

На правах рукописи

БАЛАГУЛА Юрий Моисеевич

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА
В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Специальность: 05.09.05 – Теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович

Официальные
оппоненты: **Соловьева Елена Борисовна**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.
В.И.Ульянова (Ленина)»,
профессор, заведующий кафедрой
«Теоретические основы электротехники»;

Андреев Александр Михайлович
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ОАО «Силовые машины», главный специалист;

Ведущая
организация: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-
Бруевича».

Защита состоится « 27 » декабря 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Главное здание, ауд.284.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 18 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.16
кандидат технических наук,
доцент

Журавлева Наталья Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Фрактальный анализ, как метод исследования математических множеств различной природы, базируется на идеях Б. Мандельброта, опубликование которым основополагающей работы в 1973 г. дало старт широкому внедрению методов фрактального анализа в физику, химию, биологию, экономику. Главное достижение теории фракталов - новые эффективные способы математического описания сложных явлений, поэтому актуальным является анализ и оценка этих новых возможностей и методов для теоретической электротехники.

В последнее время теоретическая электротехника встала перед необходимостью описания нового класса процессов в электрических цепях, которые не характеризуются постоянством значений токов и напряжений, то есть не являются установившимися режимами, и в то же время не могут быть отнесены к переходным. Эти процессы характеризуются тем, что токи и напряжения в нормальных эксплуатационных режимах изменяются случайным образом в определённых пределах, представляя собой стохастические временные ряды. В изучение подобных процессов в рамках теоретической электротехники и электромагнитной совместимости большой вклад внесли отечественные учёные Н.В. Коровкин, П.А. Бутырин, Д.И. Иудин, Е.А. Мареев, В.Ю. Трахтенгерц, О.А. Молчанов; зарубежные учёные Л. Чуа и М. Хаякава.

Развитие методов сбора и обработки сигналов позволяет использовать для анализа процессов в электрических цепях не только традиционные интегральные характеристики – действующие и средние значения – но получать и анализировать развёрнутые во времени данные об эволюции исследуемой электромагнитной системы в виде дискретных сигналов доступных для измерения электрических величин, то есть траекторий. Для многих теоретических и практических задач представляется полезным анализ геометрических свойств этих траекторий. Фрактальный анализ предоставляет набор инструментов для количественной характеристики специфических геометрических свойств траекторий. Учитывая, что современные средства измерения дают для анализа дис-

кретные временные ряды с некоторой шумовой составляющей, важно выделить два основных пути применения теории фракталов. В первом имеющиеся записи сигналов рассматриваются как приближения *гладких* траекторий, которые анализируются во времени или в фазовом пространстве. Так, ниже анализируется запись *мгновенных* значений напряжения на шинах дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и методы фрактального анализа применяются для вычисления размерностей траекторий. Во втором - сигнал рассматривается как стохастический *временной ряд*, принципиально негладкий, с исключённой регулярной составляющей. Такова, например, динамика *действующих* значений напряжения дуги. Здесь используется теория фрактальных временных рядов.

Методы фрактального анализа временных рядов позволяют описывать свойства временных рядов, которые не выявляются другими методами анализа, такие как персистентность и «изломанность», и дают возможность судить о специфических свойствах физических процессов, порождающих исследуемые временные ряды, например, определить размерность управляющей системы дифференциальных уравнений в случае хаотического процесса.

В целом методы фрактального анализа показали свою эффективность во многих областях, тесно соприкасающихся с электротехникой, сделали возможной реализацию новых алгоритмов обработки данных, новых моделей физических процессов, новых приборов и устройств. В то же время эти методы в контексте актуальных практических задач остаются вне поля зрения современной теоретической электротехники.

Целью работы является выявление областей для эффективного применения фрактального анализа для решения актуальных задач теоретической электротехники, в частности, задач обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и синтеза адаптивных систем управления.

Основные задачи исследования

1. Анализ существующих методов фрактального анализа, исследование особенностей различных методик вычисления фрактальных размерностей применительно к временным рядам и траекториям.

2. Применение методов фрактального анализа для распознавания условий горения дуги в дуговой сталеплавильной печи переменного тока с целью совершенствования системы управления печи, направленного на энергосбережение и улучшение её экономических характеристик.
3. Совершенствование методики определения фликера в системах электроснабжения с помощью фрактального анализа временных рядов напряжения.
4. Разработка метода регистрации двигательной активности рыб, используемого для решения ряда экспериментальных задач электромагнитной совместимости (электромагнитной экологии), на основе фрактального анализа временных рядов, получаемых в результате математической обработки видеозаписей.
5. Анализ подходов, использующих фрактальный анализ для изучения частичных разрядов в высоковольтной изоляции.

Методы исследования

В работе использовались методы фрактального анализа, теории электрических цепей и цифровой обработки сигналов.

Новые научные результаты

1. Показано, что временные ряды напряжения в системах электроснабжения имеют фрактальный характер, и, следовательно, эффективно характеризуются фрактальной размерностью.
2. Установлен факт закономерного изменения фрактальных размерностей временных рядов напряжения дуги и динамических вольтамперных характеристик дуги в процессе плавки и показана возможность их эффективного использования в качестве индикатора состояния дуги в системе управления дуговой печи.
3. Подтверждена корреляция между фрактальной размерностью временного ряда огибающей синусоидального напряжения и дозой фликера, определяемой для данного напряжения с помощью стандартного фликерметра.
4. Экспериментально установлено наличие корреляции между дозой фликера и фрактальной размерностью временного ряда напряжения на шинах дуговой сталеплавильной печи.

5. Получены значения фрактальной размерности временных рядов двигательной активности рыб в отсутствие электромагнитного воздействия.

Практическое значение работы

1. Введение математического аппарата фрактального анализа в оборот теоретической электротехники как инструмента эффективного решения задач моделирования и идентификации траекторий электромагнитных процессов в ЭМС.

2. Предложенная методика фрактального анализа динамических вольтамперных характеристик дуги, будучи внедрённой в систему управления дуговой печи, способна улучшить её энергетические и экономические характеристики.

3. Фрактальный подход к измерению уровня фликера в системе электроснабжения позволяет существенно упростить и сделать более адекватной процедуру оценки качества электрической энергии.

4. Разработанный метод регистрации двигательной активности рыб на основе фрактального анализа нашёл своё применение в исследованиях влияния электромагнитного излучения на живые организмы.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на 5-м и 6-м Международных симпозиумах по ЭМС и электромагнитной экологии (СПбГЭТУ), 3-й и 4-й Международных конференциях по качеству электроэнергии (Технический Университет г. Таллинн, Эстония), Международной конференции IEEE Power-Tech-2005, а также на семинарах кафедры ТОЭ СПбГПУ и профильных кафедр Технического Университета г. Грац (Австрия) и Университета им. Отто фон Герике г. Магдебург (ФРГ).

По теме диссертации опубликовано 15 работ в журналах и трудах конференций, из них 2 – в изданиях из списка ВАК, 7 – на английском языке.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения и списка литературных источников, насчитывающего 66 наименований. Работа изложена на 141 странице машинописного текста и содержит 64 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, рассматриваются особенности фрактального анализа в ряду других методов описания траекторий электромагнитных процессов, очерчивается круг задач электротехники, в которых его применение представляется перспективным.

Первая глава содержит важнейшие определения и характерные свойства фракталов, их классификацию, алгоритмы построения. Дается определение количественной характеристики фрактала – фрактальной размерности и рассматриваются методы её вычисления. Отдельно рассматривается фрактальный подход к временным рядам и соответствующие специальные методы их моделирования и вычисления фрактальных размерностей и связанных с ними величин.

Многие временные ряды, встречающиеся в электротехнике и электроэнергетике, особенно природного происхождения, являются фрактальными, например, годовые стоки рек, сила ветра, напряжение электрической дуги в дуговой печи, цены на электроэнергию и энергоресурсы. Выбор адекватного способа анализа и моделирования подобных временных рядов принципиально важен для обеспечения их наилучшего прогнозирования и идентификации в электротехнических приложениях. Базовой моделью для теории фрактальных временных рядов является случайный процесс с памятью под названием «фрактальное броуновское движение Мандельброта-Ван Несса». В этой модели дисперсия приращений временного ряда $B(t)$ зависит от приращений времени по степенному закону: $\text{Var}[B(t_2)-B(t_1)] \sim (t_2-t_1)^{2H}$, где $H \in [0..1]$ – так называемый коэффициент фрактального броуновского движения (ФБД), характеризующий эффект памяти. При $H=0,5$ данный процесс является обычным одномерным броуновским движением, то есть процессом, приращения которого представляют собой белый шум, и который не имеет памяти. При других значениях H реализации процесса фрактального броуновского движения выглядят как кривые разной степени гладкости, причём чем больше H , тем в большей степени проявляется эффект памяти, и тем более гладким выглядит соответствующий ряд (рис.1).

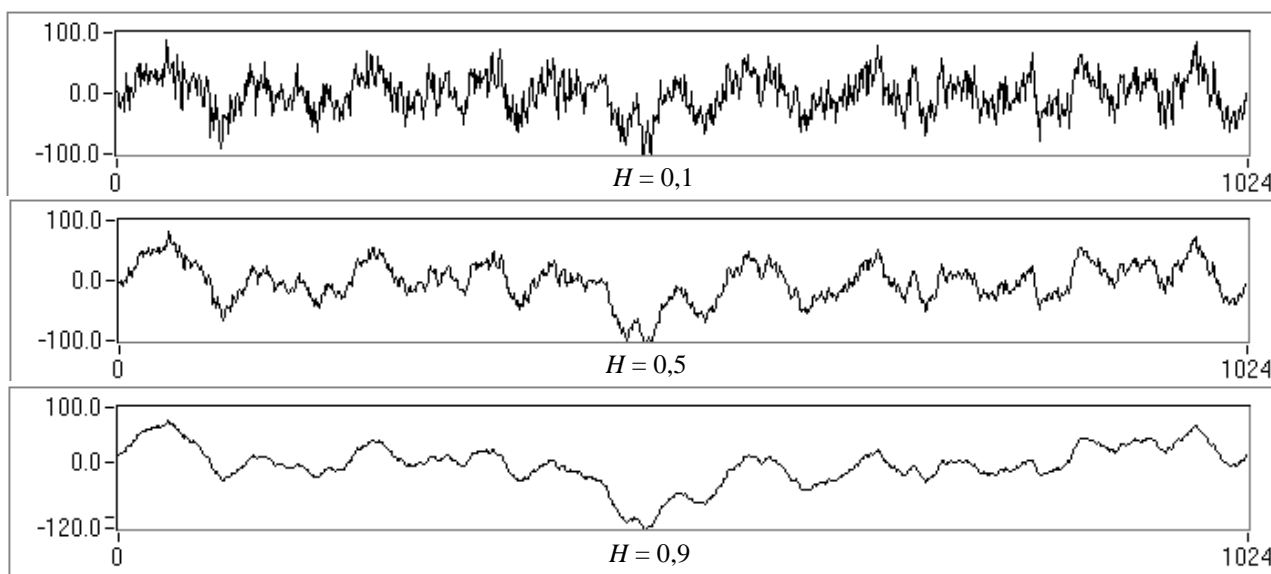


Рис.1

На этой базовой модели основаны ряд алгоритмов вычисления коэффициента H и синтеза временных рядов с заданным H , однако их адекватность остается дискуссионным вопросом. Согласно теории фракталов, любая кривая на плоскости характеризуется фрактальной (клеточной) размерностью D , которая показывает, насколько плотно кривая заполняет метрическое пространство, в котором она лежит, насколько она «извилиста» или «изломана». При этом D меняется от $D=1$ для прямой линии до $D \approx 2$ для очень изломанной линии.

Другой подход к анализу и синтезу фрактальных временных рядов основан на рядах Фурье. Показано, что спектральная плотность мощности фрактального временного ряда представляет собой степенную функцию от частоты. Тогда спектральная размерность β вводится как показатель степени этой функции: $S(f) \sim f^{-\beta}$, а между коэффициентом ФБД H , спектральной размерностью β и фрактальной размерностью D имеют место теоретически доказанные соотношения $D=2-H$, $\beta=2H+1$. В рамках этого подхода вычисление спектральной размерности β , а следовательно, и фрактальной размерности, сводится к получению спектра мощности исходного сигнала и определению угла наклона аппроксимирующей его прямой в дважды логарифмическом масштабе. Синтез временного ряда заданной размерности производится с помощью обратного преобразования Фурье. Так как гармонический анализ издавна и широко при-

меняется в электротехнике, и соответствующие программные инструменты имеются во всех стандартных математических и электротехнических программных пакетах, данный подход следует признать наиболее удобным для целей настоящей диссертации. Однако возможны и другие подходы, в частности, использующие вэйвлет-преобразование или корреляционный анализ, а также приближённые методы, два из которых применены в работе.

Важно отметить, что фрактальный анализ к изучению стохастической траектории электромагнитного процесса можно применить двумя путями. С одной стороны, её можно рассматривать как случайный временной ряд — инструменты анализа и синтеза такого рода сигналов описаны выше. С другой стороны, траектория процесса может быть представлена в виде кривой на плоскости, например, динамическая вольт-амперная характеристика электрической дуги переменного тока (задача идентификации таких характеристик подробно рассмотрена во второй главе). В этом случае применимы алгоритмы вычисления размерности, разработанные в теории фракталов для анализа растровых изображений, такие как клеточная размерность, а также упрощённые фрактальные характеристики – коэффициент длины и коэффициент гладкости.

В заключительном разделе первой главы рассмотрено применение методов фрактального анализа для диагностирования, анализа и моделирования частичных разрядов в высоковольтной изоляции. Показано, что фрактальные характеристики изображений триингов, такие как клеточная размерность и лакунарность, позволяют классифицировать дефекты в изоляции. С помощью одномерной компьютерной модели установлено, что перед пробоем распределение дефектов по размерам приобретает фрактальный характер.

Во второй главе фрактальные методы анализа траекторий используются для идентификации состояния дуговой сталеплавильной печи переменного тока, а именно – условий горения электрической дуги в зоне расплавления шихты. Вычисление фрактальной размерности траекторий переменных состояния этой электрической системы целесообразно интегрировать в адаптивную электродинамическую систему управления процессом плавки (АСУТП ДСП) с це-

лью улучшения его характеристик. В тексте главы изложены основные сведения о дуговой сталеплавильной печи переменного тока и технологии процесса плавки, об измерительных системах, с помощью которых получены анализируемые в работе временные ряды.

В настоящее время развитие дуговых электротермических установок идёт в направлении увеличения ёмкости печи и мощности печного трансформатора — таким образом повышается эффективность сталеплавильных установок. Вследствие этого повышаются требования к точности и быстродействию систем управления процессом плавки, так как, в частности, перерасход энергии из-за запаздывания системы управления даже на небольшое время может быть весьма значительным, что ухудшает экономические характеристики. Для оптимизации работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока необходимо быстрое автоматическое распознавание условий горения дуги по данным измерений ее тока и напряжения. Подходы, основанные на применении Фурье- и вейвлет-преобразования, не решают в полной мере эту задачу, так как требуют значительного временного окна для получения корректных результатов. Кроме того, их результатом является набор коэффициентов, требующий дальнейшей интерпретации для получения единого критерия состояния дуги.

В процессе плавки динамическая вольтамперная характеристика дуги (ДВАХ) меняет свою форму от весьма изрезанной до почти идеально гладкой (рис.2). Количественно характеризовать это изменение удобно с помощью клеточной фрактальной размерности D . Расчёты по данным измерений мгновенных значений тока и напряжения дуги показали, что клеточная фрактальная размерность однопериодных изображений ДВАХ дуги снижается в процессе плавки, давая численную меру изменения формы вольтамперной характеристики. То же относится и к фрактальной размерности изображений, полученных наложением ДВАХ дуги за несколько периодов. Показано, что приближенные фрактальные характеристики — коэффициент длины и коэффициент гладкости — позволяют улучшить характеристики быстродействия и селективности системы управления дуговой печью.

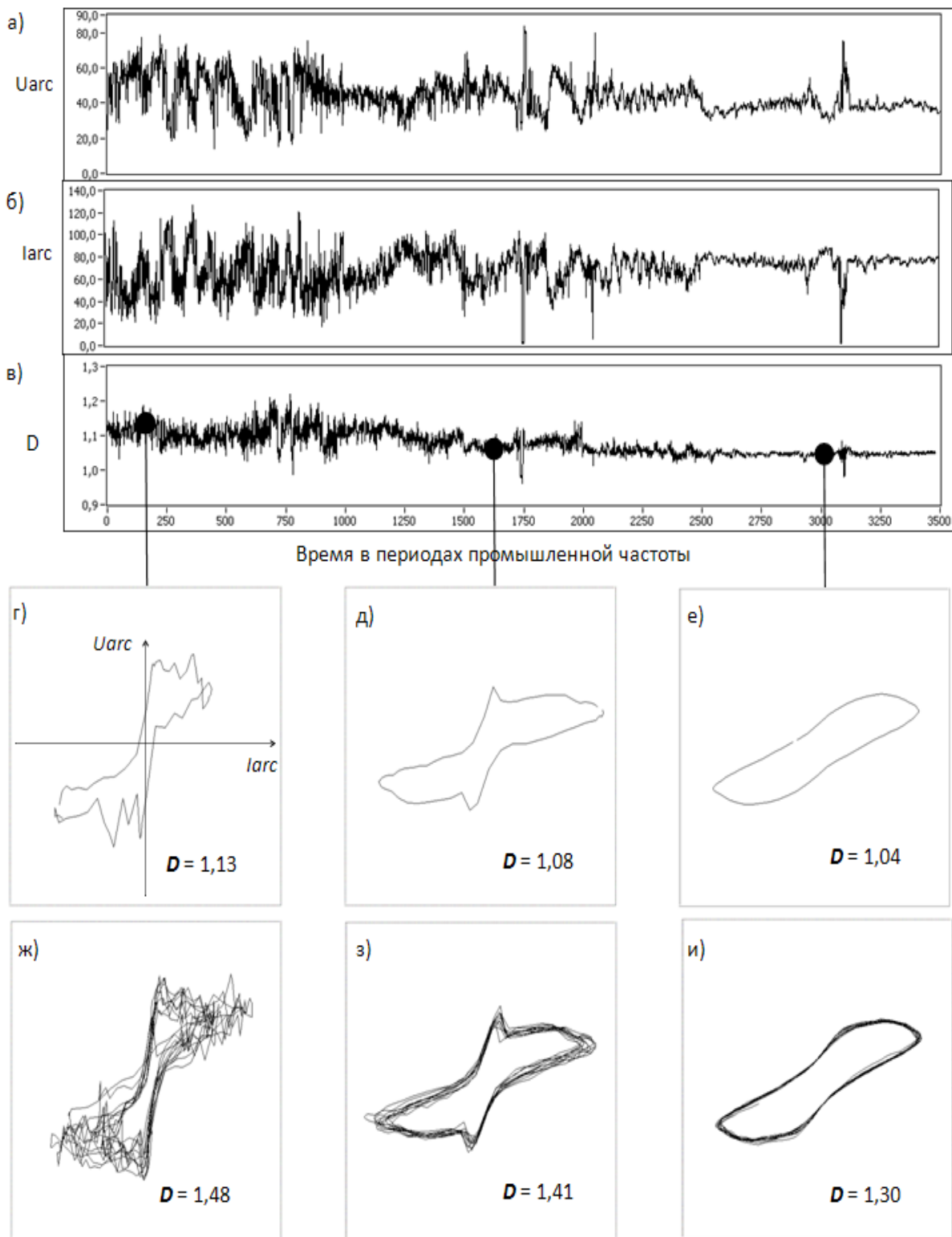


Рис. 2.

В третьей главе исследуется применение фрактального анализа временных рядов напряжения для оценки уровня фликера. Предложенные методики направлены на создание альтернативы существующему стандарту в этой области и использование в устройствах компенсации фликера.

Фликер напряжения – это один из стандартных показателей качества электроэнергии, связанный с низкочастотными колебаниями интенсивности света от ламп вследствие случайных колебаний питающего напряжения. Проблемы математического описания фликера, его стандартизации и разработки средств и методик измерения, а также поиск технических решений по снижению уровня фликера являются актуальными вследствие непрерывного развития осветительной техники и всё более широкого проникновения нелинейной нагрузки в электросети. В работе приведены основные сведения о фликере напряжения, схема и принцип действия стандартного фликерметра.

Свойство фрактальной размерности численно характеризовать размах флуктуаций временных рядов открывает возможность её использования в качестве меры фликера. Компьютерный эксперимент показал наличие корреляции между дозой фликера, вычисленной для синусоиды, модулированной временным рядом заданной размерности, и соответствующей спектральной размерностью (рис.3). С помощью метода обратного преобразования Фурье генерировался временной ряд с заданной спектральной размерностью β длительностью 30 минут и частотой дискретизации 50 Гц. Затем данный временной ряд использовался в качестве огибающей для стандартной синусоиды частотой 50 Гц. Полученная таким образом кривая напряжения разбивалась на 30 одноминутных интервалов, и для каждого интервала определялась 1-минутная доза фликера P_{st} . Для оценки дозы фликера использовалась программная модель стандартного фликерметра Международной Электротехнической Комиссии, разработанная в среде графического программирования LabVIEW. Таким образом были получены по тридцать значений P_{st} для каждого значения спектральной размерности входного сигнала (рис.3).

Показано, что для характеристики фликера могут использоваться различные фрактальные меры, в том числе приближённые. Изучена возможность улучшения отклика фликерметра путем частичной замены его статистического блока на блок вычисления фрактальной размерности.

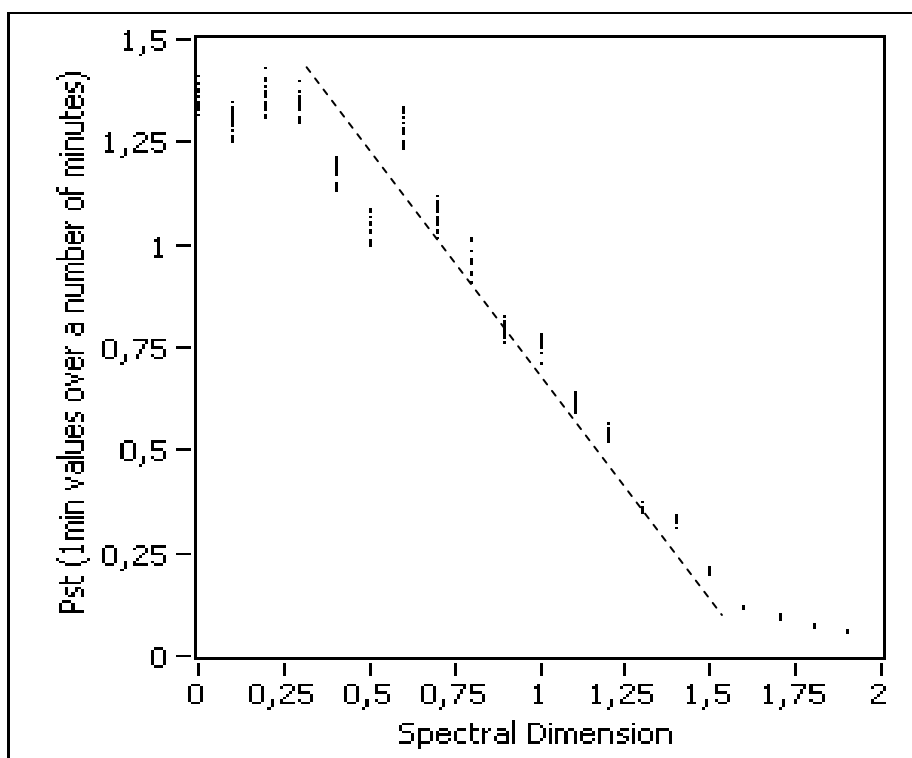


Рис. 3.

Установлено наличие корреляции между одномоментной дозой фликера Pst_{1min} и усреднённым коэффициентом фрактального броуновского движения полувольты напряжения, вычисленными для экспериментально полученного временного ряда напряжения на шинах дуговой сталеплавильной печи.

Подтверждено наличие корреляции между дозой фликера, определённой с помощью программной модели фликерметра со встроенным блоком вычисления коэффициента длины (упрощённой фрактальной характеристики), и дозой фликера, рассчитанной по стандартному алгоритму, для измеренных временных рядов напряжения дуговой сталеплавильной печи. Показано, что модифицированный фликерметр со встроенным блоком вычисления коэффициента длины в определённом диапазоне способен воспроизводить нормированный отклик на стандартные тестовые сигналы.

В четвертой главе методы фрактального анализа траекторий электромагнитных процессов применены для оценки двигательной активности рыб в рамках исследований влияния электромагнитных полей на живые организмы. Разработан и внедрён метод регистрации двигательной активности рыб по видео-

записям, позволяющий проводить количественные исследования влияния электромагнитных полей на рыб.

В тексте главы описаны актуальные постановки задачи исследования влияния электромагнитных полей на рыб, перечислены основные подходы к регистрации их двигательной активности, проведён критический обзор описанных в современной зарубежной литературе методов видеорегистрации двигательной активности рыб. Далее приводится подробное описание электрометрического метода регистрации двигательной активности водных организмов, разработанного В.В. Александровым. В рамках этого метода при наличии в водной среде течений, возникающих вследствие движения рыб, происходит изменение электрокинетического потенциала на электродах, регистрируемое измерительной системой. Характеристики получаемого стохастического сигнала используются для оценки уровня двигательной активности. Показано, что временные ряды двигательной активности, полученные таким способом, имеют фрактальный характер и характеризуются фрактальной размерностью. На основании анализа достоинств и недостатков этого и других способов регистрации сформулированы требования к современному методу регистрации двигательной активности рыб, пригодному для исследований в области электромагнитной экологии.

В работе поставлена и решена задача разработки полностью объективного и автоматизированного метода регистрации двигательной активности на основе математической обработки видеозаписей поведения рыб (рис.4). Метод позволяет получать временные ряды, характеризующие двигательную активность как одиночных особей, так и группы рыб, и применять к ним методы анализа случайных процессов и траекторий, в первую очередь фрактальный анализ (рис.5). Получены временные ряды двигательной активности рыб в отсутствие воздействия и вычислены их фрактальные размерности.

В приложении приводится описание аппаратного и программного обеспечения разработанного метода, алгоритм обработки изображений.

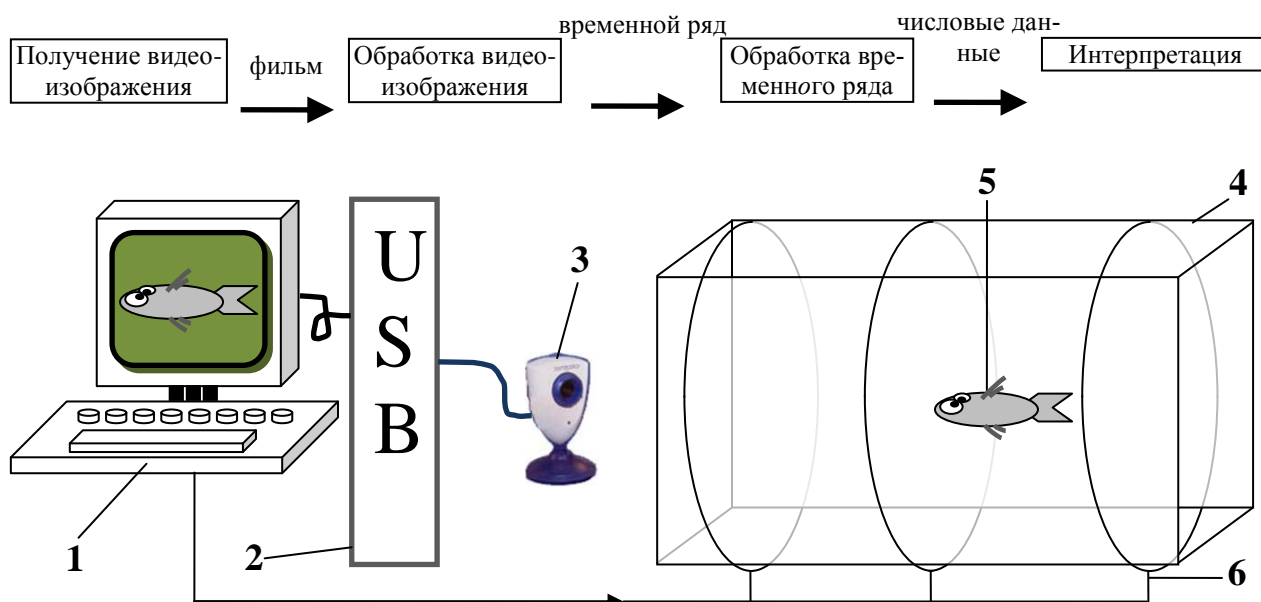


Рис. 4. Метод регистрации двигательной активности рыб по видеозаписям.

1 - компьютер с программным обеспечением для видеозахвата и математической обработки; 2 - USB-шина либо плата видеозахвата; 3 - веб-камера; 4 - аквариум с водой и подопытными организмами; 5 - рыба; 6 - источник электромагнитного излучения (кольца Гельмгольца, напряжение подаётся с компьютера);

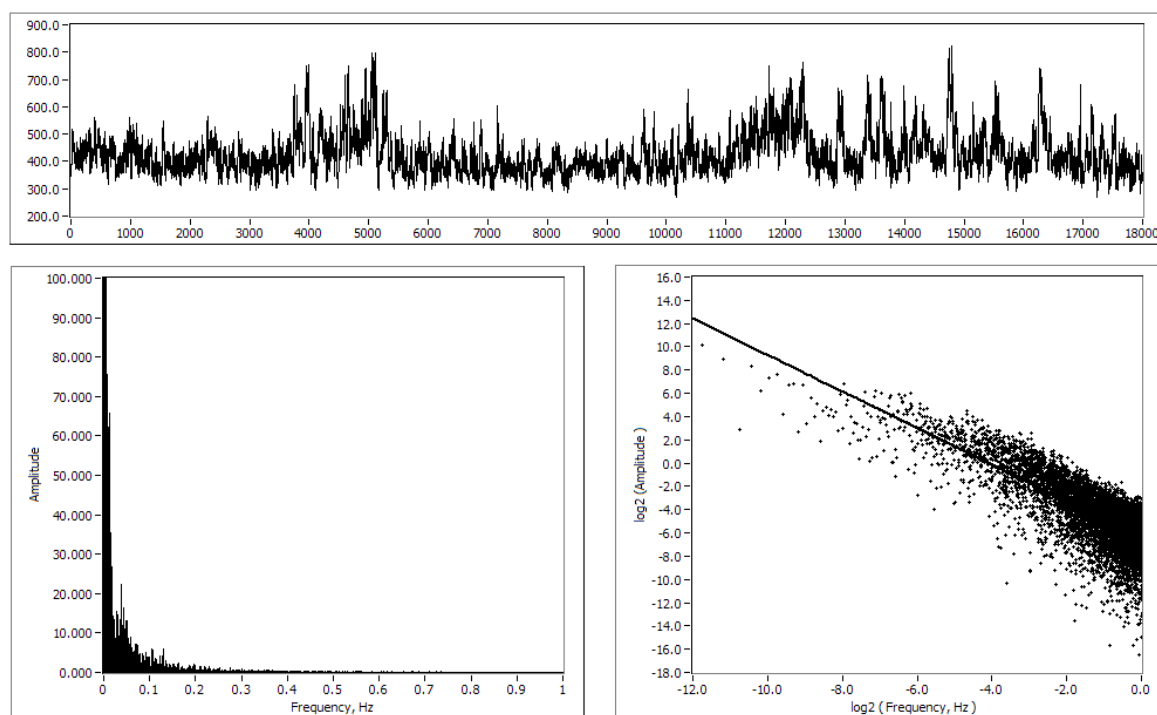


Рис. 5. Фрактальный анализ временного ряда двигательной активности.

(исходный временной ряд, его спектр мощности, спектр в дважды логарифмическом масштабе)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для ряда прикладных электротехнических задач показана эффективность применения фрактального анализа для характеристики траекторий электромагнитных процессов в рамках исследований по электромагнитной совместимости и построения адаптивных систем управления.
2. Показано, что многие временные ряды и траектории электромагнитных процессов имеют фрактальный характер и эффективно характеризуются фрактальными размерностями разных видов.
3. Установлено, что клеточная фрактальная размерность динамической вольт-амперной характеристики электрической дуги снижается в процессе плавки, численно характеризуя изменение её гладкости, что позволяет использовать фрактальную размерность в качестве индикатора состояния дуги в системе управления дуговой печи.
4. Введенные в работе приближенные фрактальные характеристики – коэффициент длины и коэффициент гладкости – позволяют улучшить характеристики быстродействия и селективности системы управления.
5. Экспериментально установлено наличие корреляции между дозой фликера и фрактальной размерностью временного ряда напряжения на шинах дуговой сталеплавильной печи.
6. С помощью компьютерного моделирования показано, что имеется корреляция между размерностью временного ряда огибающей синусоидального напряжения и дозой фликера, определяемой для этого напряжения с помощью модели стандартного фликерметра.
7. Разработан программно-аппаратный комплекс для регистрации двигательной активности рыб с помощью видеозаписей и фрактального анализа в рамках исследований по электромагнитной совместимости – электромагнитной экологии. Получены значения фрактальной размерности временных рядов двигательной активности рыб.
8. В диссертации выполнен обзор современных методов фрактального анализа, особое внимание уделено вычислению фрактальных размерностей временных

рядов и подходам, использующим фрактальный анализ для изучения частичных разрядов в высоковольтной изоляции.

Основные публикации автора по теме работы

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Балагула Ю.М., Боронин В.Н., Коровкин Н.В. Оценка фликера напряжения с помощью модели фрактального броуновского движения // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. Т.1, № 5. С. 99—102.

2. Балагула Ю.М., Боронин В.Н., Коровкин Н.В. Регистрация двигательной активности живых организмов для решения задач электромагнитной экологии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 2-1. С. 243—247.

Прочие публикации:

3. Балагула Ю.М. Фрактальный анализ цен на электроэнергию // Материалы 5-й Ежегодной конференции ЕУСПб и ЭМИ РАН «Современные подходы к исследованию и моделированию в экономике, финансах и бизнесе». 15-16 апреля 2011. Санкт-Петербург. С. 17—19.

4. Балагула Ю.М., Глухов О.А., Коровкин Н.В. Методика оценки параметров частичных разрядов в высоковольтной изоляции при относительных измерениях их импульсных электромагнитных полей // Сборник научных докладов IV Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2001. СПбГЭТУ. 19-22 июня 2001. Санкт-Петербург. С. 30—35.

5. Balagula Y., Korovkin N., Sakulin M., Renner H. The use of fractal analysis for quantifying the dynamic arc characteristics // Сборник научных докладов V международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2003. СПбГЭТУ. 16-19 сентября 2003. Санкт-Петербург. С. 39—42.

6. Balagula Y., Sakulin M., Korovkin N., Renner H. Fractal analysis as a means of flicker evaluation. — Proceedings of the 3rd International Conference on

Electric Power Quality and Supply Reliability, September 4-6 2002. Haapsalu, Estonia. P. 43—48.

7. Balagula Y., Sakulin M., Korovkin N. Characterization of the Flicker Severity Using Spectral Dimension and Related Values // Proceedings of the 4th International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability. August 29-31 2004. Pedase, Estonia. P. 43—48.

8. Balagula Y., Sakulin M., Korovkin N. Fractal Theory and Voltage Flicker Evaluation // Proceedings of the 2005 IEEE St.-Petersburg PowerTech Conference. June 27-30 2005. St.Petersburg, Russia. #682.

9. Балагула Ю.М., Коровкин Н.В., Сакулин М. Применение фрактального анализа для оценки фликера напряжения // Сборник научных докладов VI Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2005. СПбГЭТУ. 21-24 июня 2005. Санкт-Петербург. С. 248—252.

10. Адалёв А.С., Александров В.В., Александров Б.В., Балагула Ю.М., Коровкин Н.В., Серов И.Н., Уставников Д.А. Метод регистрации двигательной активности рыб с применением фрактального анализа видеозаписей // Сборник научных докладов V международного симпозиума ЭМС-2003. СПбГЭТУ. 16-19 сентября 2003. Санкт-Петербург. С. 411—414.

11. Alexandrov V.V., Alexandrov B.V., Balagula Y.M., Serov I.N., Ustavnikov D.A. Electromagnetic Exposures by Cellular Phones on Aquatic Ecosystems Behavior in-Vivo // Proceedings of the 17th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. 29 June – 1 July 2004. Wroclaw, Poland. P. 76—81.

12. Балагула Ю.М., Абакумова Ю.А. Длинная память на рынке нефти: спектральный подход. Препринт факультета экономики ЕУСПб Ес-01/11. — СПб.: Изд-во ЕУСПб, 2011. — 31 с.