

**На правах рукописи**

**ФЕДОСОВ Евгений Михайлович**

**ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ЭЛЕМЕНТАХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**Специальность:**

**05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа - 2009**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре электромеханики.

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Исмагилов Флюр Рашитович**  
проф., зав. кафедрой электромеханики  
ГОУ ВПО УГАТУ

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
**Гизатуллин Фарит Абдулганеевич**  
проф., зав. кафедрой электрооборудования  
летательных аппаратов и наземного  
транспорта ГОУ ВПО УГАТУ

кандидат технических наук  
**Байбурин Искандар Хамитович**  
главный конструктор  
свечного производства  
ФГУП «Уфимское агрегатное  
производственное объединение»

Ведущая организация: ФГУП «Уфимское научно-  
производственное предприятие «Молния»

Защита диссертации состоится 24 декабря 2009г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д–212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу:  
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «23» ноября 2009 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., проф.

Г. Н. Утляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** работы определяется необходимостью обеспечения безопасной эксплуатации элементов электротехнических комплексов, таких, как силовые трансформаторы.

Силовые трансформаторы являются основными элементами систем электроснабжения. Для обеспечения безопасного функционирования таких систем необходимо своевременно проводить диагностику состояния изоляции трансформаторов.

Традиционные методы диагностики состояния изоляции трансформаторов (измерение диэлектрических потерь и емкости изоляции обмоток, коэффициента абсорбции и др.) в ряде случаев неэффективны, т.к. направлены на выявление общего состояния изоляции, при этом локальные дефекты, в которых, как правило, происходят замыкания, не выявляются. Данные методы являются экономически не эффективными, так как основаны на системе планово-профилактического ремонта. Диагностика оборудования при этом производится через определенные нормативные интервалы времени, не зависящие от фактического состояния оборудования.

Одним из наиболее эффективных методов диагностирования электротехнического оборудования под рабочим напряжением является метод диагностики по частичным разрядам, позволяющий выявлять быстроразвивающиеся локальные дефекты.

В настоящее время метод диагностики изоляции по частичным разрядам (ЧР) при контроле состояния действующего электрооборудования используется редко, что связано с наличием разного рода помех, уровень которых на действующих объектах как правило значительно выше сигналов ЧР, а общепризнанной методики отделения сигналов ЧР от сигналов помех пока еще не существует. Исследованиями в области диагностики электротехнического оборудования и, в частности, исследованиями частичных разрядов занимались отечественные и зарубежные исследователи Кучинский Г. С., Сви П. М., Каганов З.Г., Вдовико В.П., Овсянников А.Г., Русов В.А. Голенко О.В., Живодерников С.В., Сухогузов А. П., Беляевский О.А., Курбатова А.Ф., Stone G.C., Claude Kane, Gulski E., Sedding H.G. и другие. На настоящий момент недостаточно результатов исследований зависимостей характеристик ЧР от времени эксплуатации электротехнического оборудования, которые позволяли бы прогнозировать пробой изоляции по характеристикам частичных разрядов и предотвращать отказ этого оборудования.

**Цель работы** – исследование частичных разрядов в изоляции элементов электротехнических комплексов, развитие методов и средств диагностики по частичным разрядам для обеспечения безопасной эксплуатации электротехнического оборудования.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **основные задачи**:

1. Анализ современных методов регистрации и селекции сигналов частичных разрядов в изоляции электротехнического оборудования.

2. Исследование характеристик частичных разрядов в твердой изоляции элементов современных электротехнических комплексов; выбор диагностического параметра частичных разрядов.

3. Обоснование возможности применения вейвлет-анализа для селекции сигналов частичных разрядов на основе компьютерного моделирования; разработка программного обеспечения для измерения и расчета характеристик частичных разрядов в элементах электротехнических комплексов.

4. Экспериментальное подтверждение выбранного метода селекции сигналов частичных разрядов, проведение экспериментальных исследований для анализа характеристик частичных разрядов в изоляции электротехнического оборудования в зависимости от стадии ее старения и обоснования диагностического параметра частичных разрядов.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. При решении задач исследования характеристик частичных разрядов использовался метод компьютерного моделирования на основе математического пакета *MatLab*. Обработка экспериментальных данных производилась с помощью программного обеспечения *Oscilloscope Software* и приложения *Microsoft Excel*.

**На защиту выносятся:**

1. Впервые разработанное программное обеспечение для измерения и расчета характеристик частичных разрядов в твердой изоляции электротехнического оборудования с использованием вейвлет-анализа для селекции сигналов ЧР, зарегистрированное в Реестре программ для ЭВМ.

2. Результаты компьютерного моделирования, подтверждающие обоснованность выбора метода селекции импульсов частичных разрядов в изоляции электротехнического оборудования на основе вейвлет-анализа.

3. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность применения метода селекции сигналов ЧР в элементах электротехнических комплексов по форме импульса на основе вейвлет-анализа.

4. Результаты экспериментальных исследований, отображающие закономерности изменения характеристик ЧР в зависимости от стадии старения твердой изоляции электротехнического оборудования и подтверждающие выбор диагностического параметра частичных разрядов.

#### **Научная новизна:**

1. Установлена закономерность изменения интенсивности частичных разрядов в зависимости от стадии старения изоляции электротехнического оборудования; показано, что в качестве меры интенсивности ЧР необходимо использовать мощность частичных разрядов.

2. На основе компьютерного моделирования и экспериментально обоснована возможность селекции сигналов ЧР по форме импульса на основе вейвлет-анализа с базисной функцией семейства Добеши.

3. Установлено, что диагностическим параметром частичных разрядов для оценки стадии старения изоляции является скорость увеличения интенсивности ЧР, причем для оценки типа дефектов и их расположения в изоляции измерения ЧР необходимо дополнять амплитудно-фазовыми и амплитудно-частотными характеристиками.

#### **Практическая ценность:**

1. Впервые разработано программное обеспечение, позволяющее измерять и рассчитывать комплекс характеристик ЧР в изоляции электротехнического оборудования в условиях помех, имеющее свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

2. Получена зависимость изменения интенсивности частичных разрядов от стадии старения изоляции электротехнического оборудования. Показано, что скорость роста интенсивности ЧР является диагностическим параметром, позволяющим определить стадию старения изоляции электротехнического оборудования и прогнозировать остаточный ресурс оборудования.

3. Исследовано изменение фазовых параметров и амплитуды частичных разрядов в изоляции электротехнического оборудования в зависимости от стадии ее старения. Показано, что анализ амплитудно-фазовых и амплитудно-частотных характеристик ЧР позволяет оценить тип дефектов изоляции, их локализацию и характер развития.

4. Разработаны экспериментальная установка, методика обработки данных и вспомогательные устройства для диагностики изоляции элементов электротехнических систем по частичным разрядам.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертационной работы внедрены в производственный процесс ООО «Нефтекамский завод нефтепромыслового оборудования» и в учебный процесс на кафедре электромеханики ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

**Апробация работы.** Основное содержание и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, 2008; II Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий», Уфа, 2009; VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2009; четвертой всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники», Уфа, 2009; Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, 2009.

**Публикации.** Список публикаций, содержащих основные положения, выводы и практические результаты по теме диссертации включает 11 научных трудов, в том числе 4 статьи, из которых одна опубликована в издании перечня ВАК, 6 материалов конференций, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка литературы из 112 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации – 136 страниц. В работе содержится 60 рисунков и 2 таблицы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования, показана практическая значимость работы, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации работы, описаны структура и объем работы, кратко раскрыто содержание разделов диссертации.

**В первой главе** рассмотрены физические основы развития частичных разрядов, их характеристики. Произведен анализ современных методов регистрации частичных разрядов в элементах электротехнических комплексов, рассмотрены основные схемы

регистрации ЧР в изоляции трансформаторного оборудования. Приведен анализ методов селекции сигналов частичных разрядов, на основании которого предложен и обоснован метод селекции ЧР на основе вейвлет-анализа.

Во **второй** главе разработана экспериментальная установка для измерения частичных разрядов в изоляции электрооборудования, выбраны элементы разработанной схемы регистрации.

Структурная схема экспериментальной установки для регистрации частичных разрядов приведена на рисунке 1.

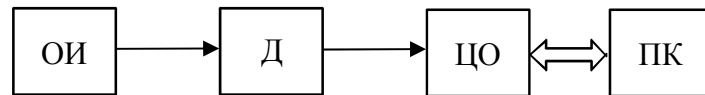


Рисунок 1 – Структурная схема измерения характеристик ЧР  
ОИ – объект испытаний, Д – датчик ЧР, ЦО – цифровой осциллограф

Исходя из поставленных задач исследования и основных требований, предъявляемых к схемам регистрации ЧР, разработана схема испытательной установки, представленная на рисунке 2.

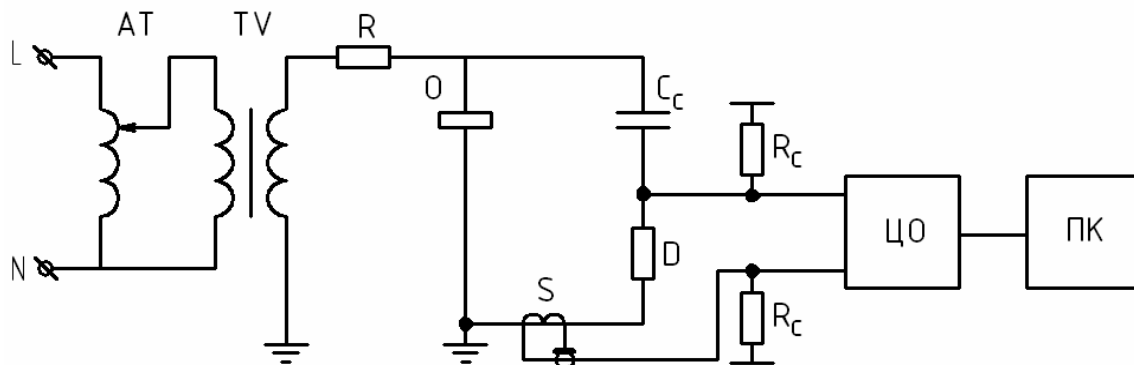


Рисунок 2 – Электрическая схема испытательной установки

Конденсатор связи  $C_c$  предназначен для создания контура с малым сопротивлением токам частичных разрядов. Делитель напряжения  $D$  предназначен для синхронизации сигналов ЧР с напряжением на объекте испытаний для регистрации фазовых параметров импульсов ЧР. В качестве датчика частичных разрядов  $S$  принят индукционный электрический датчик в виде высокочастотного трансформатора тока серии RFCT-1.

В качестве объекта испытаний ОИ использовались образцы литой изоляции на основе эпоксидной смолы, широко применяемой в современных элементах электротехнических комплексов в виде пластин. Испытательное напряжение – 10 кВ.

Схема замещения измерительной части установки с учетом паразитных емкостей представлена на рисунке 3.

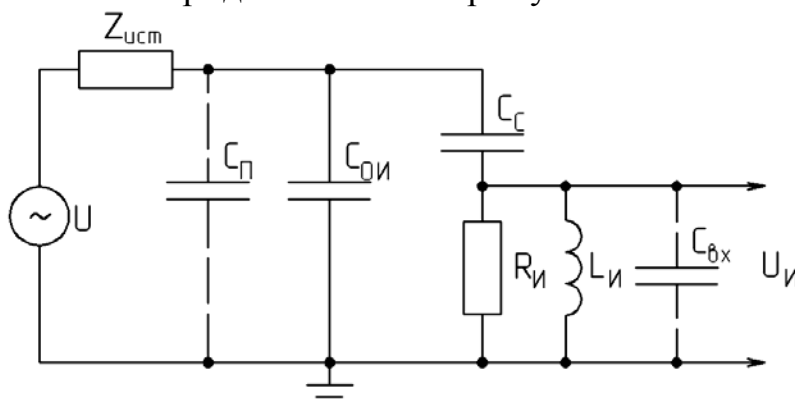


Рисунок 3 – Схема замещения испытательной установки

При возникновении ЧР в ОИ напряжение на  $C_{ОИ}$  изменится согласно выражению:

$$\Delta U_{ОИ} = \frac{q}{C_{ОИ}}; \quad (1)$$

где  $q$  – кажущийся заряд ЧР. При этом протекает ток разряда  $i(t) = dq/dt$ , в начальный момент времени  $i(t) = 0$ .

Измерительная часть схемы включает в себя сопротивления датчика ЧР  $R_{И}$ ,  $L_{И}$ , входную емкость измерительного устройства  $C_{ВХ}$  и представляет собой четырехполюсник, операторное сопротивление которого определяется по выражению:

$$z(p) = \frac{C'_{ВХ}(p^2 + p/\tau_{СХ} + \omega_0^2)}{p} \quad (2)$$

где  $p$  – комплексная частота,  $\tau_{СХ}$  – постоянная времени затухания схемы регистрации:

$$\tau_{СХ} = R_{И} \cdot C'_{ВХ} = R_{И} \cdot \left( C_{ВХ} + \frac{C_{С} \cdot (C_{П} + C_{ОИ})}{C_{С} + C_{П} + C_{ОИ}} \right); \quad \omega_0 = \sqrt{\left( \frac{1}{L_{И} \cdot C'_{ВХ}} \right)}.$$

Регистрируемый сигнал будет иметь вид затухающих колебаний:

$$U_{И}(t) = z(p)i(t) \cdot e^{-t/\tau_{СХ}} \left( \cos \omega_0 t - \frac{\delta}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \quad (3)$$

где  $\delta = \frac{R_{И}}{2L_{И}}$ .

Форма импульса сигнала ЧР на входе измерительного устройства с учетом параметров разработанной измерительной установки представлена на рисунке 4.



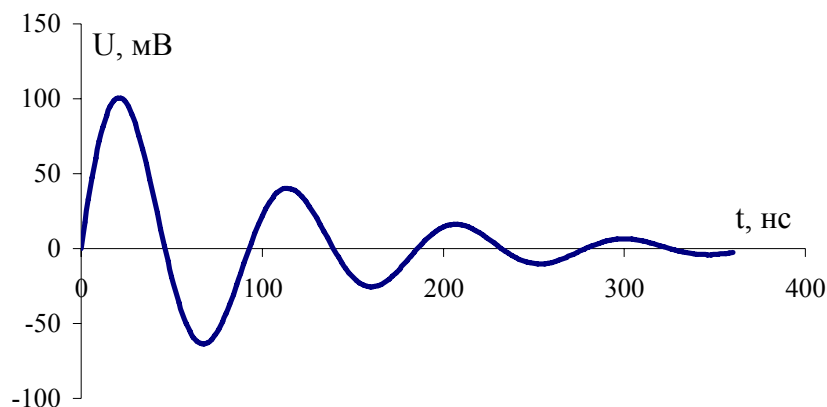


Рисунок 4 – Форма импульса смоделированного сигнала ЧР.

Для оценки состояния изоляции по характеристикам ЧР существует задача выбора диагностического параметра ЧР.

Традиционно при оценке состояния изоляции по характеристикам ЧР в качестве диагностического параметра используется максимальный кажущийся заряд  $q_{чр}$ .

Только этой характеристикой обычно пользуются производители трансформаторного оборудования на приемо-сдаточных испытаниях, что отражается в паспортных данных трансформаторов. Недостатком нормирования только характеристики  $q_{чр}$  является то, что она не учитывает количество импульсов ЧР в изоляции. Так, уровень  $q_{чр}$  в различном оборудовании одного типа может быть одинаковым, но при этом частота следования импульсов ЧР может существенно различаться. Очевидно, что срок службы изоляции оборудования с более высокой частотой следования импульсов ЧР будет меньше, чем срок службы оборудования с меньшей частотой. Поэтому, для оценки состояния изоляции в качестве диагностических характеристик ЧР, дополнительно к максимальному кажущемуся заряду, предлагается использовать в качестве характеристик интенсивности ЧР параметры, учитывающие все импульсы ЧР, такие, как ток и мощность ЧР, а также амплитудно-частотные и амплитудно-фазовые характеристики.

Средний ток частичных разрядов определяется по выражению:

$$I_{чр} = \frac{1}{t_{И}} \cdot \sum_{i=1}^k q_i \quad (4)$$

где  $t_{И}$  – время измерения ЧР, с,  $q_i$  – кажущийся заряд  $i$ -го импульса ЧР.

Мощность частичных разрядов определяется по формуле:

$$P_{чр} = \frac{1}{t_{И}} \cdot \sum_{i=1}^k q_i \cdot u_i \quad (5)$$

где  $u_i$  – мгновенное напряжение на объекте.

С целью выявления зависимости характеристик частичных разрядов от срока службы изоляции предложено моделирование длительной эксплуатации образцов эпоксидной изоляции методом

ускоренного термического старения с измерением ЧР на каждом этапе старения.

Метод ускоренного старения основан на правиле Монтзингера, согласно которому при увеличении допустимой номинальной температуры  $T_0$  на некоторую величину  $\Delta T$  при нормальных условиях срок службы изоляции сокращается вдвое:

$$L_T = A_0 \cdot 2^{\frac{T_0 - T}{\Delta T}} \quad (6)$$

где  $L_T$  – срок службы при температуре изоляции  $T$ ,  $A_0$  – номинальный срок службы изоляции при температуре  $T_0$ , соответствующей классу нагревостойкости изоляционного материала.

Таким образом, измерение характеристик частичных разрядов на различных этапах старения изоляции, позволит обосновать диагностический параметр ЧР, позволяющий прогнозировать остаточный ресурс оборудования.

**Третья глава** посвящена разработке программного обеспечения для измерения и анализа частичных разрядов в элементах электротехнических комплексов.

Основной задачей при измерении частичных разрядов является достоверное выделение из общего сигнала импульсов ЧР.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает выполнение таких функций, как загрузка массива данных измерений, селекцию сигналов частичных разрядов от сигналов помех на основе вейвлет-анализа; измерение кажущегося заряда; расчет характеристик частичных разрядов: мощности и среднего тока; представление данных о ЧР в виде амплитудно-фазовых диаграмм; построение амплитудно-частотных (АЧХ) и амплитудно-фазовых (АФХ) характеристик. Амплитудно-частотная характеристика представляет собой распределение количества импульсов ЧР  $N$  по их значениям кажущихся зарядов. Амплитудно-фазовая характеристика выражает зависимость максимальной величины кажущегося заряда от фазы напряжения.

Успешное решение задачи селекции сигналов частичных разрядов по форме импульса ЧР с использованием вейвлет-анализа связано с выбором базисной функции  $\psi(t)$ , наиболее полно описывающей форму импульса ЧР.

Исходя из полученных данных формы импульса ЧР (рисунок 4), для успешного анализа сигнала ЧР к базисной функции вейвлет-преобразования (ВП) установлены такие требования, как компактность, ограниченная продолжительность и асимметрия.

Необходимым условием для осуществления восстановления сигнала с помощью ВП является ортонормальность базиса.

На основании анализа различных вейвлетов, сделан вывод, что для селекции сигналов ЧР оптимальными являются вейвлеты Добеши.

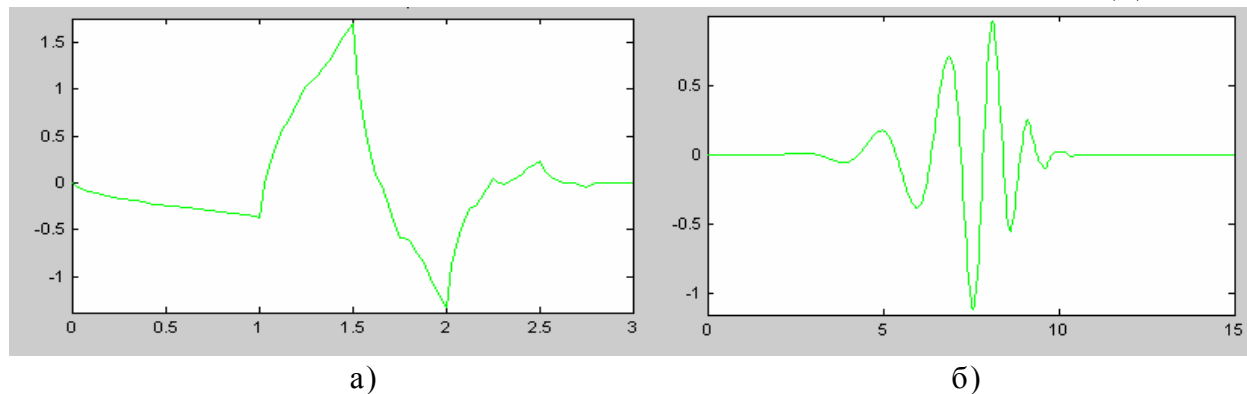


Рисунок 5 – Форма вейвлетов Добеши

а) – вейвлет второй степени (db2), б) – восьмой степени (db8)

Предлагаемый метод селекции сигнала ЧР от помех заключается в следующем. Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) исходного сигнала  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  определяется известным выражением:

$$CWT_{\psi}^{f(s,\tau)} = W_{\psi}^{f(s,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int f(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt, \quad s, \tau \in \mathbb{R}, s \neq 0 \quad (7)$$

где  $s$  – оператор масштаба («сжатия» базисной функции),  $\tau$  – оператор сдвига по времени, под символом «\*» понимается комплексное сопряжение.

Величина  $W_{\psi}^{f(s,\tau)}$  представляет собой степень подобия между исследуемым участком сигнала  $f(t)$  и масштабированными и сдвинутыми вейвлетами. Масштабирование, как математическая операция, расширяет или сжимает сигнал. Вейвлет-функция каждого масштаба  $s$  умножается с сигналом и интегрируется на всем временном интервале. Если вейвлет совпадает с сигналом ЧР, т.е. в сигнале присутствуют спектральные компоненты, соответствующие текущему значению масштаба, то произведение вейвлета с сигналом на интервале, где данная компонента присутствует, даст относительно большое значение. В противном случае произведение будет иметь малое значение или равно 0. На основе ненулевых значений  $W_{\psi}^{f(s,\tau)}$ , то есть значений базисных параметров  $s$  и  $\tau$ , производится реконструкция исходного сигнала ЧР обратным вейвлет-преобразованием сигнала  $f(t)$  согласно выражению:

$$f(t) = \frac{1}{c_{\psi}^2} \int_s \int_{\tau} W_{\psi}^{f(s,\tau)} \frac{1}{s^2} \psi \left( \frac{t-\tau}{s} \right) d\tau ds, \quad (8)$$

где  $c_{\psi}$  – константа допустимости.

Для подтверждения эффективности разработанного программного обеспечения с селекцией сигналов ЧР методом вейлет-преобразований проведено моделирование очистки сигнала в среде «*Matlab*». Для этого в программу загружались смоделированные сигналы ЧР (рисунок 4) различной амплитуды, вводились сигналы помех произвольной величины, затем производилась очистка сигнала.

Результаты работы программы представлены на рис. 6.

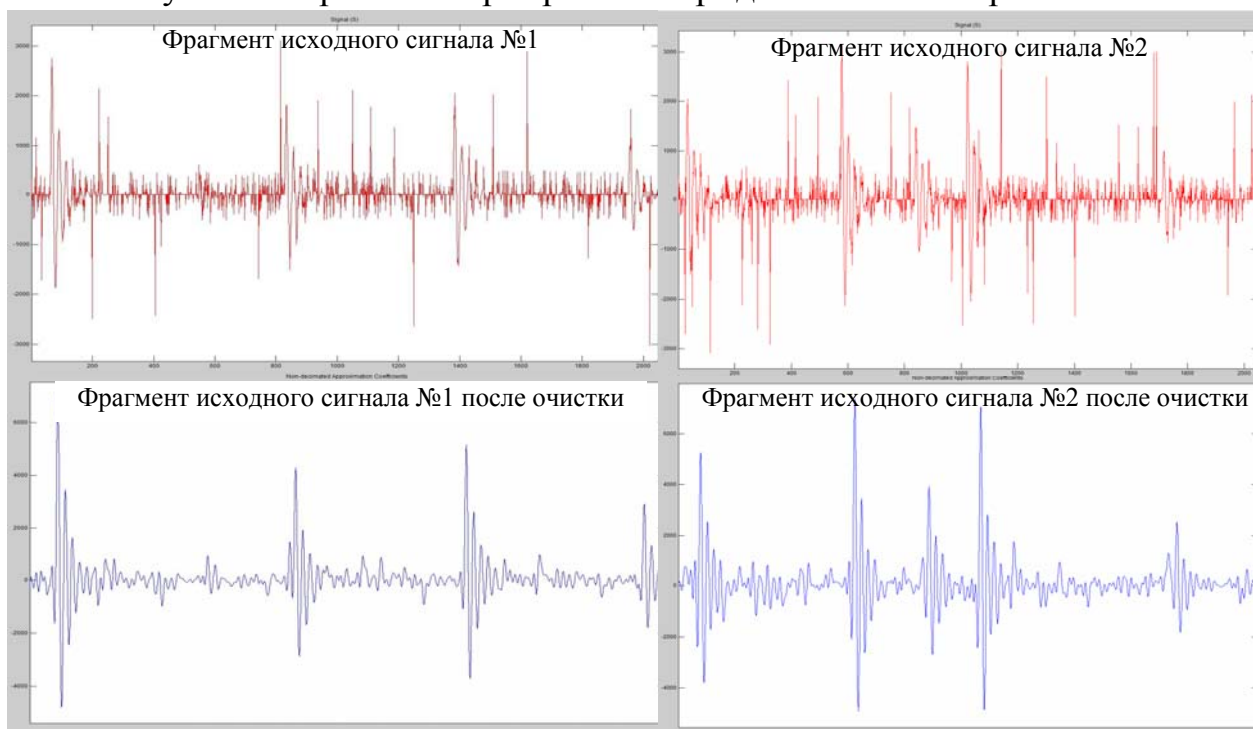


Рисунок 6 – Результаты компьютерного моделирования селекции сигналов частичных разрядов методом вейлет-анализа

Результаты работы разработанной программы, представленные на рисунке 6, показывают эффективность применяемой селекции сигналов ЧР с помощью вейлет-преобразований. Количество смоделированных импульсов ЧР как в исходном сигнале, так и в сигнале после вейлет-преобразований, совпадают. Мощность частичных разрядов  $P_{\text{ЧР}}$  в исходном сигнале составляла 25 мВт, а в очищенном – 28 мВт, то есть относительная погрешность селекции сигналов ЧР на основе вейлет-анализа составила 12%.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований частичных разрядов в образцах изоляции электротехнического оборудования.

Для получения зависимости характеристик частичных разрядов от срока службы изоляции проводилось моделирование старения пяти

образцов эпоксидной изоляции, согласно методике ускоренного термического старения. После каждого цикла старения, соответствующего ресурсу в 2000 часов, проводилась регистрация ЧР.

Типичная форма регистрируемых импульсов ЧР представлена на рисунке 7.



Рисунок 7. Осциллограмма единичного импульса ЧР

Как видно из рисунка, форма реального импульса ЧР соответствует форме смоделированного импульса. Среднеквадратичная погрешность между импульсами ЧР, полученными теоретически и экспериментально, составила 15,8%. Таким образом, результаты компьютерного моделирования селекции теоретических импульсов ЧР можно считать справедливыми и для экспериментальных импульсов. Суммарная погрешность селекции экспериментальных импульсов частичных разрядов не превышает 26%.

На рисунках 8 и 9 представлены амплитудно-фазовые характеристики (АФХ) измеренного сигнала до и после очистки от помех разработанным программным обеспечением.

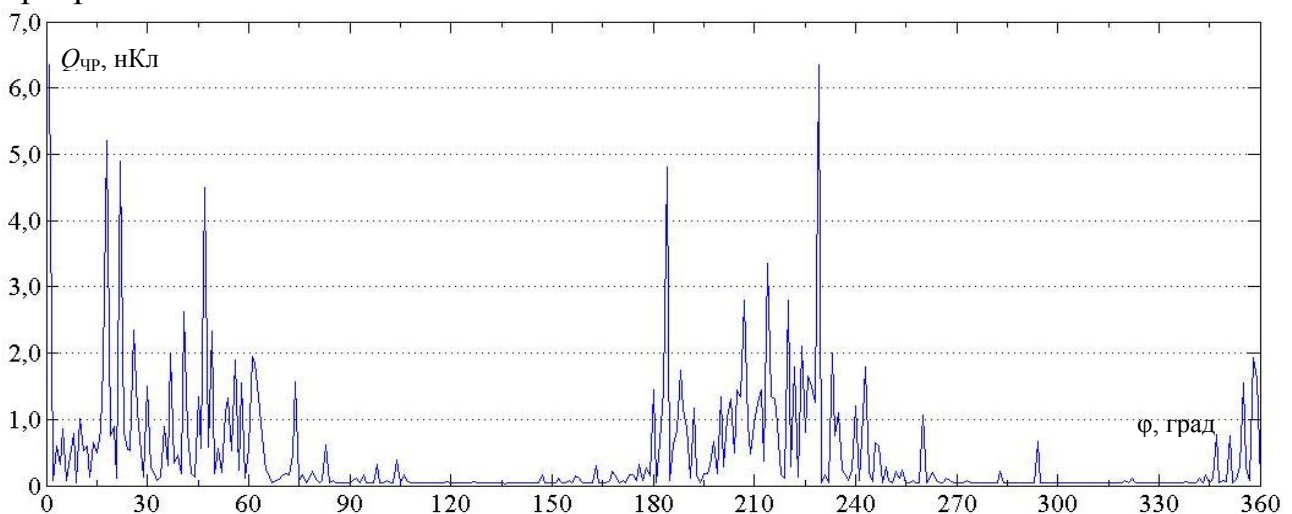


Рисунок 8 – Амплитудно-фазовая характеристика исходного сигнала

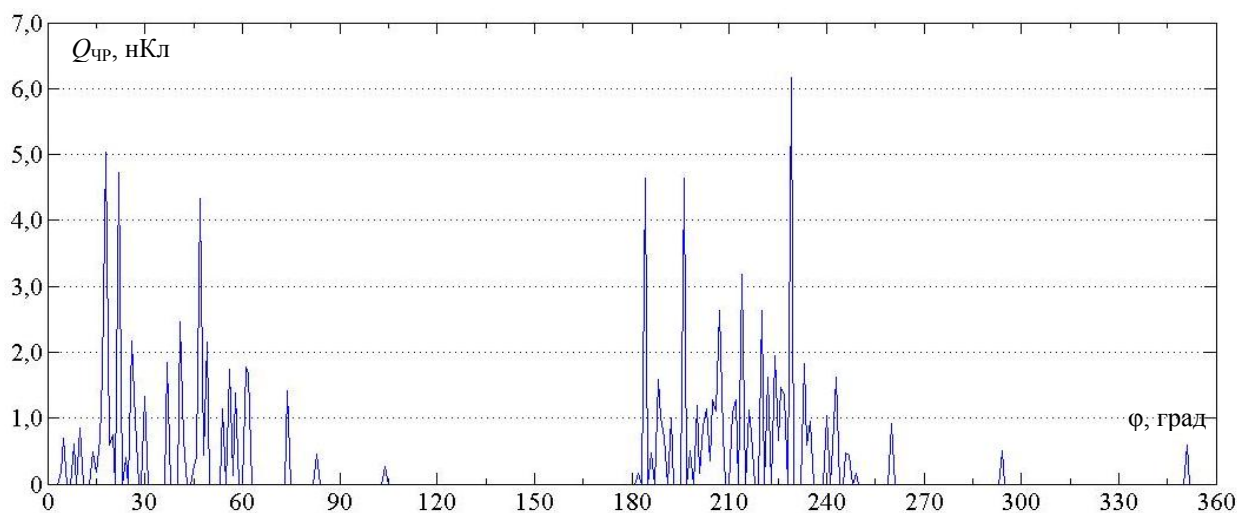


Рисунок 9 – Амплитудно-фазовая характеристика сигнала после очистки от помех разработанным программным обеспечением

Как видно из полученных диаграмм, селекция помех на основе вейвлет-анализа производится успешно. Подтверждением этому является то, удаляются сигналы в фазовых областях спада напряжения, а частичные разряды, как известно, возникают в зонах повышения напряжения.

Для обобщения полученных статистических данных и выявления общих закономерностей изменения интенсивности частичных разрядов во времени, получена усредненная характеристика мощности ЧР, где каждому моменту времени соответствует среднее арифметическое значение мощности всех пяти образцов испытываемой изоляции. Данная характеристика представлена на рисунке 10.

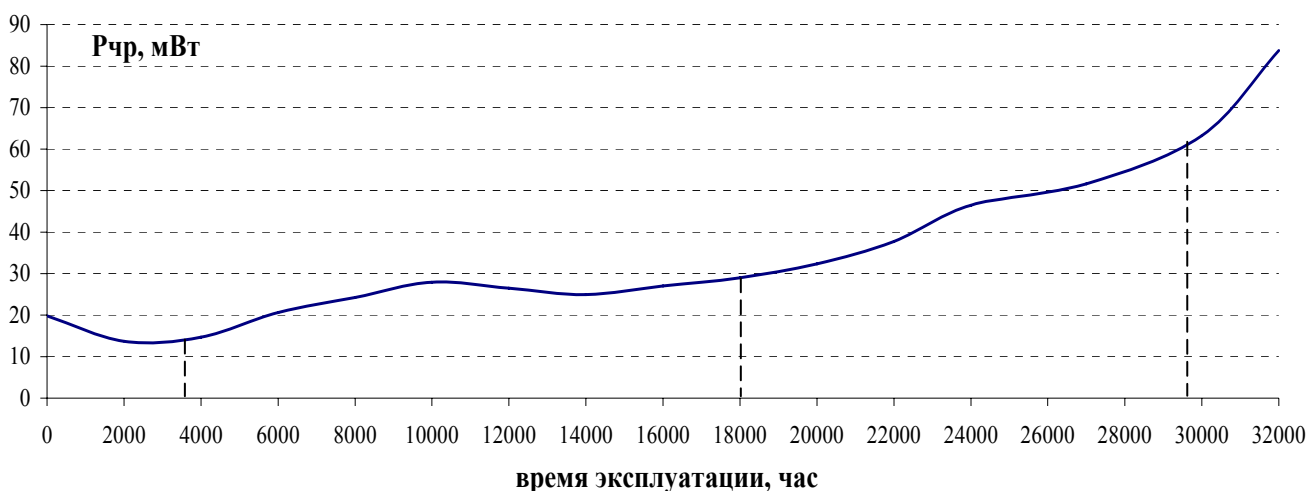


Рисунок 10 – Усредненная характеристика интенсивности ЧР

Таким образом, мощность частичных разрядов является диагностическим параметром, позволяющим выделить следующие этапы старения изоляции:

- первый этап эксплуатации твердой изоляции, на котором может наблюдаться улучшение ее характеристик, составляет 2000-4000 часов;

- основной период эксплуатации изоляции, на котором характеристики изоляции практически не ухудшаются, составляет примерно 14000-18000 часов, то есть граница данного интервала соответствует сроку службы в 18000-20000 часов;

- период старения изоляции, характеризующийся устойчивым ростом интенсивности ЧР. Длительность данного периода находится в пределах 12000-16000 часов, скорость возрастания интенсивности ЧР составляет 2–5 мВт/1000 часов;

- предпробойная стадия старения изоляции. При этом наблюдается резкое увеличение интенсивности ЧР после момента эксплуатации, соответствующего 28000-30000 часов. Роста интенсивности ЧР на данном этапе достигает 10-15 мВт/1000 часов.

На рисунке 11 представлена зависимость от срока службы традиционного параметра частичных разрядов – максимального кажущегося заряда.

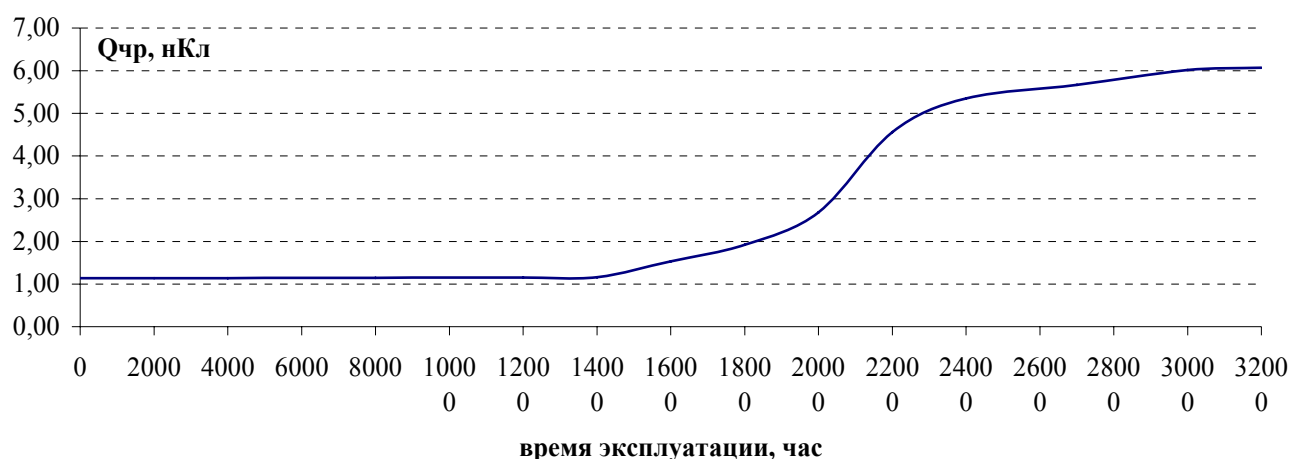


Рисунок 11 – Усредненная характеристика изменения максимального кажущегося заряда частичных разрядов во времени

Как видно из представленного графика, изменение величины кажущегося заряда ЧР в целом имеет такую же тенденцию, как и изменение мощности ЧР, но не позволяет прогнозировать предпробойную стадию изоляции. Анализ зависимостей  $Q_{чр}$  для отдельных образцов показал, что по данной характеристике ЧР не всегда можно сделать правильный вывод о текущей стадии старения изоляции. Так, например, для одного из образцов величина  $Q_{чр}$  на интервалах 18000-20000 часов и 22000-26000 часов не изменялась. Тем самым подтверждается опыт других исследователей, указывающих на недостаточность традиционного метода оценки состояния изоляции по величине максимального кажущегося заряда.



При диагностике по частичным разрядам трехфазных объектов может использоваться другой диагностический параметр частичных разрядов – средняя мощность  $P_{CP}$ , отличающийся тем, что для расчета его величины вместо мгновенного значения напряжения в выражении (5) принимается его действующее значение, то есть напряжение, одинаковое для импульсов ЧР всех трех фаз. На рисунке 12 приведено сравнение двух параметров интенсивности частичных разрядов –  $P_{ЧР}$  и  $P_{CP}$ .

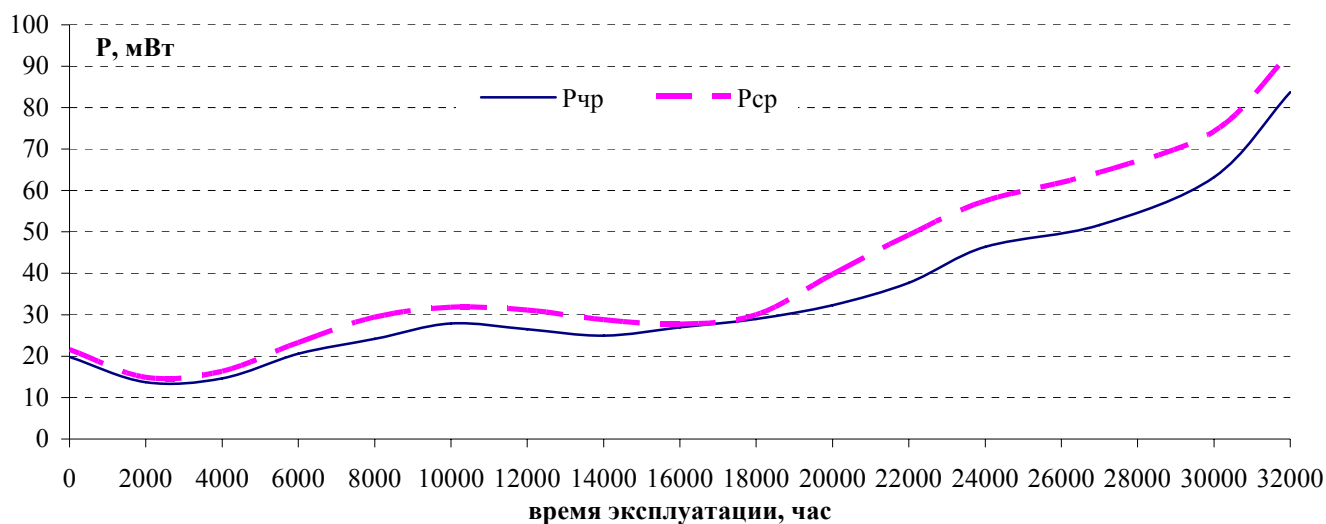


Рисунок 12 – Сравнение различных характеристик мощности ЧР

Анализ данных зависимостей показывает, что характер изменения параметров  $P_{ЧР}$  и  $P_{CP}$  идентичен, различие в абсолютных значениях находится в пределах от 7 до 25% и в среднем составляет 15,7%. Следовательно, в качестве диагностического параметра частичных разрядов можно использовать обе характеристики мощности ЧР.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что мощность частичных разрядов является эффективным диагностическим параметром, позволяющим оценивать стадии старения изоляции элементов электротехнических комплексов.

В приложениях приведены: исходный текст разработанного программного обеспечения, экспериментальные зависимости среднего тока частичных разрядов и максимального кажущегося заряда от срока эксплуатации изоляции различных образцов изоляции.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании анализа современных методов регистрации частичных разрядов показано, что предпочтительным методом диагностики изоляции трансформаторов является индукционный метод регистрации частичных разрядов.



2. Проведен анализ современных методов селекции сигналов частичных разрядов в изоляции электротехнического оборудования, на основании которого предложен и обоснован метод селекции сигналов частичных разрядов по форме импульса на основе вейлет-анализа.

3. Разработано программное обеспечение, обеспечивающее селекцию сигналов частичных разрядов на основе вейлет-анализа, измерение и расчет комплекса характеристик частичных разрядов в твердой изоляции. Проведено компьютерное моделирование, подтверждающее эффективность разработанного программного обеспечения. Погрешность селекции смоделированных импульсов частичных разрядов не превышает 12%.

4. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность выбранного метода селекции сигналов частичных разрядов по форме импульса на основе вейлет анализа. Среднеквадратичная погрешность между импульсами частичных разрядов, полученными теоретически и экспериментально, составила 15,8%.

5. Установлены закономерности изменения характеристик ЧР в зависимости от стадии старения эксплуатации. Показано, метод диагностики изоляции электротехнического оборудования по частичным разрядам с использованием комплекса характеристик частичных разрядов позволяет оценить тип дефектов твердой изоляции, отслеживать их развитие и прогнозировать остаточный ресурс изоляции электрооборудования.

6. Предложен подход к оценке стадии старения изоляции электротехнического оборудования по скорости роста интенсивности частичных разрядов. Показано, что мощность частичных разрядов как мера интенсивности является диагностическим признаком, позволяющим оценивать стадию старения изоляции элементов электротехнических комплексов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемом журнале из списка ВАК:**

1. Методы селекции сигналов частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов / Д.В. Максудов, Е.М. Федосов // Вестник УГАТУ. 2009. Т.12 №2(31). С. 138-143.

### **В других изданиях:**

2. Методы диагностики состояния изоляции по характеристикам частичных разрядов / Е.М. Федосов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научный сб. – Уфа: УГАТУ, 2008.– С.203-207.

3. Селекция сигналов частичных разрядов методом вейвлет-преобразований / Е.М. Федосов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Том 2. – Уфа: УГАТУ, 2008. – С. 17.

4. Применение вейвлет-преобразований для анализа сигналов частичных разрядов / Е.М. Федосов, Д.В. Максудов // Молодежь и современные информационные технологии: VII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Сб. трудов. Часть 1. – Томск: Изд-во СПб Графикас, 2009. – С. 211-212.

5. Оценка состояния литой эпоксидной изоляции силовых трансформаторов по характеристикам частичных разрядов / Федосов Е.М., Пашали Д.Ю., Гарифуллин И.И. // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: II Всероссийская научно-техническая конференция: Сб. научных трудов. Том 2. – Уфа: УГНТУ, 2009. – С. 65-67.

6. Методы диагностики изоляции сухих трансформаторов с обработкой данных на компьютере / Гарифуллин И.И., Федосов Е.М. // Там же. – С. 81-83.

7. Современные методы диагностики состояния изоляции электротехнического оборудования / Федосов Е.М. // Актуальные проблемы науки и техники: Сб. трудов четвертой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд-во «Диалог», 2009. – С. 372-376.

8. Моделирование импульсов частичных разрядов / Ф.Р. Исмагилов, Е.М. Федосов // Электроника, автоматика и измерительные системы: Межвуз. научный сб. – Уфа: УГАТУ, 2009– С.40-43.

9. Исследование формы импульса частичных разрядов в твердом диэлектрике / Е.М. Федосов. // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научный сб. – Уфа: УГАТУ, 2009.– С.179-182.

10. Анализ разрядных процессов в твердом диэлектрике / Е.М. Федосов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Том 2. – Уфа: УГАТУ, 2009. – С. 31-33.

11. Программа для измерения и расчета характеристик частичных разрядов в твердом диэлектрике. / Ф. Р. Исмагилов, Е.М. Федосов, И.И. Гарифуллин. //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009615859 от 21.10.2009.

ФЕДОСОВ Евгений Михайлович

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ  
В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.11.2009. Формат 60 84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. – отт. 1,0. Уч. – изд. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ №579.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа - центр, ул. К.Маркса, 12.