

Модальный анализ низкочастотных колебаний в энергосистеме

А.В.ЖУКОВ, О.Л.ОПАЛЕВ
ОАО «СО ЕЭС»
Ю.П. ЗАХАРОВ, П.Ю.КОВАЛЕНКО
УрФУ,
А.В. ЮДИН
Филиал ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Урала
Россия
kovalenko@nipt-ems.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Система мониторинга переходных режимов, синхронизированные векторные измерения, низкочастотные колебания в энергосистеме, идентификация параметров низкочастотных колебаний, модальный анализ, метод эмпирической модовой декомпозиции.

1 ВВЕДЕНИЕ

Создание Системы мониторинга переходных режимов Единой энергетической системы (СМПР ЕЭС) инициировано Системным оператором в 2005 году. На протяжении восьми лет в ОАО «СО ЕЭС» ведется работа по развитию инфраструктуры сбора данных и применению синхронизированных векторных измерений в технологиях диспетчерского и автоматического управления [1,2]. СМПР – высокотехнологичная система, базирующаяся на технологии синхронизированных векторных измерений параметров электромеханических переходных режимов [3].

По состоянию на апрель 2013 года сбор данных СМПР производится с 43 энергообъектов ЕЭС (207 устройств синхронизированных векторных измерений, *Phasor measurement unit – PMU*), из них в режиме реального времени – с 20 энергообъектов.

Результатом работы по созданию автоматической системы сбора информации с регистраторов переходных режимов в режиме *on-line* и *off-line* (АС СИ СМПР) стал ввод системы в промышленную эксплуатацию и ее интеграция с оперативно-информационным комплексом Системного оператора. Узлы АС СИ СМПР развернуты в исполнительном аппарате ОАО «СО ЕЭС», Филиалах ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Юга, Северо-Запада, Средней Волги, Урала, Сибири, Тюменском и Саратовском РДУ.

Таким образом, СМПР ЕЭС является инструментом сбора синхронизированных векторных измерений и позволяет осуществлять непрерывный мониторинг режима работы энергосистемы, а также решать задачи повышения эффективности оперативно-диспетчерского и автоматического управления за счет использования новейших средств измерения.

Одним из наиболее приоритетных аспектов применения системы является мониторинг низкочастотных (НЧ) колебаний параметров электрического режима, поскольку ЕЭС России характеризуется наличием протяженных и относительно слабых межсистемных связей и, как следствие, возможностью возникновения квазиустановившихся режимов со слабо демпфированными колебаниями режимных параметров в диапазоне частот $0,1 \div 3,0$ Гц с угрозой нарушения устойчивости энергосистемы.

Начиная с 2006 года в ОАО «СО ЕЭС» на основе данных СМПР ведется мониторинг НЧ колебаний в режиме *off-line*, что позволяет исследовать динамические свойства системы, оценивать эффективность работы АРВ сильного действия, вырабатывать рекомендации по оптимизации настроек каналов системной стабилизации АРВ на действующих энергообъектах.

ОАО «СО ЕЭС» и ОАО «НТЦ ЕЭС» ведут разработку программного комплекса мониторинга НЧ колебаний. Комплекс использует данные АС СИ СМР и в перспективе должен работать в режиме реального времени.

ПК «Мониторинг низкочастотных колебаний» выполняет следующие функции:

- выявление (идентификация) и фиксация аварийных событий;
- идентификация НЧ колебаний и определение их параметров: частоты, амплитуды, коэффициента демпфирования;
- определение опасных НЧ колебаний;
- идентификация вероятного источника колебаний и объектов, попавших в зону колебаний по амплитуде частоты.

В основу исследования НЧ колебаний режимных параметров положен модальный анализ рассматриваемых процессов.

Модальный анализ основан на выделении доминантных мод колебаний параметров электрического режима, определении и сопоставлении их характеристик на рассматриваемом интервале времени. К характеристикам, как правило, относятся частота, амплитуда, фаза колебаний и коэффициент демпфирования.

В качестве математического аппарата модального анализа выбран эмпирический метод декомпозиции (*Empirical mode decomposition – EMD*), представляющий собой последовательную вычислительную процедуру разложения исходных данных (непрерывных или дискретных сигналов) на «эмпирические моды» или внутренние колебания – *IMF (intrinsic mode functions)* [4]. Применение данного метода к частотно-временному анализу параметров электрических режимов ЭЭС является наиболее приемлемым, поскольку он предназначен для исследования нелинейных нестационарных процессов за счет применения адаптивного базиса, функционально зависящего от содержания данных.

Целью исследования является установление критериев идентификации источника низкочастотных колебаний (например, ошибочно настроенный или неверно функционирующий регулятор), а также предположительных мер препятствования развитию колебаний – разгрузка соответствующего оборудования, корректировка параметров работы систем управления и т.д.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НЧ КОЛЕБАНИЙ

Для апробации метода исследования низкочастотных колебаний на основе разработанных алгоритмов были проведены тестовые расчеты. Подробное описание расчетов приведено в [5].

В процессе расчетов были выявлены следующие закономерности:

- Для моды частоты в узлах
 - Наименьшая фаза моды частоты (φ_{f_0}) в начале НЧК – индикатор близости узла к месту возмущения.
 - Наибольшее абсолютное значение скорости изменения частоты моды в узле в начале НЧК – индикатор близости узла к месту возмущения.
 - Противофаза мод частоты в узлах указывает на то, что генераторы в этих узлах колеблются в противофазе.
- Для моды мощности в узлах
 - Генератор активно участвует в данной моде (участвует в демпфировании на интервалах цикла НЧК), если фаза моды колебаний его активной мощности отстает от моды частоты на угол до 90° . [6].
- Для моды мощности в линиях

- Амплитуды НЧК активной мощности принимают наибольшее значение в ВЛ (сечениях), связывающих районы, в которых генераторы колеблются в противофазе, или между колеблющимися генераторами и остальной системой
- АРВ генератора участвует в демпфировании колебаний, если мода тока возбуждения (реактивная мощность) находится в противофазе с его модой напряжения.
- Соотношения параметров мод
 - Группы когерентных генераторов могут быть идентифицированы по амплитуде и фазе мод колебаний их частоты и мощности.

Из приведенных результатов следует, что анализ амплитуд и фаз мод НЧК позволяет определить местоположение колеблющихся генераторов, а так же по каким направлениям передается обменная мощность при колебаниях (качаниях) генераторов [7].

Одним из направлений исследования является идентификация источника колебаний. Идентификацию источника можно выполнить на основании анализа участия синхронных генераторов в циклах НЧК (демпфирует, «раскачивает» или пассивен). Количественная оценка роли генератора в циклах НЧК может быть реализована путем анализа поведения его синхронизирующей мощности (P_{CM}). При правильной настройке системных регуляторов P_{CM} всегда противодействует изменению частоты системы, прикладывая синхронизирующий момент и действуя на уменьшение скольжения.

Для точного определения синхронизирующей мощности требуется измерение угла нагрузки генератора и величины скольжения. Для этого необходимы непосредственные измерения угловой скорости и положения ротора. Приближенная оценка угла нагрузки генератора может быть получена с использованием характеристики холостого хода и параметров обмотки возбуждения.

В настоящее время проводятся исследования реальных данных с применением ПК «Мониторинг низкочастотных колебаний» с целью подтверждения закономерностей, выявленных в тестовых расчетах. В качестве исходных данных для исследования рассмотрены реальные измерения низкочастотных колебаний, зафиксированных в 2011 году регистратором (СМПП), установленным на энергоблоке одной из электростанций ОЭС Урала, которые через 8 минут были устранены оперативной (неавтоматической) разгрузкой энергоблоков указанной электростанции [8]. Колебания затронули несколько объектов энергосистемы, характеристики колебаний на них приведены в таблице 1. Для иллюстрации приведены записи колебаний активной мощности на рисунках 1-5.

В зону наибольших качаний попал объект 1, локализация зоны проводилась по амплитуде доминантных мод частоты и активной мощности. При этом считалось, что доминантные моды в составе процесса отсутствуют, если амплитуды мод частоты не превышают 0,01Гц, а амплитуды мод активной мощности – 5% от текущей мощности блока или перетока по ВЛ. Данные ограничения не являются окончательными и подлежат адаптации к конкретным исследуемым объектам в соответствии с целями исследования. В частности, для работы в режиме on-line критерии отбора доминантных мод предполагается определять дифференцированно для различных объектов.

Табл. 1: Характеристики НЧК на объектах.

Объект (выделена одна мода на объекте)	Частота			Активная мощность		
	Амплитуда (Гц) макс./нач./средн.	Частота (Гц) средн.	Фаза (°) $t=90c$	Амплитуда (МВт) макс./нач./средн.	Частота (Гц) средн.	Фаза (°) $t=90c$
Объект 1	0,2933/0,2890/0,0932	0,8464	358,47	199,91/180,31/61,44	0,8465	292,92
Объект 2	0,0285/0,0565/0,0094	0,8532	221,77	7,68/26,30/1,75	0,8594	112,48
Объект 3	Доминантных мод нет			43,36/71,92/13,02	0,8383	260,92
Объект 4	0,196/0,0463/0,0052	0,8453	340,26	41,79/66,83/12,53	0,8425	260,67
Объект 5	Доминантных мод нет			Доминантных мод нет		

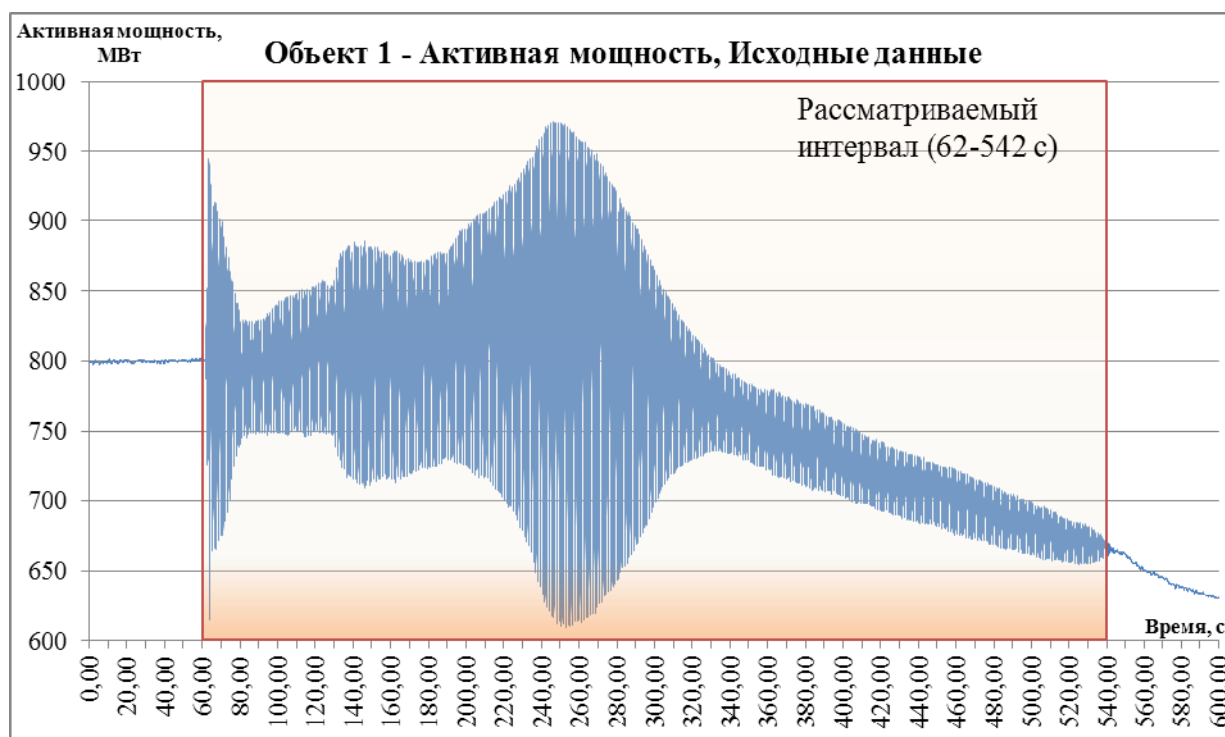


Рис. 1: НЧК активной мощности на объекте 1

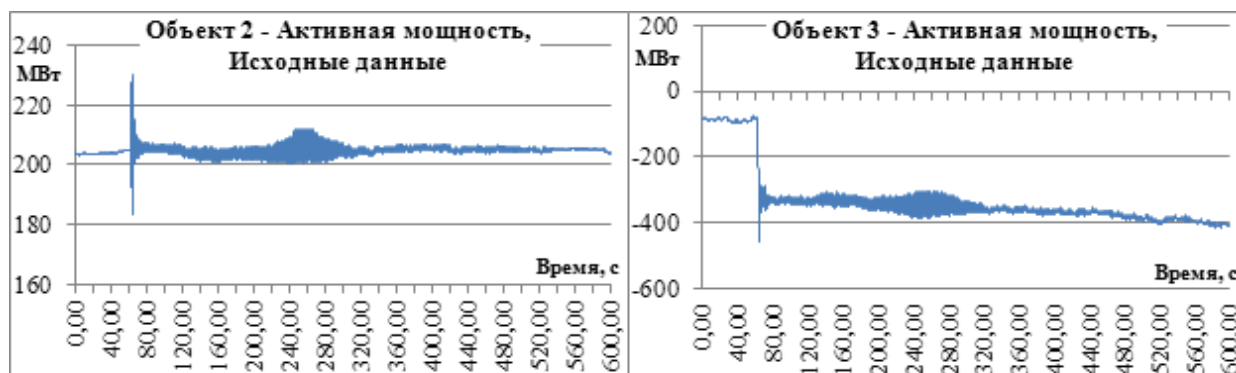


Рис. 2: НЧК активной мощности на объектах 2 и 3

Следующим этапом работы по применению модального анализа для исследования НЧ колебаний является определение чувствительности модальных характеристик к изменению схемно-режимных условий, что позволит не только реагировать на текущие возмущения, но и заблаговременно предупреждать о возможных угрозах.



Рис. 3: НЧК активной мощности на объектах 4 и 5

Для решения данной задачи прибегают к трем основным методам:

1. Анализ реакции на событие.

Изменение архитектуры сети (переключения ВЛ, внедрение гибких систем передачи энергии и т.д.), изменение количества агрегатов и, соответственно, мощностей станций, вывод в ремонт оборудования (например, секций шин подстанций, реакторов) заметно влияет на величины модальных характеристик. Например, если при непрерывном мониторинге удастся установить факт резкого снижения демпфирования в ответ на ввод нового оборудования, то на это, безусловно, должно быть обращено пристальное внимание.

2. Долгосрочный статистический анализ

Метод состоит в применении методов статистического анализа для определения линейных и нелинейных зависимостей (взаимосвязей) между параметрами электрического режима и модальными характеристиками НЧ колебаний.

3. Анализ собственных векторов системы

Метод состоит в расчете для верифицированной динамической модели энергосистемы собственных векторов, определяющих частоты мод колебаний, их характеристики, а так же чувствительности к изменению параметров электрического режима.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В мировой практике анализу НЧ колебаний в энергосистемах уделяется значительное внимание в силу современных тенденций развития энергетики (в частности, внедрение малой генерации – как традиционной, так и на возобновляемых источниках энергии), а также потенциальной опасности колебательных процессов в условиях синхронной работы энергообъединений.
- Модальный анализ – инструмент, предоставляющий широчайшие возможности исследования колебательных явлений в энергосистемах; метод *EMD*, используемый в качестве математического аппарата модального анализа, соответствует характеру протекающих в энергосистеме процессов – нелинейному и нестационарному.
- Алгоритмы, разработанные в рамках ПК «Мониторинг низкочастотных колебаний» обеспечивают выполнение модального анализа данных СМНР, тем самым адаптируя успешный зарубежный опыт для применения в специфических условиях ЕЭС России.
- Важнейшим практическим применением модального анализа параметров режима по данным СМНР может стать контроль возникновения НЧ колебаний, обеспечение соответствующих мер предотвращения развития колебаний, корректировка настроек регулирующей аппаратуры во избежание дальнейшего появления колебательных процессов, а также верификация расчетных моделей энергосистем на основе сравнения модальных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н. Шульгинов, Л. Кошечев, А. Жуков, А. Демчук Повышение эксплуатационной надежности ЕЭС России средствами противоаварийного автоматического управления – Материалы 43ей сессии СИГРЭ, 2010г.
- [2] Демчук А.Т., Жуков А.В., Кац П.Я., Данилин В.А. Система мониторинга запасов устойчивости энергосистемы с использованием технологии векторного измерения параметров// Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. Сб. тр. Международной научно-технической конференции, Москва, 2009.
- [3] Аюев Б.И. О системе мониторинга переходных режимов. Энергорынок, №2, 2006.
- [4] CIGRE C4.601. Выявление колебательных мод. Август, 2007.
- [5] 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.
- [6] Identifying sources of damping issues in the icelandic power system Douglas Wilson, Karine Hay, Patrick McNabb и др. 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008.
- [7] McNabb et al: "Dynamic Model Validation of the Icelandic Power System using WAMS based Measurement of Oscillatory Stability", PSCC, Glasgow UK, July 2008.
- [8] Павлушко, С.А. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных генераторов как эффективный инструмент обеспечения надежности параллельной работы генерирующего оборудования и ЕЭС в целом. – М.: Электрические станции, 07/2012.