

О влиянии масла марки ГК на надёжность электрооборудования.

Трансформаторное масло, являясь неотъемлемой частью изоляционной системы маслonaполненного электрооборудования, оказывает значительное (зачастую решающее) влияние на надёжность этого оборудования в целом. К сожалению номенклатура показателей качества трансформаторного масла, закреплённая в действующих нормативных документах, далеко не всегда позволяет оценить степень влияния масла на диэлектрические характеристики изоляционной конструкции.

Не составляет исключения и считающееся одним из лучших отечественных масел масло марки ГК. Несмотря на эпизодически, но достаточно регулярно, появляющиеся повреждения или браковка маслonaполненных вводов из-за выделения в бумажно-масляном изоляционном остова воскообразного вещества (X-воск), до сих пор не проведено исчерпывающих исследований его появления, хотя в периодической печати звучали заявления о полном разрешении этой проблемы и давались кое-какие рекомендации по диагностированию этого явления.

Остановимся вкратце на истории этой проблемы. Впервые, примерно 20 лет назад, с проблемой воскообразования столкнулись в Иркутскэнерго при попытке смешения во вводах масел марок ТКП и ГК, что дало повод объяснить это явление особенными свойствами смеси этих масел. Однако не прошло и нескольких лет, как в Мосэнерго в 1989 году через несколько лет эксплуатации аварийно повредился ввод масляного выключателя 220 кВ (зав. чертёж 2ИЭ.800.112.), после чего при обследовании было забраковано 48 из 90 аналогичных вводов, залитых чистым маслом ГК. Однако по каким то причинам было решено, что явление касается только одной партии вводов, залитых одной партией масла и о проблеме вновь забыли, посчитав это результатом случайного сбоя при изготовлении масла. Поскольку это пришлось на период практически полного развала отраслевого информационного пространства, о печальном опыте Мосэнерго знало лишь небольшое число специалистов, призывы которых о более глубоком изучении причин появления X-воска не были услышаны. Следующими на очереди оказались Свердловэнерго и Челябинэнерго, которым после нескольких повреждений вводов из-за отложений X-воска пришлось разрабатывать собственные методы обнаружения вводов с наличием X-воска. Всего было выявлено и заменено около 80 вводов разных лет изготовления, которых объединяло одно – все они были залиты маслом марки ГК.

На рисунке 1 показаны фрагменты бумажной основы одного из повредившихся вводов, где хорошо видны отложения X-воска и очаги развивающегося пробоя. Большое количество X-воска свидетельствует о достаточном длительном процессе его отложения до возникновения пробоя изоляционного остова (по нашему опыту 9-10 месяцев). Именно это обстоятельство позволило разработать систему диагностирования таких вводов, позволившую планомерно заменить все вводы с X-воском, избегая преждевременного отключения оборудования и его длительного простоя в ожидании подхода резерва. В основу такой системы были положены следующие соображения:

1. Отложения X-воска приводят к ухудшению отвода тепла, появлению локальных перегревов, в местах которых начинают развиваться очаги пробоя. Это неизбежно приводит к появлению газов разложения, наличие которых в масле легко обнаруживается хроматографическим методом. Причём на начальной стадии развития процесса будут преобладать газы, характерные для термических процессов разложения, а по мере формирования очагов пробоя будут повышаться концентрации газов, характерных для электрических разрядов.
2. Появление X-воска и очагов развития пробоя неизбежно должны приводить к увеличению диэлектрических потерь изоляции вводов. Причём на начальной стадии процесса, когда объём местных дефектов ещё невелик, это увеличение уверенно

зафиксировать можно только при измерении $tg\delta$ на напряжении выше 10 кВ и тем увереннее, чем ближе напряжение при измерениях к рабочему напряжению вводов. Первое утверждение подтверждается данными таблицы 1, а второе – таблицы 2.



Рис. 1. Отложение X-воска между слоями бумажной основы и очаг развития пробоя во вводе 220 кВ.

1 - отложение (соскобы) X-воска.2 – очаг развития пробоя.

Таблица 1.

Результаты хроматографического анализа газов, растворённых в масле вводов масляных выключателей 220 кВ, содержащих X-воск (зав. чертёж 090 и 112)

Завод. черт.	Год изг.	Содержание газов (ppm)							$tg\delta_1$ (%) 70 кВ
		CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	H ₂	CO	
112	1992	14359	1270	54,1	12,5	4592	28080	250	-
	1993	3904	1520	13,2	5,6	1294	25580	80	1,60
	1991	3278	640	24,6	4,2	1564	41110	60	-
090	1986	3578	1950	32,7	7,0	1764	19940	120	1,66
	1986	1160	2290	88,5	137,8	510	10970	190	1,6
	1987	2573	1440	31,6	14,0	19772	9560	120	1,65

В Свердловэнерго на базе серийной ЭТЛ-35 была создана передвижная электролаборатория для измерения $tg\delta$ изоляции вводов при напряжении до 80-90 кВ непосредственно на выключателе. Анализ результатов измерения $tg\delta_1$ изоляции вводов при повышенном напряжении и результатов хроматографического анализа масла с учётом данных о повреждённых вводах показал, что процесс формирования пробоя от момента начала образования X-воска составляет не менее 12 месяцев. Это обстоятельство позволило разбить весь массив дефектных вводов группы по степени развитости дефектов и планировать поквартальную замену вводов с дефектами на последней стадии развития. Как отмечалось выше это позволило сократить до минимума время вывода из работы выключателей с дефектными вводами.

Таблица 2.

Зависимость $tg\delta_1$ изоляции вводов масляных выключателей 220 кВ, содержавших X-воск, от напряжения

Зав. чертёж	Год изготовления	$tg\delta_1$ (%) при напряжении (кВ)				
		10	35	75	100	126
112	1986	1,50	2,00	2,60	2,80	3,00
	1986	1,43	1,7	2,20	2,80	2,80
	1992	0,80	0,93	1,18	1,40	1,70
090	1986	0,71	0,80	1,04	1,25	1,45
	1988	0,70	1,20	1,60	-	-
	1989	0,93	1,00	1,50	1,80	2,10
	1989	0,60	0,74	0,86	1,08	-
	1990	0,76	0,87	1,24	1,50	1,45

Наученные горьким опытом, несмотря на утверждения некоторых высокопоставленных специалистов о случайности таких явлений, работники электротехнических служб Свердловэнерго, Челябинэнерго и ТГК-9 стали с более пристальным вниманием следить за результатами контроля всех вводов и всего электрооборудования 220 кВ и выше, залитого маслом марки ГК, большую часть времени находящегося в холодном состоянии.

Результат не замедлил сказаться, и симптомы появления Х-воска были обнаружены во вводах силовых трансформаторов и в измерительных трансформаторах тока. Ниже даётся описание этих случаев.

По результатам хроматографического контроля масла были забракованы и отправлены в ремонт 2 ввода 220 кВ типа ГМТБ-220/1000 (заводской чертёж 086) резервного трансформатора собственных нужд. При осмотре этих вводов с полной разборкой в Свердловэнерго было установлено:

- -внутренние поверхности фарфоровых покрышек чистые, желтый налет и следы частичных разрядов отсутствуют,
- -остовы вводов чистые, следов разрушения изоляции не обнаружено,
- -сильфоны вводов замечаний не имеют,
- -при разборке стяжных узлов вводов на металлических разрезных фланцах прессующих устройств в местах касания прессующих винтов обнаружен небольшой черный налет.

Учитывая имеющийся опыт, было принято решение о дальнейшем исследовании вводов, включая термовакуумную сушку, измерения диэлектрических потерь изоляции при повышенном напряжении и испытания повышенным напряжением. Результаты хроматографического анализа газов, растворённых в масле, на разных этапах исследований приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Результаты хроматографического анализа растворённых в масле газов из ввода типа ГМТБ-220/1000, зав. черт.086, зав., № Т-13896, 1983 года выпуска.

газ	Этапы исследований							
	обследование в эксплуатации		ремонт без сушки			ремонт с сушкой		
			до осмотра	после ремонта	после испытан	до испытан	после испытан	
	30.07.02	15.02.05	16.02.05	23.03.05	30.03.05	06.05.05	06.05.05	13.05.05
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CH ₄	14,0	287,0	1127,0	3,3	8,3	24,6	23,2	24,0
CO ₂	1364,0	344,0	485,0	74,0	96,0	125,0	133,0	149,0
C ₂ H ₄	5,1	0,2	0,9	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2
C ₂ H ₂	-	-	-	-	0,8	0,2	Сл	-
C ₂ H ₆	3,1	11,8	34,8	0,6	1,1	3,0	2,4	3,0
H ₂	15,0	1662,0	1368,2	64,0	282,0	965,0	908,0	823,0
CO	292,0	30,0	46,0	3,0	4,0	6,0	6,0	8,0

Таблица 4

Результаты хроматографического анализа растворённых в масле газов из ввода типа ГМТБ-220/1000, зав. черт.086, зав., № Т-13510, 1983 года выпуска.

газ	Этапы исследований							
	обследование в эксплуатации		ремонт без сушки			ремонт с сушкой		
			до осмотра	после ремонта	после испытан	до испытан.	после испытан	повтор
	30.07.02	15.02.05	16.02.05	23.03.05	30.03.05	06.05.05	06.05.05	13.05.05
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CH ₄	88,9	19474,0	19065,0	37,2	142,0	300,4	276,2	310,0
CO ₂	2821,0	988,0	857,0	88,0	131,0	171,0	187,0	206,0
C ₂ H ₄	48,3	6,8	6,7	1,5	0,9	1,0	0,8	0,8
C ₂ H ₂	0,7	0,5	0,5	-	0,3	0,3	0,2	0,1

C ₂ H ₆	12,0	966,4	940,0	9,6	53,0	75,2	74,4	82,6
H ₂	30,0	4075,0	4374,0	181,0	618,0	1833,0	1471,0	1474,0
CO	635,0	38,0	40,0	4,6	8,6	13,0	12,0	17,0

Результаты измерений диэлектрических характеристик основной изоляции вводов после термовакуумной сушки представлены в таблицах 5 иб.

Таблица 5

Результаты измерения диэлектрических ввода типа ГМТБ-220/1000,
зав. черт.086, зав., № Т-13896, 1983 года выпуска.

характеристика	значение характеристики при напряжении (кВ)										
	на подъёме напряжения					Выдерж. 1 мин. 400	при снижении напряжения				
	10	35	76	151	214		214	151	76	35	10
$tg\delta_1$ (%)	0,46	0,50	0,55	0,58	0,60	-	0,61	0,60	0,57	0,52	0,47
C_1 (пФ)	332	332	389	390	390	-	390	390	390	390	390

Таблица 6

Результаты измерения диэлектрических ввода типа ГМТБ-220/1000,
зав. черт.086, зав., № Т-13510, 1983 года выпуска.

характеристика	Значение характеристики при напряжении (кВ)		
	10	38	76
$tg\delta_1$	0,59	0,63	Установка отключается действием защит
C_1	406,6	406,6	

Поскольку у обоих вводов в процессе исследований отмечено увеличение концентраций растворённых в масле газов, а также рост диэлектрических потерь и ёмкости при повышении напряжения было принято решение о полной разборке вводов с размоткой изоляционной основы. При этом обнаружено:

- На ближайших к токоведущей трубе слоях бумаги по всей высоте остова ввода зав. № Т-13896 имеются парафинистые отложения (Х-воск) и следы разложения масла в виде вязкой черной массы.
- На ближайших к токоведущей трубе слоях бумаги по всей высоте остова ввода зав. № Т-13510 имеются парафинистые отложения (Х-воск) и следы частичных разрядов примерно на 1/4 высоты остова.

Таким образом, во вводах 220 кВ силового трансформатора зав. черт. 086, залитых маслом марки ГК, впервые были обнаружены признаки развивающихся дефектов, аналогичных обнаруживаемым у вводах 220 кВ масляных выключателей, залитых маслом этой же марки..

В 2006-2007 годах при плановых обследованиях трансформаторов тока типа ТФЗМ-110, залитых маслом марки ГК, было выявлено несколько трансформаторов, у которых зафиксирован рост диэлектрических потерь при повышении напряжения и аномально высокое содержание в масле водорода, метана и этана,. Результаты обследования этих трансформаторов приведены в таблице 7.

Хотя формально диэлектрические характеристики этих трансформаторов тока удовлетворяли требованиям норм, учитывая предыдущий опыт, было принято решение о полной разборке одного трансформатора и послойном осмотре бумажной изоляции. При этом на первых от токоведущей жилы слоях бумаги обмотки высокого напряжения были

обнаружены точечные вазелинообразные отложения (Х-воск). Общий бумажных слоёв с отложениями показан на рисунке 2.

Эти данные ещё раз доказывают склонность масла марки ГК к образованию отложений на слоях бумаги воскообразных отложений, приводящих в конечном итоге к повреждению оборудования.

Таблица 7.

Результаты обследования трансформаторов тока 110 кВ типа ТФЗМ-110Б-У1, залитых маслом марки ГК в ОАО «Свердловэнерго»

характеристика		Значения измеренных характеристик и данные о трансформаторах				
заводской №		9876	49455	49466	49421	49482
год выпуска		01.01.95	01.01.98	01.01.98	01.03.98	01.03.98
год установки		01.01.96	01.01.02	01.01.02	27.02.02	27.02.02
дата контроля		26.04.06(*)	10.07.07	10.07.07	03.07.07	03.07.07
$tg \delta_1$ (%)	10 кВ	0,40	0,48	0,4	0,8	0,58
	75 кВ	2,55	2,49	2,6	3,3	2,52
H ₂		3956	2279,8	1578,5	5326,9	2403,1
CH ₄		2333	841,2	758	1253,9	530,1
C ₂ H ₆		2500	382,6	304,7	579,1	282,3
C ₂ H ₄		0,9	1,1	1	3,4	2
C ₂ H ₂		0,1	0	0	0	0
CO		29	38	35,3	90,2	78,6
CO ₂		449	947,9	651,3	971,7	879,8
$\sum C_x H_y$		4834	1224,9	1063,7	1836,4	814,4



Рис. 2. Воскообразные отложения на слоях бумажной изоляции трансформатора тока типа ТФЗМ-110.

Таким образом, в настоящее время можно с достаточной уверенностью утверждать, что масло марки ГК может быть источником образования X-воска в изоляции практически всех видов высоковольтного оборудования, что в конечном итоге приводит к развитию частичных разрядов, формированию канала пробоя изоляции и повреждению или выводу такого оборудования из работы. При этом нормированные показатели масла и диэлектрические характеристики изоляции соответствуют действующим нормам, что свидетельствует о несовершенстве этих норм.

Эффективным способом обнаружения таких дефектов на работающем оборудовании является измерение диэлектрических характеристик изоляции при повышенном напряжении (снятие ионизационной характеристики) в сочетании с хроматографическим анализом растворённых в масле газов.

Необходимо целенаправленное изучение причин выделения из масла марки ГК X-воска для выработки рекомендаций по совершенствованию технологии его изготовления и разработки методов контроля, позволяющих обнаруживать склонность масла к образованию X-воска уже на стадии изготовления, чтобы исключить попадание такого масла в эксплуатацию.