции, является сравнительный анализ результатов измерений всех трансформаторов и выделение в зону риска объектов с наиболее высокими значениями частичных разрядов. Диагностика силовых трансформаторов методом измерения ЧР была произведена на БКЭС в количестве 40 объектов. По результатам диагностики составлена сводная таблица 2. Полученные результаты демонстрируют, что частичные разряды значительной величины (более 1 нКл при указанном в ГОСТ уровне 10 пКл) зарегистрированы в большинстве сухих трансформаторов. Исключение составляют сухие трансформаторы ТСЗЛ-25/6/0,4 производства ОАО "Электроштит" (20, 21, 26), обмотки высшего и низшего напряжения которых выполнены отдельно. Во всех трёх трансформаторах данного типа

зарегистрировано не более одного дефекта на фазу, а величина частичных разрядов не превышает 0,25 нКл, что 20 раз меньше, чем в трансформаторах того же завода-изготовителя с монолитным блоком обмоток ВН-НН. Трансформатор УРГ-3 марки ТСЗЛ-40/6/0,4 с отдельными обмотками производства ООО «Свердловский завод трансформаторов тока» (1,2,9,14,16,17,28,35-40) также отличается сниженным уровнем и интенсивностью частичных разрядов. Состояние изоляции данных трансформаторов можно классифицировать как нормальное.

Таблица 2 Результаты измерения частичных разрядов трансформаторов БКЭС

№	Объект	Количество дефектов (наличие частичных разрядов) по фазам			Средний заряд по фазам, нКл			Максимальный заряд по фазам, нКл		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	БКЭС 1152 км	18			3,82			4,09		
2	БКЭС 1231 км	21	11	13	2,82	4,31	2,59	3,33	7,22	3,31
3	БКЭС 1242 км	7	13	2	5,6	3,66	0,4	8,38	7,6	7,9
4	БКЭС 1248 км	10	8	5	6,2	5,95	7,68	19,41	11,04	14,54
5	БКЭС 1251 км	5	1	5	3,67	2,07	8,47	10,35	4,89	16,27
6	БКЭС 1279 км	4	9	15	5,06	6,78	5,57	9,58	18,26	17,37
7	БКЭС 1301 км	16	13	7	8,78	6,7	6,47	22,02	26,05	10,2
8	БКЭС 1322 км	10	25	14	2,46	6,78	6,39	6,5	8,02	8,75
9	БКЭС ПРС-44	8	0	0	4,16	0	0	13,01	0	0
10	БКЭС УРС-45	15	9	8	3,22	3,36	5,97	3,65	3,55	8,03
11	БКЭС 1501 км	28	13	33	4,06	2,11	7,98	8,73	5,6	8,82
12	БКЭС 1521 км	13	21	23	2,37	6,32	4,63	7,81	8,32	8,22
13	БКЭС 1522 км	11	19	29	5,56	6,56	5,32	9,01	9,04	8,59
14	БКЭС УРГ-3	12	12	6	1,06	1,54	2,56	2,83	2,47	6,24
15	БКЭС БС 61	4	22	0	7,24	0,78	0	7,27	1,77	0
16	БКЭС 71 км	10	8	8	2,18	3,29	1,34	3,28	8,43	2,63
17	БКЭС БС 62	38	16	25	1,37	2,71	2,9	3,99	6,7	8,45
18	БКЭС 106 км	28	27	23	5,05	4,21	5,68	8,96	8,6	8,5
19	БКЭС БС 63	23	29	27	2,72	7,24	4,85	7,97	9,37	7,68
20	БКЭС БС 60	0	0	1	0	0	0,136	0	0	0,15
21	БКЭС БС 58	0	0	1	0	0	0,25	0	0	0,272
22	БКЭС 1377 км	10	6	13	7,4	6,35	7,81	21,18	14,4	15,57
23	БКЭС 1401 км	15	16	20	9,73	18,81	21,42	21,08	34,44	32
24	БКЭС 1447 км	12	6	15	8,66	7,32	27,5	18,91	16,3	32,46
25	БКЭС 1469 км	3	10	20	3,52	5,78	11,25	8,56	24,09	23,95
26	БКЭС 1569 км	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	БКЭС 59 км	13	164	7	4,44	10,41	5,76	6,47	11,34	9,39
28	БКЭС 83 км	9	13	14	2,06	4,11	2,71	3,98	10	7,65
29	БКЭС 1421 км	21	26	27	1,87	4,4	7,54	7,42	8,69	8,88
30	БКЭС ПРС 46	15	10	4	8,79	4,39	4,74	32,01	9,81	6,66
31	БКЭС ПРС 47	10	10	8	7,41	10,27	13,82	19,8	32,9	23,3
32	БКЭС ПРС 49	21	21	27	7,28	3,82	7,08	8,91	6,25	9,18
33	БКЭС ПРС 50	8	7	21	2,58	3,05	6,29	8,27	7,96	9,25
34	БКЭС УРС 48	37	27	28	2,09	6,18	7,47	8,09	8,9	9,37
35	БКЭС 1168 км	18	12	13	1,31	2,08	2,3	6,78	4,88	7,39
36	БКЭС 1204 км	8	9	11	1,39	1,95	2,15	2,93	3,31	4,81
37	БКЭС 1222 км	9	16	10	3,03	3,45	2,49	8,01	7,2	6,9
38	БКЭС 1223 км	19	14	15	3,67	3,87	3,68	7,61	7,89	7,68
39	БКЭС 1224 км	13	18	11	2,25	4,98	2,75	7,3	8,69	7,62
40	БКЭС ПРС 40	14	16	15	3,09	2,18	2,63	7,56	8,82	5,47

Трансформаторы, величина частичных разрядов в изоляции которых не превышает значения 5 нКл. Состояние данных трансформаторов можно классифицировать как нормальное с дефектами.

В группу риска необходимо выделить трансформаторы, величина средних зарядов в которых превышает значение 5 нКл - это 60% от общего числа трансформаторов. Частичные разряды высокой амплитуды в этих трансформаторах фиксируются, начиная со значения 3,9 кВ при номинальном фазном напряжении 5,7 кВ, что означает их постоянное присутствие в нормальном режиме работы.

Ввиду отсутствия данных об исходном уровне частичных разрядов на момент производства приёмо-сдаточных испытаний сделать прогноз дальнейшего срока эксплуатации не представляется возможным. С целью оценки дальнейшего состояния изоляции необходимо производство повторного измерения частичных разрядов в среднесрочной перспективе.

Учитывая повышенную чувствительность сухих трансформаторов к отклонениям напряжения внешней сети, а также информацию о периодических ударах молнии в подводящие линии 6-10 кВ с выходом из строя измерительных трансформаторов тока и напряжения, был выполнен контроль качества электрической энергии воздушной линии 6 кВ «Подстанции А» при помощи анализатора Ресурс-ЦБ2. Результаты измерений качества сети и анализ полученных данных приведены ниже.

Анализатор Ресурс-ЦБ2 был установлен в ячейке трансформатора напряжения 6 кВ БКТП- 160/6/10 ГРС «Владивосток» в период с 25.07.2017 по 11.10.2017 года. Питание устройства осуществлялось от трансформатора собственных нужд БКЭС. Ниже приведены данные о провалах и перенапряжениях в сети 6кВ за указанный период.

Таблица 3. Провалы фазных напряжений в исследуемом периоде

Напряжение Ua			Напряжение Ub			Напряжение Uc		
Дата	δU_n %	$\Delta t_{п}$, с	Дата	δU_n %	$\Delta t_{п}$, с	Дата	δU_n %	$\Delta t_{п}$, с
27.07.17, 10:55	94,40	3,29	26.07.17, 10:29	59,40	2,61	18.08.17, 15:55	93,20	16,10
07.08.17, 08:05	79,50	59,75	—	—	—	—	—	—
09.10.17, 14:57	93,50	7,92	—	—	—	—	—	—

δU_n – глубина провала фазного напряжения, %;

$\Delta t_{п}$ – длительность провала фазного напряжения, с.

Таблица 4. Перенапряжения в исследуемом периоде

Напряжение Ua			Напряжение Ub			Напряжение Uc		
Дата	$K_{перU}$	$\Delta t_{пер}$, с	Дата	$K_{перU}$	$\Delta t_{пер}$, с	Дата	$K_{перU}$	$\Delta t_{пер}$, с
26.07.17, 06:10	1,53	0,61	26.07.17, 10:29	1,83	12,4	26.07.17, 10:29	1,88	17,04
26.07.17, 10:29	1,55	3,82	18.08.17, 15:55	1,66	16,1	27.07.17, 10:55	1,67	3,26
18.08.17, 15:55	1,67	15,98	09.10.17, 14:57	1,81	7,91	07.08.17, 08:05	1,63	59,50
26.09.17, 13:03	1,50	0,13	—	—	—	09.10.17, 14:57	1,67	7,91

$K_{перU}$ – коэффициент временного перенапряжения;

$\Delta t_{пер}$ – длительность провала фазного напряжения, с.

По полученным данным видны периодические глубокие провалы фазных напряжений с одновременным повышением напряжения других фаз

до линейного значения. Это является прямым признаком однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью. Длительность этих режимов достигает одной минуты. Защиты по напряжению нулевой последовательности реклоузеров и терминалов Сириус-СП при этом режиме срабатывают на сигнал, однако сообщения на АРМ энергетика и диспетчера Приморского ЛПУМГ не приходят поскольку передача этих данных посредством ОБМ-интерфейса не реализована. На рисунке 3 представлены кривые напряжение при зафиксированном однофазном КЗ.

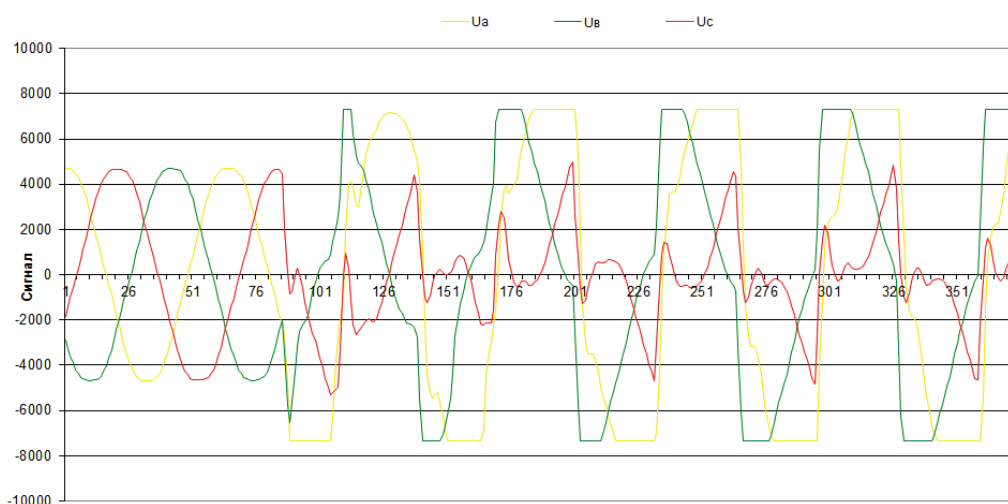


Рисунок 1 - Однофазное замыкание на землю в сети 6кВ 18.08.2017 г.

По результатам проведенных мероприятий, возможно, сделать вывод о факторах способствующих ухудшению изоляционных свойств в процессе эксплуатации:

1. Исполнение высшей и низшей обмоток трансформаторов производства ОАО “Электроцит” в виде единого монолитного блока ВН-НН. Результаты диагностики трансформаторов данного типа показали наличие частичных разрядов повышенной амплитуды и интенсивности по сравнению с трансформаторами другого исполнения и значениями, определенными в нормативных документах. Данных об уровне частичных разрядов в момент проведения приемо-сдаточных испытаний заводом-изготовителем не предоставлено, поэтому вероятной причиной наличия дефектов изоляции может являться нарушение технологического процесса при изготовлении трансформаторов.

2. Низкое качество напряжения питающей сети 6-10 кВ, выражающееся в регулярных провалах и перенапряжениях по причине однофазных замыканий на землю и грозовых импульсов. Согласно паспортным данным на сухие трансформаторы их продолжительная безопасная эксплуатация гарантируется при напряжении не более 110% от номинального значения.

3. Несоблюдение необходимой периодичности проведения испытаний и измерений силовых трансформаторов в процессе эксплуатации. Фактически с момента проведения пусконаладочных работ техническое

обслуживание трансформаторов в объёме, регламентированном ПТЭЭП, не производилось.

С целью продления срока службы силовых сухих трансформаторов с литой изоляцией, предлагается осуществить мероприятия и рекомендации:

1. Постоянный контроль уровня напряжения питающих воздушных линий 6-10 кВ с фиксацией внешних возмущений в виде однофазных замыканий на землю и перенапряжений. Данный контроль может быть осуществлён имеющимися в составе реклоузеров и терминалов Сириус защитами с обязательной организацией передачи предупредительных сообщений на пульт диспетчера или АРМ инженера-энергетика. Для предотвращения работы трансформаторов при длительном перенапряжении ввести в работу защиту от перенапряжения с выдержкой времени 5 минут.

2. Работы по ежегодному техническому обслуживанию силовых трансформаторов, включая измерения сопротивления изоляции обмоток, стяжных шпилек и измерение омических сопротивлений обмоток постоянному току.

3. Рассмотреть возможность формирования аварийного запаса и поэтапной замены сухих трансформаторов с литой изоляцией на аналогичны, однако со сниженным числом дефектов в изоляции, к примеру марки ТСЛЗ ОАО «Электроцит» - ТМ Самара».

4. Рекомендовать заводу изготовителю сопровождать трансформатор данными испытаний о частичных разрядах и устанавливать на вводах ограничители перенапряжений.

Библиографический список

1. САНШ.672133.05 РЭ п 1.4.1 “В трансформаторах мощностью до 63 кВА включительно обмотки НН и ВН выполнены одним монолитным блоком”.
2. ПТЭЭП Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей Приказ Минэнерго России от 13.01.2003 N 6 (ред. от 13.09.2018)
3. ГОСТ 20074-83 “Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов”;
4. МЭК 60076-11:2004 “Трансформаторы сухие. Часть 11. Сухие трансформаторы”;
5. ГОСТ Р 54827-2011 “Трансформаторы сухие. Общие технические условия”.