

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31

К ВОПРОСУ ШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н.И. Игнатъев

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8291-0689>, kola03@yandex.ru

Резюме: В работе демонстрируются возможности применения шумовой диагностики высоковольтного электроэнергетического оборудования, обладающей увеличенной глубиной и повышенной надежностью диагностирования. Приведены базовые положения методики, основанной на определении дефектностей всех основных внешних и внутренних конструктивных элементов. Подробно изложены этапы получения информации о полной дефектности оборудования на примере диагностирования пяти силовых автотрансформаторов с различным сроком эксплуатации. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными другими диагностическими методами.

Ключевые слова: электроэнергетическое оборудование, автотрансформатор, электромагнитное излучение, энергетический спектр, резонансная частота, критерий дефектности.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -100-110

TO THE PROBLEM OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT NOISE DIAGNOSTICS

N.I. Ignatev

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8291-0689>, kola03@yandex.ru

Abstract: Application possibilities of electrical power equipment noise diagnostics are shown. The diagnostics possesses increased depth and the enlarged reliability of diagnosing. Main guidelines of the technique based on determination of external and internal constructive elements deficiencies are described. Stages of obtaining information about full deficiency of the equipment are explained in detail on the example of diagnosing of five power autotransformers with various term of operation. The received results well correspond with the data obtained by other diagnostic methods.

Keywords: power equipment, autotransformer, electromagnetic radiation, energy spectrum, resonance frequency, criterion of deficiency.

Введение

Обеспечению надёжной и безаварийной работы высоковольтного электротехнического оборудования (ВВЭО) способствуют высокоэффективные методы и системы оценки его технического состояния и диагностики. В настоящее время особое внимание уделяется разработке методов, обеспечивающих контроль состояния под рабочим напряжением [1–3]. Непрерывный, а зачастую и автоматический контроль в первую очередь обеспечивается путем анализа растворенных газов, регистрацией физико-химических характеристик изоляции, измерением уровней частичных разрядов, параметров электроэнергии [4–8] и т.д. Надёжность диагностирования существенно повышается при использовании нескольких независимых параметров, обладающих детерминированной ценностью [9]. К их числу относится и метод шумовой диагностики, основанный на анализе спектров собственного электромагнитного излучения оборудования.

Впервые на возможность диагностики точечных источников электромагнитных шумов было указано в работе [10]. В ней изложены принципы построения диагностической модели и эквивалентных схем измерения шумов, а также приведены уравнения, описывающие решение задачи диагностики. Дальнейшее развитие теория шумовой диагностики получила в работах [11–13], в которых сформулировано положение о том, что диагностическая информация содержится в информативных частотных полосах спектров собственного электромагнитного излучения оборудования, определяемых размерами излучающих элементов конструкции. Описание физики шумовых процессов, а также методических аспектов шумовой диагностики нашло свое отражение в работах [14–16]. Показано, что шум может быть обусловлен как самими процессами протекания электрического тока, так и хаотическими изменениями других неэлектрических параметров оборудования, которые преобразуются в изменения величин токов и напряжений. Методика диагностирования, базирующаяся на шумовой излучающей модели, позволяет оценивать состояние внешних и внутренних конструктивных элементов, тем самым существенно углубляя и повышая надёжность диагностирования [17, 18]. Данная работа представляет результаты практического использования принципов и методики шумовой диагностики с примерами детального анализа тех участков спектров электромагнитного излучения, которые отражают состояние как внешних, так внутренних конструктивных элементов.

Силовые трансформаторы и их конструктивные элементы

Процедура шумовой диагностики предполагает использование шумовой излучающей модели ВВЭО [17, 18]. Согласно этой модели энергетический спектр излучения вертикальной поляризации ВВЭО, состоящий из широкого набора квазигармонических составляющих, обусловлен действием шумов ионизации с равномерным спектром (включая шумы лавинной ионизации) в диэлектрической изоляции оборудования (фарфоровой, целлюлозной, бумажной, масляной, воздушной и пр.). Эти шумы фильтруются резонансными колебательными цепями оборудования и излучаются в окружающее пространство вводами этого оборудования, выступающими в роли вибраторных антенн вертикальной поляризации. Само ВВЭО представляет собой сложную конструкцию, включающую вводы различного напряжения, обмотки, регулятор напряжения, магнитопровод, основной бак, расширительный бак и т.д.

В качестве примера на рис. 1 схематически изображены силовые однофазный автотрансформатор и трёхфазный трансформатор, показаны их основные конструктивные элементы, расположенные снаружи и внутри металлического корпуса. Для силового однофазного автотрансформатора 500 кВ наружными излучающими элементами являются вводы напряжением 500, 220, 11 кВ и ввод нейтрали как отдельно, так и в совокупности со спусками к ним, а в качестве внутренних резонансных колебательных цепей рассматриваются обмотки, регулятор напряжения и сам основной бак (рис. 1, а). Для силового трёхфазного трансформатора 110 кВ число внешних и внутренних резонансных

цепей существенно больше, поскольку присутствуют элементы трёх фаз (рис. 1, б).

Процедура шумовой диагностики предусматривает наличие энергетических спектров собственного электромагнитного излучения контролируемого оборудования. Практика показывает, что, как правило, энергетическое наполнение спектров тем больше, чем больше стаж работы оборудования. В качестве примера на рис. 2, 3 представлены результаты регистрации спектров для трёх автотрансформаторов, именуемых в ходе дальнейшего изложения как Т-1, Т-2 и Т-3, со сроком эксплуатации до одного года, а на рис. 4, 5 – для автотрансформаторов Т-4 и Т-5 со стажем работы более двадцати лет. Резонансные частоты основной гармоники для вводов 500 кВ и 220 кВ и соответствующие им информационные частотные полосы для всех автотрансформаторов располагаются в частотном диапазоне от 5 до 40 МГц.

Сравнение в указанном диапазоне спектров для автотрансформаторов со сроком эксплуатации до года и свыше 20 лет указывает на существенное превышение у последних мощности собственного электромагнитного излучения. Например, в информационной частотной полосе ввода 500 кВ $(\Delta f_{v1})_1$ на рис.2 и рис.4) интегральная мощность излучения составляет $4,04 \cdot 10^{-12}$ Вт для автотрансформатора Т-1 (до года) и $1,32 \cdot 10^{-7}$ Вт для автотрансформатора Т-5 (старше двадцати лет). Для излучения ввода 220 кВ эти значения соответственно равны $4,27 \cdot 10^{-12}$ Вт и $6,41 \cdot 10^{-8}$ Вт.

Подсчет и анализ интегральной мощности излучения позволяет осуществлять ранжирование оборудования, а также оценивать степень дефектности. В качестве критерия можно использовать коэффициент интегральной мощности, определяемый по формуле

$$K_{ij} = 10 \lg (P_{ij} / P_{j\min}), \quad (1)$$

где P_{ij} – интегральная мощность электромагнитного излучения, зарегистрированного вблизи i -го оборудования в пределах j -й частотной полосы; $P_{j\min}$ – эталонное значение интегральной мощности электромагнитного излучения в пределах j -й частотной полосы.

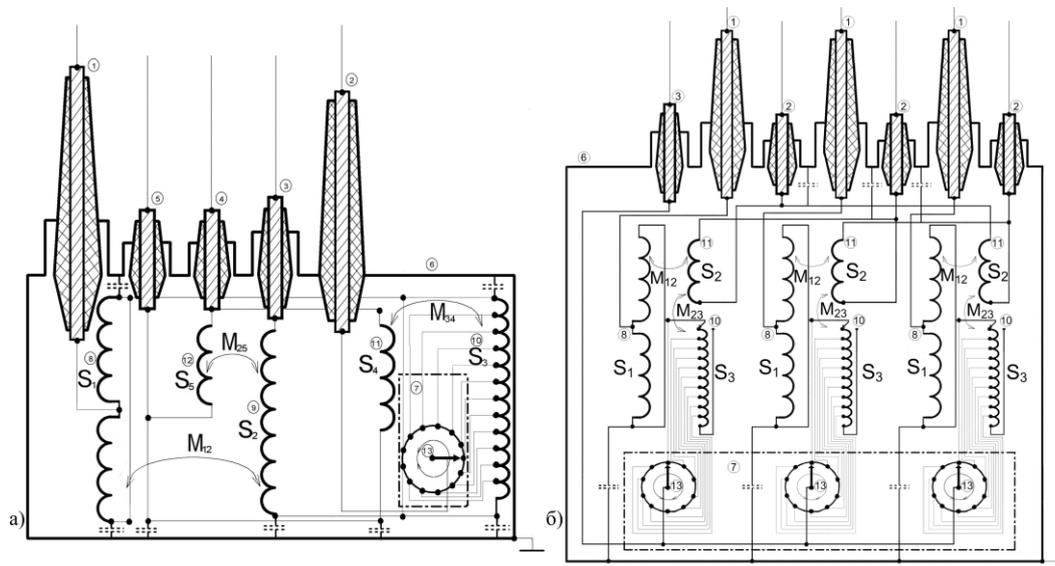


Рис. 1. Схематическое устройство силового однофазного автотрансформатора (а) и силового трёхфазного трансформатора (б): 1, 2 – высоковольтные вводы; 3 – вводы нейтрали; 4, 5 – низковольтные вводы; 6 – основной металлический бак; 7 – металлический бак регулятора напряжения; 8, 9 – первичные обмотки S_1 и S_2 ; 10 – регулировочная обмотка S_3 ; 11, 12 – вторичные обмотки S_4 и S_5 ; 13 – регулятор напряжения

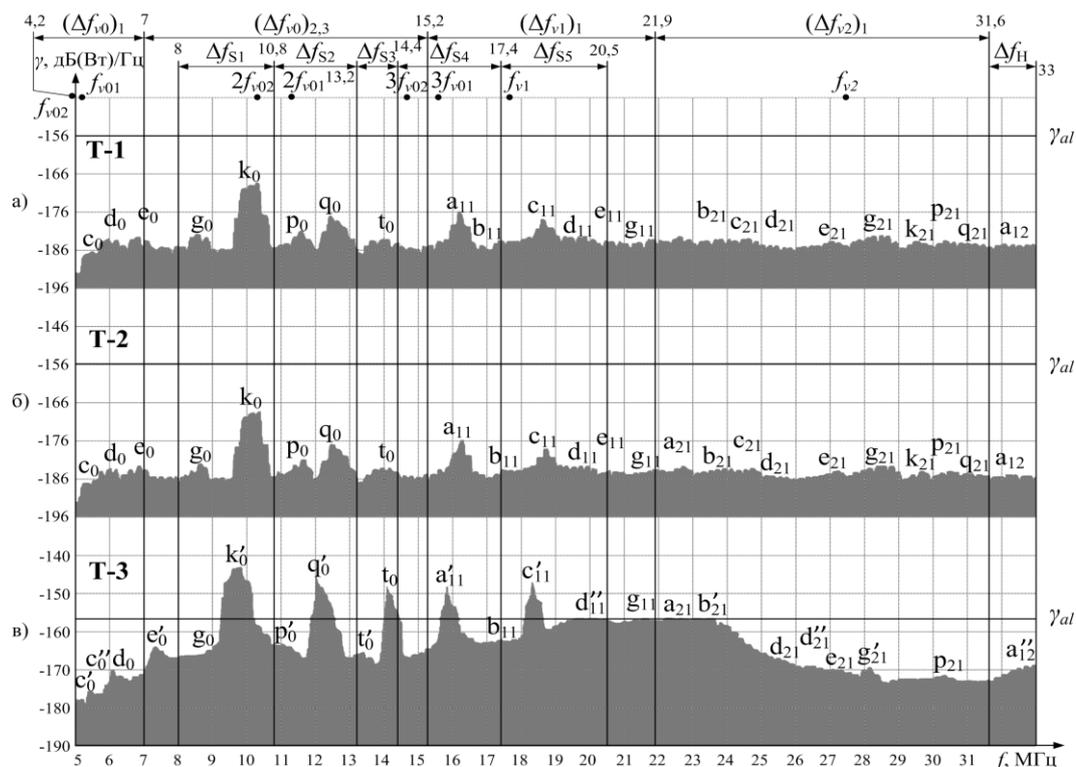


Рис. 2. Энергетические спектры излучений вертикальной поляризации на частотах 5–33 МГц для трех автотрансформаторов со сроком эксплуатации до 1 года: а) Т-1; б) Т-2; в) Т-3

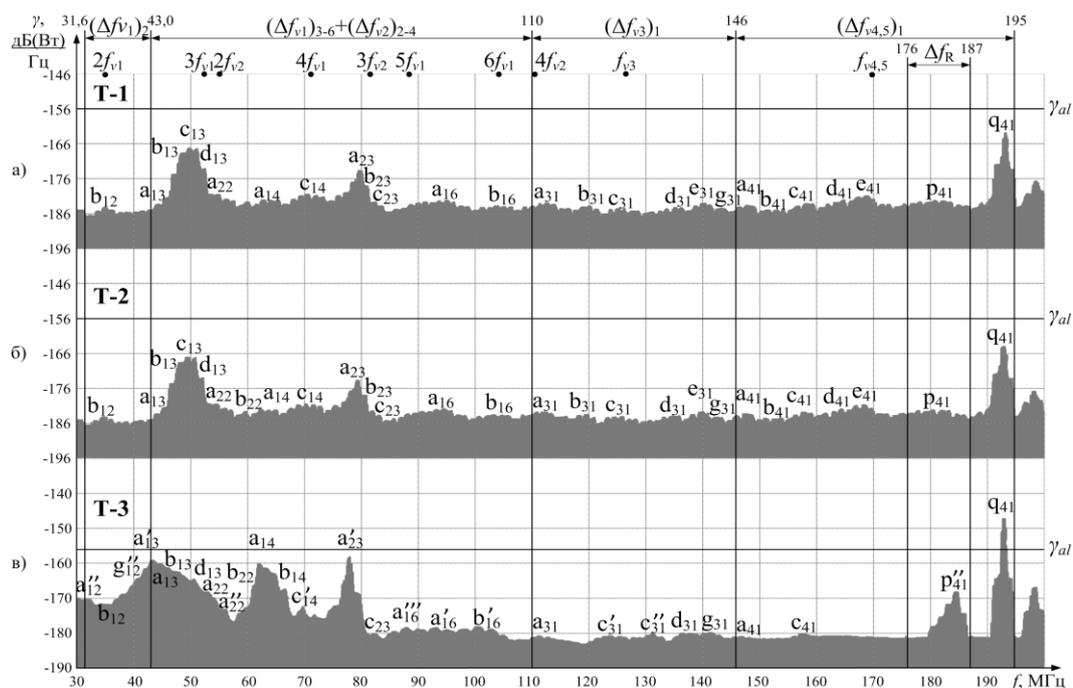


Рис. 3. Энергетические спектры излучений вертикальной поляризации на частотах 30–205 МГц для трех автотрансформаторов со сроком эксплуатации до 1 года: а) Т-1; б) Т-2; в) Т-3

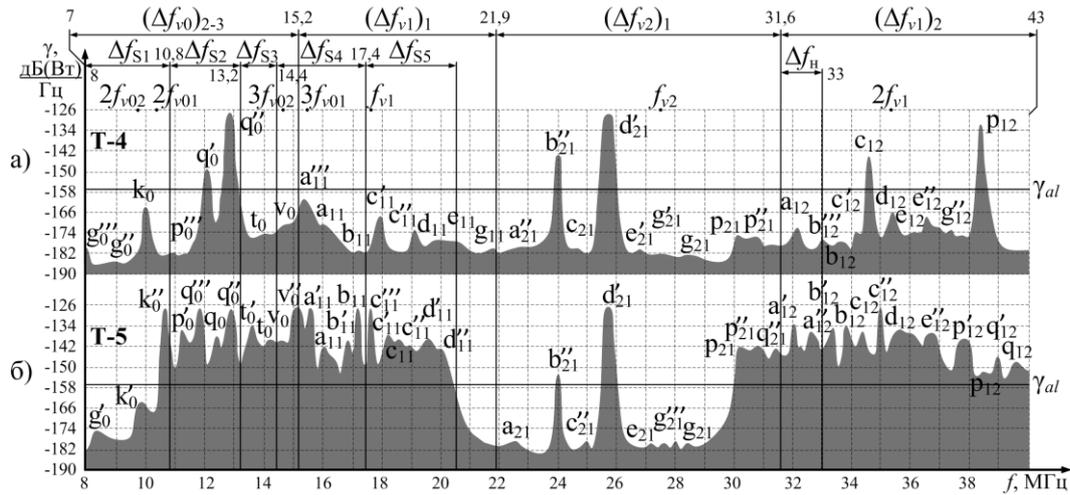


Рис. 4. Энергетические спектры излучений вертикальной поляризации на частотах 8–40 МГц для двух автотрансформаторов со сроком эксплуатации более 20 лет: а) Т-4; б) Т-5

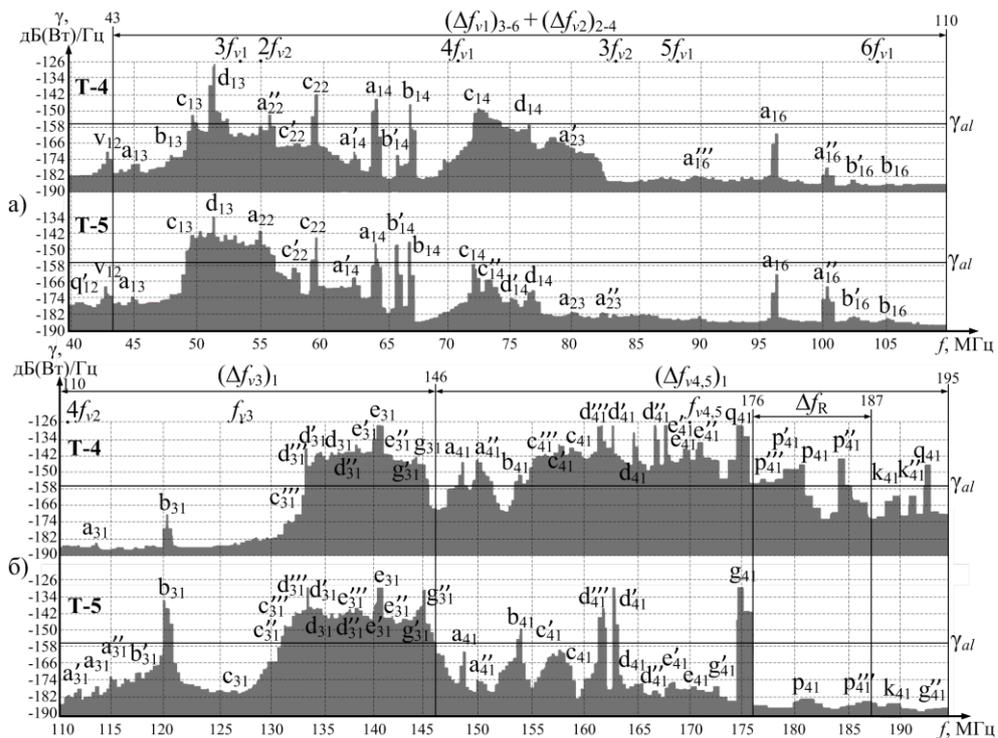


Рис. 5. Энергетические спектры излучений вертикальной поляризации для автотрансформаторов Т-4 и Т-5 со сроком эксплуатации более 20 лет: а) 40–110 МГц; б) 110–195 МГц

Что касается рассматриваемых автотрансформаторов, то процедура ранжирования позволяет выбрать в качестве эталонного автотрансформатор Т-1. Рассчитав значения коэффициентов интегральной мощности K_{ij} для излучений приведённых автотрансформаторов по формуле (1), мы можем констатировать, что наибольший уровень дефектности имеет Т-5.

Методика шумовой диагностики предполагает оценку уровня дефектности не только по значению интегральной мощности излучения, но и путем подсчета числа пиков излучений с интенсивностями, равными или выше граничного уровня γ_{al} , характеризующего опасное развитие дефекта. Численное значение граничного уровня γ_{al} для информационных частотных полос по основной гармонике принят равным -156 дБ (Вт)/Гц. Анализ спектров показывает, что в частотной полосе ввода 500 кВ у автотрансформаторов Т-1, Т-2 и Т-4 отсутствует превышение пиками граничного уровня. У Т-3 превышение зафиксировано для четырёх пиков, у Т-5 – для 10 пиков.

Автором проведен анализ энергетических спектров излучений в информационных частотных полосах основной гармонике всех вводов автотрансформаторов, обозначенных на рис.1 следующим образом: 1 – 500 кВ; 2 – 220 кВ; 3 – ввод нейтрали; 4, 5 – вводы 11 кВ. Результаты анализа сведены в табл. 1. Полученные данные позволили дать оценки уровней дефектности внешних конструктивных элементов, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты анализа энергетических спектров электромагнитных излучений вводов

Оборудование	Число пиков с интенсивностями, превышающими уровень γ_{al}			
	по вводу 1	по вводу 2	по вводу 3	по вводам 4, 5
Т-1, Т-2	–	–	–	–
Т-3	$a'_{11}, c'_{11}, d_{11}, g_{11}$	a_{21}, b'_{21}	–	–
Т-4	–	b''_{21}, d'_{21}	$d'''_{31}, d'_{31}, d_{31}, d''_{31}, e'_{31}, e_{31}, e''_{31}, g'_{31}, g_{31}$	$a_{41}, a''_{41}, b_{41}, c'''_{41}, c'_{41}, c_{41}, d'''_{41}, d'_{41}, d_{41}, d''_{41}, e'_{41}, e_{41}, e''_{41}, g_{41}, P'_{41}, P'_{41}, P_{41}, Q_{41}$
Т-5	$a'_{11}, a_{11}, b'_{11}, b_{11}, c'''_{11}, c'_{11}, c_{11}, c''_{11}, d'_{11}, d''_{11}$	$b''_{21}, d'_{21}, p_{21}, p'_{21}, q'_{21}$	$b_{31}, c'''_{31}, c'_{31}, d'''_{31}, d'_{31}, d_{31}, d''_{31}, e'''_{31}, e'_{31}, e_{31}, e''_{31}, g'_{31}, g''_{31}$	$b_{41}, d'''_{41}, d'_{41}, g_{41}$

Таблица 2

Результаты оценки степени дефектностей вводов

Оборудование	Степень дефектности				
	ввода 1	ввода 2	ввода 3	ввода 4	ввода 5
Т-1	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая
Т-2	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая
Т-3	умеренная	слабая	слабая	слабая	слабая
Т-4	слабая	слабая	сильная	сильная	сильная
Т-5	сильная	сильная	сильная	умеренная	умеренная

Критерии, по которым оценивался уровень дефектности, сформулированы в работе [17] и выглядят следующим образом: слабой дефектности ввода соответствует наличие в наиболее информативной частотной полосе не более двух, умеренной дефектности – трёх-четырёх, а сильной дефектности – пяти и более пиков с интенсивностями, равными или выше граничного уровня γ_{al} .

Данные таблиц 1 и 2 указывают на то, что вводы Т-4 и Т-5 находятся в состоянии умеренной или сильной дефектности, что предполагает постановку этих автотрансформаторов на учащенный контроль, в том числе и другими диагностическими методами.

Оценка технического состояния внутренних элементов

В спектрах собственного электромагнитного излучения автотрансформаторов в пределах информационных частотных полос присутствует информация, позволяющая дать

оценку дефектности внутренних элементов. Алгоритм определения информационных частотных полос подробно рассмотрен в работе [19]. Отметим, что сами полосы внутренних конструктивных элементов ВВЭО должны располагаться внутри одной или нескольких соседних информативных частотных полос излучений антенн вертикальной поляризации и включать в себя компактную серию из интенсивных пиков колебаний.

Определенные в соответствии с упомянутым алгоритмом оптимальные информативные частотные полосы основных внутренних конструктивных элементов автотрансформаторов обозначены на рис. 2–5: Δf_{S1} , Δf_{S2} , Δf_{S3} , Δf_{S4} , Δf_{S5} – полосы обмоток S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 соответственно; Δf_H – полоса основного бака 6 автотрансформатора; Δf_R – полоса регулятора напряжения R с его баком 7 (см. рис. 1, а).

После определения информационных частотных полос можно приступить к процедуре оценки степени дефектности внутренних элементов. В первую очередь выделяются эталонные пики, наличие которых говорит о слабой дефектности элементов. Для обследованных автотрансформаторов это пики k_0 , q_0 , t_0 , a_{11} , c_{11} , зафиксированные у автотрансформатора Т-1. Далее ведется подсчет величины превышения уровней пиков в информационных частотных полосах над эталонным уровнем. Значения этих превышений для обследованных автотрансформаторов сведены в табл. 3. Полученные данные позволяют определить степень дефектности внутренних элементов по величине превышения максимальными интенсивностями пиков излучений аналогичных интенсивностей у эталонного образца [19]. Слабой дефектности элемента соответствует превышение не более чем на 20 дБ, умеренной – на 20–40 дБ, сильной – более чем на 40 дБ.

Полученная в соответствии с приведёнными критериями оценка степени дефектности внутренних элементов сведена в таблицу 4. Как и следовало ожидать, автотрансформаторы Т-4 и Т-5 имеют наибольшее число внутренних элементов, обладающих сильной дефектностью.

Таблица 3

Результаты анализа пиков электромагнитных излучений внутренних элементов

Оборудование	Величина превышения уровня пика над эталонным уровнем, дБ						
	обмотка S_1	обмотка S_2	обмотка S_3	обмотка S_4	обмотка S_5	бак	регулятор напряжения
Т-1	0	0	0	0	0	0	0
Т-2	0	1	0	1	0	0	0
Т-3	28	31	37	29	34	17	11
Т-4	4	47	7	14	10	12	41
Т-5	40	47	50	47	50	48	2

Таблица 4

Результаты оценки степени дефектности внутренних элементов

Оборудование	Степень дефектности						
	обмотка S_1	обмотка S_2	обмотка S_3	обмотка S_4	обмотка S_5	бак	регулятор напряжения
Т-1	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая
Т-2	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая	слабая
Т-3	умерен.	умерен.	умерен.	умерен.	умерен.	слабая	слабая
Т-4	слабая	сильная	слабая	слабая	слабая	слабая	сильная
Т-5	умерен.	сильная	сильная	сильная	сильная	сильная	слабая

Оценка технического состояния автотрансформаторов

Данные о степени дефектности внешних и внутренних элементов (табл. 2 и 4)

могут служить основой для оценки полной дефектности каждой единицы оборудования. В работе [19] приведены критерии оценки, а именно:

- слабая полная дефектность соответствует слабым дефектностям всех его основных конструктивных элементов;
- умеренная полная дефектность соответствует умеренным дефектностям хотя бы одного из основных конструктивных элементов при слабых дефектностях остальных конструктивных элементов;
- сильная полная дефектность соответствует сильным дефектностям от одного до половины основных конструктивных элементов при слабых и (или) умеренных дефектностях остальных конструктивных элементов;
- опасная полная дефектность соответствует сильным дефектностям более половины основных конструктивных элементов при слабых и (или) умеренных дефектностях остальных конструктивных элементов.

Наличие хотя бы одного конструктивного элемента с сильной дефектностью говорит о необходимости принятия мер по учащенному контролю, проведению дополнительных испытаний.

Полученные данные позволяют определить степень полной дефектности диагностируемых автотрансформаторов: как слабую для Т-1 и Т-2, умеренную для Т-3, сильную для Т-4 и опасную для Т-5. Отметим, что выводы о полных дефектностях диагностируемых автотрансформаторов, сделанные на основе анализа зарегистрированных энергетических спектров излучений вертикальной поляризации и определения дефектностей всех основных внешних и внутренних конструктивных элементов этих автотрансформаторов, в целом не противоречат выводам, полученным ранее в работе [16] для автотрансформаторов Т-1, Т-2 и Т-3, но существенно уточняют и дополняют их, находятся в хорошем согласии с результатами хроматографического анализа для всех рассмотренных автотрансформаторов.

Выводы

1. Шумовая диагностика служит эффективным инструментом для оценки технического состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования.
2. Глубина и эффективность диагностирования существенно расширяются при тщательном учете информации во всех составляющих спектров, а также при учете состояния внешних и внутренних конструктивных элементов.

Литература

1. Живодерников С.В., Овсянников С.В., Русов В.А. Зарубежный опыт мониторинга состояния маслонаполненного оборудования // Материалы четвертого научно-практического семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Востока по проблемам мониторинга трансформаторного оборудования и диагностики электрических установок. Новосибирск: ГЦРО, 2009. С. 7–22.
2. Wensheng Gao, Cuifen Bai, Tong Liu. A Dynamic Integrated Fault Diagnosis Method for Power Transformers. The Scientific World Journal, 2015. Vol. 2015, article ID 459268, 8 pages. DOI:10.1155/2015/459268.
3. Kamini Devi, Shimi S.L. Online condition assessment of transformer oil for incipient faults detection. International Journal of Scientific Research engineering and Technology. 2015. Vol. 4, issue 10, pp. 991–997.
4. Peimankar A., Weddell S.J., Jalal T., Laphorn A.C. Evolutionary multi-objective fault diagnosis of power transformers // Swarm and Evolutionary Computation. 2017. Vol. 36, pp. 62–75, DOI: 10.1016/j.swevo.2017.03.005.
5. Sikorski W., Walczak K., Przybylek P. Moisture Migration in an Oil-Paper Insulation System in Relation to Online Partial Discharge Monitoring of Power Transformers // Energies. 2016. 9 (12), 1082, DOI:10.3390/en9121082.

6. Hong Q., Zhang J., Xie Q., Liang S., Xu Y., Li S., Hu W. Transformer's Condition Assessment Method Based on Combination of Cloud Matter Element and Principal Component Analysis. *Energy and Power Engineering*. 2017. 9. Pp. 659–666, DOI: 10.4236/epe.2017.94B071.
7. Akolkar S.M., Kushare B.E., Remaining Life Assessment of Power Transformer // *Journal of Automation and Control*. 2014. Vol. 2, no. 2, pp. 45–48, DOI:10.12691/automation-2-2-2.
8. Nelson A.A., Jaiswal G.C., Ballal M.S., Tutakne D.R., Remote condition monitoring system for distribution transformer. *Proceedings of the 8th National Power Systems Conference (NPSC '14)*, IEEE, Guwahati, India. 2014. Pp. 1–5.
9. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshin V.R., Methods of Multi-Parameter Diagnostics of Electric Equipment Condition within On-line Monitoring Systems. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 150, pp. 32–38, DOI:10.1016/j.proeng.2016.07.206.
10. Киншт Н.В., Кац М.А. Диагностика точечных источников электромагнитных шумов // *Электричество*. 1999. № 4. С. 40–42.
11. Силин Н.В. Электромагнитный способ оценки технического состояния высоковольтного оборудования // *Промышленная энергетика*. 2006. № 1. С. 8–11.
12. Киншт Н.В. О способе контроля высоковольтного оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения / Н.В. Киншт, В.Л. Лосев, Н.В. Силин, В.В. Клоков, А.Б. Попович, М.Ю. Белушкин // *Промышленная энергетика*. 2007. № 4. С. 24–29.
13. Силин Н.В. Оценка технического состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого электромагнитного поля // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2008. № 3. С. 86–91.
14. Силин Н.В., Шевердин Д.Г. Шумовая диагностика электротехнического оборудования // *Ползуновский вестник*. 2011. № 2–1. С. 132–139.
15. Силин Н.В., Шевердин Д.Г., Павлов Е.Н. К вопросу шумовой диагностики электротехнического оборудования // *Ползуновский вестник*, 2011. №2–2. С. 195–201.
16. Клоков В.В., Лосев В.Л., Игнатьев Н.И., Силин Н.В. Шумовая диагностика электротехнического оборудования морского транспорта // *Морские интеллектуальные технологии*. С.-Пб.: Моринтех, 2015. № 3 (29). Т. 1. С. 142–147.
17. Losev V., Silin N., Belushkin M., Klokov V., Emitting model of the high-voltage electric equipment. *Proceedings of the 18-th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Munich, Germany, Septemder 24–27. 2007. Pp. 36–38.
18. Dima M., Losev V., Generating electromagnetic fluctuations by electric condenser. *Proceedings of the 18-th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Munich, Germany, Septemder 24–27, 2007. Pp. 39–40.
19. Клоков В.В., Лосев В.Л., Попович А.Б., Силин Н.В., Шевердин Д.Г. Развитая шумовая излучающая модель электроэнергетического оборудования // *Электро*. 2011. № 2. С. 19–24.

Автор публикации

Игнатьев Николай Игоревич – аспирант, ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Дальневосточного федерального университета.

References

1. Zhivodernikov S.V., Ovsyanikov A.G., Rusov V.A., Zarubezhnyi opyt monitoringa sostoianiia maslonapolnennogo oborudovaniia [International practices at monitoring condition of oil-filled equipment]. *Materialy chetvertogo nauchno-prakticheskogo seminara Obshestvennogo Soveta spetsialistov Sibiri i Vostoka po problemam monitoringa transformatornogo oborudovaniia i diagnostiki elektricheskikh ustanovok* [Proceeding of the fourth research and practice meeting of the Community Council of Specialists of Siberia and East on the Issues of Monitoring Transformer Equipment and Diagnostics of Electrical Units], Novosibirsk, 2009, pp. 7-22 (in Russian).

2. Wensheng Gao, Cuifen Bai, Tong Liu, A Dynamic Integrated Fault Diagnosis Method for Power Transformers. *The Scientific World Journal*, 2015, vol. 2015, article ID 459268, 8 pages, DOI:10.1155/2015/459268.

3. Kamini Devi, Shimi S.L., Online condition assessment of transformer oil for incipient faults detection. *International Journal of Scientific Research engineering and Technology*, 2015, vol. 4, issue 10, pp. 991-997.

4. Peimankar A., Weddell S.J., Jalal T., Laphorn A.C., Evolutionary multi-objective fault diagnosis of power transformers. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2017, vol. 36, pp. 62-75, DOI: 10.1016/j.swevo.2017.03.005.

5. Sikorski W., Walczak K., Przybylek P., Moisture Migration in an Oil-Paper Insulation System in Relation to Online Partial Discharge Monitoring of Power Transformers. *Energies*, 2016, 9(12), 1082, DOI:10.3390/en9121082.

6. Hong Q., Zhang J., Xie Q., Liang S., Xu Y., Li S., Hu W., Transformer's Condition Assessment Method Based on Combination of Cloud Matter Element and Principal Component Analysis. *Energy and Power Engineering*, 2017, 9, pp. 659-666, DOI: 10.4236/epe.2017.94B071.

7. Akolkar S.M., Kushare B.E., Remaining Life Assessment of Power Transformer. *Journal of Automation and Control*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 45-48, DOI:10.12691/automation-2-2-2.

8. Nelson A.A., Jaiswal G.C., Ballal M.S., Tutakne D.R., Remote condition monitoring system for distribution transformer. *Proceedings of the 8th National Power Systems Conference (NPSC '14)*, IEEE, Guwahati, India, 2014, pp. 1-5.

9. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshin V.R., Methods of Multi-Parameter Diagnostics of Electric Equipment Condition within On-line Monitoring Systems. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 32-38, DOI:10.1016/j.proeng.2016.07.206.

10. Kinsht N.V., Katz M.A., Диагностика точечных источников электромагнитных шумов [Diagnostic Point Sources of Electromagnetic Noises]. *Elektrichestvo [Electrical Technology Russia]*, 1999, no. 4, pp. 40-42 (in Russian).

11. Silin N.V., Elektromagnitnyi sposob otsenki tekhnicheskogo sostoianiia vysokovol'nogo oborudovaniia [Electromagnetic approach of high-voltage equipment technical condition assessment]. *Promyshlennaia energetika [Power industry]*, 2006, no. 1, pp. 8-11 (in Russian).

12. Kinsht N.V., Losev V.L., Klokov V.V., Silin N.V., Popovich A.B., Belushkin M.Yu., O sposobe kontrolya vysokovol'nogo oborudovaniia na osnove analiza spektrov ego sobstvennogo elektromagnitnogo izlucheniia [About a way of the control of the high-voltage equipment on the basis of the analysis of spectra of its own electromagnetic radiation]. *Promyshlennaia energetika [Power industry]*, 2007, no. 4, pp. 24-29 (in Russian).

13. Silin N.V., Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia elektroenergeticheskogo oborudovaniia po spektral'nym kharakteristikam izluchaemogo elektromagnitnogo polia [Assessment of electrical power equipment technical condition by spectral characteristics of the radiated electromagnetic field]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Energetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]*, 2008, no. 3., pp. 86-91 (in Russian).

14. Silin N.V., Sheverdin D.G., Shumovaia diagnostika elektrotekhnicheskogo oborudovaniia [Noise diagnostics of the electrotechnical equipment]. *Polzunovskii vestnik [Polzunovsky messenger]*, 2011, no. 2-1, pp. 132-139 (in Russian).

15. Silin N.V., Sheverdin D.G., Pavlov E.N., K voprosu shumovoi diagnostiki elektrotekhnicheskogo oborudovaniia [To a question of noise diagnostics of the electrotechnical equipment]. *Polzunovskii vestnik [Polzunovsky messenger]*, 2011, no. 2-2, pp. 195-201 (in Russian).

16. Klokov V.V., Losev V.L., Silin N.V., Ignatev N.I., Shumovaia diagnostika elektrotekhnicheskogo oborudovaniia morskogo transporta [Noise diagnostics of sea transport's electrotechnical equipment]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intelligent technologies]*, St. Petersburg, 2015, no. 3(29), vol. 1, pp. 142-147 (in Russian).

17. Losev V.L., Silin N.V., Belushkin M.Yu., Klokov V.V., Emitting model of the high-voltage electric equipment. *Proceedings of the 18-th International Zurich Symposium on Electromagnetic*

© *Н.И. Игнатьев*

Compatibility. Munich, Germany, September 24-27, 2007, pp. 36–38.

18. Dima M., Losev V., Generating electromagnetic fluctuations by electric condenser. Proceedings of the 18-th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Munich, Germany, September 24-27, 2007, pp. 39–40.

19. Klokov V.V., Losev V.L., Popovich A.B., Silin N.V., Sheverdin D.G., Razvitaia shumovaia izluchaiushchaia model' elektroenergeticheskogo oborudovaniia [The developed noise radiating model of the electrical power equipment]. Elektro [Elektro], 2011, no. 2, pp. 19–24 (in Russian).

Author of the publication

Nikolay Ignatev – postgraduate student, assistant, «Power Industry and Electrical Engineering» Department, Far Eastern Federal University.

Поступила в редакцию

21 октября 2017 г.