

Методы исследования нелинейных и нестационарных свойств низкочастотных колебаний в энергосистеме

А.С.БЕРДИН, А.С. ГЕРАСИМОВ
ОАО «НТЦ ЕЭС», Россия
Ю.П. ЗАХАРОВ, П.Ю.КОВАЛЕНКО
УрФУ, Россия
Н.Г.ШУБИН
ЗАО «РТСофт», Россия
kovalenko@niipt-ems.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Система мониторинга переходных режимов, синхронизированные векторные измерения, низкочастотные колебания энергосистеме, метод эмпирической модовой декомпозиции, преобразование Гильберта.

1 ВВЕДЕНИЕ

Настоящий этап развития энергетики характеризуется наличием соединенных относительно слабыми связями крупных концентрированных энергосистем, в состав которых активно включаются мощности распределенной генерации. Изменение состава генерации и структуры электропотребления приводит к уменьшению постоянной инерции элементов энергосистем, повышая чувствительность параметров режима энергосистемы в целом к небольшим возмущениям. В целях повышения управляемости энергосистем внедряется новое оборудование, оснащенное современными быстродействующими устройствами регулирования: асинхронизированные синхронные генераторы, FACTS, накопители энергии. В результате помимо полезных эффектов энергосистема приобретает также и некоторые негативные свойства, проявляющиеся, в частности, в возникновении низкочастотных ($0,1 \div 3,0$ Гц) общесистемных колебаний ее режимных параметров. Важность и сложность задачи обеспечения устойчивости энергосистем при возникновении таких колебаний привели к необходимости разработки новых методов ее оценки, основанных на тщательном изучении динамических свойств энергообъединений.

Динамические свойства современной энергосистемы характеризуются многочастотностью. В литературе принято частотные составляющие, характеризующие взаимные качания роторов синхронных машин, называть электромеханическими колебаниями, а частотные составляющие, проявляющиеся в системах регулирования возбуждения – электромагнитными колебаниями.

Как правило, собственные частоты электромеханических колебаний расположены в диапазоне $0,1 \div 2,0$ Гц. Среди них имеются как локальные, так и общесистемные колебания, охватывающие практически всю энергосистему. Локальные колебания характеризуют параметры взаимных качаний синхронных машин в подсистемах, общесистемные – качания подсистем или групп генераторов относительно друг друга.

Верхнюю часть спектра низкочастотных синхронных колебаний ($1,5 \div 3,0$ Гц) составляют собственные частоты электромагнитных процессов энергосистемы.

Для автоматизированного анализа таких регистрируемых процессов в энергосистемах нужны методы, способные обеспечить их уверенную идентификацию по частоте и амплитуде во времени. Это необходимо для локализации всего спектра низкочастотных колебаний ($0,1 \div 3,0$ Гц), идентификации нелинейных нестационарных процессов в системах автоматического

управления. В настоящее время в России не в полной мере изучены вопросы идентификации и превентивного демпфирования низкочастотных колебаний, отсутствует утвержденная методика. Исследование, проводимое в рамках данной работы, направлено на преодоление этого пробела.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЧК

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 анализируемых сигналов, существенное влияние на выбор метода оказывают также практические возможности системы сбора информации. Одной из задач данного исследования является выбор метода, применение которого наилучшим образом позволит идентифицировать характеристики низкочастотных колебаний энергосистемы.

Применяемые в настоящее время методы частотно-временного анализа условно могут быть разбиты на группы, в зависимости от области их корректного применения.

К первой группе можно отнести методы, использующие преобразование Фурье и предназначенные для исследования линейных и стационарных процессов. Основным их достоинством является хорошо проработанная, законченная теория. К недостаткам следует отнести использование априорно заданного базиса (функций синуса и косинуса, меандровых функций Уолша) и затрудненность получения информации о локализации во времени компонент сигнала [1].

Ко второй группе методов, предназначенных для исследования линейных нестационарных процессов, можно отнести вейвлет-анализ, сингулярный анализ, методы Вигнера-Вилла и Прони. Достоинством этих методов является получение информации о спектральном составе исследуемого процесса и его изменении во времени или пространстве. К недостаткам следует отнести использование априорно заданного базиса (вейвлеты Хаара, Мейера и др.), что вносит дополнительную погрешность в результат исследования [2].

К третьей группе следует отнести метод эмпирический модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD), предназначенный для исследования нелинейных нестационарных процессов. Основным достоинством метода является формирование адаптивного базиса, функционально зависящего от содержания самих данных [3].

Результаты сравнительного анализа трех групп методов частотно-временного анализа приведены в таблице 1.

Табл. 1: Результаты сравнительного анализа методов частотно-временного анализа

Характеристика процесса	Линейный, стационарный	Линейный, нестационарный		Нелинейный, нестационарный
Метод анализа	Фурье	Вейвлет-анализ, Вингер-Вилл, метод Прони и др.	Singular Spectral Analysis (SSA) – метод «Гусеница»	Empirical Mode Decomposition (EMD)
Базис	Априорно	Априорно	Адаптивный	Адаптивный
Индикация (оцениваемые параметры)	Амплитуда – частота	Амплитуда – время – частота		Амплитуда – время – частота
Особенность извлечения составляющей	нет	нет (искл.: непрерывный вейвлет-анализ)	нет	да
Теоретическое ядро	Законченная теория	Законченная теория с продолжающимся усовершенствованием отдельных методов		Эмпирический метод с продолжающимся усовершенствованием отдельных процедур

Реальные (измеренные) данные для анализа энергосистем редко бывают хорошего качества. Необходимость предварительной обработки при анализе данных возникает независимо от того, какие технологии и алгоритмы используются. К задачам «очистки» данных относятся

заполнение пропусков, редактирование аномалий, сглаживание, обнаружение дубликатов и противоречий и т.д. Следует отметить, что все это приводит к возникновению дополнительной погрешности. Анализ данных, получаемых от объектов энергосистем, указывает на то, что, как правило, измеряемые параметры являются нелинейными и нестационарными величинами. В связи с этим, для идентификации низкочастотных колебаний и определения их характеристик целесообразно применять метод EMD.

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) [4, 5].

Эмпирическая мода – это функция, обладающая следующими свойствами:

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

IMF представляет собой циклическую функцию с переменными во времени амплитудой и частотой, в отличие от простой гармоники, характеризуемой постоянными амплитудой и частотой. Любую функцию и любой произвольный сигнал можно разделить на семейство функций IMF.

Эмпирические моды, в отличие от гармонического анализа, где модель (дискретного или непрерывного) сигнала задается заранее, вычисляются в ходе процесса путем извлечения непосредственно из реального сигнала. Разложение на эмпирические моды позволяет анализировать локальные явления, поэтому данный метод применим при обработке нестационарных временных рядов (или процессов).

Базис EMD обладает важными для практических приложений свойствами: ортогональностью, локальностью, полнотой и адаптивностью. Эти свойства чрезвычайно важны. В частности, полнота базиса гарантирует конечное количество мод, если сигнал имеет конечное число степеней свободы (конечную длительность, а значит, конечную энергию). Полнота базиса обусловлена тем, что число экстремумов, по которым строятся огибающие, уменьшается с увеличением номера моды, а значит, в конечном итоге будет выделен результирующий остаток, который невозможно декомпозировать в дальнейшем. Это произойдет тогда, когда остаточный сигнал не будет иметь либо ни одного максимума, либо ни одного минимума. Такой результирующий остаток представляет собой либо константу, либо тренд среднего значения. Отсюда вытекает одно из приложений метода EMD – исключение тренда среднего из сигнала.

В центре внимания теории метода EMD в настоящее время стоят следующие математические задачи:

- адаптивная методология анализа данных;
- нелинейная системная идентификация;
- прогнозирование для нестационарных процессов (для нейтрализации концевых эффектов);
- сплайновые задачи;
- задачи об оптимизации (лучший выбор IMF);
- задачи о приближении (Гильбертово преобразование и квадратура);
- смешанные вопросы относительно EMD.

Декомпозиция, применяемая в методе EMD, основана на предположении, что любые данные на некотором временном интервале могут состоять из различных сосуществующих внутренних колебаний, наложенных одно на другое. Каждое колебание, линейное или нелинейное, стационарное или нестационарное, представляет собой модовую функцию, которая в определенной степени «симметрична» относительно локального среднего значения, а, следовательно, имеет экстремумы и нулевые пересечения. Суть метода EMD заключается в последовательном вычислении эмпирических мод $c_j(t)$ и остатков $r_j(t) = r_{j-1}(t) - c_j(t)$, где $j = 1, 2, 3 \dots n$ при $r_0 = x(t)$. В результате, получается разложение сигнала в виде суммы модовых функций $c_j(t)$ и конечного остатка $r_n(t)$:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t),$$

где $x(t)$ – анализируемый сигнал; n – количество эмпирических мод, которое устанавливается в ходе вычислений.

Анализ амплитуд и фаз мод позволяет определить расположение колеблющихся генераторов, а также направления формирования путей, по которым передается обменная мощность при колебаниях (качаниях) генераторов [6, 7].

Разница фаз колебаний может быть использована для идентификации источника колебаний. Так, если генератор участвует в моде, то колебания мощности на частоте моды отстают от колебаний угловой скорости (частоты) на 90° . Вблизи генератора по местному замеру частоты можно судить об угловой скорости генератора [4].

Для определения мгновенных значений параметров колебательных процессов (амплитуда, частота, фаза) во времени применяется преобразование Гильберта [8].

Обсуждаемые методы тестировались на реальных измерениях низкочастотных колебаний, зафиксированных в 2011 году регистратором системы мониторинга переходных режимов (СМПР), установленным на энергоблоке одной из электростанций ОЭС Урала, которые через 8 минут были устранены оперативной (неавтоматической) разгрузкой энергоблоков указанной электростанции [9].

Колебания затронули несколько объектов энергосистемы, характеристики колебаний на них приведены в таблице 2. Запись колебаний активной мощности представлены на рисунке 1. Для иллюстрации подхода, описанного выше, приведен анализ НЧК активной мощности на объекте 1. Результат разложения приведен на рисунке 2, основные характеристики модовых составляющих сведены в таблицу 3.

Табл. 2: Характеристики НЧК на энергообъектах

Объект (выделена одна мода на объекте)	Частота (Гц)			Активная мощность (МВт)		
	Амплитуда (Гц) макс./нач./средн.	Частота (Гц) средн.	Фаза (°) $t=90c$	Амплитуда (Гц) 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	0,196/0,0463/0,0052	0,8453	340,26	41,79/66,83/12,53	0,8425	260,67
Объект 4	Колебаний не выявлено			Колебаний не выявлено		



Рис. 1: НЧК активной мощности на объекте 1

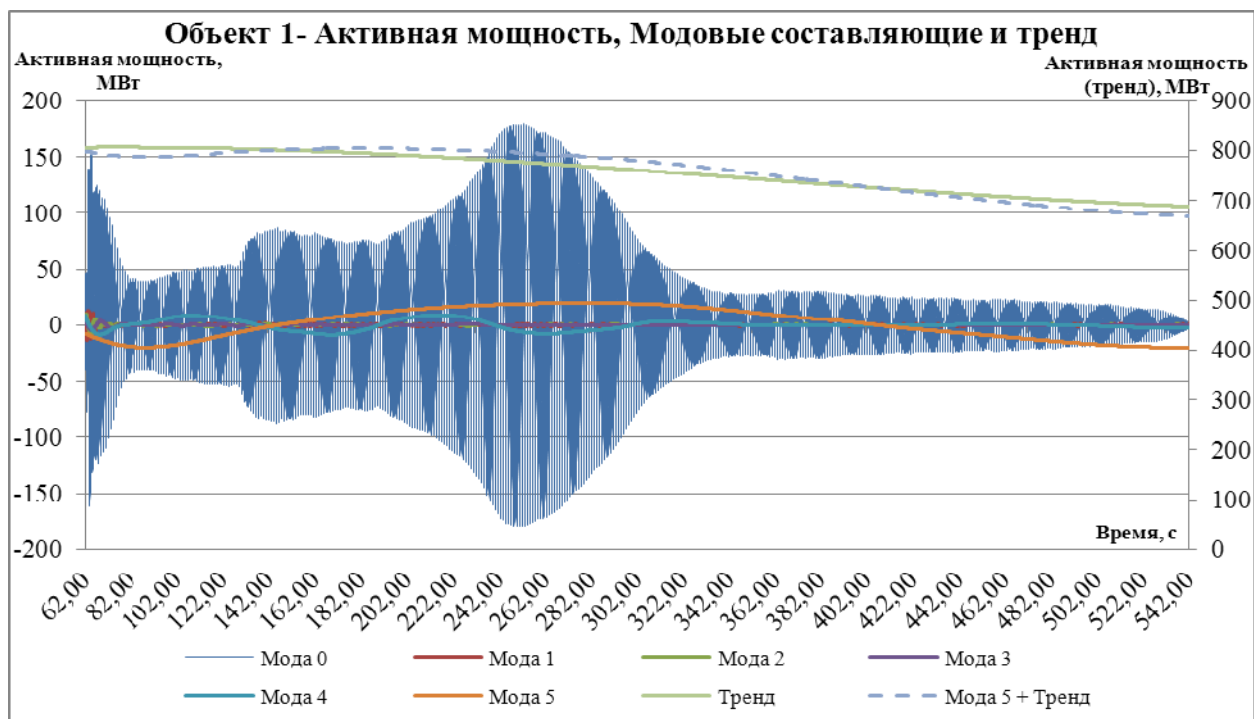


Рис. 2: НЧК активной мощности на объекте 1 – Модовые составляющие и тренд

Табл. 3: Характеристики НЧК на объекте 1.

Мода	Амплитуда (макс)	Для моды 0:
0	199,9104	Амплитуда (нач.)
1	2,0187	180,3118
2	1,0742	Амплитуда (сред.)
3	0,8698	61,4421

4	8,9267	Частота (средн)
5	19,6944	0,8465
		Фаза ($t=90с$)
		292,9239

В процессе исследований было выявлено, что при использовании классического преобразования Гильберта на выборках реальных данных возникают искажения пульсирующего характера при определении мгновенных характеристик низкочастотных колебаний, что показано на рисунке 3 (а). Преобразование Гильберта было модифицировано авторами таким образом, что наведенные пульсации были значительно снижены (рисунок 3 (б)).

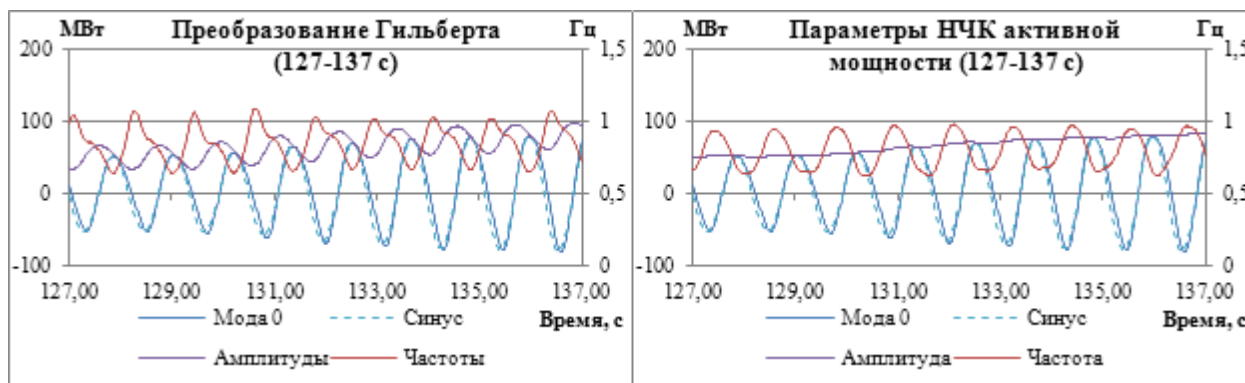


(а)

(б)

Рис. 3: Амплитуда НЧК активной мощности, определенная преобразованием Гильберта (а) и модифицированным методом (б)

Для наглядного представления динамики изменения характеристик низкочастотных составляющих в записи исходных данных выделены 5 фрагментов длительностью 10 секунд (первый – 65÷75 с, второй – 127÷137 с, третий – 242÷252 с, четвертый – 292÷302 с, пятый – 522÷532 с). На рисунке 4 в качестве иллюстрации приведены графики этих параметров на втором и третьем фрагментах (рисунок 4 (а) и рисунок 4 (б), соответственно).



(а)

(б)

Рис. 4: Параметры НЧК активной мощности, определенные модифицированным методом

На рисунке 4 наряду со значениями моды приведена синусоида, построенная следующим образом. Каждый период синусоиды равен соответствующему циклу колебаний, то есть, в общем случае, последовательные периоды синусоиды не равны, но постоянны в своих пределах. За амплитуду на каждом из периодов принимается максимальное значение моды на соответствующем цикле колебаний. Таким образом, на каждом цикле качаний модовой составляющей ставится в соответствие синусоида с совпадающими периодом и амплитудой, при этом наблюдается отклонение формы доминантной моды от гармонической. Результаты анализа реальных низкочастотных колебаний параметров электрического режима подтвердили, что они являются выраженными нелинейными и нестационарными процессами.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- в данной статье были рассмотрены основные методы частотно-временного анализа, проведена сравнительная характеристика методов, в результате которой было доказано, что для идентификации низкочастотных колебаний в энергосистемах целесообразно использовать метод EMD;
- в статье были рассмотрены основные принципы использования обобщенного метода EMD для анализа низкочастотных колебаний в энергосистемах;
- применение данного метода позволяет отслеживать НЧК с целью идентификации вероятных источников их возникновения, исследовать причины и развитие электромеханических переходных процессов и определять необходимые упреждающие управляющие воздействия для сохранения устойчивости в системе;
- подтверждено, что НЧК ПЭР имеют явно нелинейный характер. В настоящее время для улучшения качества определения параметров НЧК разработаны модифицированные методы и тестируется ряд новых алгоритмов, в данном исследовании приведены результаты апробации этих алгоритмов;
- в дальнейшем планируется провести тестовые расчеты с применением обобщенного метода EMD для анализа НЧК на простейших моделях с использованием ПК «RUSTAB» и «EUROSTAG», а также на ретроспективных данных путем анализа возмущений в энергосистеме, зафиксированных системой мониторинга переходных режимов (СМПР).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Залманзон, Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука, 1989.
- [2] Грейтанс, М. (2005). Усовершенствованная обработка неравномерно дискретизированных нестационарных сигналов. Электроника и электротехника.
- [3] CIGRE C4.601. Выявление колебательных мод. Август, 2007
- [4] Norden, E. Huang. The Hilbert-Huang transform and its applications / Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005. – 309 p.
- [5] Цифровая обработка сигналов. Лекции и практикум на ПК. Преобразование Гильберта-Хуанга [Компьютерная версия в сети Интернет]. – Режим доступа: <http://www.prodav.narod.ru/dsp/doc/dsp24.doc> - Загл. с экрана.
- [6] California Institute for Energy and Environment (CIEE)/Kema: "Phasor Measurement Application Study", October 2006
- [7] CIGRE WG601.SC4: "Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement", Jan 2007
- [8] Н.А. Хованова, И.А. Хованов. Методы анализа временных рядов, учебное пособие. Издательство Государственного учебно-научного центра "Колледж"; Саратов, 2001.
- [9] Павлушко, С.А. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных генераторов как эффективный инструмент обеспечения надежности параллельной работы генерирующего оборудования и ЭЭС в целом. – М.: Электрические станции, 07/2012