

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-2-110-118>
УДК 621.3.048

Внедрение спектральных методов в диагностику маслонаполненного высоковольтного оборудования

Лютикова М. Н.^{1*}, Коробейников С. М.¹, Коновалов А. А.²

¹ ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»
пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

² ПАО «ФСК ЕЭС»
ул. Академика Челомея, 5А, 117630, г. Москва, Россия

Поступила / Received 05.04.2020

Принята к печати / Accepted for publication 10.06.2020

Надежная эксплуатация маслонаполненного высоковольтного оборудования базируется, в том числе на эффективных методах диагностики, позволяющих получать информацию о состоянии внутренней изоляции электрооборудования и, соответственно, своевременно проводить мероприятия по обеспечению его бесперебойной работы. Традиционно в лабораторной практике используют хорошо известные физико-химические методы анализа, с помощью которых устанавливают электрофизические, физические и химические показатели жидкого диэлектрика. Каждый показатель и в особенности их совокупность указывают на степень термо- и электрохимического старения масла, образования в нем примесей ионного характера, которые коагулируют, накапливаются в наиболее напряженных местах и образуют проводящие осадки. В целом, наличие таких опасных веществ в масле приводит к снижению электроизоляционных свойств, что увеличивает риск развития дефекта, способного привести к негативным последствиям. Следует заметить, что традиционными методами далеко не всегда удается зафиксировать начало образования коллоидно-дисперсных включений, предшествующего формированию осадка на твердой внутренней изоляции электрооборудования. Поэтому, с целью более глубокого понимания процессов, происходящих в изоляции высоковольтного оборудования необходимо внедрение высокочувствительных спектральных методов контроля.

Показана актуальность внедрения спектрального метода в практическую диагностику высоковольтного оборудования с жидкими диэлектриками на примере изучения элементного состава осадков и бумажной изоляции из высоковольтных герметичных вводов. Рассмотрены конкретные случаи из практики эксплуатации герметичных вводов, которые были отбракованы по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. В то время как физико-химические параметры масла из вводов не вызвали никаких опасений, при детальном осмотре внутренней изоляции вводов обнаружены воскообразные осадки, состав которых был установлен с помощью метода атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Кроме того, проводилось исследование состава слоев бумажной изоляции высоковольтных вводов на предмет содержания в них элементоорганических примесей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: осадок, металлы, коллоиды, бумажная изоляция, спектральные методы

Адрес для переписки:

Лютикова М. Н.
ФГБОУ ВО «НГТУ», кафедра Безопасность труда
пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия
e-mail: m.lyutikova@mail.ru

Address for correspondence:

Lyutikova M. N.
Novosibirsk State Technical University
K. Marxa str., 20, 630073, Novosibirsk, Russia
e-mail: m.lyutikova@mail.ru

Для цитирования:

Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Коновалов А. А.
Внедрение спектральных методов в диагностику
маслонаполненного высоковольтного оборудования.
Надежность и безопасность энергетики. 2020. – Т. 13,
№2 – С. 110 – 118.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-2-110-118>

For citation:

Lyutikova M.N., Korobeynikov S. M., Konovalov A. A. [The introduction of spectral methods in the diagnosis of oil-filled high-voltage equipment]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2020, vol. 13, no. 2, pp.110 – 118. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-2-110-118>

The introduction of spectral methods in the diagnosis of oil-filled high-voltage equipment

Lyutikova M. N.^{1*}, Korobeynikov S. M.¹, Konovalov A. A.²

¹ Novosibirsk State Technical University
K. Marxa str., 20, 630073, Novosibirsk, Russia

² PJSC «FGC UES»
Academician Chelomei str., 5A, 117630, Moscow, Russia

Reliable operation of oil-filled high-voltage equipment is based, inter alia, on effective diagnostic methods, which make it possible to obtain information on the state of the internal insulation of electrical equipment and, accordingly, take timely measures to ensure its uninterrupted operation. Traditionally, well-known physicochemical methods of analysis are used in laboratory practice, which enable to determine the electrophysical, physical and chemical parameters of a liquid dielectric. Each parameter, and especially their totality, indicate the degree of thermal and electrochemical aging of the oil, and the formation of ionic impurities in it, which coagulate, accumulate in the most stressful places and form conductive deposits. In general, the presence of such "dangerous" substances in the oil leads to a decrease in electrical insulation properties, which increases the risk of developing a defect that can lead to negative consequences. However, traditional methods are not always able to measure the commencement of formation of the colloid-dispersed inclusions preceding the formation of deposits on the solid internal insulation of electrical equipment. Therefore, in order to gain a deeper understanding of the processes occurring in the isolation of high-voltage equipment, it is necessary to introduce highly sensitive spectral control methods.

This study shows the relevance of the introduction of the spectral method in practical diagnosis of high-voltage equipment with liquid dielectrics, in the case of a study of the elemental composition of deposits and paper insulation in high-voltage bushings. This also explains individual cases in the practice of operation of sealed bushings, which have been rejected as a consequence of the results of chromatographic analysis of dissolved gases in oil. Physicochemical parameters of the oil from the bushings does not cause any concern. However, during the detailed examination of the internal insulation of the bushings, wax-like deposits were revealed, and their composition was established using atomic absorption spectrometry (AAS). In addition, the composition of the paper (OIP) insulation layers of high-voltage bushings was analyzed for the content of organometallic impurities.

KEYWORDS: deposits, metals, colloids, paper (OIP) insulation, spectral methods

Применение минерального масла в качестве изоляционной жидкости и теплоотводящего агента в высоковольтном оборудовании берет начало с конца 19 века. В отличие от газообразной или твердой изоляции минеральное масло имеет ряд преимуществ, таких, как способность эффективно отводить тепло от активной части и отличные изоляционные свойства. Недостатком использования минерального масла в качестве изоляции является его способность разлагаться с образованием нежелательных примесей и необходимостью регенерации масла в процессе работы, а также разработка методов утилизации отработанного масла без нанесения вреда окружающей среды. Именно в целях снижения финансовых и временных затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также снижения антропогенной нагрузки на экологию энергокомпаниями интенсивно внедряют в работу высоковольтное электрооборудование (выключатели, измерительные трансформаторы, высоковольтные вводы), изоляция которых не включает минеральные масла. Однако в энергокомпаниях до сих пор эксплуатируется огромное количество (около 70%) маслonaполненного оборудования, в том числе высоковольтные вводы с бумажно-масляной изоляцией.

Как показывает многолетняя практика, базовая проблема эксплуатации высоковольтных вводов с OIP

изоляция (Oil impregnated paper) заключается в образовании X-восков, налетов и осадков на внутренних поверхностях нижних фарфоровых покрышек. Такие отложения приводят к поверхностному перекрытию внутренней изоляции масляного канала, которые в свою очередь являются основным видом повреждений высоковольтных маслonaполненных вводов [1–3]. По данным [4–7] выход из строя силовых трансформаторов, реакторов и баковых выключателей около 14–40% случаев происходит по причине неисправной изоляции вводов. Поэтому с целью предотвращения серьезных аварий с определенной периодичностью осуществляется контроль параметров изоляции вводов.

Среди всех применяемых на практике методов диагностики маслonaполненного оборудования [8–12], особую роль следует отвести методам физико-химического контроля (рисунок 1). Так как именно физико-химические методы исследования позволяют работать непосредственно с образцами внутренней изоляции из оборудования, а значит понять состояние изоляционной системы изнутри.

Традиционно ухудшение свойств внутренней изоляции понимают по неудовлетворительным значениям таких показателей, как кислотное число, содержание водорастворимых кислот, растворимый шлам, оптическая мутность, тангенс угла диэлектрических потерь.

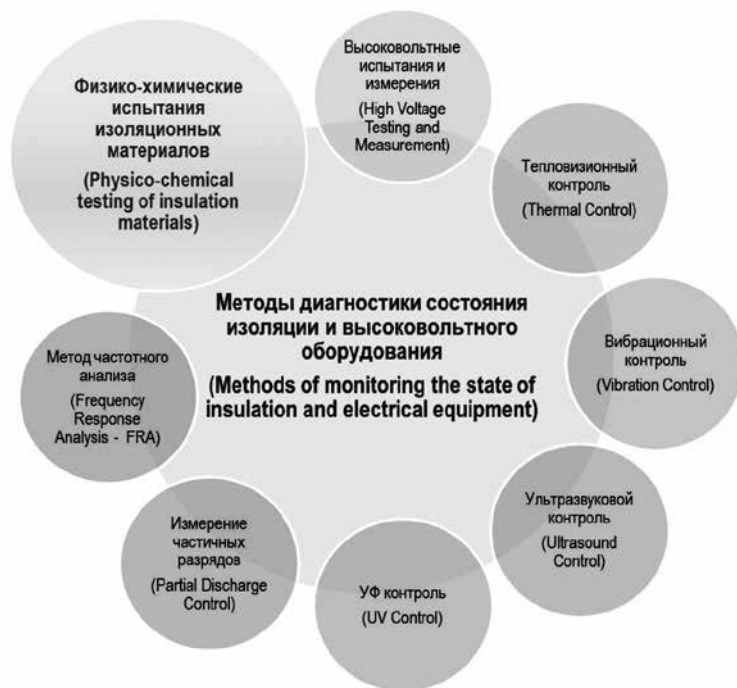


Рисунок 1. Методы диагностики состояния высоковольтного оборудования
Figure 1. Diagnostic methods for high voltage equipment

Контроль перечисленных характеристик изоляционно-го масла из ввода согласно требованиям стандартов осуществляется один раз в 2–4 года в зависимости от типа ввода. Такой периодический контроль с использованием тривиальных методов, как правило, не в полной мере позволяет обнаруживать дефекты, связанные с формированием осадка из коллоидных частиц, особенно в тот момент, когда уже произошло укрупнение коллоидных частиц и седиментация осадка на внутренние поверхности оборудования. По мнению авторов, в дополнение к традиционно используемым методам физико-химического анализа, необходимо внедрение новых методик и технических средств контроля, в число которых входят спектральные методы. Разработка и внедрение методик анализа, базирующихся на спектральных методах, является перспективным направлением, поскольку позволяет определять содержание растворенных в масле металлов, способствующих образованию «полупроводящих» осадков. Информация о содержании конкретных металлов является диагностической, так как дает возможность понять о глубоком изменении химического состава диэлектрика в результате растворения компонентов элементов из конструктивных элементов оборудования, а значит оценить временной интервал до вероятного образования нерастворимого «опасного» осадка.

Целью исследования являлось изучение элементного состава осадков, восковых отложений, а также

бумажной изоляции взятых из высоковольтных вводов с ОИР-изоляцией с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС).

Определение показателей масла (электрическая прочность, диэлектрические потери, цвет и прозрачность, влагосодержание, температура вспышки в закрытом тигле, кислотное число, шлам, антиокислительная присадка) из вводов проводили по методикам, указанные в ИЕС 60422. Испытание образцов масла из вводов на наличие коррозионной серы проводили по методу, описанному в стандарте DIN 51353.

Спектральное исследование состава осадков и твердой изоляции включало следующие основные этапы: подготовка твердых осадков и бумажной изоляции к ААС (атомно-абсорбционному спектральному) анализу, анализ полученных растворов металлов в пламени атомно-абсорбционного спектрофотометра, обработка результатов и их обсуждение. Техническое описание разработанной методики приведено [13]. Методика измерения валового содержания металлов (Cu, Pb, Ni, Fe, Zn, Cr, Cd, Co, Mn) базируется на ААС с атомизацией пробы в пламени. Возбуждение атомов происходит потоком света УФ-видимой области, исходящего из лампы с полым катодом. Метод ААС является достаточно высокочувствительным физическим методом анализа и позволяет определять элементы на уровне 10^{-9} г/мл (1 нг/мл).

Объектом исследования служили осадки, а также бумажная изоляция из демонтированных вводов, отработавших в реальных условиях более 30 лет. Подробная информация об оборудовании приведена в таблице 1.

Объектом исследования служили осадки, а также бумажная изоляция из демонтированных вводов, отработавших в реальных условиях более 30 лет. Подробная информация об оборудовании приведена в таблице 1.

Таблица 1. Описание объекта испытания
Table 1. Description of test object

Оборудование Equipment	Ввод 1 OIP-Bushing 1	Ввод 2 OIP-Bushing 2
Напряжение, кВ High Voltage, kV	110	110
Оборудование, на котором был установлен ввод Equipment on which the bushing was installed	Выключатель Switch	Выключатель Switch
Период эксплуатации, лет Operating period, years	35	30
Тип масла Types of Mineral Oil	Ароматическое Aromatic oil	Парафиновое Paraffinic oil
Причина демонтажа Dismantling reason	Превышение границной концентрации ацетилена (C_2H_2) Exceeding the limit of acetylene concentra- tion (C_2H_2)	Превышение граничной концен- трации ацетилена (C_2H_2), суммы углеводородных газов (C_xH_y) Exceeding the limit of acetylene con- centration (C_2H_2), Amount of hydrocarbon gases (C_xH_y)

После замены дефектных ОИР-вводов было принято решение о полной разборке демонтированных вводов и послойном осмотре бумажной изоляции. При детальном разборе высоковольтных вводов с ОИР-изоляцией на контактном наконечнике, а также с внутренней поверхности нижней фарфоровой покрывки фиксировались осадки воскообразной консистенции темно-коричневого цвета. Места отбора проб осадков схематично показаны на рисунке 2. Кроме того, на ближайших к токоведущей медной трубе слоях бумаги по всей высоте остова были обнаружены воскообразные отложения (Х-воск), местами наблюдалась вязкая черная масса, а также следы частичных разрядов примерно на $\frac{3}{4}$ высоты остова (рисунок 3).

На спектральный анализ также были взяты слои изоляционной бумаги на разных уровнях по высоте остова ввода. Образцы отбирали сверху вниз (рисунок 4). Всего отбор образцов бумаги проводился на трех уровнях по высоте остова (первый уровень — верх, второй

уровень — середина, третий уровень — низ остова). На каждом уровне проводился послойный отбор изоляции. Таких точек было 5.

Очередной плановый хроматографический анализ

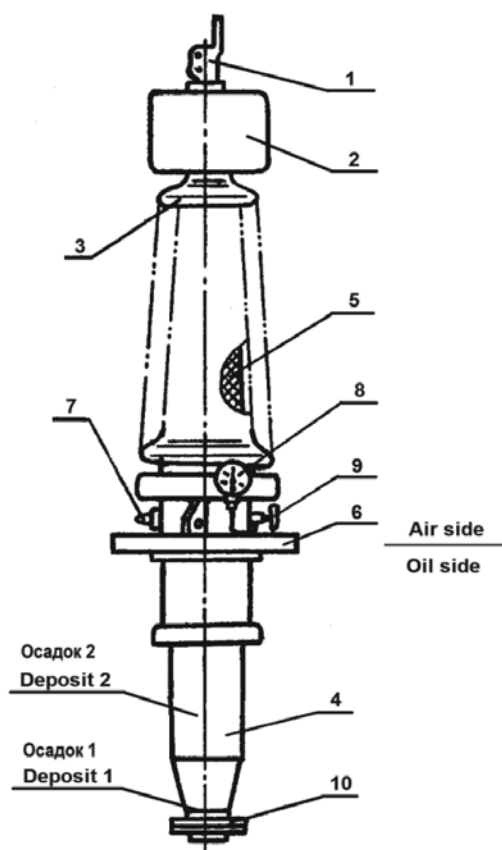


Рисунок 2. Места обнаруженных осадков и налетов в ОИР-вводах:

1 — контактный зажим (клемма); 2 — компенсатор давления; 3 — верхняя фарфоровая покрывка; 4 — нижняя фарфоровая покрывка; 5 — бумажно-масляная изоляция; 6 — крепежный фланец; 7 — измерительный вывод; 8 — манометр; 9 — вентиль; 10 — нижний контактный наконечник

Figure 2. Places of precipitation and raids detected in OIP-bushings:

1 — HV connection; 2 — head; 3 — upper porcelain insulator; 4 — lower porcelain insulator; 5 — OIP-insulation; 6 — mounting flange; 7 — test top; 8 — pressure gauge; 9 — valve; 10 — bottom terminal or lower flange

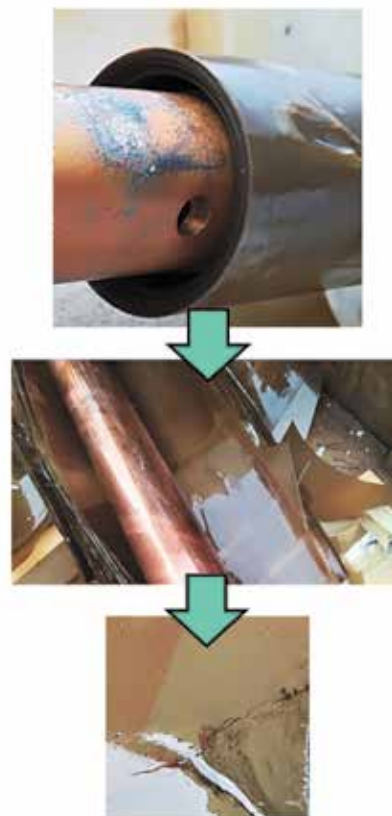


Рисунок 3. Демонтаж вводов и отбор образцов на элементный анализ

Figure 3. Bushings dismantling and sampling for elemental analysis

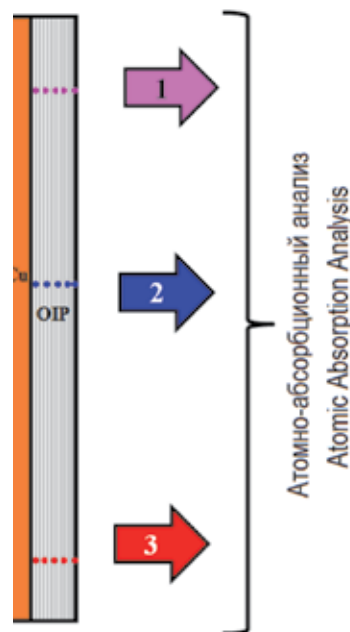


Рисунок 4. Схема точек отбора образцов бумаги ОИР вводов

Figure 4. Scheme of paper sampling points of OIP-bushings

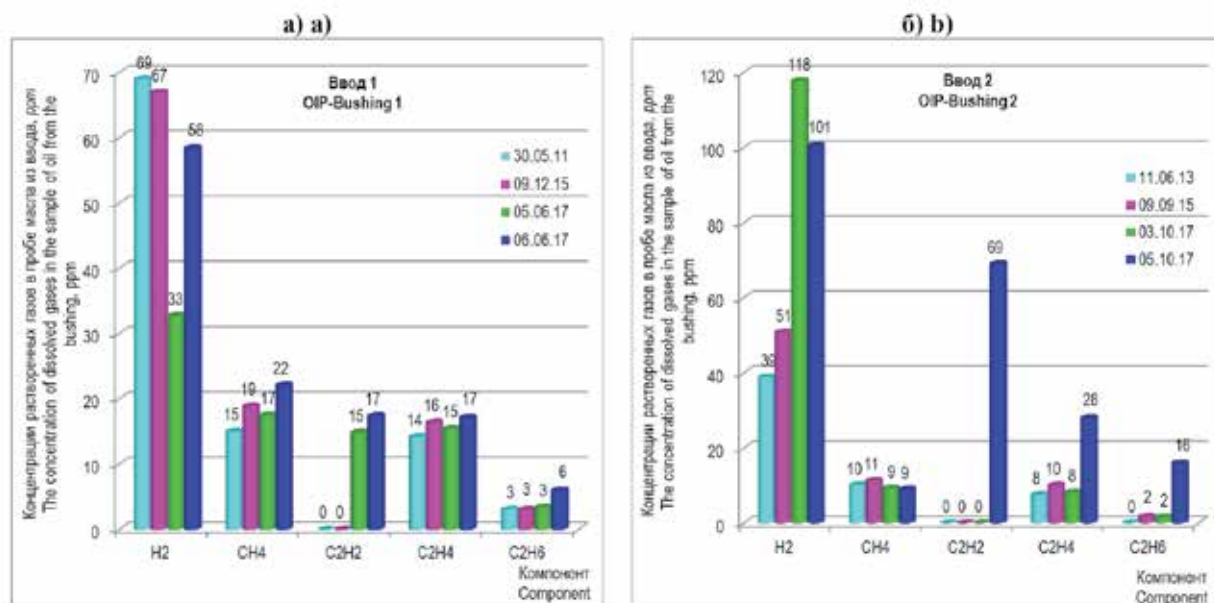


Рисунок 5. Динамика образования углеводородных газов в масле в OIP-вводах: а) — ввод 1; б) — ввод 2
Figure 5. The dynamics of the hydrocarbon gases formation in oil in the OIP-bushings: а) — OIP-bushing 1; б) — OIP-bushing 2

Таблица 2. Интерпретация результатов XAPГ
Table 2. Interpretation of DGA Results

Отношение газов Ration for DGA interpretation of Bushings	OIP –ввод 1 OIP –bushing 1	OIP – ввод 2 OIP – bushing 2	Нормы согласно IEC 61464-1998 Limits (IEC 61464-1998)
H_2/CH_4	2,6	11	>13 = Частичный разряд >13 = Partial Discharge
C_2H_4/C_2H_6	2,9	2	>1 = Термический дефект >1 = Thermal Fault
C_2H_2/C_2H_4	1,0	2	>1 = разряды >1 = Discharges
CO_2/CO	1,9	10	>20 или <1 = Термический дефект в бумаге >20 or <1 = Thermal Fault in Paper
C_2H_2/H_2	0,3	1	>1 = индикаторы разрядов высокой плотности энергии >1 = indicates High Energy Discharge
H_2/C_xH_y	0,9	1	>30 = может указывать на образование водорода в большей степени из материалов, чем из-за электрического дефекта >30 = may indicate hydrogen generated by material influence rather than electrical

Таблица 3. Физико-химические параметры изоляционного масла из вводов
Table 3. Physico-chemical parameters of insulating oil from the bushings

Показатель Properties	Единица измерения Units	Нормы [10] Limits [10]	OIP-ввод 1 OIP-bushing 1	OIP-ввод 2 OIP-bushing 2
Внешний вид Appearance	–	Прозрачное, без видимых загрязнений Clear, free from sediment and suspended matter		
Пробивное напряжение / Breakdown Voltage	kV	>60	69	67
Фактор диэлектрических потерь $Tg \delta$ at 90°C Dielectric Dissipation Factor $Tg \delta$ at 90°C	–	Max. 0,015	0,002	0,004
Температура вспышки в закрытом тигле / Flash Point	°C	>125	138	144
Содержание воды / Water content	ppm	<10	5,5	7,7
Кислотное число / Acidity	мг КОН/г mg KOH/g	Max. 0,03	<0,01	<0,01
Содержание шлама / Sediment and sludge	% масс. % by mass	<0,002	Отсутствует No sediment or precipitable sludge	
Содержание антиокислительной присадки Inhibitor content	% масс. % by mass	>0,1	0,28	0,21

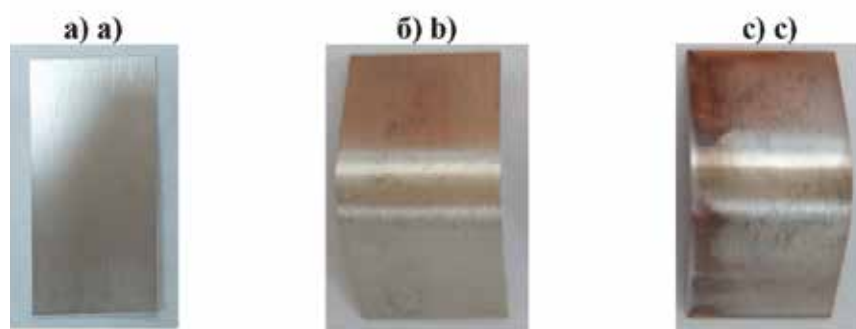


Рисунок 6. Серебряные пластины до (а) и после (б — ароматическое масло, ввод 1; с — парафиновое масло, ввод 2) термического испытания

Figure 6. Silver plates before (a) and after (b — aromatic oil, bushing 1; c — paraffinic oil, bushing 2) the thermal aging tests

газов, растворенных в масле (ХАРГ), взятом из герметичных ОИР-вводов, показал положительную динамику роста концентрации газа C_2H_2 (рисунок 5). Интенсивно образующийся в масле ацетилен является индикатором искровых и дуговых разрядов в изоляции оборудования. На появление дефекта электрического и термического характера указывали также значения отношений пар газов (таблица 2), рассчитанные в соответствии со стандартом IEC 61464. При этом испытания изоляции вводов на тангенс угла диэлектрических потерь бумажной изоляции и емкость не выявили отклонений от граничных значений.

Было решено провести дополнительные испытания трансформаторного масла. Физико-химические испытания пробы изоляционного масла из вводов, проведенные одновременно с ХАРГ, не выявили отклонения от нормируемых значений традиционных параметров, в том числе и по оптической мутности. Оптическая мутность — показатель, который должен фиксировать ускоренное развитие коллоидно-дисперсных процес-

сов, ведущих к образованию налетов, лаковых пленок, осадков, оседающих на токоведущих частях электрооборудования.

Несмотря на возникновение неоднозначной ситуации, было принято решение о замене вводов с последующим детальным осмотром его внутренней бумажно-масляной изоляции. При разборе ввода 1 и ввода 2 на нижнем фланце были обнаружены осадки воскообразной консистенции темно-коричневого цвета. На внутренней поверхности нижней фарфоровой покрывки ввода 1 фиксировалось начало появления поверхностно-

го разряда. Во вводе 2, несмотря на наличие осадка на внутренней поверхности нижней фарфоровой покрывки, развития поверхностного разряда не наблюдалось. Однако, в слоях бумаги, прилегающих к медному остову, примерно на $\frac{3}{4}$ высоты наблюдались следы частичных разрядов. Испытание образцов изоляционного масла из ОИР-вводов показало наличие коррозионной серы. При этом серебряная пластина, которая была помещена в парафиновое масло из ввода 2, гораздо сильнее изменила свой цвет (рис. 6с), что указывает на присутствие коррозионной серы в большом количестве.

В таблице 4 приведены идентифицированные в исследованных осадках элементы и их концентрации. Во всех образцах также найден алюминий (Al). Концентрация алюминия как в масле из вводов, так и в осадках по сравнению с другими элементами огромная. Причина высокого содержания алюминия в воскообразных осадках, а также в масле из вводов заключается в следующем. В конструкции герметичного ввода основу внутренней изоляции составляет бумажный остов, который выполняется

Таблица 4. Содержание металлов в осадках из ОИР-вводов (ppm)

Table 4. The metal content in precipitation from OIP-bushings (ppm)

Элемент Element	ОИР-ввод 1 / OIP-bushing 1		ОИР-ввод 2 / OIP-bushing 2	
	Осадок 1 / Deposit 1 (B1D1)	Осадок 2 / Deposit 2 (B1D2)	Осадок 1 / Deposit 1 (B2D1)	Осадок 2 / Deposit 2 (B2D2)
Алюминий (Al)	8762	5673	10492	6723
Медь (Cu)	3858	2207	2586	1634
Железо (Fe)	4024	1013	3452	889
Цинк (Zn)	903	523	673	378
Свинец (Pb)	52	39	44	18
Никель (Ni)	24	9	23	12
Хром (Cr)	21	19	16	9
Кадмий (Cd)	42	7	10	8
Кобальт (Co)	12	3	9	7
Магний (Mn)	32	24	27	18

Примечание: 1) 1 ppm = 1 г/т = 1 мг/кг; 2) относительное стандартное отклонение в условиях повторяемости при доверительной вероятности 0.95 для цинка, железа и меди не превышает 3%, остальные элементы — не более 7%.

Note: 1) 1 ppm = 1 g / t = 1 mg / kg; 2) the relative standard deviation under repeatability conditions with a confidence level of 0.95 for zinc, iron and copper does not exceed 3%, other elements — no more than 7%.

путем намотки слоев кабельной бумаги на центральную медную трубу. При намотке в остов закладывают, уравнивательные (конденсаторные) обкладки из алюминиевой фольги для регулирования электрического поля в радиальном и осевом направлениях. Появление алюминия в твердых обнаруженных частицах указывает на диффузию молекул элемента в объем изоляционного масла, а затем его осаждение в составе тяжелых органических соединений на внутренние части ввода.

В твердом налете на внутренней поверхности нижних фарфоровых крышек обнаружены следующие металлы Cu, Pb, Ni, Fe, Zn, Cr, Cd, Co, Mn, Al. Концентрация металлов в осадках B1D2 и B2D2 несколько ниже, чем в осадках B1D1 и B2D1, взятых с контактных наконечников (таблица 4). Такая ситуация вполне объяснима. Молекулы металлосодержащих соединений, накапливаясь в объеме масла, укрупняются и, в первую очередь, под действием силы тяжести выпадают на внутреннюю горизонтальную часть контактного наконечника. Повышенная концентрация полярных частиц в местах наибольшей напряженности электрического поля активизирует процесс седиментации и вызывает еще большее насыщение отложений на внутренних элементах ввода.

Формированию воскообразных налетов и осадков внутри герметичных вводов с ОИП-изоляцией могут способствовать различные факторы. Конструкционные материалы вводов всегда содержат некоторые элементы. Например, остов высоковольтного ввода выполнен из меди, контактный наконечник изготовлен из латуни (сплав меди и цинка с добавлением никеля, свинца, марганца, железа и других элементов). Лаки, эмали и другие покрытия металлов, используемые для их защиты от коррозии, также могут содержать примеси элементов, применяемых в качестве катализаторов при синтезе защитных покрытий. Резиновые уплотнения могут также привносить некоторые составляющие при их вымывании из резины в условиях продолжительного контакта с маслом.

Для понимания полной картины появления обнаруженных элементов представляет интерес сравнение начального молекулярного состава ароматического и парафинового масла с рабочими маслами из исследуемых ОИП-вводов (таблица. 5). Следует заметить, что концентрация металлов в неиспользованных маслах много меньше, чем определенная нами в маслах и осадках из герметичных вводов. Поэтому можно предположить вымывание элементов из конструкционных частей ввода (остов, контактные части, лаки, уплотняющие резиновые детали и др.) в результате постоянного контакта их с изоляционным маслом, а вернее с продуктами разложения масла. Результаты анализа твердой изоляции ОИП-вводов приведенные ниже, указывают на перенос частичек медьсодержащего осадка между слоями бумаги (рисунок 7). В [14] отмечалось, что концентрация меди в слоях бумаги снижается от внутренних к внешним слоям в соответствии с законом Фика для нестационарной диффузии.

Рассматривая условия, способствующие формированию отложений, необходимо учесть углеводородный состав масла, а также эксплуатационные факторы. Ароматическое масло, по сравнению с другими типами масел, в своем составе содержит высокую концентрацию ароматических углеводородов (около 17%), а также небольшое количество смол (десятые доли процента). В состав парафинового также входят некоторое количество ароматических углеводородов (около 5%). В герметичных вводах масло циркулирует только за счет электрогидродинамических сил, т. е. без принудительного движения масла. Кроме того, содержание растворенного кислорода в масле не велико. В таких условиях при одновременном воздействии повышенной температуры и электрического поля, ароматические углеводороды вступают в реакцию поликонденсации. Конденсированные ароматические компоненты сначала образуют коллоидные соединения, а взаимодействуя с металлосодержащими компонентами масла, укрупняются и выпадают в виде «опасного» осадка на контактный наконечник. Кроме того, наличие корро-

Таблица 5. Содержание металлов в масле из ОИП-вводов (ppm)

Table 5. The metal content in oil from OIP-bushings (ppm)

Элемент Element	Ароматическое масло из ОИП-ввода 1 Aromatic oil from OIP-bushing 1		Парафиновое масло из ОИП-ввода 2 Paraffinic oil from OIP-bushing 2	
	Свежее масло / New oil	Использованное / Used oil	Свежее масло / New oil	Использованное / Used oil
Алюминий (Al)	0,02	112,68	0,03	134,54
Медь (Cu)	0,05	16,35	0,02	11,09
Железо (Fe)	0,09	1,98	0,07	1,77
Цинк (Zn)	0,36	0,85	0,36	0,59
Свинец (Pb)	0,03	0,08	0,01	0,06
Никель (Ni)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Хром (Cr)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Кадмий (Cd)	0,01	0,01	0,01	0,01
Кобальт (Co)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Марганец (Mn)	0,02	0,18	0,01	0,07

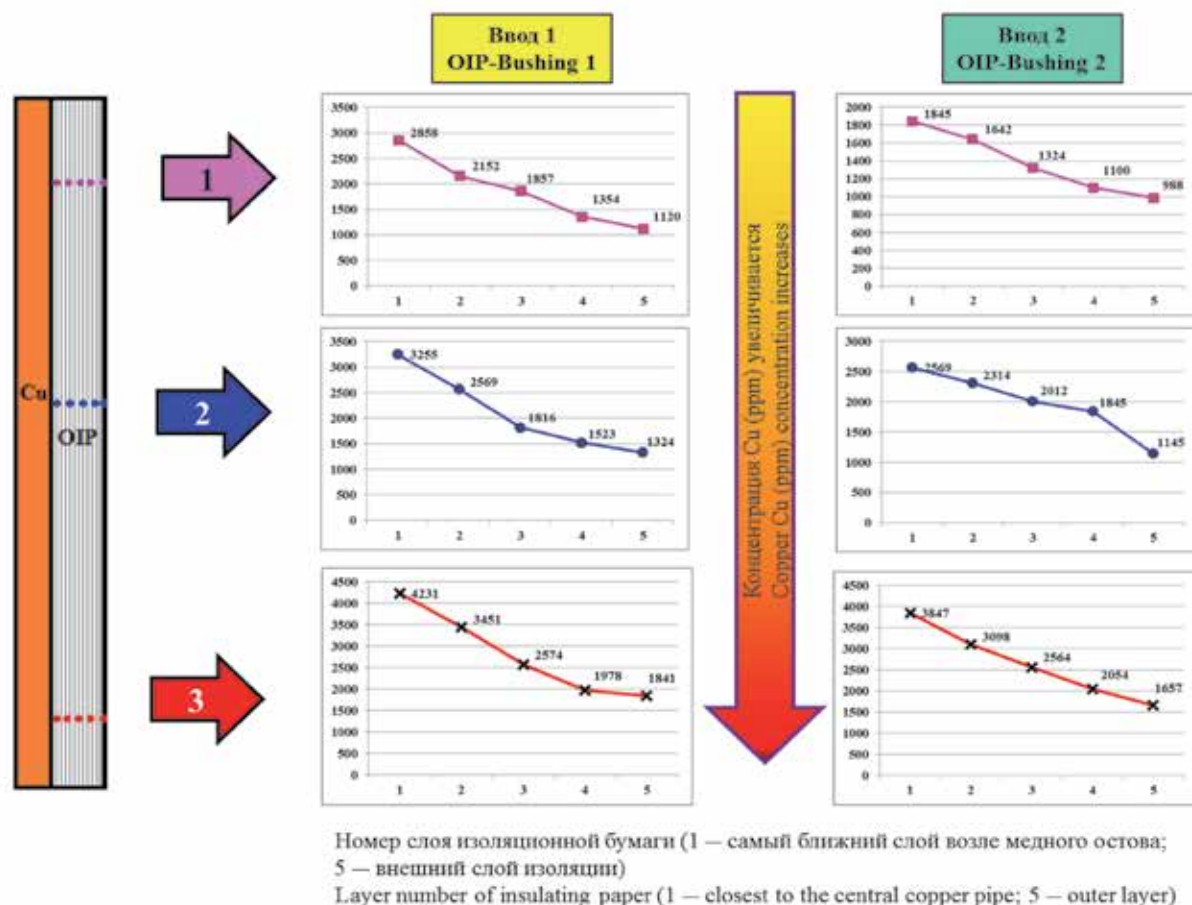


Рисунок 7. Распределение концентрации меди Cu по слоям OIP-изоляции вводов
Figure 7. Distribution of Cu concentration in layers in OIP-insulation of bushings

зионной серы (рисунок 6), зафиксированной в маслах из вводов, а также идентифицированные элементы Cu, Pb, Ni, Fe, Zn, Cr, Cd, Co, Mn, Al в осадках позволяет заключить о существовании в осадках не только сульфида меди Cu_2S , но сульфидов других металлов (PbS, NiS, FeS, ZnS, Cr_2S_3 , CdS, CoS, MnS). Перечисленные соединения также, как сульфид меди являются не растворимыми, за исключением сульфида алюминия Al_2S_3 и Cr_2S_3 , которые под влиянием воды могут вступать в реакцию гидролиза с образованием плохо растворимого гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ и сероводорода H_2S , и нерастворимого Cr_2S_3 и сероводорода H_2S , соответственно. В этом случае представляет интерес вопрос о проводимости каждого отдельно взятого сульфида металла, а также о степени влияния на развитие поверхностных разрядов. Данные задачи мы постараемся решить в наших дальнейших исследованиях.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что спектральные методы, в число которых входит ААС, могут служить инструментом для более эффективного глубокого диагностирования состояния внутренней изоляционной системы «жидкий диэлектрик — целлюлоза» в дополнение к традиционно-используемым. Так, с помощью высокочувствительного метода ААС установлен

элементный состав осадков и налетов в OIP-вводах. Полученные результаты указывают на то, что проводящими соединениями могут быть не только достаточно хорошо изученный Cu_2S , но и сульфиды других металлов и элементов (PbS, NiS, FeS, ZnS, Cr_2S_3 , CdS, CoS, MnS).

Очевидно, что образующиеся твердые, нерастворимые в масле продукты отлагаются на поверхности внутренних элементов аппарата и вызывают локальные нагревы. Сконцентрированная масса ионных примесей в сочетании с влагой обладает высокой электропроводностью, что создает условия для возникновения частичных, искровых и дуговых разрядов в диэлектриках. Результатом перегревов и электрических разрядов становится появление в масле газообразных продуктов, в том числе ацетилена C_2H_2 , т. е. диагностические газы (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , CO, CO_2) помогают выявлять уже развивающиеся повреждения в масляном канале вводов. Однако, ХАРГ, как и другие традиционные методы испытания масла не позволяет заранее обнаруживать дефекты в масляном канале, связанные с формированием осадка из коллоидных частиц на поверхности элементах конструкции высоковольтного оборудования и возникновением частичных разрядов в этих местах. Очевидно, что для исключения подобного рода проблем необходимо осуществлять контроль содержания металлов в жидкой изоляции в процессе выполнения своих главных функций — диэлектрической и теплоот-

водящей. Поэтому следующим этапом усовершенствования контроля над состоянием изоляции является разработка экспрессной селективной, высокочувствительной методики определения элементов (металлов) в изоляционном масле, которое эксплуатируется в оборудовании. При этом очень важно установить граничное значение в количественном выражении по каждому металлу, а также их кумулятивного эффекта, превышение которого приведет к инициированию образования крайне нежелательного осадка. Такой контроль поможет принять своевременные меры по очистке и проведению необходимых соответствующих мероприятий по восстановлению электроизоляционных и теплоотводящих свойств масла, снизить разрушающее воздействие на твердую целлюлозную изоляцию. В целом они будут способствовать снижению риска возникновения технологического отказа высоковольтного аппарата.

Список использованных источников

1. Harichandanray S., Das J., Kumar R., Dixit P. A novel approach for bushing fault diagnosis: Power Grid India experience. Proc. of 47rd CIGRE Session. Paris. 2018; paper A2-208.
2. CIGRE brochure 755. Power transformers and reactors. Transformer bushing reliability. WG A2.43. 2019.
3. Ризванова Г. И., Гафиятуллин Л. Г., Гарифуллин М. Ш., Козлов В. К., Туранов А. Н. Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации. ИВУЗ. Проблемы энергетики 2015; (9–10): 91–94.
4. Митькин Ю. А., Мельникова О. С. Диагностические статистические характеристики пробивных напряжений масла действующих силовых трансформаторов 110 кВ. Вестник ИГЭУ 2016; (3): 40–46.
5. Степанов В. М., Судавный А. С. Дефекты в изоляции электротехнических устройств, приводящие к появлению частичных разрядов. Известия ТулГУ 2018; (6): 386–391.
6. Notingher V., Stancu C., Badicu L., Gorgan B., Busoi S., Tanasescu G. Concerning the power transformers insulation systems monitoring. Journal of International Scientific Publications Materials, Methods & Technologies 2017; (11): 101–120.
7. Falade A. J., Fabiyi S. D., Abdulkarim A. Reliability Assessment of Power Transformers for Oshogbo Area Control Center in Nigeria. Journal of Research Information in Civil Engineering 2016; 1(14): 1066–1081.
8. Александров А., Сазонов В. Современные методы диагностики. Дистанционная локация мест возникновения дефектов в изоляции высоковольтного оборудования подстанции. Электроэнергия. Передача и распределение 2016; S1(1): 34–37.
9. Кузнецов А. А., Григоришин К. Е. Акустико-эмиссионный контроль изоляции высоковольтного оборудования. Труды конференции: Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта 2018: 52–58.
10. Рыбаков Л. М., Белов В. В., Макарова Н. Л., Захватаева А. О. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации. Вестник Чувашской ГСХА 2018; 2(5): 108–111.
11. Малюк Е. Г., Смирнова Е. В. Диагностика технического состояния электрооборудования. Электрические установки и технологии 2018; 1(4): 74–79.
12. Шутенко О. В. Анализ содержания газов в маслонаполненном оборудовании с дефектами электрического

- типа. Проблемы региональной энергетики 2018; 3(38): 1–16.
13. Лютикова М. Н., Коновалов А. А., Фефилов Н. Н., Загоруйко А. В. Разработка и опробование методики идентификации элементного состава осадков, образующихся в изоляционных минеральных маслах при эксплуатации высоковольтного оборудования. Системы. Методы. Технологии 2018; 4(40): 76–84.
 14. Sevastyanova O., Pasalskiy B., Zhmud B. Copper Release Kinetics and Ageing of Insulation Paper in Oil-Immersed Transformers. Engineering 2015; (7): 514–529.

References

1. Harichandanray S., Das J., Kumar R., Dixit P. A novel approach for bushing fault diagnosis: Power Grid India experience. Proc. of 47rd CIGRE Session. Paris 2018; paper A2-208.
2. CIGRE brochure 755. Power transformers and reactors. Transformer bushing reliability. WG A2.43. 2019.
3. Rizvanova G. I., Gafiyatullin L. G., Garifullin M. Sh., Kozlov V. K., Turanov A. N. Features of the aging of transformer oil in real operating conditions. IVUZ. Energy issues 2015; (9–10): 91–94. (In Russ.)
4. Mitkin Yu. A., Melnikova O. S. Diagnostic statistical characteristics of breakdown oil voltages of existing power transformers 110 kV. Bulletin of ISEU 2016; (3): 40–46. (In Russ.)
5. Stepanov V. M., Sudavny A. S. Defects in the insulation of electrical devices, leading to the appearance of partial discharges. Izvestiya TulGU 2018; (6): 386–391. (In Russ.)
6. Notingher V., Stancu C., Badicu L., Gorgan B., Busoi S., Tanasescu G. Concerning the power transformers insulation systems monitoring. Journal of International Scientific Publications Materials, Methods & Technologies 2017; (11): 101–120.
7. Falade A. J., Fabiyi S. D., Abdulkarim A. Reliability Assessment of Power Transformers for Oshogbo Area Control Center in Nigeria. Journal of Research Information in Civil Engineering 2016; 1(14): 1066–1081.
8. Aleksandrov A., Sazonov V. Modern diagnostic methods. Remote location of the places of occurrence of defects in the insulation of high-voltage equipment of the substation. Electricity Transmission and distribution 2016; S1 (1): 34–37. (In Russ.)
9. Kuznetsov A. A., Grigorishin K. E. Acoustic emission control of high-voltage equipment insulation. Conference proceedings: Development and operation of electrical complexes and energy systems and ground transportation 2018: 52–58. (In Russ.)
10. Rybakov L. M., Belov V. V., Makarova N. L., Zakhvataeva A. O. Methods and methods for assessing the status of power transformers during operation. Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy 2018; 2 (5): 108–111. (In Russ.)
11. Malyuk E. G., Smirnova E. V. Diagnostics of the technical condition of electrical equipment. Electrical installations and technology 2018; 1 (4): 74–79. (In Russ.)
12. Shutenko O. V. Analysis of gas content in oil-filled equipment with defects of the electrical type. Problems of regional energy 2018; 3 (38): 1–16. (In Russ.)
13. Lyutikova M. N., Konovalov A. A., Fefilov N. N., Zagoruyko A. V. Development and testing of a technique for identifying the elemental composition of sediments formed in insulating mineral oils during the operation of high-voltage equipment. Systems. Methods Technologies 2018; 4 (40): 76–84. (In Russ.)
14. Sevastyanova O., Pasalskiy B., Zhmud B. Copper Release Kinetics and Ageing of Insulation Paper in Oil-Immersed Transformers. Engineering 2015; (7): 514–529.