

УДК 621.384.658

## **ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ МАСЛОБАРЬЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**В.А. Шахнин, Н.П. Бадалян, Ю.С. Чебрякова, Я.В. Мироненко**

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

Проведен дистанционный мониторинг маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов. Представлены результаты экспериментальных исследований статистической взаимосвязи между концентрациями растворённых газов в масле главной изоляции силовых трансформаторов и параметрами частичных разрядов. Предложены математические модели, предназначенные для дистанционного электрошумового мониторинга состояния изоляции с помощью мехатронного диагностического комплекса. Применение мехатронного комплекса “Электро” позволяет автоматизировать дистанционный мониторинг высоковольтного оборудования электрической подстанции в условиях разнообразия типов установленных силовых трансформаторов.

**Ключевые слова:** высоковольтное оборудование, электрошумовой мониторинг, растворённые газы, частичные разряды, мехатронный комплекс.

**Введение.** Значительная часть повреждений силовых трансформаторов связана со снижением электрической прочности маслобарьерной изоляции и её пробоем в ближайшем к обмотке высокого напряжения масляном канале. Эксплуатационные свойства изоляции тесно связаны с наличием растворённых в масле газов, концентрация которых в большой степени определяется частичными разрядами (ЧР). Для диагностики развивающихся дефектов разработаны принципы и критерии оценки состояния изоляции на основе анализа растворённых газов [1]. Однако традиционные методы анализа растворённых газов трудоёмки, требуют отбора проб масла из работающих высоковольтных аппаратов и в силу этого неудобны для непрерывного мониторинга состояния изоляции. Современные системы мониторинга масла, например “GE Energy Hydran”, “GE Energy Minitrans”, довольно дороги и требуют установки датчиков на каждый диагностируемый трансформатор, т.е. не обеспечивают дистанционности мониторинга.

**Постановка задачи.** Целью исследования является поиск устойчивых многофакторных статистических взаимосвязей между параметрами ЧР и концентрациями растворённых газов в трансформаторном масле. Результаты

исследования необходимы для анализа возможности дистанционного мониторинга концентрации растворённых газов с помощью мехатронного комплекса дистанционного мониторинга (МКДМ) “ЭЛЕКТРО”, разработанного во Владимирском государственном университете им. А.Г. и Н.Г. Столетовых совместно с ПАО “Электросетьсервис”.

**Метод решения.** Исследование статистической взаимосвязи между значениями параметров ЧР, в рассматриваемом случае - измеряемых параметров, и концентрациями растворённых газов, т.е. значениями контролируемых параметров, проводилось с помощью математической модели вида

$$y_i = b_{i0} + \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j,$$

где  $y_i$  –  $i$ -й контролируемый параметр пробы трансформаторного масла;  $n$  – число измеряемых параметров  $x_j$  ЧР;  $b_{i0}$ ,  $b_{ij}$  – параметры модели для  $i$ -го контролируемого параметра.

Для оценки параметров модели  $b_{i0}$ ,  $b_{ij}$  был использован метод главных компонент совместно с множественным регрессионным анализом. Такой подход позволяет обрабатывать результаты экспериментов при сильной мультиколлинеарности исходных данных и повысить устойчивость модели к случайным погрешностям измерений. Обработка экспериментальных результатов проводилась модулем моделирования и обучения МКДМ “ЭЛЕКТРО” с помощью специализированных программных средств.

Отбор проб и хроматографический анализ растворённых газов (ХАРГ) осуществлялись в соответствии с РД 34.46.303-98 “Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворённых в масле силовых трансформаторов” с использованием пробоотборников “ShakeTest”, “ELCHROM-G” и портативного хроматографа “MYRKOS” фирмы Morgan Schaffer Inc. (Канада). Измерение параметров ЧР производилось с помощью МКДМ “ЭЛЕКТРО”. Для управления движением элементов комплекса применён адаптивный алгоритм, позволяющий учесть сложность топологии и насыщенность энергетических объектов высоковольтным оборудованием, а также крупные габариты современных высоковольтных аппаратов [2]. Исследования проводились в процессе плановых обследований состояния трансформаторного оборудования для 58 трансформаторов электрических подстанций (ПС) предприятий магистральных электрических сетей (МЭС) Центра в период с 2009 г. по 2015 г. В настоящей работе представлены результаты исследований лишь для 18 аппаратов, в том числе для пяти автотрансформаторов АОДЦН-417000/750/500-У1, шести автотрансформаторов АТДЦН-250000/500/110/10 и семи

трансформаторов ТДТН-31500/110. Эти трансформаторы установлены на ПС Московского, Валдайского и Волго-Окского предприятий МЭС (“Владимирская-750 кВ”, “Белый Раст-750 кВ”, “Ногинск-500 кВ”, “Радуга-500 кВ”, “Калининская-330 кВ”, “Неро-220 кВ”, “Вязники-220 кВ” и др.). В обследованных трансформаторах применено масло марок ГК и Т-150. Во всех аппаратах используется плёночная защита. Результаты исследований 18 названных трансформаторов оказались наиболее информативными и достоверными в силу того, что близки продолжительности их эксплуатации (введены в эксплуатацию в 1987-1989 гг.), сроки проведения и периодичность комплексных обследований, а также нормальные и имевшие место аварийные режимы работы аппаратов.

**Результаты исследования.** Исследования были начаты в июне 2009 г. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты анализа образцов масла из основных баков трансформаторов, установленных на ПС “Владимирская-750 кВ”, “Радуга-500 кВ”, “Вязники-220 кВ” на дату начала исследований.

Таблица 1

Значения основных параметров трансформаторного масла

Даты	АОДЦТН-417000	АТДЦТН-250000	ТДТН-31500
Отбор проб масла	15.06.2009 г.	16.06.2009 г.	17.06.2009 г.
Проведение измерений	18.06.2009 г.	18.06.2009 г.	18.06.2009 г.
Концентрации растворённых газов, % об.			
Метан $\text{CH}_4$	$45 \cdot 10^{-4}$	$50 \cdot 10^{-4}$	$56 \cdot 10^{-4}$
Этан $\text{C}_2\text{H}_6$	$20 \cdot 10^{-4}$	$16 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-4}$
Этилен $\text{C}_2\text{H}_4$	$90 \cdot 10^{-4}$	$81 \cdot 10^{-4}$	$75 \cdot 10^{-4}$
Ацетилен $\text{C}_2\text{H}_2$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	не обнаружено
Водород $\text{H}_2$	$8 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Оксид углерода $\text{CO}$	$200 \cdot 10^{-4}$	$130 \cdot 10^{-4}$	$110 \cdot 10^{-4}$
Диоксид углерода $\text{CO}_2$	$1700 \cdot 10^{-4}$	$1700 \cdot 10^{-4}$	$1600 \cdot 10^{-4}$
Пробивное напряжение			
Среднее значение ( $U_{ср.пр.}$ ), кВ	50,14	50,28	51,24
Коэффициент вариации (V), %	5,1	2,4	3,6
$tg\delta$ при $20^\circ\text{C}$	0,29	0,31	0,25

Пробы масла по всем 18 трансформаторам были сгруппированы в шесть выборок (табл. 2) по типам трансформаторов, маркам масла, датам проведения ХАРГ и средней нагрузке в период проведения исследований.

Таблица 2

## Выборки проб трансформаторного масла

№ выборки	Типы (авто) трансформаторов	Марки масла	Время проведения ХАРГ	Средняя нагрузка (% от $S_{ном}$ )	Кол-во проб масла в выборке
1	АОДЦТН	ГК	июнь 2009 г., июль 2010 г., июль 2012 г., июль 2013г.	68	28
2	АОДЦТН	ГК	май 2014 г., декабрь 2014 г., май 2015 г., ноябрь 2015 г.	45	18
3	АТДЦТН	ГК, Т-150	июнь 2009 г., июль 2010 г., июль 2012 г., июль 2013 г.	71	24
4	АТДЦТН	ГК, Т-150	май 2014 г., декабрь 2014 г., май 2015 г., декабрь 2015 г.	48	26
5	ТДТН	Т-150	июнь 2009 г., июль 2010 г., май 2012 г., июль 2013 г.	67	19
6	ТДТН	Т-150	май 2014 г., декабрь 2014 г., май 2015 г., ноябрь 2015 г.	40	29

Выборки 1, 3, 5 содержат пробы масла, отобранные и исследованные с годовым интервалом приблизительно с 2009 по 2013 гг. Для этого периода характерна более высокая электрическая нагрузка, чем в последующие два года, в течение которых масло исследовалось с интервалом в шесть месяцев (выборки 2, 4, 6). Выборки 1 и 6 являются наиболее представительными. В выборках 1 и 4 имеется по шесть проб масла, взятых после срабатывания газовых защит на сигнал, а выборка 6 содержит 4 пробы, отобранные после срабатывания дифференциальной защиты. Выборки 2 и 3 содержат только пробы, взятые из трансформаторов, анализ работы которых за предшествующий период показал отсутствие эксплуатационных факторов, вызывающих рост концентраций углеводородных газов. В выборку 6 включены 4 пробы, отобранные после замены силикагеля, и 2 пробы, отобранные после длительного отключения трансформаторов.

Таким образом, в целом 144 пробы являются представительной выборкой в аспекте разнообразия типов трансформаторов, марок масла, дат проведения ХАРГ и режимов эксплуатации. Перед отбором каждой из этих 144 проб с помощью МКДМ высоковольтного оборудования “ЭЛЕКТРО” производилась электрошумовая локация аппаратов, из баков которых брались пробы. Измерялись следующие параметры ЧР:

- среднее за период сетевого напряжения значение частоты ЧР ( $F_{cp}$ );

- частотный диапазон  $\Delta f = f_b - f_n$ , где  $f_n$  и  $f_b$  - граничные частоты соответственно, ниже и выше которых наблюдается спад кривой спектральной плотности до уровня в  $\sqrt{2}$  раз меньше максимального значения;

- максимальное значение спектральной плотности  $g_{max}$  за интервал наблюдения  $T$  в диапазоне  $f_n, \dots, f_b$ ;

- регулярность  $R(q)$ , т.е. отношение числа периодов сетевого напряжения, в которых зарегистрированы ЧР с кажущимся зарядом  $q$  и более, к общему числу периодов напряжения за интервал наблюдения  $T$ ;

- суммарный кажущийся заряд  $Q_\Sigma$  за интервал наблюдения  $T$ ;

- выходное напряжение  $U_p$  измерителя радиопомех П4-17, входящего в состав МКДМ “ЭЛЕКТРО” и работающего в режиме определения среднего значения измеряемого импульсного сигнала.

Параметры 1, 5 и 6 определены ГОСТ 20074-83 [3], информативность параметра 4 хорошо проиллюстрирована в книге В.П. Вдовико [4], а целесообразность определения параметров 2 и 3 показана в работе [5].

На первом этапе эксперимента определялись частные модели, связывающие измеряемые и контролируемые параметры проб масла марки ГК для обучающих выборок 1 и 2. В первом и во втором столбцах табл. 3 приведены значения коэффициентов множественной корреляции для найденных моделей, в состав которых входят все шесть измеряемых параметров ( $F_{cp}$ ,  $\Delta f$ ,  $g_{max}$ ,  $R(q)$ ,  $Q_\Sigma$ ,  $U_p$ ). Отметим, что при использовании этих частных моделей электрошумовой контроль возможен лишь для определенного типа аппаратов, что ограничивает технологическую гибкость электрошумового мониторинга.

На втором этапе исследовалась возможность объединения исходных данных с целью получения общих моделей, позволяющих определить контролируемые параметры по совокупности измеряемых параметров независимо от типа (авто)трансформаторов. Достоверность полученных результатов для объединенных обучающих выборок 1+3, 2+4, 3+5 подтверждалась по критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95. В табл. 3 приведены коэффициенты множественной корреляции для общих моделей (также с шестью магнитошумовыми параметрами), а в табл. 4 - значения параметров математических моделей, найденные по объединённым выборкам 2+4 и 3+5.

Таблица 3

## Коэффициенты множественной корреляции

Концентрации растворённых газов	Обучающие выборки				
	1	2	1+3	2+4	3+5
Метан CH <sub>4</sub>	0,994	0,996	0,992	0,995	0,994
Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,977	0,982	0,976	0,989	0,986
Этилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,944	0,931	0,910	0,955	0,897
Водород H <sub>2</sub>	0,958	0,933	0,925	0,979	0,971
Оксид углерода CO	0,935	0,952	0,933	0,971	0,955
Диоксид углерода CO <sub>2</sub>	0,995	0,992	0,976	0,994	0,982

Таблица 4

## Параметры математических моделей

Обуч. выборки	Раств. газы	Параметры модели						
		$b_0 10^4$	$b_1 10^4$	$b_2 10^4$	$b_3 10^4$	$b_4 10^4$	$b_5 10^4$	$b_6 10^4$
2+4	CH <sub>4</sub>	-58,0	107,1	4,340	555,2	-1,359	-37,95	12,24
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-67,0	105,9	4,852	843,1	-1,949	-47,12	15,71
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	98,2	0,245	-0,14	-19,11	0,024	-0,655	-0,19
	H <sub>2</sub>	13,6	-3,75	0,032	-25,47	0,028	1,844	-0,22
	CO	332,0	-97,5	-16,93	-2799	1,777	-0,737	-19,8
	CO <sub>2</sub>	-561,1	2,906	0,309	54,45	-0,049	-0,422	0,417
3+5	CH <sub>4</sub>	-42,0	96,33	9,165	121,4	-0,414	-2053	4,797
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-51,0	98,56	13,32	498,8	0,057	-13,08	2,348
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	124,5	-0,41	-0,169	-28,87	0,024	-0,449	-0,24
	H <sub>2</sub>	17,5	-1,05	-0,299	-34,97	0,014	-1,236	-0,52
	CO	387,0	-95,4	-18,27	-4204	2,344	-29,99	-38,2
	CO <sub>2</sub>	-690,5	2,43	0,408	32,76	-0,019	-0,025	0,229

Таблица 5

## Коэффициенты парной корреляции

Растворённые газы	Электрошумовые параметры					
	$F_{cp}$	$\Delta f$	$g_{max}$	$R(q)$	$Q_{\Sigma}$	$U_p$
CH <sub>4</sub>	0,91	0,96	0,39	0,96	0,91	0,45
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,79	0,91	0,23	0,85	0,79	0,32
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,66	0,74	0,11	0,67	0,52	0,03
H <sub>2</sub>	0,96	0,86	0,58	0,92	0,92	0,60
CO	0,51	0,63	0,20	0,57	0,42	0,06
CO <sub>2</sub>	0,86	0,86	0,18	0,86	0,74	0,33

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты свидетельствуют о возможности нахождения обобщенных моделей для

концентраций всех шести исследованных растворённых газов. Кроме того, сравнение коэффициентов множественной корреляции с коэффициентами парной корреляции (табл. 5) показывает явное преимущество многопараметрового электрошумового мониторинга перед мониторингом по одному параметру. Отметим, что обучающие массивы измеряемых и контролируемых параметров для табл. 5 формировались на основе объединённой выборки 1+2.

Далее эксперимент был направлен на исследование возможности нахождения общих моделей, позволяющих осуществить многопараметровый мониторинг, инвариантный к нагрузке трансформаторного оборудования и его длительным отключениям. В конечном счёте выявление такой возможности означает существенное увеличение технологической гибкости электрошумового мониторинга. Нахождение общей модели проводилось на обучающем массиве данных, включающем в свой состав выборки 2, 3, 5 и 6, а достоверность полученных решений, как и ранее, подтверждалась по  $F$ -критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95.

Во втором столбце табл. 6 приведены значения коэффициентов множественной корреляции для объединённых моделей, содержащих шесть магнитных параметров. Анализ результатов эксперимента показывает возможность нахождения для концентраций четырёх растворённых газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{H}_2$ ) универсальных моделей, устойчивых к вариациям нагрузки. При этом значения коэффициентов множественной корреляции для универсальных моделей существенно не уменьшаются по сравнению со значениями соответствующих коэффициентов множественной корреляции для моделей, полученных для близких значений нагрузки. Для концентраций оксида и диоксида углерода объединённые модели оказались неадекватными.

С целью упрощения процедуры мониторинга в ходе эксперимента изучалась возможность изменения номенклатурного и численного составов измеряемых электрошумовых параметров, входящих в состав универсальной математической модели. В табл. 6 и 7 приведены коэффициенты множественной корреляции и параметры для универсальных математических моделей, содержащих в первом случае все шесть ранее названных электрошумовых параметров, во втором - лишь параметры 2, 3 и 4, характеризующие случайный характер процесса ЧР, в третьем - только параметры 1, 4, 5 и 6, связанные с частотой и кажущимся зарядом ЧР.

Анализ полученных результатов показывает, что при некотором снижении требований к точности результатов мониторинга можно использовать модели с меньшим числом измеряемых электрошумовых параметров. Например, для оперативного контроля целесообразно исключить сложные измерения

кажущегося заряда ЧР. При этом существенно снижается лишь коэффициент множественной корреляции для модели, позволяющей рассчитать значение концентрации этилена. К сожалению, следует отметить, что все модели для концентраций оксида и диоксида углерода оказались неадекватными.

Таблица 6

*Коэффициенты множественной корреляции*

Растворённые газы	Электрошумовые параметры		
	$F_{cp}, \Delta f, g_{max}, R(q), Q_{\Sigma}, U_p$	$\Delta f, g_{max}, R(q)$	$F_{cp}, R(q), Q_{\Sigma}, U_p$
CH <sub>4</sub>	0,982	0,980	0,969
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,971	0,944	0,971
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,917	0,869	0,839
H <sub>2</sub>	0,964	0,944	0,942

Таблица 7

*Параметры универсальных математических моделей*

Электрошумовые параметры	Раств. газы	Параметры модели						
		$b_0 10^4$	$b_1 10^4$	$b_2 10^4$	$b_3 10^4$	$b_4 10^4$	$b_5 10^4$	$b_6 10^4$
$F_{cp}, \Delta f, g_{max}, R(q), Q_{\Sigma}, U_p$	CH <sub>4</sub>	-70,0	82,30	4,428	387,0	-1,367	20,46	10,63
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-74,0	82,29	7,483	769,6	-1,245	-17,41	10,60
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	103,8	0,6471	-0,9492	-23,84	0,03821	-0,8204	-0,2689
	H <sub>2</sub>	19,5	1,479	0,2525	45,72	-0,06165	0,1840	0,4520
$\Delta f, g_{max}, R(q)$	CH <sub>4</sub>	-34,0	23,90	2,284	55,06			
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-81,2	23,57	4,801	510,1			
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-112,4	0,4666	0,02434	-4,292			
	H <sub>2</sub>	-19,3	0,3108	0,1065	23,10			
$F_{cp}, R(q), Q_{\Sigma}, U_p$	CH <sub>4</sub>	-104,0		6,953		-1,195	37,93	7,433
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-156,0		9,814		-0,7418	37,54	5,448
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	119,0		-0,0758		0,02100	-0,1137	-0,1549
	H <sub>2</sub>	-444,6		0,2781		-0,03004	0,8990	0,1830

Для оценки достоверности многопараметрового электрошумового мониторинга применён следующий подход. Коэффициент множественной корреляции  $R$  характеризует тесноту группирования экспериментальных данных вокруг функциональной зависимости, связывающей измеряемые и контролируемые параметры. Вместе с тем он определяет приведенную погрешность восстановления исходных данных  $\gamma'$ . Указанные величины связаны между собой следующим приближенным соотношением  $\gamma' \approx 0,5\sqrt{1-R^2} \cdot 100\%$  [6]. Это позволяет использовать коэффициент множественной корреляции для



приблизительной усредненной оценки точности модели. Необходимо отметить, что уже при  $R < 0,9$  найденную модель нецелесообразно использовать для решения метрических задач мониторинга, поскольку погрешность  $\gamma'$  будет велика (более 20%). В табл. 8 приведены оценки погрешности  $\gamma'$  определения концентраций растворённых газов в объединенной обучающей выборке 2+3+5+6 по универсальным математическим моделям, первая из которых содержит все шесть электрошумовых параметров ( $F_{cp}$ ,  $\Delta f$ ,  $g_{max}$ ,  $R(q)$ ,  $Q_{\Sigma}$ ,  $U_p$ ), вторая - только параметры  $\Delta f$ ,  $g_{max}$  и  $R(q)$ , а третья – только параметры  $F_{cp}$ ,  $R(q)$ ,  $Q_{\Sigma}$ ,  $U_p$ . Сравнение оценки погрешности  $\gamma'$  с фактическими значениями погрешности восстановления концентраций растворённых газов показало, что она довольно точно отражает истинное положение. Например, оценки погрешности  $\gamma'$  восстановления концентрации метана в обучающей выборке 2+3+5+6 с использованием второй и третьей моделей составляют 9,6 и 11,3% соответственно. При этом фактические значения погрешности восстановления концентрации метана по указанным моделям лежат в пределах от 4,1 до 10,6% (среднее значение погрешности - 8,5%) и от 6,6 до 14,6% (среднее значение погрешности – 10,5%).

При оценке достоверности мониторинга трансформаторного оборудования обычно предъявляется требование нахождения погрешности каждого из результатов диагностики.

Таблица 8

Погрешности многопараметрового электрошумового мониторинга

Электрошумовые параметры	Растворённые газы	Погрешность, %			
		$\gamma'$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$	$\bar{\gamma}$
$F_{cp}, \Delta f, g_{max}, R(q), Q_{\Sigma}, U_p$	CH <sub>4</sub>	9,8	3,8	11,6	9,4
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	14,2	7,9	16,6	13,1
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	18,9	15,4	40,9	19,7
	H <sub>2</sub>	13,5	5,6	17,9	11,9
$\Delta f, g_{max}, R(q)$	CH <sub>4</sub>	9,6	6,4	16,6	10,4
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	17,9	9,7	19,9	15,5
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	25,4	24,7	39,0	26,5
	H <sub>2</sub>	15,9	9,7	22,6	17,3
$F_{cp}, R(q), Q_{\Sigma}, U_p$	CH <sub>4</sub>	11,3	9,1	15,0	12,4
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	15,8	13,4	21,8	16,9
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	27,1	23,6	43,4	30,6
	H <sub>2</sub>	16,3	15,1	23,8	17,5

Для этого целесообразно определить относительную погрешность  $\gamma$  расчета значений контролируемых параметров по некоторому набору измеряемых параметров по следующей формуле [6]:  $\gamma = \hat{y}_i^{-1}(t_\alpha; n-k-1) \sqrt{\hat{\sigma}^2 [1 + X_j (X^T X)^{-1} X_j^T]}$ , где  $\hat{y}_i$  - оценка, рассчитанная по математической модели  $i$ -го контролируемого параметра;  $t_\alpha$  - коэффициент Стьюдента;  $n$  - число значений  $i$ -го контролируемого параметра в обучающей выборке;  $k$  - число измеряемых параметров;  $\hat{\sigma}^2$  - оценка среднеквадратического отклонения, которая определяется при нахождении математической модели;  $X_j$  - текущий вектор измеряемых параметров;  $X$  - матрица измеряемых параметров в обучающей выборке размерностью  $n \times k$ .

В табл. 8 приводятся минимальные, максимальные и средние значения погрешностей  $\gamma$  расчета исходных концентраций растворённых газов в обучающей выборке 2+3+5+6 по математическим моделям, включающим в свой состав вышеуказанные наборы электрошумовых параметров. Близость значений погрешностей  $\gamma'$  и  $\bar{\gamma}$ , полученных различными методами, позволяет сделать вывод об их достоверности.

**Выводы.** Таким образом, на основе экспериментальных исследований установлено следующее:

- для дистанционного мониторинга концентрации растворённых газов в масле главной изоляции силовых трансформаторов перспективно применение электрошумового метода диагностики;
- выявлено явное преимущество многопараметрового мониторинга перед мониторингом по одному параметру;
- электрошумовой мониторинг концентраций четырёх растворённых газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{H}_2$ ), являющихся ключевыми либо характерными для большинства развивающихся дефектов электрического и термического характера [1], возможен на основе универсальных моделей, устойчивых к вариациям марок масла, типов трансформаторов и их нагрузки;
- электрошумовой мониторинг концентраций оксида и диоксида углерода, являющихся ключевыми газами для развивающихся дефектов твёрдой изоляции [1], возможен лишь на основе моделей, полученных для трансформаторов с близким характером нагрузки;
- применение мехатронного комплекса “ЭЛЕКТРО” позволяет автоматизировать дистанционный мониторинг высоковольтного оборудования электрической подстанции в условиях разнообразия типов установленных силовых трансформаторов.

## Литература

1. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования. - М.: Департамент научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России", АО ВНИИЭ, 1995.- 26 с.
2. **Шахнин В.А., Моногаров О.И., Чебрякова Ю.С.** Алгоритм управления движением антенны мехатронного комплекса электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования // Контроль. Диагностика. - 2013.- № 11.- С. 60-65.
3. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Методы измерения характеристик частичных разрядов. - М.: Изд-во стандартов, 1983.- 24 с.
4. **Вдовико В.П.** Частичные разряды в диагностике высоковольтного оборудования.- Новосибирск: Наука, 2007.- 155 с.
5. **Шахнин В.А., Бадалян Н.П., Чебрякова Ю.С.** Экспериментальное определение и моделирование статистических характеристик частичных разрядов // Вестник ГИУА (Политехник). Серия "Электротехника. Энергетика". - 2014.- Вып. 17, №2.- С. 71-81.
6. **Львовский Е.Н.** Статистические методы построения эмпирических формул.- М.: Высшая школа, 1998.- 239 с.

*Поступила в редакцию 04.04.2016.  
Принята к опубликованию 26.04.2016.*

## ՈՒՃԱՅԻՆ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՅՈՒՂԱՆՋՐՊԵՏԱՅԻՆ ՄԵԿՈՒՍԱՑՄԱՆ ՀԵՌԱՎԱՐ ՄՇՏԱԴԻՏԱՐԿՈՒՄ

**Վ.Ա. Շախնին, Ն.Պ. Բադալյան, Յու.Ս. Չեբրյակովա, Յա.Վ. Միրոնենկո**

Կատարվել է ուժային տրանսֆորմատորների յուղանջրպետային մեկուսացման հեռավար մշտադիտարկում: Ներկայացվել են ուժային տրանսֆորմատորների հիմնական մեկուսապատվածքի՝ յուղում լուծվող գազերի կոնցենտրացիաների և մասնակի լիցքաթափումների պարամետրերի վիճակագրական փոխկապակցվածության փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները: Առաջարկվել են մաթեմատիկական մոդելներ՝ արատորոշման մեխատրոնային համալիրով մեկուսացման վիճակի էլեկտրաաղմկային հեռավար մշտադիտարկման համար: Մեխատրոնային «էլեկտրո» համալիրի կիրառումը հնարավորություն է ընձեռում ավտոմատացնելու էլեկտրական ենթակայանների բարձրավոլտ սարքավորումները՝ ուժային տեղակայված տրանսֆորմատորների բազմատեսակության պայմաններում:

*Առանցքային բառեր.* բարձրավոլտ սարքավորումներ, էլեկտրաաղմկային մշտադիտարկում, լուծվող գազեր, մասնակի լիցքաթափումներ, մեխատրոնային համալիր:

## REMOTE MONITORING OF OIL-BARRIER INSULATION OF POWER TRANSFORMERS

**V.A. Shakhnin, N.P. Badalyan, U.S. Chebryakova, Y.V. Mironenko**

Remote monitoring of oil-barrier insulation of power transformers is carried out. The results of experimental investigations of the statistical relationship between the concentrations of the dissolved gases in oil of the main insulation of power transformers and the parameters of partial discharges are introduced. Mathematical models intended for remote electric-noise monitoring of the insulation state by a mechatronic diagnostic complex are proposed. The application of the mechatronic complex “Electro” allows to automate the remote monitoring of high-voltage equipment of electric substation at different types of the installed power transformers.

**Keywords:** high-voltage equipment, electrical-noise monitoring; dissolved gases, partial discharges, mechatronic complex.