

## К ВОПРОСУ ШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н.В. Силин, Д.Г. Шевердин, Е.Н. Павлов

*В статье рассмотрены методические аспекты шумовой диагностики электротехнического оборудования по спектрам его собственного электромагнитного излучения. Методика диагностирования базируется на использовании шумовой излучающей модели, учитывающей внутренние шумы в изоляции и конструктивных элементах оборудования и условия их излучения в окружающее пространство. Показано, что предлагаемая методика позволяет существенно углубить и повысить надежность диагностирования оборудования.*

*Ключевые слова: электромагнитные шумы, диагностика; электротехническое оборудование; автотрансформатор; антенны; энергетический спектр; информативные частотные полосы.*

Работа любого электротехнического, радиотехнического и электроэнергетического оборудования, в том числе используемого в агропромышленном секторе, всегда сопровождается генерацией и распространением электромагнитных волн в широком частотном диапазоне. Электромагнитные поля, создаваемые этим оборудованием во внешней области пространства, отражают их внутреннее состояние. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что собственные внешние электрические, магнитные и электромагнитные поля электротехнического оборудования можно рассматривать как информационные, позволяющие решать задачи диагностики.

Контроль технического состояния электротехнического оборудования возможно осуществлять по данным измерения спектральных составляющих, соответствующих гармоникам промышленной частоты [1], а также по энергетическим спектрам в высокочастотной области [2].

Методы спектрального контроля в высокочастотной области основаны на применении принципов шумовой диагностики электротехнического оборудования. Шум может быть обусловлен как самим механизмом протекания электрического тока, так и хаотическими изменениями других неэлектрических параметров оборудования, которые преобразуются в изменения величин токов и напряжений. На практике шумом можно считать любое нерегулярное или хаотическое изменение параметра, обусловленное большим числом случайных событий. Шумы присутствуют в любых системах и средах. Например, шумы в электронных схемах [3, 4] обычно

рассматриваются как вредный фактор, и, в действительности они часто накладывают ограничения на работу устройств. Это справедливо, например, в случае малошумящего усилителя звуковой частоты, в котором минимальная обнаруживаемая мощность входного сигнала зависит главным образом от уровня шумов входного каскада. Практика показывает, что шум может быть использован и для целей диагностики электронного и электротехнического оборудования.

Собственные электромагнитные излучения электротехнического оборудования тесно связаны с физико-химическими процессами, протекающими в изоляции, узлах и конструктивных элементах. Тепловое и электрическое разрушение изоляции, нарушение взаимосвязей между молекулами за счет химических процессов сопровождается движением и взаимодействием носителей зарядов, возбуждением и излучением электромагнитных колебаний.

В электротехнических установках источниками шумов являются электрические пробои, частичные и ползущие разряды, повышенный нагрев локальных зон, перегрев контактов и т.д. В общем случае вышеперечисленные процессы являются причиной появления так называемых токов полевой и тепловой ионизации, возникающих в дефектных областях наружных и внутренних частей электротехнического оборудования, а следовательно, и лавинных шумов, которые увеличиваются с ростом дефектов.

Установлено, что в процессе деградации динамических систем интенсивности шумов в них возрастают на 60-80 дВ при изменениях средних параметров систем на 20-30%. По-

этому шумовая методика диагностирования дефектов электротехнического оборудования может обладать высокой чувствительностью и эффективностью.

В [5] показана возможность применения теории шумов для диагностики электротехнического оборудования (ЭО) по спектру его электромагнитного излучения, в основу которой положена излучающая модель такого оборудования [6, 7]. Согласно этой модели энергетический спектр излучения вертикальной поляризации ЭО, 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.). Шумы фильтруются резонансными колебательными цепями оборудования и излучаются в окружающее пространство вводами на-

пряжений этого оборудования, выступающими в роли вибраторных антенн

В данной работе представлена методика диагностирования электротехнического оборудования, базирующаяся на апробированной экспериментально развитой шумовой излучающей модели ЭО [8], учитывающей влияние внешних и внутренних конструктивных элементов на энергетический спектр электромагнитного излучения. Особенностью предлагаемого метода является то, что дефект контролируемого оборудования устанавливается после определения дефектностей не только внешних, но и внутренних основных конструктивных элементов, включая и сам корпус оборудования.

Реализацию шумовой диагностики ЭО продемонстрируем на примере однофазного силового высоковольтного автотрансформатора типа АОДЦТН 16700/500/200 (рисунок 1).

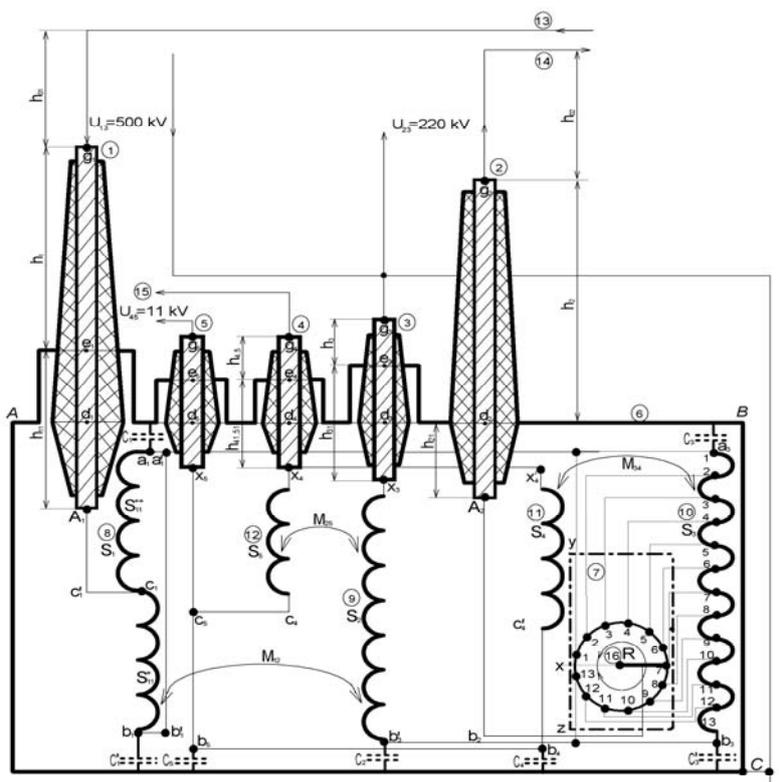


Рисунок 1 - Устройство силового высоковольтного автотрансформатора: 1, 2 – ВВ вводы; 3, 4, 5 – НВ вводы; 6 – металлический бак АТ; 7 – металлический бак регулятора напряжения; 8 – ВВ катушка  $S_1$ , ( $S_{11}^*$ ,  $S_{11}^{**}$  – две половинки катушки  $S_1$ ); 9 – ВВ катушка  $S_2$  (основная); 10 – ВВ  $S_3$  (регулирующая); 11, 12 – НВ катушки  $S_4$ ,  $S_5$ ; 13, 14 – ВВ линии электропередачи; 15 – НВ линия электропередачи; 16 – регулятор напряжения  $R$

## К ВОПРОСУ ШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Энергетические спектры собственных электромагнитных излучений вертикальной поляризации группового автотрансформатора, снятые при номинальном режиме работы в частотных диапазонах 5-33МГц и 30-

205МГц сразу после ввода его в эксплуатацию (первичное включение под нагрузку), представлены соответственно на рисунках 2 и 3. Процедура диагностирования состоит из нескольких этапов.

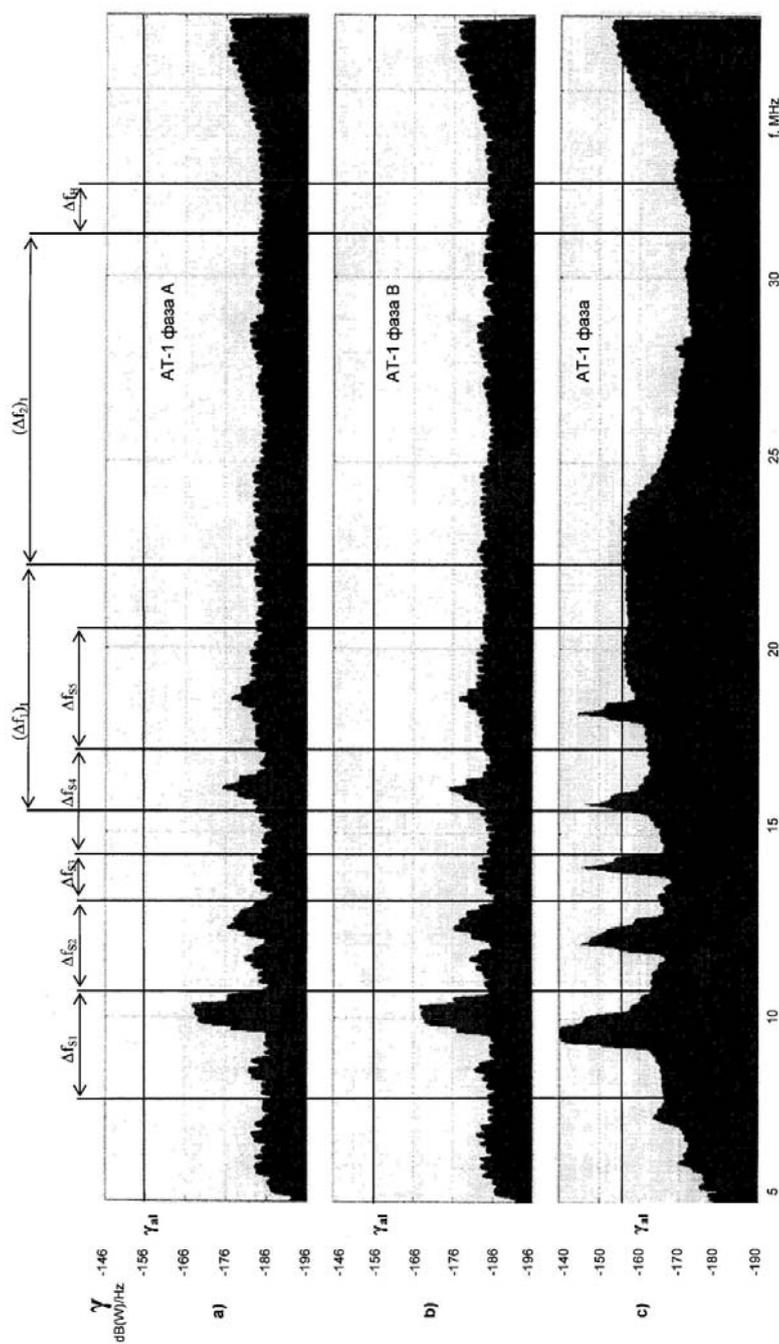


Рисунок 2- Энергетические спектры излучений вертикальной поляризации на частотах 5-33МГц для трех АТ: а) АТ-1 фаза А, б) АТ-1 фаза В, с) АТ-1 фаза с

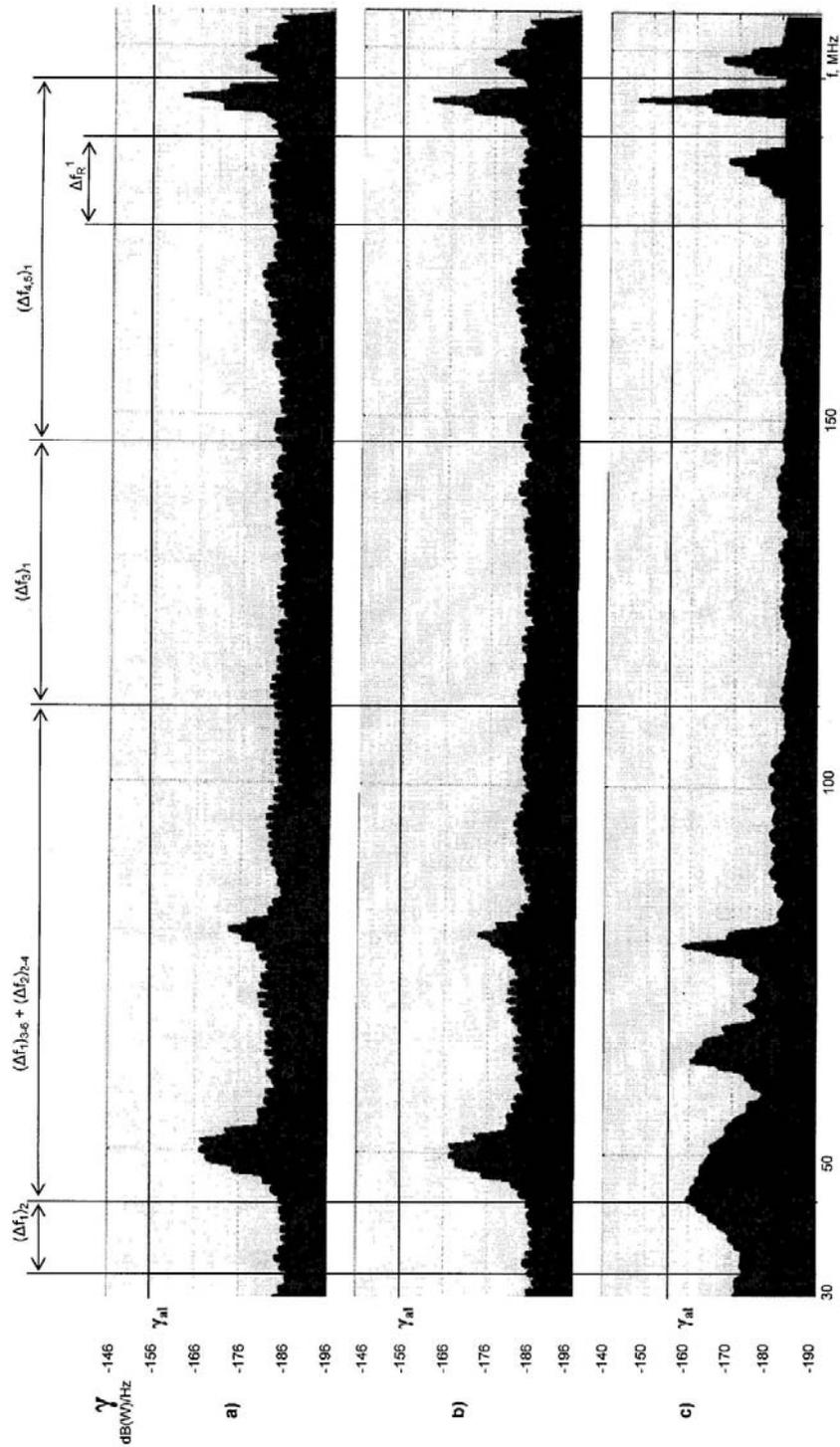


Рисунок 3 - Энергетические спектры излучений вертикальной поляризации на частотах 30-205MHz для трех АТ: а) АТ-1 фаза А, б) АТ-1 фаза В, в) АТ-1 фаза С

## К ВОПРОСУ ШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

На первом этапе рассчитываются резонансные частоты  $(f_i)_n$  и информативные частотные полосы излучений  $(\Delta f_i)_n$  антенн вертикальной поляризации (внешних конструктивных элементов), а также добротности  $(Q_{Kj}^t)_m$  и резонансные частоты  $(f_{Kj}^t)_m$  добротных внутренних (и внешне-внутренних) колебательных цепей, включающих в себя  $K_j$ -ые конструктивные элементы, расположенные внутри металлического корпуса оборудования, включая и сам металлический корпус (внутренние конструктивные элементы). Здесь и далее:  $i = 1, 2, \dots, i_{max}$  – порядковый номер ввода,  $i_{max}$  – полное число вводов;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – числа натурального ряда, соответствующие номерам гармоник резонансных частот излучений антенн;  $K = R, S, \dots$  – тип внутреннего конструктивного элемента, входящего в  $K_j^t$ -ую колебательную цепь;  $j = 1, 2, 3, \dots$  – порядковый номер внутреннего конструктивного элемента в ряду однотипных;  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядковый номер колебательной цепи в группе таких цепей, включающих в себя  $K_j$ -ый внутренний конструктивный элемент;  $m = 1, 2, 3, \dots$  – числа натурального ряда, соответствующие номерам гармоник резонансных частот колебательных цепей.

На втором этапе в измеренных в эквивалентных условиях энергетических спектрах от всех однотипных образцов диагностируемого ЭО выделяются наиболее информативные частотные полосы  $(\Delta f_i)_1$  излучений вышеуказанных антенн (обычно для первых гармоник) для определения дефектностей внешних конструктивных элементов (вводов напряжений) и оптимальные частотные полосы  $(\Delta f_{Kj})_{opt}$  для выявления дефектностей внутренних конструктивных элементов этого оборудования. Наиболее информативные частотные полосы излучений  $(\Delta f_1)_1$ ,  $(\Delta f_2)_1$ ,  $(\Delta f_3)_1$ ,  $(\Delta f_{4,5})_1$  отмечены на рисунках 2, 3 в верхних частях спектров.

При определении оптимальной информативной частотной полосы  $(\Delta f_{Kj})_{opt}$  для каждого  $K_j$ -ого внутреннего конструктивного элемента ЭО необходимо учитывать следующие положения. Полоса  $(\Delta f_{Kj})_{opt}$  конкретного внутреннего конструктивного эле-

мента оборудования должна располагаться внутри одной или нескольких соседних информативных частотных полос излучений  $(\Delta f_i)_n$  вышеуказанных антенн и включать в себя компактную серию из интенсивных пиков колебаний с добротностями и частотами, близкими к рассчитанным значениям добротностей  $(Q_{Kj}^t)_m$  и резонансных частот  $(f_{Kj}^t)_m$  собственных колебательных цепей этого конструктивного элемента с набором порядковых номеров  $t$  при минимальных номерах гармоник  $m$ . При этом набор порядковых номеров  $t$  обеспечивает полноту снимаемой информации, а минимизация номеров гармоник  $m$  позволяет повысить качество диагностической информации за счет ослабления эффектов наложения резонансов различных колебательных цепей [8].

На третьем этапе фиксируются интегральные мощности колебаний в каждой из вышеуказанных наиболее информативных частотных полосах  $(\Delta f_i)_1$  излучений внешних конструктивных элементов (вводов напряжений) и максимальные пики колебаний в каждой из оптимальных информативных частотных полос  $(\Delta f_{Kj})_{opt}$  внутренних конструктивных элементов этого оборудования в энергетических спектрах излучений вертикальной поляризации от однотипных образцов диагностируемого ЭО.

Значения интегральных мощностей электромагнитных колебаний, излучаемых в каждой из наиболее информативных частотных полос  $(\Delta f_i)_1$ , вычисляются путем регистрации числа пиков излучений с интенсивностями равными и выше граничного уровня интегральной мощности излучения  $\gamma_{al}$ , характеризующего в указанных частотных полосах излучений антенн  $(\Delta f_i)_1$  опасное развитие дефектов в проводе  $i$ -ого ввода напряжения. Численное значение граничного уровня  $\gamma_{al}$  для наиболее информативных частотных полос  $(\Delta f_i)_1$  как и в [5] выберем равным  $-156$  dB(W)/Hz. Для диагностируемых автотрансформаторов выделим четыре наиболее информативные частотные полосы по разным вводам (рисунок 1):  $(\Delta f_1)_1$ ,  $(\Delta f_2)_1$ ,  $(\Delta f_3)_1$ ,  $(\Delta f_{4,5})_1$ .

Энергетические спектры излучений для этих вводов приведены на рисунках 2, 3.

Анализ измеренных интенсивностей пиков позволяет сформулировать следующие критерии для определения дефектностей  $i$ -ых вводов напряжений диагностируемых

автотрансформаторов (внешних конструктивных элементов) по числу пиков колебаний в наиболее информативных частотных полосах этих вводов  $(\Delta f_i)_1$  с интенсивностями равными и выше значения граничного уровня  $\gamma_{al}$ :

- *слабая дефектность ввода напряжения* – в полосе излучения этого ввода присутствуют не более 2-х пиков с интенсивностями равными или выше граничного уровня  $\gamma_{al}$ ;

- *умеренная дефектность ввода напряжения* – в полосе излучения этого ввода присутствуют 3-4 пика с интенсивностями равными или выше граничного уровня  $\gamma_{al}$ ;

- *сильная дефектность* – в полосе излучения этого ввода присутствуют 5 и более пиков с интенсивностями равными или выше граничного уровня  $\gamma_{al}$ .

Рассмотрим процедуру определения дефектностей **внутренних** конструктивных элементов диагностируемых автотрансформаторов. Максимальные интенсивности пиков колебаний в оптимальной информативной частотной полосе  $\Delta f_S$  для катушек  $S_1 - S_5$ ,  $\Delta f_H$  для основного бака и  $\Delta f_R^1$  для регулятора с баком в энергетических спектрах автотрансформаторов показаны на рис. 2. При этом эталонами слабой дефектности катушек, основного бака и регулятора с баком являются представленные в таблице следующие значения мощности излучения [5]:

Элемент конструкции	Мощность излучения (дБ Вт/Гц)
Катушка $S_1$	-171
Катушка $S_2$	-176
Катушка $S_3$	-182
Катушка $S_4$	-175
Катушка $S_5$	-178
Основной бак	-184
Регулятор с баком	-183

С учетом приведенных данных можно сформировать следующие критерии для определения дефектностей внутренних  $K_j$  -ых конструктивных элементов диагностируемых автотрансформаторов по максимальным интенсивностям пиков излучений в оптимальных информативных частотных полосах этих элементов  $(\Delta f_{K_j})_{opt}$ :

- *слабая дефектность внутреннего элемента* – максимальные интенсивности пиков излучений менее чем на 20 дБ превышают аналогичные у эталонного образца;

- *умеренная дефектность внутреннего элемента* – максимальные интенсивности

пиков излучений на 20-40 дБ превышают аналогичные у эталонного образца;

- *сильная дефектность внутреннего элемента* – максимальные интенсивности пиков излучений более чем на 40 дБ превышают аналогичные у эталонного образца.

**На четвертом этапе** с учетом полученных данных разрабатываются критерии и определяются полные дефектности диагностируемых автотрансформаторов. Данные содержат результаты определения дефектностей основных внешних и внутренних конструктивных элементов диагностируемых автотрансформаторов (всего 12 основных конструктивных элементов), среди которых:

- 6 высоковольтных конструктивных элементов – вводы напряжений 1, 2, катушки  $S_1, S_2, S_3$  и регулятор напряжения  $R$  с баком 7;

- 6 низковольтных конструктивных элементов – основной бак автотрансформатора 6, вводы напряжений 3,4,5 и катушки  $S_4, S_5$ .

Относительные запасы электрических прочностей у высоковольтных и низковольтных (внешних и внутренних) элементов конструкции примерно одинаковые. Следовательно, отказы отдельных конструктивных элементов равновероятны, и вероятность полного отказа ЭО пропорциональна числу сильно дефектных элементов. С учетом отмеченных обстоятельств можно сформировать следующие критерии для определения полных дефектностей диагностируемых автотрансформаторов по результатам установленных выше дефектностей их основных внешних и внутренних конструктивных элементов:

- *слабая полная дефектность автотрансформатора* соответствует слабым дефектностям всех его основных конструктивных элементов;

- *умеренная полная дефектность автотрансформатора* соответствует умеренным дефектностям 1-12-ти его основных конструктивных элементов при слабых дефектностях остальных конструктивных элементов;

- *сильная полная дефектность автотрансформатора* соответствует сильным дефектностям 1-6-ти его основных конструктивных элементов при слабых и (или) умеренных дефектностях остальных конструктивных элементов;

- *опасная полная дефектность автотрансформатора* соответствует сильным дефектностям 7-12-ти его основных конструктивных элементов при слабых и (или) уме-

## К ВОПРОСУ ШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ренных дефектностях остальных конструктивных элементов.

Приведенные выводы о полных дефектностях диагностируемых автотрансформаторов, сделанные на основе анализа измеренных энергетических спектров излучений вертикальной поляризации и определения дефектностей всех основных внешних и внутренних конструктивных элементов этих автотрансформаторов, дополняют выводы, полученные в [5].

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами хроматографического анализа содержания растворенных газов в масляной изоляции высоковольтных вводов и баков (основного и бака регулятора напряжения) для рассмотренных автотрансформаторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомутов С.О. и др. Оценка состояния электродвигателей по параметрам магнитного поля // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 5.
2. Силин, Н.В. Оценка технического состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля: автореф. дис. ... д-ра тех. наук / Н.В. Силин. – Санкт-Петербург, 2009. – 34 с.
3. Букингом, М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. – М.: Мир, -1986. – 399 с.

4. Ван дер Зил А. Шум (источники, описание, измерение). Пер. с англ. Под ред. А.К.Нарышкина. М., -Сов. Радио. -1973.

5. Klovov V., Losev V., Popovich A., Silin N. Diagnostics of power electric equipment according to its parasite electromagnetic radiation. Proceedings of the 8-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. S. Petersburg, June 16-19, 2009.-P.33-35.

6. Klovov V., Losev V., Popovich A., Silin N. Emitting model of the power electric equipment. Proceedings of the 8-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. S. Petersburg, June 16-19, 2009 (P. 36-38).

7. Dima M., Losev V. Generating electromagnetic fluctuations by electric condenser. Proceedings of the 8-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. S. Petersburg, June 16-19.- 2009.-P.39-40.

8. Клоков В.В., Развитая шумовая излучающая модель электроэнергетического оборудования / В.В. Лосев, А.Б. Попович, Н.В. Силин, Д.Г. Шевердин-М.: - ЭЛЕКТРО, -№2,- 2011.- С. 19 – 26.

**Силин Н.В.**, д.т.н., доцент, Дальневосточный федеральный университет, тел.: 8 (4232) 45-02-02, E-mail: silin22@mail.ru;

**Шевердин Д.Г.**, старший преподаватель, Дальневосточный институт коммуникаций, тел.: 8 (4232) 61-16-33, E-mail: dgsheverdin@mail.ru;

**Павлов Е.Н.**, инженер, Филиал ОАО ФСК ЭЭС, тел.: 8(4232) 40-63-65, E-mail: metrolog@ppmes.ru,.