

Кандидаты технических наук, старшие и ведущие научные сотрудники: Борисов Р.К., Будович В.Л., Доггадин Г.С., Жарков Ю.В., Иванов А.В., Панюшкин В.В., Обух А.А., Соколова М.В., Тарасова Т.Н.

Кандидаты технических наук, доценты: Авруцкий В.А., Аношин О.А., Аронов М.А., Бизяев А.С., Базуткин В.В., Белогловский А.А., Белоусов С.В., Борисков В.В., Дмоховская Л.Ф., Гончаренко Г.М., Жарков Е.М., Калугина И.Е., Кошелев М.А., Кондратов О.И., Кужекин И.П., Ларин В.С., Орлов А.В.,

Пинталь Ю.С., Пашин М.М., Рябкова Е.Я., Сергеев Ю.Г., Сергеев А.С., Темников А.Г., Тихонов А.В., Фотин В.П.

Старшие преподаватели, ассистенты: Пашкова Л.А., Матвеев Д.А., Ковалев Д.И., Субботина Г.И., Шкрабляк Н.Н.

Автор: Хренов Сергей Иванович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1980 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1996 г. в МЭИ. Зав. кафедрой ТЭВН МЭИ (ТУ).

* * *

Акустические сигналы от частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов

РОЩУПКИН М.Д., ЕРМАКОВ Е.Г., ХРЕНОВ С.И.

Возникающие в изоляции электрооборудования частичные разряды (ЧР) большой интенсивности представляют серьезную опасность. Одной из возможностей их обнаружения является акустический метод, позволяющий не только определить место дефекта, но и оценить его негативные последствия. С целью расширения возможностей акустического метода задачей авторов было определение параметров акустического сигнала и идентификация по ним дефектов от ЧР различных видов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, изоляция, частичные разряды, методы обнаружения дефектов

Известно, что частичные разряды (ЧР) значительной интенсивности, возникающие в изоляции, представляют большую опасность для электрооборудования. Частичные разряды в изоляции силового трансформатора могут возникнуть по ряду причин: дефекты изготовления, старение, загрязнение поверхности твердой изоляции и масла, образование пузырьков газов, нештатные режимы работы и др.

Основные методы для обнаружения ЧР в изоляции — химический, электрический, акустический и разборка. Электрический метод широко известен, позволяет достаточно точно определить интенсивность разрядного процесса и его характер [1, 2]. Акустическим методом можно определить не только место дефекта, но и оценить примерно его опасность. Важно, что этим методом обследование можно провести оперативно, так как для этого не требуется отключать оборудование. С целью расширения возможностей акустического метода в статье определяются параметры акустического сиг-

High-level partial discharges occurring in the insulation of electrical equipment pose a serious hazard. One of possible ways in which they can be revealed consists of using the acoustical method, which makes it possible not only to locate the flaw, but also to estimate its negative consequences. The aim of the presented study is to determine the parameters of an acoustic signal and identify flaws on the basis of these parameters from different kinds of partial discharges, thus widening the possibilities of the acoustic method.

Key words: power transformer, insulation, partial discharges, flaw detection methods

нала и изучаются возможности идентификации по ним различных видов ЧР.

На основании данных [3–6] можно выделить четыре основных вида дефектов продольной и главной изоляции трансформаторов, связанных с развитием ЧР: пробой масляного канала, скользящий разряд по поверхности твердой изоляции, ползущий разряд, разряд в масляном клине. Так как проведение измерений изоляции реальных силовых трансформаторов связано с рядом трудностей, то исследования проводились на четырех моделях. Конструкции испытательных ячеек с электродами, подробно описанные в [1, 2], представлены на рис. 1.

Модель 1 служит для изучения разрядов в масляном канале. Такого рода разряды в силовом трансформаторе могут возникать, например, между картонным барьером и катушкой или между соседними катушками. На модели 2 исследовались скользящие разряды. В трансформаторном обору-

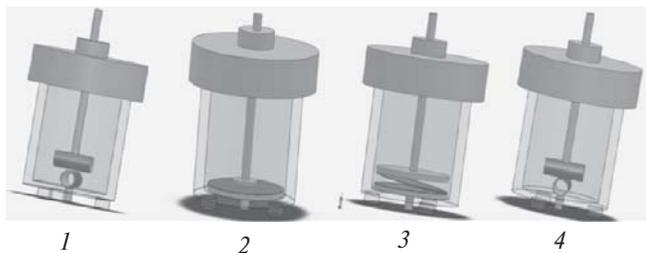


Рис. 1. Конструкции испытательных ячеек с электродами

довании наиболее вероятно их возникновение по поверхности электрокартона. Скользящие разряды также могут развиваться в высоковольтных вводах с изоляцией конденсаторного типа по поверхности бумажных слоев и на изоляции вокруг устройства РПН. В конструкции 3 исследовались ползущие разряды. В маслобарьерной изоляции при пробое масляного канала, например вследствие грозового перенапряжения на трансформаторе, может произойти обугливание картона барьера. В электрическом поле с такого участка начинают возникать новые ЧР. Развиваясь, они оставляют в толще электрокартона характерный науглероженный след. В модели 4 изучались разряды в масляном клине. Эти разряды возникают в тех местах оборудования, где изолированные токоведущие части в местах изгибов опираются на картонные изоляционные детали и напряженность поля имеет значительную касательную составляющую к поверхности диэлектрика. Пробой масла может возникнуть при небольшом напряжении и далее развиваться по поверхности изоляции в виде скользящего разряда.

Эти виды ЧР были изучены электрическим методом с использованием аппаратуры «СКИТ ЧР» производства ООО «Дизкон». Для каждой модели получены уникальные фазовые диаграммы и амплитудные спектры [1, 2]. В итоге была подтверждена гипотеза об уникальности амплитудно-фазового распределения ЧР для различных видов дефектов.

В настоящем исследовании использовались датчик с рабочей полосой частот от 60 до 159 кГц (типа РчР) и широкополосный датчик от 30 до 500 кГц (тип WDI, фирма PAC). Запись показания датчика ультразвука проводилась с помощью цифрового осциллографа с пороговым триггером в течение 40 мс, т.е. в течение двух периодов сетевой частоты (будем называть такую запись акустическим сигналом). Регистрировались лишь те импульсы давления, которые превышали установленный уровень.

Выделим две стадии: 1 – начальную стадию разрядных процессов, когда не происходят видимые изменения в образце; 2 – развитую стадию, которая приводит к необратимым изменениям изоля-

ционной конструкции. Начальная стадия по нашему акустическому критерию – это появление одиночного акустического импульса или их группы, по амплитуде незначительно превышающих шум. Стадия развитых разрядных процессов – период стационарных интенсивных акустических импульсов, относительно устойчивых во времени (15–30 мин). На этой стадии акустический сигнал, как следовало ожидать, состоял из четырех импульсов (рис. 2 и 3) (частота 100 Гц), соответствующих четырем полупериодам сетевой частоты. Напряжение, прикладываемое к модели, зависит от конфигурации электродов и типа твердого диэлектрика. При исследованиях на развитой стадии оно достигало значения 50 кВ.

Анализ всей совокупности результатов исследования акустических сигналов, возникающих в ходе различных видов разрядов в моделях, показал, что существуют две формы отдельных полупериодных ультразвуковых импульсов: 1 – импульсы с резким вступительным фронтом и выраженным затуханием (рис. 2, в, г; 3, в и г); 2 – веретенообразные импульсы (рис. 2, б, 3, а, 4).

Импульсы первого вида характерны для разрядов в масляном клине и скользящих разрядов по поверхности твердой изоляции (картона) на всех стадиях. Акустические импульсы веретенообразной формы сопровождают ползущие разряды на начальной стадии и разряды в масляном канале на всех стадиях.

Рассмотрим подробнее осциллограмму акустических сигналов, совместную с измерениями, проведенными электрическим методом (рис. 4). Отметим задержку акустического сигнала относительно электрического. Электрическое поле распространяется почти мгновенно, а акустический импульс возникает через время, которое требуется звуку, чтобы пройти расстояние от места возникновения до датчика. При детальном рассмотрении выяснились некоторые особенности генерации акустического сигнала. Разряд, имеющий меньшую амплитуду (заключен в кружок справа на рис. 4), вызывает большую амплитуду акустического сигнала. Этот факт можно объяснить тем, что разряд с меньшей электрической амплитудой, предположительно, возник в газовом пузыре от предыдущего ЧР, тем самым большая часть энергии выделилась в виде ударной волны. Разряд с большей электрической амплитудой, вероятно, мог возникнуть в масле. Часть его энергии обусловила деструкцию масла с образованием газового пузырька, который в дальнейшем лопнул, образовав звуковую волну.

Расчет амплитудных спектров с помощью быстрого преобразования Фурье показал, что разряды высокочастотные, максимум энергии отклика со-

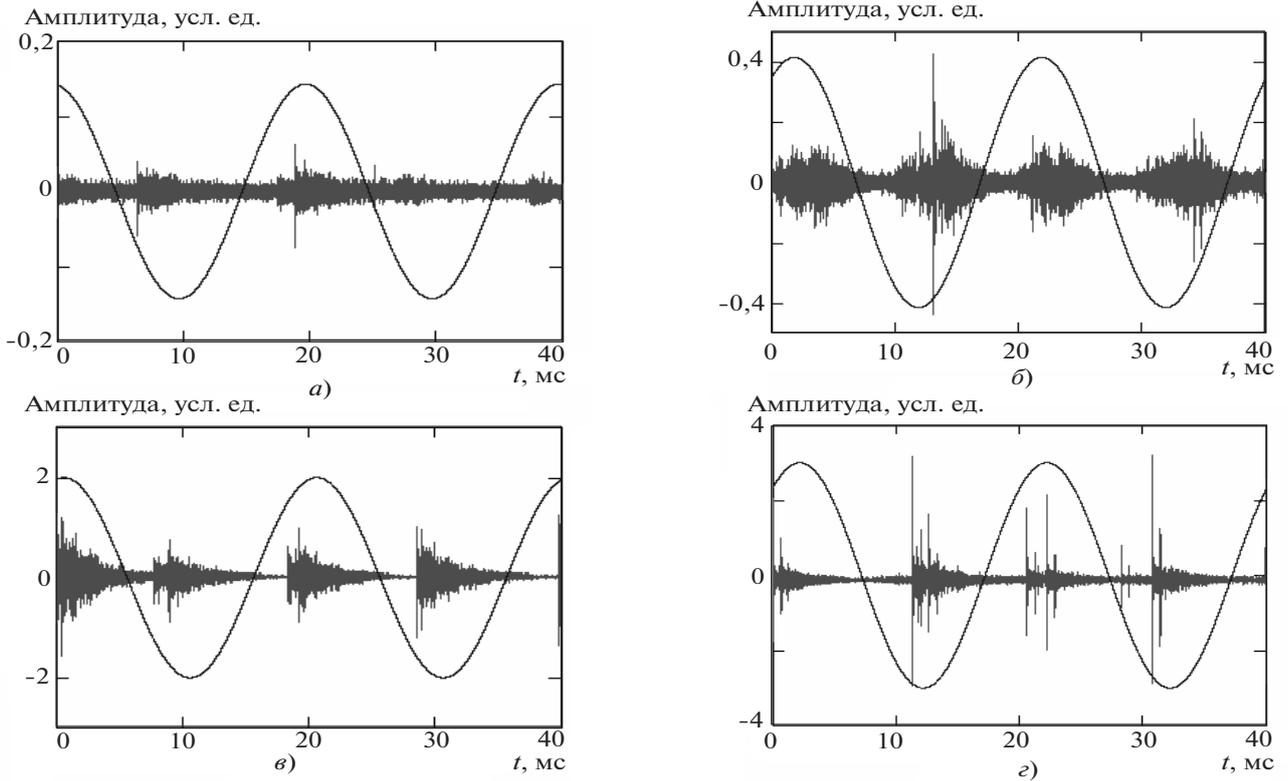


Рис. 2. Акустические сигналы от разрядов в масляном клине (а, в) и ползущих (б, г) разрядов: а, б – начальная стадия; в, г – развитая стадия

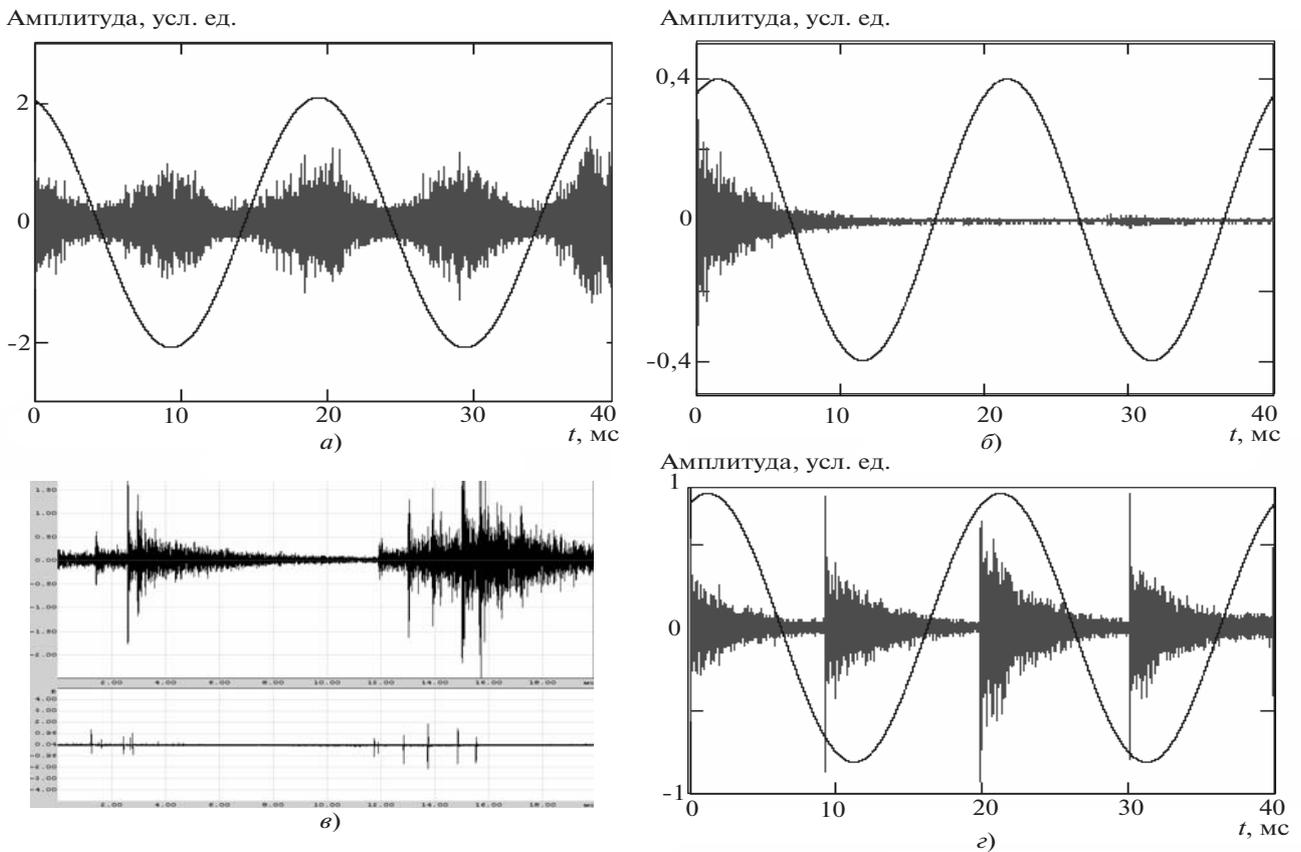


Рис. 3. Акустические и электрические сигналы от разрядов в масляном канале (а, в) и акустические сигналы на модели скользящего разряда (б, г): а и б – начальная стадия; в и г – развитая стадия

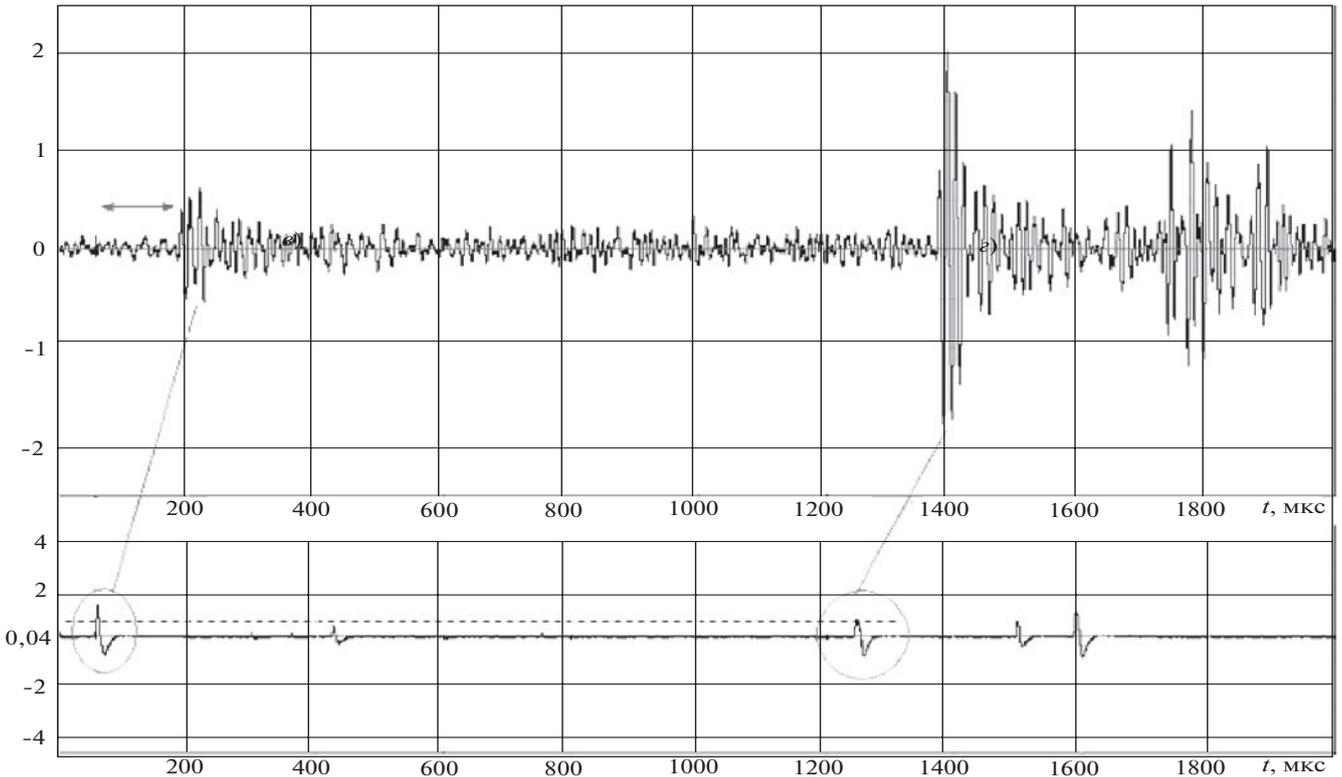


Рис. 4. Акустические и электрические сигналы от разрядов в масляном канале

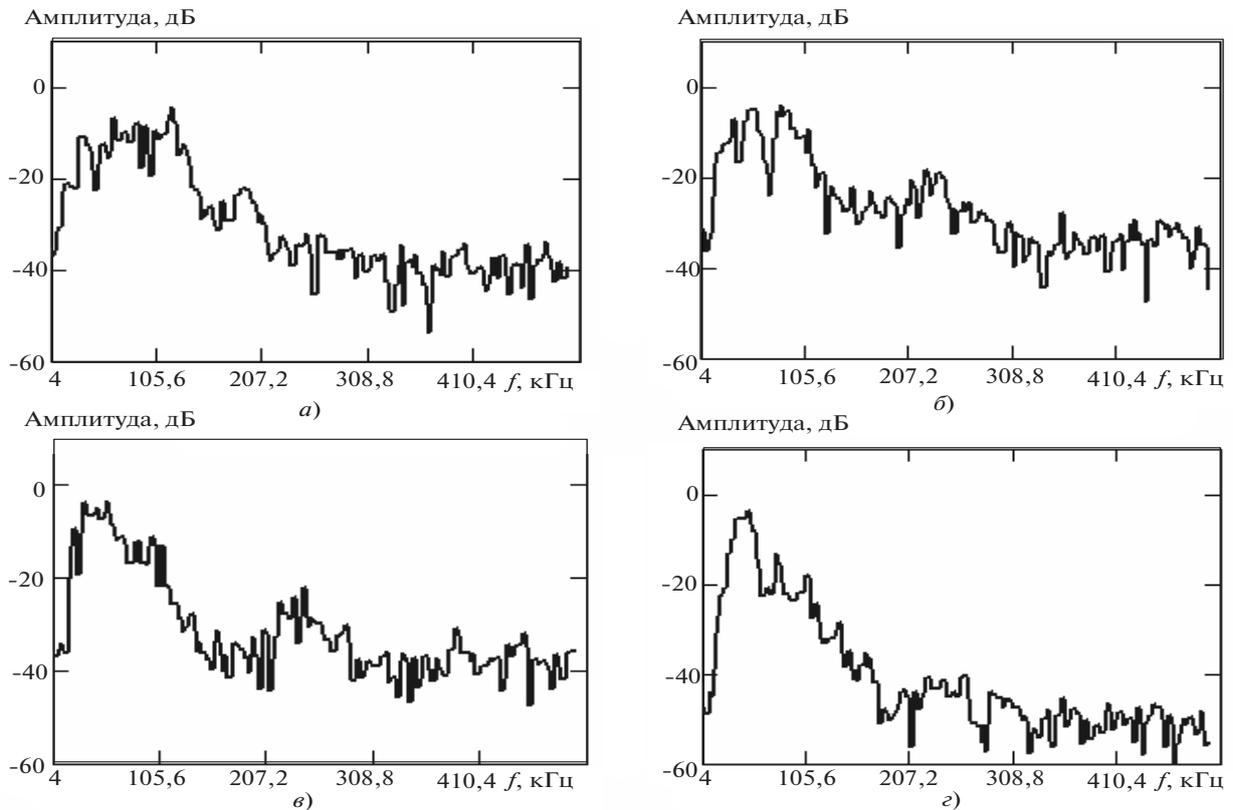


Рис. 5. Амплитудные спектры акустических сигналов, полученные с помощью быстрого преобразования Фурье: а – разряд в масляном канале; б – скользящий разряд; в – разряд в масляном клине; г – ползущий разряд

средоточен в полосе частот от 30 до 150 кГц, разряды отличаются по форме друг от друга. Следовательно, имеется возможность дифференцировать

обсуждаемые виды ЧР по спектральным свойствам ультразвуковых сигналов. Однако визуально достаточно сложно выявить особенности и оце-

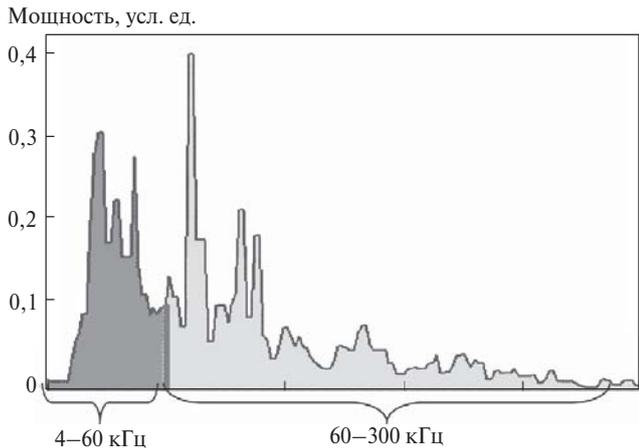


Рис. 6. Пояснение к разбиению спектра мощности акустического сигнала для вычисления площадей под кривой

нить спектр каждого из обсуждаемых видов ЧР (рис. 5).

Эмпирически были выбраны два диапазона: от 4 до 60 кГц и от 60 до 300 кГц. По составленной программе вначале рассчитывался спектр мощности в линейном масштабе, а не в логарифмическом (рис. 6), а затем определялись значения площади под кривой. Были получены данные по четырем акустическим сигналам для каждого вида разрядов.

Диаграмма (рис. 7) отражает всю энергию, которую несут частоты в каждом из двух диапазонов (1 – диапазон от 4 до 60 кГц; 2 – диапазон от 60 до 300 кГц). Видно, что для разрядов в масляном клине и скользящих разрядов большая часть мощности сосредоточена на низкочастотном участке спектра, что подтверждает наше предположение о близости физической природы данных разрядов, т.е. в обоих случаях разряды возникают по поверхности диэлектрика. Разряды в масляном канале характеризуются примерно равным распределением мощности в обоих диапазонах. В ползущем разряде большая доля энергии приходится на область высоких частот.

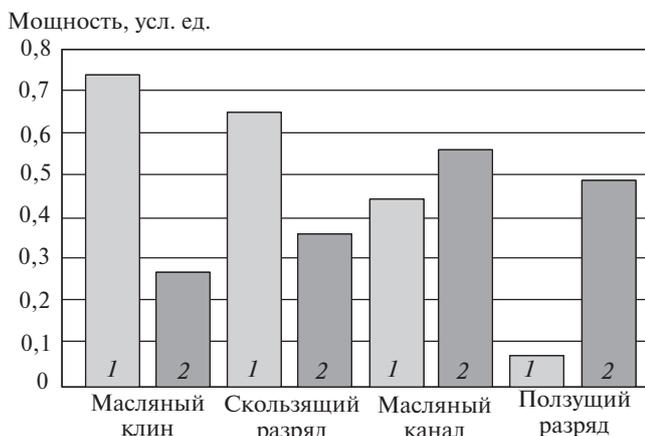


Рис. 7. Диаграмма распределения энергии по диапазонам частот в акустических сигналах от различных разрядов

На сегодняшний день практически решена задача автоматической идентификации лишь некоторых акустических сигналов в электрооборудовании, например: акустические сигналы от искрового разряда между металлическими элементами конструкции, ЧР без указания его вида, множественных разрядов, виброударного механического процесса [8]. Вся совокупность полученных данных на моделях ЧР свидетельствует о том, что дефекты, возникшие в изоляции силовых трансформаторов, также возможно дифференцировать по их акустическим сигналам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е.** О проблемах применения электрического метода регистрации характеристик частичных разрядов для диагностики высоковольтных силовых трансформаторов. Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы. – Материалы Международ. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Виктора Соколова/Под ред. А.Г. Овсянникова, В.Н. Осотова. – Екатеринбург: Изд. дом «Автограф», 2010.
2. **Ермаков Е.Г.** Оптимизация схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2010.
3. **Монастырский А.Е., Пильщиков В.Е.** Методические основы измерения характеристик частичных разрядов в мощных силовых трансформаторах. – Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования, 2000, вып. 11. – СПб: ПЭИПК.
4. **Маяков В.П., Соколов В.В.** Методы диагностики состояния трансформаторного оборудования. – Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования, 2000, вып. 11. – СПб: ПЭИПК.
5. **Голоднов М.Ю.** Контроль за состоянием трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. **Силовые трансформаторы.** Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
7. **Chulichkov A.I., Tsybulskaya N.D., Surkont O.S. et al.** Vorphological Analysis of Acoustic Signals of Discharge Processes. – CIGRE 6th Southern Africa Regional Conf., Cape Town, Somerset West, 17–21 August 2009, Paper P110.

Авторы: Роцупкин Михаил Дмитриевич окончил факультет вычислительных машин и систем Московского института радиотехники, электроники и автоматики. Главный инженер службы мониторинга электрооборудования ЗАО НПО «Техносервис–Электро».

Ермаков Евгений Григорьевич окончил факультет электромеханики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПГПУ). В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения» в СПбПУ. Специалист отдела сервиса трансформаторов ООО «АББ».

Хренов Сергей Иванович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1980 г. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию в МЭИ. Зав. кафедрой ТЭВН МЭИ.