

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»**

Математико-механический факультет  
Кафедра информатики и процессов управления

**Применение методов научной и информационной  
визуализации к задачам отображения в сфере  
электроэнергетики**

"Допущен к защите"

"\_\_" \_\_\_\_\_ 2013 г.

Магистерская диссертация студента  
6 курса группы мкм-210122  
Кожевина Александра Вячеславовича

Научный руководитель  
Авербух Владимир Лазаревич  
кандидат технических наук

Соруководитель  
Топорков Дмитрий Николаевич

Екатеринбург  
2013

## Оглавление

1. Введение .....	3
2. Постановка задачи .....	5
3. Теория по научной визуализации специализированных систем.....	8
4. Разработка вида отображения сигнальных ситуаций СМГР .....	11
4.1. Реализация диаграммы Ганта .....	12
4.2. Проработка интерфейса.....	15
4.3. Обратная связь.....	16
4.4. Применение подхода .....	17
4.5. Перспективы .....	18
4.6. Выводы .....	18
5. Разработка вида отображения мод декомпозиции.....	20
5.1. Низкочастотные колебания с энергетической системе .....	20
5.2. Математика EMD .....	22
5.3. Разработка вида отображения мод декомпозиции, визуальный анализ.....	27
5.3.1. Графическая часть .....	28
5.3.2. Дерево декомпозиции .....	29
5.3.3. Проработка интерфейса дерева декомпозиции .....	29
5.3.4. Этап подготовки к анализу .....	30
5.3.5. Расчет мод декомпозиции.....	34
5.4. Выводы .....	34
6. Заключение и основные результаты.....	35
7. Список литературы .....	36

## 1. Введение

Повышение безопасности эксплуатации электрических сетей при том уровне интеграции, который характерен для РФ, относится к числу наиболее актуальных проблем развития Единой энергетической системы нашей страны. В связи с этим совершенствование методического инструментария для анализа электрических параметров в нормальных и переходных режимах с целью диагностики аварийных ситуаций, выявления причин их возникновения, оценки масштабов аварий, прогнозирования развития аварийных ситуаций всегда востребовано. По этой причине, пополнение арсенала инструментальных средств анализа сетевых электрических параметров новыми удобными и эффективными средствами научной визуализации, несомненно, важный и актуальный этап в развитии ЕЭС. Особую актуальность магистерской диссертации придает именно применение средств научной визуализации, объективно позволяющее одновременно учитывать огромное количество параметров на разных участках системы и оценивать их взаимное влияние.

Значимость данного материала определяется востребованностью в сфере системы мониторинга переходных режимов (СМПР) электроэнергетической системы, где внедрение разработанных видов отображения позволяют специалистам существенно расширить круг задач по повышению качества и надежности управления электрическими режимами ЕЭС.

Магистерская диссертация состоит из двух основных частей, посвященных двум видам отображения: сигнальных ситуаций СМПР и функций, полученных в результате проведения разложения сигналов методом декомпозиции на «эмпирические моды». Первая часть посвящена исследованию проблем создания методов визуализации для множества временных отрезков, характеризующих даты начала и конца некоторого события. Исследование проводилось в рамках решения задачи отображения

сигнальных ситуаций при разработке автоматизированной системы сбора информации с регистраторов системы мониторинга переходных режимов (АС СИ СМПР), используемой в филиалах СО ЕЭС России. Вторая часть посвящена комплексу инструментов научной визуализации, помогающих эффективно проводить декомпозицию и анализировать полученные результаты. Исследование проводилось в рамках решения задачи отображения «эмпирических мод» при разработке программного комплекса по мониторингу низкочастотных колебаний, используемой в филиалах СО ЕЭС России.

## 2. Постановка задачи

Работа реальной энергетической системы всегда сопровождается так называемыми переходными режимами [1]. Под переходным режимом понимается изменение параметров электрической сети (частоты, тока, напряжения, фазового угла и т.д.) при переходе из одного устойчивого состояния в другое в результате воздействия какого-либо возмущающего фактора: отключения или включения генератора, линии, нагрузки, короткого замыкания и т. п.

Создание и внедрение в практику эксплуатации крупнейших энергообъединений мира систем мониторинга переходных режимов (СМПР) является одним из приоритетных направлений их технологического развития. СМПР базируется на технологии векторных измерений, обеспечивающей способность регистрации синхронизированных по времени измерений параметров электромеханических переходных режимов в различных сколь угодно удаленных друг от друга точках энергосистемы и вычисление взаимных углов векторов напряжения в однозначно определенные моменты времени благодаря использованию сигналов синхронизации глобальных навигационных спутниковых систем. Это отличает СМПР от систем телеметрии и определяет широкий спектр и специфику ее применения, в частности, обеспечивает получение более детальной информации о параметрах переходных режимов в энергосистемах, возникающих вследствие технологических нарушений или аварийных возмущений. Новое качество предоставляемой СМПР информации позволяет специалистам существенно расширить круг задач по повышению качества и надежности управления электрическими режимами электроэнергетической системы [2].

В филиалах СО ЕЭС России развёрнута автоматизированная система сбора информации с регистраторов системы мониторинга переходных режимов (АС СИ СМПР). Регистраторы постоянно измеряют параметры электрического режима сети. Некоторые из них могут быть

сконфигурированы так, чтобы отслеживать выход значений параметров за указанный допустимый диапазон и создавать аварийные файлы в случае регистрации выхода [3]. Для остальных регистраторов аналогичную функциональность предоставляет и АС СИ СМПП. В терминах этой системы событие выхода параметра за допустимый диапазон называется сигнальной ситуацией, на которую следует обратить внимание при изучении поведения энергосистемы. Сигнальная ситуация характеризуется датой и временем начала и окончания события выхода параметра за диапазон, а также идентификацией регистратора, её зафиксировавшего.

Сигнальные ситуации анализируются специалистом-технологом СО ЕЭС, основными задачами которого являются:

- Анализ электрических параметров в нормальных и переходных режимах;
- Расчет сигнальных настроек для переходных режимов;
- Выявление причин возникновения аварийных ситуаций;
- Планирование и расчет краткосрочных и долгосрочных планов затрат энергии.

В АС СИ СМПП имеется возможность работать как с оперативными (текущими) данными, так и с архивной информацией. С оперативными данными, как правило, работает специалист-диспетчер, архивные данные интересны специалисту-технологу, выполняющему их анализ и исследование.

Первая часть магистерской диссертации посвящена разработке специализированного вида отображения сигнальных ситуаций для поддержки функциональных задач технолога по анализу архивных данных. При этом необходим такой вид отображения, который бы давал общую картину распределения сигнальных ситуаций за указанный промежуток времени для анализа периодичности и выявления возможных закономерностей их возникновения.

В энергосистеме непрерывно происходят изменения генерации и потребления, напряжения, частоты, потоков мощности, топологии сети. Даже малые изменения параметров энергосистемы ведут к возникновению малых переходных режимов в широком спектре частот, отличающихся от номинальной частоты системы, чему способствует неоднородность характеристик элементов энергосистемы.

Как показывает практика [4], наиболее опасными для энергосистемы являются колебания с частотами, близкими к собственным частотам механических колебаний вращающихся масс (например, роторы генераторов) и управляющей автоматики (например, регуляторы возбуждения, регуляторы частоты). По наблюдениям, такие колебания обычно имеют частоту в пределах 0,5-1,5 Гц, что существенно ниже номинальной частоты напряжения сети.

Вторая часть магистерской диссертации посвящена разработке вспомогательного инструмента для проведения визуального анализа сигналов и их разложения на «эмпирические моды». Такой инструмент должен позволить специалисту быстро и эффективно отобразить результаты разложения сигналов.

### **3. Теория по научной визуализации специализированных систем**

В данной магистерской работе рассматривается создание инструмента визуализации, являющееся частью более крупной специализированной системы научной визуализации. При создании таких систем выделяются следующие составляющие [5]:

- инженерия программного обеспечения;
- компьютерная графика и средства организации человеко-компьютерного интерфейса;
- аспекты, связанные с “человеческим фактором”.

При этом значительное внимание уделяется “человеческим” проблемам, возникающим при проектировании визуальных и интерактивных систем. Задача выбора тех или иных методик генерации изображения затрагиваются только лишь в связи с разработкой специализированных систем. Также в связи с разработкой специализированных средств научной визуализации возникли задачи интерактивной визуализации супервычислений, которые относятся к проблематике инженерии программного обеспечения.

Очевидно, что визуализация, понимаемая как зримое представление ментальных моделей, существовала задолго до появления современной вычислительной техники. Более того, визуализацию, то есть перевод данных и информации в некоторые графические образы, можно рассматривать как составную часть нашей повседневной жизни. Официально научная визуализация как самостоятельная дисциплина оформилась после публикации в ноябре 1987 г. специального выпуска журнала *Computer Graphics*, содержавшего доклад “Визуализация в научных вычислениях” [6]. Визуализация, представляя результаты вычислений, обеспечивает интерпретацию и анализ полученных данных.



Под компьютерной визуализацией понимается методика перевода абстрактных представлений об объектах в геометрические образы, что дает возможность исследователю наблюдать результаты компьютерного моделирования явлений и процессов.

Традиционно выделяются следующие подобласти компьютерной визуализации:

- научная визуализация;
- визуализация программного обеспечения;
- информационная визуализация.

Отметим также, что иногда визуализация упрощенно понимается лишь как непосредственное отображение трехмерных образов (рендеринг) на некоторую плоскость вывода или даже как простой набор визуальных и иконических интерактивных методик. Эти (кстати, весьма, важные) вопросы следует скорее отнести к проблематике компьютерной графики и человеко-машинного взаимодействия.

Имеет место ряд связанных между собой базовых понятий, который включает в себя метафору визуализации, язык визуализации, вид отображения, конкретный графический вывод.

Следует отметить две тенденции развития систем визуализации. С одной стороны - разработка универсальных средств визуализации, а с другой – специализация по всем направлениям, вплоть до создания специальных графических станций с реализацией для данного случая графическим алгоритмическим и программным обеспечением. Данная работа выполнена в рамках специализированной системы научной визуализации.

Специализированные системы облегчают работу пользователя, а, в случае исследования принципиально новых модельных объектов, только за счет их

использования можно получить наглядное представление об их природе и особенностях.

Существует несколько подходов к обеспечению специализации - по объектам визуализации, по использованию методик компьютерной графики, по научным направлениям, для которых разрабатываются соответствующие системы. Имеет место подробная номенклатура отраслей научной визуализации, соответствующих научным отраслям и дисциплинам. Встречаются такие подразделы научной визуализации, как биомедицинская визуализация, химическая визуализация, визуализация аэро и гидродинамики, географическая визуализация и т.п. Возможна разработка систем, пригодных для решения только одной, хотя и мощной задачи. Интересно, что такого рода специализация приводит к созданию специальных суперкомпьютеров, которые можно рассматривать как специализированные вычислители, в целом ориентированные на строго определенные проблемы, например, на задачи газовой динамики. Изучение статей, касающихся отдельных отраслей научной визуализации, позволяет уяснить, что каждое направление содержит свои (хотя иногда и совпадающие с другими отраслями) наборы моделируемых сущностей, объектов изучения и визуализации, методик выделения этих объектов, например, методики выделения изоповерхностей. Для каждого подраздела визуализации, связанного с тем или иным научным направлением, характерны наиболее важные объекты визуализации, выбор той или иной естественной или привычной образности, набор видов отображения и т.п.

#### 4. Разработка вида отображения сигнальных ситуаций СМПР

[7] Единицей исследуемых данных служит объект, который включает в себя всю необходимую информацию о возникшей сигнальной ситуации. Запрос технологом в АС СИ СМПР посредством АРМ Технолога возвращает набор сигнальных ситуаций за указанный промежуток времени. Эта информация отображается в виде таблицы, как минимум состоящей из трех колонок (название регистратора, время начала и время окончания). Сразу надо заметить одно очень полезное свойство данных - сигнальные ситуации могут принадлежать одному регистратору. Таким образом, можно объединить их в одну группу и хранить уже набор регистраторов, каждый из которых будет содержать свой набор сигнальных ситуаций. Если представить каждый из регистраторов на временной оси и отобразить на ней отрезками сигнальные ситуации, то можно получить полосы времени с отмеченными промежутками. Если расположить эти оси одна под другой, то получится изображение, очень похожее на известный из области научной визуализации вид отображения, называемый «Диаграмма Ганта» [8, 9]. Можно сразу перечислить и применить некоторые полезные свойства такого метода визуализации. Преимуществом диаграммы Ганта является то, что она позволяет наглядно отражать распределение сигнальных ситуаций между различными регистраторами. Также диаграмма легка в построении. Пользователь, который имеет дело с таблицами интервалов времени, лишен возможности посмотреть на картину происходящего в целом, перед ним только набор дат и времен. Чтобы выявить области скопления или области отсутствия интервалов событий и, что самое главное, выявить возможные закономерности или зависимости, нужно потратить достаточно много времени и усилий. Диаграммный вид отображения такой таблицы наглядно демонстрирует относительное положение интервалов событий между собой при заданных границах времени. К тому же, в любой момент можно переключиться с диаграммного на табличный вид и обратно.

Таким образом, имеется определенный набор сигнальных ситуаций от нескольких регистраторов, каждая из которых содержит всю необходимую информацию для обработки. Для диаграммы Ганта требуется знать только топологическое место расположения регистратора, его название и временной промежуток сигнальной ситуации, состоящий из дат начала и конца. В табличном виде отображения обрабатывать такую информацию очень сложно: в поле зрения технолога видны только несколько строк таблицы, хотя их может быть несколько десятков, а то и сотен.

#### **4.1. Реализация диаграммы Ганта**

Рассмотрим подробнее реализацию диаграммного вида отображения.

Одна из проблем, с которыми пришлось столкнуться, возникла тогда, когда потребовалось запросить данные за большой промежуток времени, например неделю или месяц. Как правило, длительность сигнальной ситуации не превышает 10 минут, поэтому относительная длина интервала сигнальной ситуации при отображении может оказаться полоской с шириной, трудно различимой пользователем. Проблема была решена заданием минимального размера объекта («ширины» полоски) и приданием ему свойства прозрачности. При таких настройках, тонкие и частые интервалы будут накладываться друг на друга и картина в целом сохранится. Там, где будет большое скопление интервалов, образуется более темное пятно. Как результат, такой вид отображения легче интерпретировать, можно быстро определить области повышенного внимания и сразу приступить к работе с ними.

Следующая проблема связана с выбором цвета отображаемых объектов. Первая мысль была сделать их красными на основании того, что сигнальная ситуация должна обращать на себя внимание. Но красный цвет с психологической точки зрения содержит ощущение тревоги, и пользователь может ощущать напряжение от воспринимаемой информации. Также он имеет максимальную длину волны, и поэтому обладает раздражающим и

возбуждающим эффектом. Значит нужно подобрать такой цвет, который был бы нейтральным и не ассоциировался с аварией. Известно, что зеленый цвет способствует расслаблению глаз, обладает успокаивающим эффектом, что может оказаться немаловажным для спокойной и эффективной интерпретации данных. Чтобы цвет не слишком выделялся, было решено взять зелено-желтый оттенок.

В процессе реализации цветовой схемы диаграммы была рассмотрена идея более детальной разрисовки сигнальных ситуаций: пусть цвета одних и тех же параметров электрического режима, являющихся причиной возникновения сигнальных ситуаций, имеют один и тот же уникальный цвет, отличный от других. От этого отказались, обнаружив в литературе пример подобного отображения, представленный на Рис 1 [10]. Понятно, что из подобной пёстрой разноцветной картинки очень сложно технологу извлечь сравнительную информацию. Поэтому было решено отказаться от данной идеи и оставить предыдущий стиль оформления.



Рис. 1. Пример пестрой разрисовки диаграммы Ганта

Определившись с цветовой схемой и способом отображения, возник вопрос о выборе формы сигнальной ситуации. Если на экране отображать одновременно все регистраторы, то высота строки будет варьироваться, что неудобно для восприятия. При каждом новом запросе будет своя высота: когда слишком мало – строки будут большие, и наоборот, если много – строки будут очень маленькими. Поэтому было решено сделать высоту фиксированной и обеспечить прокрутку по вертикали. По горизонтали же

длина будет фиксированной, так как длину отображаемого интервала можно варьировать, изменяя параметры запроса.

Теперь рассмотрим сами сигнальные ситуации и воспользуемся некоторыми выводами теории Гештальта [11], связанные с выбором цвета и расположением объектов. Если объект будет такой же высоты, что и полоса, то смежные сигнальные ситуации будут сливаться. Поэтому нужно сделать отступ со всех сторон. Таким образом, объект будет казаться «вложенным» в полоску. Результат полученного внешнего вида приведен на Рис. 2.



Рис. 2. Итоговый вариант диаграммы сигнальных ситуаций

В ходе исследования отображения сигнальных ситуаций в виде диаграммы Ганта, появилась идея создать смежный вид отображения на основе регулярной сетки. Такой вид дает пользователю возможность разбить всю картину на области, которые будут содержать в себе только лишь информацию о фактах возникновения ситуаций, что может оказаться эффективным в случае их сильной разреженности. Так же такое отображение можно использовать для удобной навигации на touch-скринах. Диаграмма с регулярной сеткой состоит из ячеек фиксированных размеров с цветом фона. Например, каждая строка делится на определенное количество частей. Если хотя бы одна сигнальная ситуация попадает в какую-либо ячейку, то она становится цветной. Регулярные ячейки обладают прозрачностью, что дает определенные преимущества в некоторых случаях. Например, когда

сигнальные ситуации распределяются так, что почти в каждой регулярной ячейке есть хотя бы один объект. Как и в предыдущей диаграмме, чем больше объектов попало в ячейку, тем темнее она будет. Таким образом, можно увидеть области наибольшего скопления сигнальных ситуаций, представляющие наибольший интерес для рассмотрения. Цвет для рисования ячеек был выбран таким же, как и в предыдущем отображении, зелено-желтый. Цветные ячейки являются активными и при нажатии на них отображаются только те, которые попадали в нее. Таким образом, можно углубиться и рассмотреть более подробно интересующие участки времени. Результат показан на Рис. 3.



Рис. 3. Регулярная сетка в диаграмме Ганта

#### 4.2. Проработка интерфейса

Чтобы эффективно анализировать данные, нужно сделать такой интерфейс, который бы позволял быстро и просто добраться до нужных данных. Стандартным методом является инструмент «Лупа». Реализованный интерфейс позволяет мышкой выделить в пределах одной строки интересующий набор сигнальных ситуаций. Выбранный интервал времени тут же разворачивается в той же вкладке или создается новая вкладка с указанным интервалом. Таким образом, можно без особого труда визуально локализовать нужную область. Одновременно с действиями увеличения обновляется и таблица сигнальных ситуаций, сокращая их список до выбранного интервала.

Очень часто группа устройств регистрирует одинаковые сигнальные ситуации. Тем самым строки разных устройств совпадают, и нет необходимости показывать их все, достаточно показать только одну.

Поэтому в интерфейсе реализована группировка регистраторов по энергообъектам и возможность свернуть все строки различных устройств энергообъекта на диаграмме в одну с объединением соответствующих списков сигнальных ситуаций. Для получившейся строки применен тот же стиль оформления, что и для строк регистраторов. Свернув энергообъект, можно увидеть его картину сигнальных ситуаций. А если свернуть все энергообъекты диаграммы получится отображение общей картины по всем энергообъектам на запрошенный интервал времени. Во время общения с пользователем было выяснено, что возможность скрытия регистраторов по отдельности будет ему не нужна, поэтому она не была реализована. Получившийся результат показан на Рис. 4.

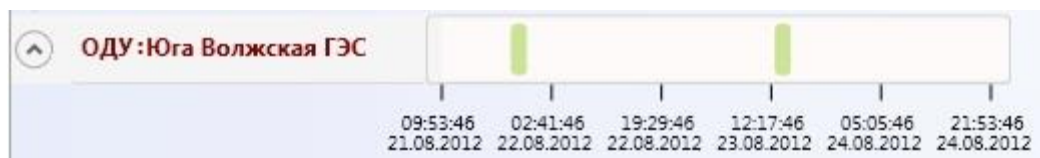


Рис. 4. Сворачивание энергообъекта

### 4.3. Обратная связь

Немаловажную роль в разработке программного обеспечения играет общение с заказчиком. Это позволяет избежать очень многих проблем на всех стадиях проекта. В первое время не было никакой информации, кроме технического задания и понимания предметной области. Исходя из этого, разработка велась исключительно из собственных соображений и представлений программистов. Первую версию диаграммы сигнальных ситуаций заказчик принял хорошо, в целом было то, что надо. Но потом сразу пошли предложения и пожелания того, чего бы он хотел видеть и как вообще он себе представляет работу с диаграммой. Также программисты подробно изучили порядок действий специалиста-технолога, с которыми он сталкивается каждый день. Это и было определяющим для утверждения существующего интерфейса. Таким образом, общение с заказчиком оказало большое положительное влияние на проработку метода визуализации.



#### 4.4. Применение подхода

Оказалось, что предложенный подход к решению задачи визуализации хорошо подходит также для визуализации импульс-архивов АС СИ СМПР.

Для понимания проблемы необходимо оценить объем регистрируемых данных с регистраторов СМПР за один день. Условно предположим, что один регистратор регистрирует около десяти параметров электрического режима (по факту регистраторы сохраняют от 6 до 30 параметров). В одну секунду регистрируется 50 значений (одно значение на период частоты). Получается, что в один день нужно сохранить около 4 320 000 значений (это требует, как минимум, 50 Мб) для каждого параметра. Получается, что для среднестатистического регистратора с 10 параметрами требуется как минимум 500 Мб в день. Учитывая, что на энергообъекте, как правило, установлено несколько регистраторов, количество данных соответственно больше. Хранить все данные нерационально, поэтому в системе хранения (в АС СИ СМПР используется ОИК СК-2007) предусмотрены механизмы прореживания [12]. Однако данные аварийных ситуаций являются существенной информацией и удаляться не должны. Для этого в системе хранения предусмотрен механизм создания импульс-архивов – интервалов неудаляемых данных. Импульс-архивы могут создаваться автоматически при формировании сигнальной ситуации или создаваться вручную технологом. Если таких импульс-архивов будет также много, то вопрос экономии дискового пространства также становится актуальным. Поэтому для отображения имеющихся в системе импульс-архивов также необходимо создать вид отображения, удобный для понимания, насколько их много. В данном случае вопрос экономии места представляет собой актуальную проблему для администраторов, поддерживающих систему.

Можно заметить, что импульс-архивы тоже представляют собой интервалы времени, как и сигнальные ситуации. А значит, метод визуализации будет такой же, как и у сигнальных ситуаций, только строка диаграммы будет одна.

Такой вид отображения позволяет визуально оценить объём не удаляемых данных и, при необходимости, удалить ненужные или слишком длинные импульс-архивы. В табличном виде отображения при большом количестве элементов данная операция если не невозможна, то очень затруднена. Тем самым новый вид отображения позволил создать не только понимание новой информации, но и предоставил реальную возможность выполнения дополнительных действий, ранее не предполагаемых.

#### **4.5. Перспективы**

В планах развития диаграммного вида можно выделить следующие направления. Во-первых, можно ввести дополнительную функциональность по отображению всей картины происходящего за запрошенный интервал времени. В таком случае будут одновременно показаны все регистраторы, что-либо зарегистрировавшие. Таким образом, например, можно будет оценить масштаб аварии. Во-вторых, можно реализовать отображение сигнальных ситуаций на географической карте, где будут отображены все регистраторы СМНР. Таким образом, можно будет локализовать аварии на территориальном уровне, и исследовать зависимости между узлами. В-третьих, для анализа распределения возмущений после возникновения аварии по энергетической сети было бы интересно просмотреть картину происходящего в динамике. Для этого можно реализовать своеобразный проигрыватель по воспроизведению на географической карте последовательности фактов регистрации аварии. Это может помочь в прогнозировании аварий, анализе и исследовании характера распространения волны возмущения после возникновения аварийной ситуации.

#### **4.6. Выводы**

В результате выполненной работы был получен удобный и интуитивно понятный интерфейс работы с сигнальными ситуациями. Диаграммный вид позволил извлекать информацию, которая может быть получена только в

результате визуального сравнения поведения разных регистраторов. Например, когда группа регистраторов должна регистрировать одну и ту же аварию, но некоторые ничего не регистрируют. Это можно интерпретировать, что возможно регистратор вышел из строя, или просто этот случай требует дополнительного внимания. Также наглядно можно выявить закономерности возникновения аварий, выявлять группы зависимостей.

Кроме того, было на практике проверено, что предложенный подход является удобным и весьма полезным для отображения любого специализированного типа информации, основанного на интервалах времени.

## **5. Разработка вида отображения мод декомпозиции**

### **5.1. Низкочастотные колебания с энергетической системе**

Низкочастотные колебания частот диапазона 0,2 – 2 Гц, как правило, успешно демпфируются за счет настройки регулирующей автоматики и собственных свойств энергосистемы: устойчивости, качества, регулируемости и др. [13] Однако, развитие колебаний потоков мощности, частоты, напряжения может, при недостаточном демпфировании, могут раскачать систему и привести ее к разделению, отключению потребителей и генераторов.

Естественно, для того, чтобы управлять такими явлениями, необходимо выявлять их в ходе непрерывного наблюдения, анализировать их частоты, вычислять степень демпфирования, устанавливать источники колебаний, законы их существования и развития, и способы управления.

Одной из основных задач анализа регистрируемых процессов является разложение наблюдаемого процесса представленного временным рядом на значимые составляющие. Для этого необходимы методы, способные обеспечить хорошую идентификацию и по частоте, и по времени, и по амплитуде. Это требуется для локализации низкочастотных составляющих, выделения компонент более высокой частоты, идентификации нелинейных процессов.

В настоящее время разработано и активно используется, в том числе и в электроэнергетике, большое количество различных методов частотно-временного анализа. Выбор того или иного метода определяется, с одной стороны, целями анализа, а с другой стороны, природой формирования значений сигнала.

Помимо целей анализа и класса входных сигналов, важными критериями выбора метода служат требования к системе обработки информации с учетом возможности практической реализации.

Анализируемые данные (параметры ЭР (ПЭР)), получаемые от энергосистем, обычно являются нелинейными и нестационарными. Для исследования таких процессов (данных) в последнее время применяют метод Empirical Mode Decomposition (EMD). Метод представляет собой итерационную вычислительную процедуру разложения исходных данных на эмпирические моды (внутренние колебания).

Основным достоинством метода является формирование адаптивного базиса, функционально зависящего от содержания самих данных.

Метод EMD был предложен Норденом Е. Хуангом в 1995 в США (NASA) для изучения эволюции поверхностных волн и феномена преобразования высокочастотных волн с короткой выборкой в низкочастотные волны при длинной выборке. В 1998 г данный метод коллективом соавторов был обобщен для анализа произвольных временных рядов.

EMD – метод разложения сигналов на функции, которые получили название «эмпирических мод». Метод представляет собой последовательную вычислительную процедуру разложения исходных данных (непрерывных или дискретных сигналов) на эмпирические моды или внутренние колебания – IMF (intrinsic mode functions).

Эмпирическая мода – это такая функция, которая обладает следующими свойствами:

- 1) Количество экстремумов функции (максимумов и минимумов) и количество пересечений нуля не должны отличаться более чем на единицу.
- 2) В любой точке функции среднее значение огибающих линий, определенных локальными максимумами и локальными минимумами, должно быть нулевым.

IMF представляет собой колебательный режим, как часть простой гармонической функции, но вместо постоянной амплитуды и частоты, как в

простой гармонике, у IMF могут быть переменные амплитуда и частота, как функции времени. Любую функцию и любой произвольный сигнал можно разделить на семейство функций IMF.

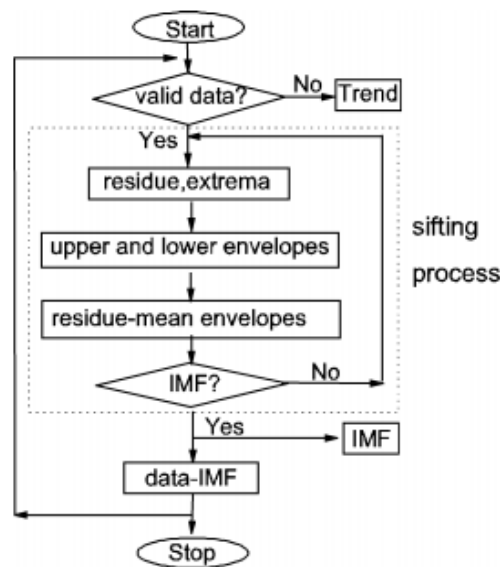
## 5.2. Математика EMD

Если обобщить алгоритм получения мод декомпозиции [14], то можно сформулировать формальные шаги алгоритма их получения:

- (1) Для любых данных  $x(t)$  идентифицируются все локальные экстремумы.
- (2) Выделяются все максимумы и минимумы, далее естественными кубическими сплайновыми линиями формируются верхняя  $u(t)$ , и нижняя  $l(t)$ , огибающие.
- (3) Вычисляется среднее значение огибающих, как  $m(t) = [u(t) + l(t)]/2$ .
- (4) Разность между данными и средним значением принимается за прото-IMF,  $h(t) = x(t) - m(t)$ .
- (5) Прото-IMF проверяется на соответствие IMF и критерий остановки, также определяется, является ли этот прототип IMF.
- (6) Если прото-IMF не удовлетворяет определению IMF, то повторяются (при необходимости многократно) шаги 1 - 5, пока  $h(t)$  не удовлетворит определению IMF.
- (7) Если прото-IMF действительно удовлетворяет определению, прото-IMF принимается как IMF компонент  $c(t)$ .
- (8) Шаги 1 - 7 повторяются на остатке,  $r(t) = x(t) - c(t)$ , где остаток принимается как данные.
- (9) Операция заканчивается, когда остаток содержит не больше, чем один экстремум.

Блок-схема этого процесса отсеивания дана на рис. 5. Математически, операция дана следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x(t) - m_{1,1}(t) &= h_{1,1}(t); \\
 x(t) - m_{1,1}(t) &= h_{1,1}(t); \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 h_{1,k-1}(t) - m_{1,k}(t) &= h_{1,k}(t); \\
 \rightarrow h_{1,k}(t) &= c_1(t),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



**Рис. 5.** Блок-схема процесса декомпозиции EMD.

в котором индексы указывают итерацию того же самого шага. На этой операции мы можем видеть:

$$\begin{aligned}
 x(t) - m_{1,1}(t) &= h_{1,1}(t); \\
 h_{1,2}(t) &= h_{1,1}(t) - m_{1,2}(t) = x(t) - (m_{1,1} + m_{1,2}); \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \dots \\ h_{1,k}(t) &= h_{1,k-1}(t) - m_{1,k} = x(t) - (m_{1,1} + m_{1,2} + \dots + m_{1,k}); \\ & \rightarrow c_1(t) = x(t) - (m_{1,1} + m_{1,2} + \dots + m_{1,k}) \end{aligned}$$

Это шаг, который извлекает первый компонент IMF. Впоследствии, мы имеем

$$\begin{aligned} x(t) - c_1(t) &= r_1(t); \\ r_1(t) - c_2(t) &= r_2(t); \\ & \dots \\ & \dots \\ r_{n-1}(t) - c_n(t) &= r_n(t); \\ \rightarrow x(t) - \sum_{j=1}^n c_j(t) &= r_n(t). \end{aligned} \tag{3}$$

Поэтому,

$$r_1(t) = \sum_{j=1}^{k_1} m_{1,j} \tag{4}$$

От уравнения (3), мы имеем

$$c_2(t) = r_1 - r_2 = \sum_{j=1}^{k_1} m_{1,j} - \sum_{j=1}^{k_2} m_{2,j} \tag{5}$$

Точно так же мы должны иметь

$$c_i(t) = r_{i-1} - r_i = \sum_{j=1}^{k_1} m_{i-1,j} - \sum_{j=1}^{k_2} m_{i,j} \tag{6}$$



Таким образом, все компоненты IMF являются суммами сплайновых функций. Таким образом исходный сигнал можно разложить по базису в терминах IMF:

$$\begin{aligned}
 x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n = x(t) - \sum_{j=1}^{k_1} m_{1,j} + \left( \sum_{j=1}^{k_1} m_{1,j} - \sum_{j=1}^{k_2} m_{2,j} \right) + \dots + \\
 + \left( \sum_{j=1}^{k_{n-1}} m_{n-1,j} - \sum_{j=1}^{k_n} m_{n,j} \right) + \sum_{j=1}^{k_n} m_{n,j} = x(t) \quad (7)
 \end{aligned}$$

Как здесь показано, анализ EMD основан на сплайновой функции.

Теперь позвольте нам обратиться к двум критическим элементам в алгоритме EMD. Сначала сделаем обзор первоначального определения IMF как внутренней модовой функции: любая функция, имеющая одинаковое количество (или с различием не более чем на 1) нулевых пересечений и экстремумов, и также симметричные огибающие локальных максимумов и минимумов соответственно. Во-вторых, обсудим критерий остановки. За все время существования EMD было предложено много различных критериев остановки. При квалифицированном выборе критериев остановки EMD приводит к информативным и полезным результатам. Все доступные критерии остановки могут быть разделены по тематическим категориям следующим образом:

(a) Критерий типа Коши

Критерий типа Коши был первоначально предложен Хуангом в 1998 году [15]. Определено, что процесс разложения должен остановиться, когда разность SD, определенная равенством (8), будет меньше, чем предварительно установленное значение.

$$SD = \sum_{t=0}^T m_{n,j} \frac{[h_{k-1}(t) - h_k(t)]^2}{h_{k-1}^2(t)} \quad (8)$$

Согласно этому определению, условие конвергенции математически может быть установлено в следующем: Для любого небольшого числа  $\varepsilon$ , существует большое количество  $M$  итераций таким образом, что  $SD < \varepsilon$  тогда, когда номер итерации отсеивания,  $K$ , больше чем  $M$ . Конвергенция всегда получается опытным путем, без каких-либо строгих доказательств. Вышеупомянутый критерий - глобальное свойство, поскольку это интегрированный критерий по целой предметной области. Кроме того, значение  $SD$ , плохо реагирует на небольшие изменения значений прото-IMF в специфических расположениях. Чтобы сделать критерий более устойчивым,  $SD$  определено как

$$SD = \frac{\sum_{t=0}^T [h_{k-1}(t) - h_k(t)]^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2(t)} \quad (9)$$

Хотя это определение более устойчиво, оно тоже является глобальным и четным сглаживающим контуром.

Хотя это определение является более локальным, это также зависит от локального значения прото-IMF. Однако, определения выше не могут гарантировать, что результаты действительно являются IMF, т.к. не имеют никакого отношения ни к количеству экстремумов, ни к количеству нулевых пересечений, ни к симметрии огибающих. Чтобы исправить это, есть два более новых подхода.

#### (b) Критерий среднего значения

Он был предложен в 2004 году [16], в котором  $SD$  определялось как единственный член в уравнении (6)

$$SD = m_{i,k}(t) \quad (11)$$

Отсеивание остановится, когда SD будет меньшим, чем предписанное значение. Это определение, конечно, лучше чем условие Коши, поскольку оно связано с определением IMF (требование среднего значения огибающих быть небольшим). Поскольку оно задано, то вынуждает огибающим быть симметричными, а это удовлетворяет одной из двух критических характеристик IMF.

### (с) Критерий S-номера

Эта форма была предложена в 2003 году [17] и связана с другим аспектом определения IMF. Чтобы осуществить этот критерий, нужно считать количество экстремумов и нулевых пересечений. S-число определено, как количество последовательных итераций отсеивания, по которым количество нулевых пересечений и экстремумов сохраняют то же самое значение и равны или отличается на один.

В результате проведенного анализа критериев остановки можно сказать, что ни один из методов не дает точного представления сигнала. Каждый критерий остановки подчеркивает свои особенности. Но, в зависимости от поставленной задачи можно использовать эти известные преимущества. Проблема состоит в том, что нет никакого строгого математического стандарта для принятия решений. Определение критерия остановки для расчета IMF является все еще актуальной темой, которая будет достигнута в реализации EMD. В настоящее время, все критерии можно осуществлять с некоторой степенью осторожности, т.к. полученные результаты удовлетворяют определению IMF только приблизительно.

### **5.3. Разработка вида отображения мод декомпозиции, визуальный анализ**

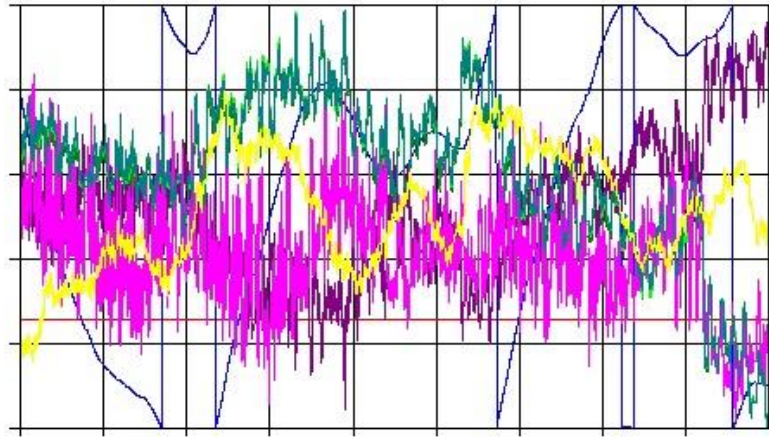
Второй вид отображения так же, как и для сигнальных ситуаций, является специализированным. Его функциональность тесно связана с задачами, с которыми будет сталкиваться специалист-технолог при анализе мод декомпозиции. Это одно из важных условий проектирования интерфейса, в результате чего интерфейс будет брать на себя лишнюю смысловую нагрузку

пользователя, позволив сконцентрировать внимание только на решении поставленных технологу задач. С другой стороны, интерфейс будет подсказывать пользователю некоторую дополнительную информацию, сохраняя контекст данных. За основной подход к проектированию интерфейсов было решено взять «Деятельностный» подход [18], который позволяет сделать интерфейс удобным в решении поставленных задач.

Интерфейс условно можно разделить на две области – это графическая часть и объект управления отображением. Рассмотрим подробнее каждую из них.

### **5.3.1. Графическая часть**

Под графической частью будем понимать область, где будут отображаться все выбранные в объекте управления сигналы или моды декомпозиции. Основная проблема, которая встала в этой части – это большая информационная нагрузка на одну область отображения. Как известно, проще всего визуально сравнивать графики простым методом наложения друг на друга. Когда сравниваются два – три сигнала, можно без особого труда сделать определенные выводы, провести визуальный анализ. Но когда их становится намного больше, то проводить визуальный анализ становится все труднее с каждым дополнительным графиком. Например, если отобразить все сигналы одного регистратора, а их в среднем около 10, как показано на рис. 6, то отображением будет разноцветное большое пятно, понять из которого будет что-то очень сложно. Это существенный недостаток такого отображения, а именно наложения графиков друг на друга, который очень трудно поддается исправлению. Поэтому одним из возможных путей решения этой проблемы является эффективная навигация по отображаемым данным, которая позволит сократить количество отображаемой информации, а также позволит упростить интерпретацию результата.



**Рис. 6.** Сильная загруженность отображения.

### **5.3.2. Дерево декомпозиции**

Теперь перейдем к основному объекту исследования вида отображения. Для этого проведем небольшой анализ прикладной области. Основной целью являются моды декомпозиции, их количество может быть от одной и более. Заметим, что для каждого сигнала прикреплен свой набор мод декомпозиции. Каждый сигнал принадлежит определенному устройству в топологии. Исходя из этих фактов, можно выделить древовидную структуру представления мод декомпозиции. Пусть в дальнейшем объект управления будет называться «дерево декомпозиции».

### **5.3.3. Проработка интерфейса дерева декомпозиции**

Воспользуемся тем свойством древовидной структуры, что все элементы дерева декомпозиции можно разделить на несколько групп: мода, сигнал, устройство, энергообъект и узел. Заметим тот факт, что сигналы могут содержать только моды, устройства могут содержать только сигналы. Узлы могут содержать как энергообъекты, так и устройства, в то время как энергообъекты могут содержать только устройства. Для упрощения визуализации можно объединить узлы и энергообъекты, и будет называть их просто энергообъекты.

Первое, что было исследовано – это добавление к элементам дерева декомпозиции возможности менять состояние «выбрано» или «не выбрано».

Самым простым и общепринятым способом выделения элементов является checkbox. Теперь подробнее рассмотрим каждую из групп элементов дерева. Что будет в случае, если пользователь выберет энергообъект? Исходя из стандартной логики дерева элементов, нужно установить то же состояние выбора для всех дочерних элементов. А это будет значить, что в случае положительного выбора энергообъекта будут выбраны все его устройства, далее все сигналы выбранных устройств и далее все рассчитанные моды выбранных сигналов. На области отображения графиков будет снова разноцветное пятно, работать с которым не представляется возможным. Поэтому было принято решение убрать checkbox из представления группы энергообъектов. Та же картина будет происходить и при выборе устройства, у которого несколько сигналов и каждого из них несколько мод декомпозиции. Поэтому у группы устройств было принято убрать из представления checkbox. Следующая по иерархии группа элементов – это сигналы. Следует заметить, что отображение графика сигнала – это основное из составляющих анализа данных. Поэтому checkbox нужно оставить. С другой стороны стандартное поведение древовидной структуры в данном случае играет отрицательную роль, а именно выделение дочерних элементов при выделении родителя. Это влечет появление на графике всех мод декомпозиций. Поэтому от такой функциональности было решено отказаться в принципе на всем дереве. Если посмотреть на это со стороны пользователя, то такой функционал оказывается весьма удобным. Пользователь выбирает для отображения только то, что он хочет.

#### **5.3.4. Этап подготовки к анализу**

Рассмотрим другой аспект дерева декомпозиции. Как было замечено выше, рассматриваются древовидные элементы. Но вся топология системы содержит тысячи элементов. Поэтому возникает другая проблема: пользователь работает с несколькими устройствами, а отображаются абсолютно все. Получается, что в условиях решаемой задачи дерево

перегружено лишней информацией. Поэтому перед началом работы пользователю будет необходимо выбрать устройства, необходимые для анализа. Это действие можно выделить в отдельный инструмент, предшествующий инструменту анализа мод декомпозиции.

На данном этапе представляется дерево со всей топологией системы, а также график наличия данных. По горизонтальной оси системы координат отображается время, а по вертикальной – наличие данных у выбранного устройства. Таким образом, если у выбранного устройства есть какие-либо данные, на графике отображается набор точек, соответствующий времени данных (рис. 7). Дерево состоит из тех же групп, как описано в 5.3.3, за исключением мод декомпозиции (они рассчитываются отдельно на следующем этапе).

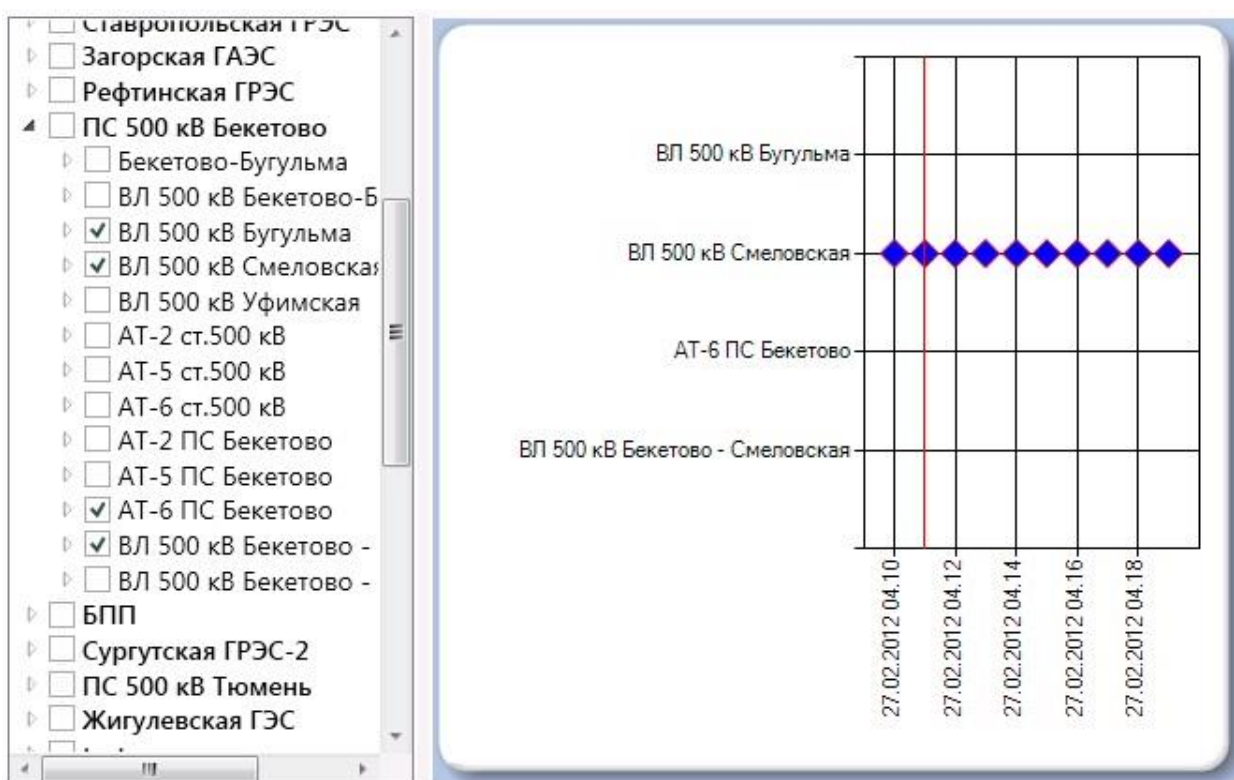
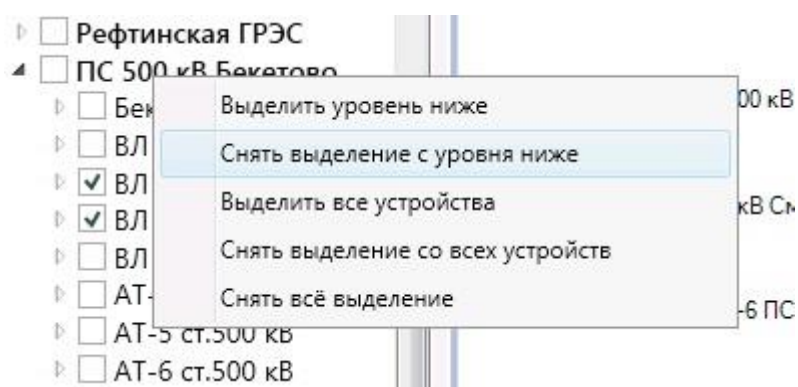


Рис. 7. Подготовительный этап.

Задачу можно сформулировать следующим образом: определить наличие данных по устройствам и выбрать только необходимые для анализа.

В данном случае возможность выбора меняется в точности наоборот. Но возможность выбора всех дочерних элементов также отсутствует, вместо этого эта функциональность переведена в контекстное меню. Так, кликнув правой кнопкой мыши, можно выбрать одно из четырех действий: «выбрать уровень ниже», «убрать выделение с уровня ниже», «выбрать все устройства», «снять выделение со всех устройств», «убрать всё выделение», как показано на рисунке ниже.



**Рис. 8.** Контекстное меню подготовительного этапа.

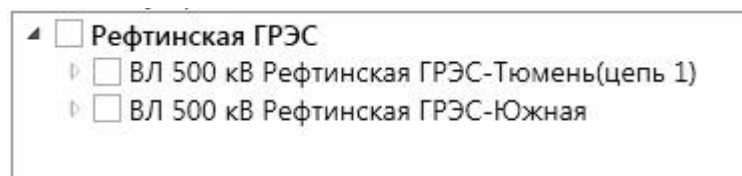
Команды «выбрать уровень ниже», «убрать выделение с уровня ниже» установят указанные значения для всех дочерних элементов независимо от группы по отношению к тому, от кого применена команда. Вся работа на этом этапе заключается в выделении нужных устройств, поэтому команды «выбрать все устройства», «снять выделение со всех устройств» позволяют одной командой показать или скрыть на графике данные по все устройствам, которые иерархически расположены ниже выбранного элемента, и посмотреть на сложившуюся картину. А потом, например, убрать устройства без данных. Команда «убрать всё выделение» сбрасывает с выбранного элемента и всех иерархически расположенных ниже элементов состояние выбора. Следует отметить, что комбинацией этих команд можно быстро отобразить на графике практически любой интересующий набор данных.

Данное отображение содержит дополнительную функциональность по сворачиванию строк устройств одной группы в одну строку, при этом все



данные объединяются. Это происходит, когда общий родитель группы находится в состоянии «выбран». Тем самым можно свернуть необязательную группу данных в одну строку и продолжить исследование, при этом относительная картина наличия данных сохраняется.

Вернемся к переходу между этапами. Чтобы определить устройства для анализа, как уже говорилось выше, сначала нужно увидеть, есть ли у данного устройства какие-либо данные. Если данных по устройству нет, то и анализ по нему проводить не имеет смысла, а значит, что подобные устройства не будут передаваться в следующий этап, и не будут загромождать дерево декомпозиции. В результате фильтрации по такому принципу на следующий этап будет передаваться набор устройств, необходимых для анализа. Здесь скрывается другая проблема, связанная с тем, что устройства могут относиться к разным узлам энергосистемы, а могут принадлежать одному энергообъекту. И из переданных устройств никак не будет следовать эта информация. Поэтому было решено передавать на второй этап минимальное поддереву, содержащее выбранные устройства, как показано на рис. 9. Таким образом все устройства оказываются разнесены по соответствующим энергообъектам, эти энергообъекты можно будет сворачивать, тем самым выделяя подмножества устройств, исследуемых в конкретный момент времени.



**Рис. 9.** Минимальное поддереву, содержащее два устройства.

В результате применения научного подхода, анализ мод декомпозиции разбился на два этапа: подготовительный этап и непосредственно сам анализ. Основное преимущество данного разбиения заключается в фильтрации устройств, не участвующих в проведении анализа данных.

### 5.3.5. Расчет мод декомпозиции

Для оптимизации работы интерфейса моды декомпозиции рассчитываются по запросу пользователя после разворачивания окна второго этапа. Сам по себе расчет мод занимает значительное время, а если расчет нужно провести по нескольким сигналам, то время многократно увеличивается.

Для того чтобы выполнить расчет по выбранным сигналам, достаточно будет нажать на кнопку декомпозиции, после чего появится окно настроек декомпозиции, где задаются все параметры, участвующие в нем. Таким образом, моды для всех выбранных сигналов рассчитываются с одинаковыми характеристиками, что позволяет сравнивать их в одинаковых условиях. После проведения расчетов в выбранных сигналах появляются дочерние элементы, состоящие из рассчитанных мод декомпозиции. Данные элементы имеют возможность изменять состояние выбора, влияющее на отображение графика указанной моды. Таким образом, дерево декомпозиции содержит всю необходимую информацию для сравнения графиков сигналов и их мод. Выбором необходимых сигналов или мод можно отобразить на системе координат любой набор графиков.



Интервал:	7	<input checked="" type="checkbox"/> Итераций:	20
Шаг:	1	<input checked="" type="checkbox"/> Мод:	3

Рис. 10. Окно настроек декомпозиции.

### 5.4. Выводы

В результате проведенной работы был получен удобный и интуитивно понятный интерфейс инструмента, который позволил специалисту эффективно проводить визуальный анализ сигналов и их составляющих мод. Деятельностный подход к проектированию функциональности инструмента позволил разработать такой интерфейс, который помогает сконцентрировать внимание специалиста только на его поставленных задачах, не тратя время на лишние действия.

## **6. Заключение и основные результаты**

В ходе исследований проанализированы методики графического представления данных, зависящих от времени, а также проанализированы подходы к проектированию интерфейсов. В результате чего были выбраны наиболее подходящие типы отображений в рамках поставленных задач и требований к функциональности.

Для задачи отображения сигнальных ситуаций в рамках поддержки функциональных задач технолога по анализу архивных данных было реализовано отображение, в основе которого лежит диаграмма Ганта. Полученная специализированная система визуализации внедрена в АС СИ СМПП, используемой в филиалах СО ЕЭС России. Диаграммный вид позволил извлекать информацию, которая может быть получена только в результате визуального сравнения поведения разных регистраторов.

Для задачи проведения визуального анализа сигналов и их разложения на «эмпирические моды» был разработан вспомогательный инструмент, в отображении которого за основу взята древовидная структура элементов. Данный инструмент позволил проводить визуальный анализ более быстро и эффективно.

Каждый из видов отображения дорабатывался согласно деятельностному подходу, использование которого оказалось плодотворным в рамках задач, поставленных в магистерской диссертации. Практика показала, что этот подход будет эффективным для проектирования любого вида специализированных инструментов, т.к. является наиболее приближенным к решаемым в конкретных случаях проблемам.

## 7. Список литературы

1. Система мониторинга переходных режимов для объектов РАО "ЕЭС России", Энергетик 7/2006. URL: <http://www.rtsoft.ru/press/articles/detail.php?ID=1501>.
2. Жуков А.В., Демчук А.Т., Дубинин Д.М. (ОАО «СО ЕЭС») Сборник докладов XXI конференции «Релейная защита и автоматизация энергосистем», Развитие технологий векторной регистрации параметров противоаварийного режимного управления электрическими режимами энергосистем, стр. 232-245.
3. МИП-02 - Многофункциональный измерительный преобразователь, общая информация, ЗАО «РТСофт». URL: <http://www.rtsoft.ru/catalog/plk/mer/detail/316/>
4. А.В. Жуков, Ю.П. Захаров, П.Ю. Коваленко, М.А. Лагуткина, О.Л. Опалев, Н.Г. Шубин, А.В. Юдин. Применение модального анализа для исследования низкочастотных колебаний – Материалы III международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Екатеринбург, 2012.
5. Авербух В.Л., Байдалин А.Ю., Бахтерев М.О., Васёв П.А., Казанцев А.Ю., Манаков Д.В., Опыт разработки специализированных систем научной визуализации // Научная визуализация. Квартал 4. Том 2. Номер 4. 2010. Стр. 27-39.
6. *Rosenberg D., Grafton A. Cartographies of Time: A History of the Timeline*, 2009, 272 p.
7. Кожевин А.В., Топорков Д.Н., Разработка вида отображения сигнальных ситуаций СМПП // Научная визуализация. Квартал 1. Том 5. Номер 1. 2013. Стр. 48-56.

8. *Авербух В.Л.* Визуализация программного обеспечения. Конспект лекций. Екатеринбург. Математико-механический факультет УрГУ. 1995.
9. Диаграмма Ганта // Википедия. [2009—2012]. Дата обновления: 04.07.2012. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=45839653>
10. Visualization in Scientific Computing, Special Issue, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, V. 21, N 6, November 1987.
11. *Soegaard M.* (2011) Gestalt principles of form perception. URL: [www.interaction-design.org/encyclopedia/gestalt\\_principles\\_of\\_form\\_perception.html](http://www.interaction-design.org/encyclopedia/gestalt_principles_of_form_perception.html)
12. Оперативно-информационный комплекс СК-2007С, ЗАО "Монитор Электрик", URL: <http://www.monitel.ru/products/ck-2007c/overview.html>
13. Бушуев В.В. Динамические свойства электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
14. J.R. Yeh, J.S. Shieh, N.E. Huang, Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis* 2 (2010) 135–156.
15. Huang, N. E. et al. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 454: 903-995.
16. Flandrin, P. Rilling, G. and Goncalves, P. (2004). Empirical mode decomposition as a filter bank. *Signal Processing Letters, IEEE*, 11(2): 112-114.
17. Huang, N. E. et al. (2003). A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 459: 3217-2345.
18. Averbukh V., Averbukh N., Semenishev D., Activity Theory In Practice Of Design And Development Of Human-Computer Interfaces // *Современные*

компьютерные и информационные технологии: сборник трудов международной научной Российско-Корейской конференции, 16 - 18 мая 2012 года. Екатеринбург: УрФУ, 2012, с.86-96.