

Комбинированный метод выявления источника низкочастотных колебаний в энергосистеме

Попов* А.И., Бутин* К.П., Родионов А.В.** , Дубинин*** Д.М.

Аннотация

Выявление и анализ низкочастотных колебаний параметров электрического режима занимает важное место в обеспечении эффективной работы энергосистем. Мониторинг низкочастотных колебаний включен в контур принятия решений диспетчером в большинстве диспетчерских центров крупных системных операторов и относится к одному из самых актуальных направлений обработки данных синхронизированных векторных измерений. К настоящему времени разработаны различные методы определения источника вынужденных колебаний, однако в силу масштабности и внутренней неоднородности реальных энергосистем, ни один из методов не обеспечивает окончательного решения задачи на практике. В работе предлагается комбинация методов, основанных на анализе энергии колебаний и амплитудно-частотных характеристик измерительных сигналов. Рассматриваются примеры анализа реальных случаев НЧК в энергосистеме России.

Ключевые слова: энергосистема, колебательная устойчивость, источник вынужденных колебаний, обработка сигналов.

Введение

Интерес к использованию данных синхронизированных векторных измерений (СВИ) для выявления различных режимов функционирования энергосистем [1] растет во всем мире. В России с развитием системы мониторинга переходных режимов (СМПР) расширяется внедрение устройств с поддержкой технологии СВИ (УСВИ). Вследствие этого увеличивается наблюдаемость энергосистемы, ускоряется накопление массивов измерительных данных.

Одной из важнейших задач в области управления энергосистемами является обеспечение их колебательной устойчивости. Особый интерес

* ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия, a.popov@ens.ru, k.butin@ens.ru

** ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия, a.rodionov@ens.ru

*** АО «СО ЕЭС», Москва, Россия, dubinin@so-ups.ru

представляют плохо демпфируемые низкочастотные колебания (НЧК) [2, 3]. Колебательные процессы проявляются в измерительных сигналах, формируемых УСВИ. Соответственно, распространение технологии СВИ обеспечивает материалом решение задачи анализа НЧК в масштабе крупных энергосистем.

Своевременное обнаружение источника вынужденных колебаний и надлежащее реагирование в рамках диспетчерского управления, по меньшей мере, способствует снижению износа оборудования и повышению качества электроэнергии.

В общем, задача поиска источника НЧК может пониматься как выявление такой части энергосистемы, которая вносит наибольший положительный вклад в развитие колебательного процесса. При этом необязательно речь идет об указании на конкретный объект, т.к. он может находиться за рамками наблюдений (не покрыт измерениями, расположен в энергосистеме соседнего государства, ограничен объем обрабатываемого массива данных и др.). Поэтому востребована также возможность локализации источника – указания области или направления, в котором он находится. Последнее актуально для энергосистемы России, которая, в частности, имеет связи с энергосистемами соседних государств.

Многие задачи анализа данных характеризуются наличием некоторой общей многоэтапной вычислительной схемы при постоянно увеличивающемся разнообразии реализаций каждого этапа. Реализация задачи в целом носит, таким образом, комбинаторный характер. В связи с этим могут ставиться вопросы о поиске оптимальной комбинации методов и о параллельном использовании нескольких реализаций схемы. В последнем случае возникает проблема интерпретации результатов применения альтернативных подходов к анализу.

Целью настоящей работы является поиск способов совместного применения различных методов обработки данных синхронизированных векторных измерений для повышения точности выявления источника вынужденных низкочастотных колебаний.

Низкочастотные колебания в сигналах СВИ

На рис. 1. показан пример НЧК, наблюдавшихся в южной части энергосистемы России в сентябре 2020 г. Здесь одним и тем же способом (тонкая серая линия) изображены графики частоты (рис. 1, а) по данным от 48 линий электропередач. Темным цветом показано среднее значение частоты в каждый момент времени. Аналогичным образом (рис. 1, б) показаны амплитудные спектры сигналов частоты, включая усредненный спектр. Подобные представления данных позволяют понять

статистическую картину процесса, оценить вовлеченность системы в колебания. Это важно, в частности, при выявлении режима.

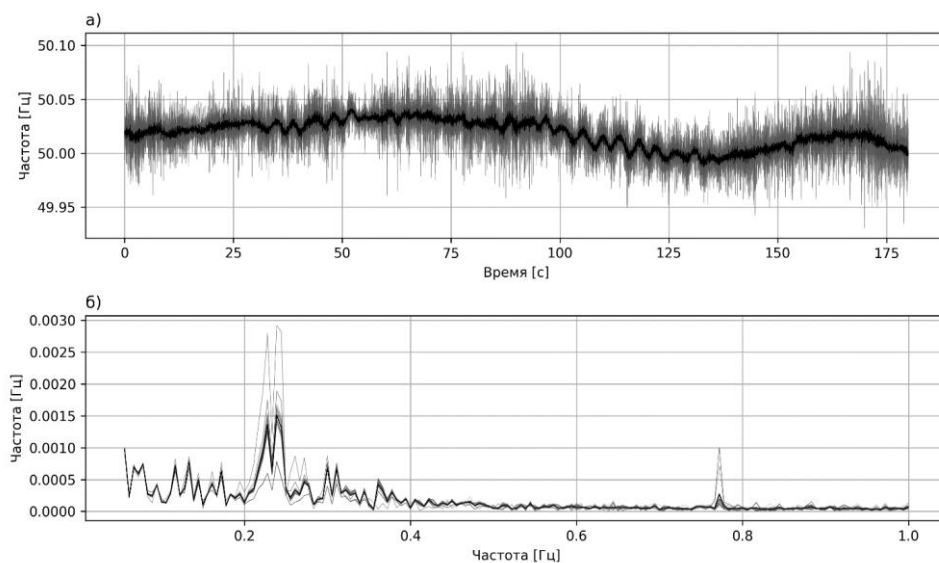


Рис. 1 – Пример НЧК: а) частоты, б) амплитудные спектры

В разных исследованиях используются различные модели измерительного сигнала: сумма тренда и отклонения [4], сумма постоянной составляющей и набор мод – гармоник с переменными параметрами [5], сумма эмпирических мод [6], случайный процесс [7] и др. Как видно, при некоторых подходах можно оперировать понятием низкочастотной моды – составляющей сигнала, в которой проявляется низкочастотный процесс.

На рис. 2. показана запись частоты на одной из линий электропередач во время колебаний, зафиксированных в мае 2018 года. Показан исходный сигнал и мода с частотой, расположенной в диапазоне 0.5 Гц – 0.7 Гц. Мода здесь получена путем полосовой фильтрации.

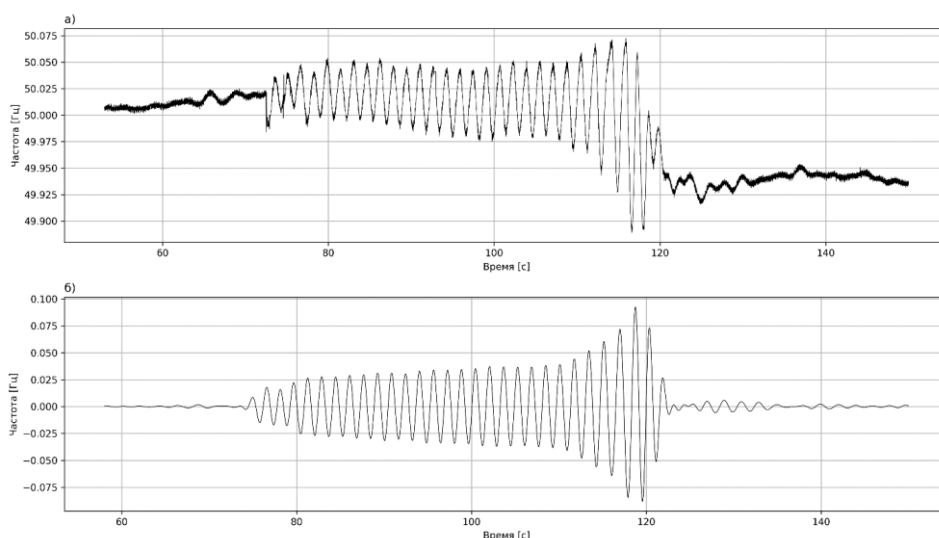


Рис. 2. Извлечение моды: а) исходный сигнал, б) мода 0.6 Гц.

Методы определения источника колебаний

Современные обзоры по проблеме анализа НЧК по данным СВИ можно найти, например, в [2, 3]. Методы поиска источника колебаний базируются на разных принципах: оценке роли генераторов в развитии колебательного процесса, сравнении амплитудно-частотных характеристик компонентов измерительных сигналов, анализе распространения волн в энергосистеме, сравнении измерительных данных и выходных данных симуляционной модели энергосистемы, накоплении данных и машинном обучении и др.

Одним из основных в настоящее время является метод диссипации энергии (Dissipating energy flow, DEF) [4, 5]. В этом методе для каждого объекта вычисляется величина W_{ij}^D на участках сигнала длиной от 5 до 20 периодов НЧК [5]:

$$W_{ij}^D \approx \int 2\pi \Delta P_{ij} \Delta f_i dt + \Delta Q_{ij} \frac{d(\Delta V_i)}{\tilde{V}_i + \Delta V_i} \quad (1)$$

Символом Δ здесь обозначена операция извлечения (фильтрации) моды из измерительного сигнала. P_{ij} – активная мощность на линии $i - j$, Q_{ij} – реактивная мощность, f_i – частота, V_i – напряжение, \tilde{V}_i – среднее значение напряжения в точке i .

Направление потока диссипации энергии определяется по угловому коэффициенту линейной регрессии:

$$W_{ij}^D(t) = DE_{ij} * t + b_{ij} \quad (2)$$

Положительные значения DE_{ij} свидетельствуют о перетоке энергии колебаний от объекта к системе, а отрицательные – об обратном направлении перетока. Таким образом, наибольшее значение DE_{ij} соответствует источнику НЧК.

DEF изначально ориентирован на обработку сигнала во временной области и, соответственно, может быть реализован в режиме онлайн.

Другой распространенный метод – mode shape estimation (MSE) – основан на сравнении полных фаз моды для рассматриваемых объектов и предполагает, что источнику колебаний соответствует сигнал, опережающий остальных по фазе [3, 8, 9]. При этом сигналы предварительно могут быть разделены на когерентные группы и в этом случае может ставиться вопрос о лидирующей группе [10].

Рис. 3. иллюстрирует идею метода. Приведены синтезированные гармонические сигналы (рис. 3, а) с различными амплитудами и начальными фазами. Частота всех сигналов равна 0,1 Гц. Глядя на графики исходных сигналов, можно сделать вывод, что колебания сигнала, изображенного сплошной линией, «опережают» колебания двух других сигналов. Анализ амплитудных спектров (рис. 3, б) позволяет

сделать вывод о частоте моды (0,1 Гц). Фазовые спектры (рис. 3, в) показывают начальную фазу для каждой частоты: в точке 0,1 Гц сплошная линия располагается выше остальных. На векторной диаграмме (рис. 3, г) показаны спектры в точке 0,1 Гц.

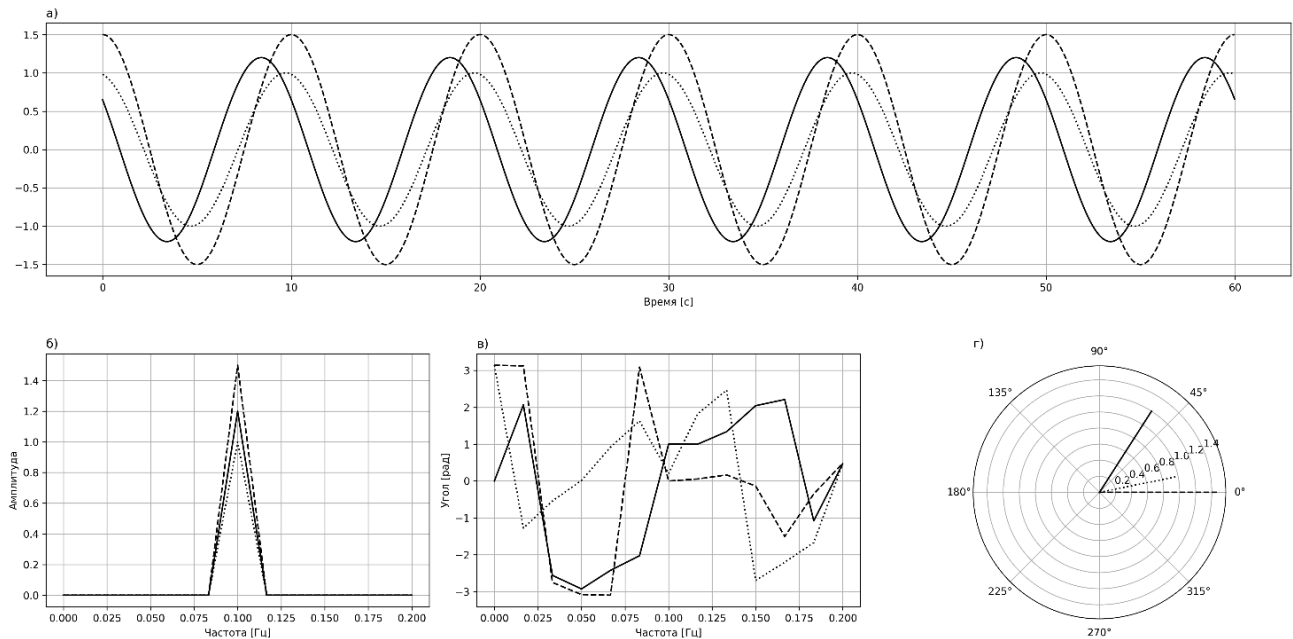


Рис. 3 – MSE: а) исходные сигналы, б) амплитудные спектры, в) фазовые спектры, г) спектры в точке 0.1 Гц.

Финитная запись может анализироваться в частотной области. В приведенном простом примере результаты извлекаются непосредственно из комплекснозначного спектра сигнала. В реальности задача идентификации мод оказывается сложнее, работа в этом направлении остаётся актуальной [8, 9].

Для анализа во временной области требуется фильтрация моды и постоянный расчет ее динамических параметров – амплитуды и частоты. Здесь с одной стороны требуется быстроедействие фильтров, а с другой – их высокая избирательность. Глядя на рис. 3, в., можно заметить, что при недостаточно точном определении частоты моды взаимное расположение векторов получилось бы иным.

Объединённая схема

Как и многие задачи обработки сигналов, поиск источника НЧК характеризуется многоэтапной схемой обработки данных. С одной стороны, решается набор общих подзадач: предварительная обработка данных, выявление режима, извлечение информативных компонентов сигналов, вычисление динамических параметров колебаний, собственно поиск источника. С другой стороны, по мере развития исследований постоянно увеличивается разнообразие методов обработки на каждом

этапе. При этом методы обладают различными наборами параметров и имеют различные программные реализации.

Ранее авторами был разработан подход к описанию вычислений в виде обобщённых схем с возможностью вариации алгоритмов на уровне пользователя [11, 12]. Конкретная реализация схемы получается путём назначения алгоритмов (исполнителей) для каждого этапа вычислений. Кроме того, была разработана высокопроизводительная программная платформа, реализующая данный подход [13, 14].

Наличие такой платформы позволило реализовать объединённую схему анализа НЧК в соответствии с диаграммой потоков данных, приведённой на рис. 4. Кроме сокращения дублирования вычислительных операций, общая схема обеспечивает сопоставимость результатов обработки на этапах, предшествующих собственно определению источника.

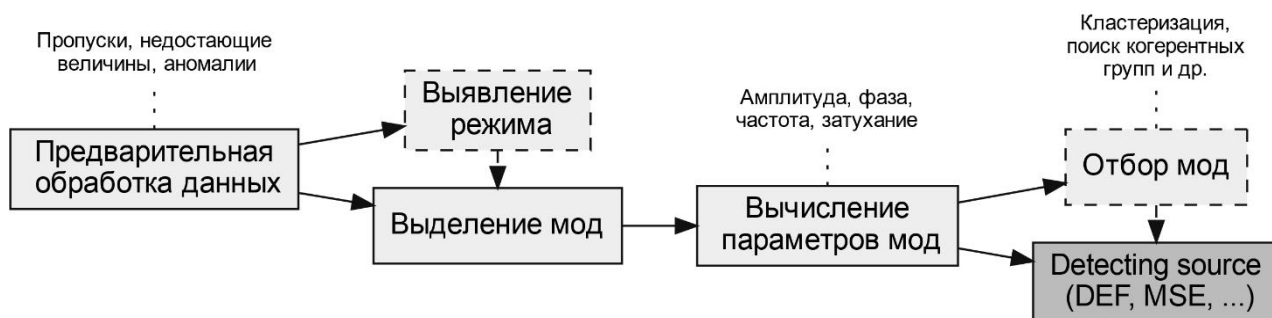


Рис. 4 – Объединенная схема DEF и MSE.

Рассмотрим пример анализа реального случая НЧК, наблюдавшегося в сентябре 2020 года на юге России. На рис. 5. приведена часть исходных данных и показаны результаты расчетов методом DEF. Задача заключалась в определении направления источника по данным СВЧ от 48 линий электропередач. Для обезличивания все источники данных были последовательно пронумерованы. Применяется описанный выше способ визуализации, когда элементы массива исходных данных изображаются одинаково. В данном случае это позволяет выделить особенности некоторых данных на фоне картины в целом. Изображены колебания активной мощности вокруг 0.24 Гц (рис. 5, а), подынтегральное выражение DEF (рис. 5, б), интеграл (1), рассчитанный для всей записи (рис. 5, в) и для её небольших последовательных участков (рис. 5, г).

При практическом применении метода для линий имеется неоднозначность, связанная с учетом направления перетока мощности. Соответственно, существует риск получить неправильный знак перед P и Q [15]. Поэтому выделены лидеры не по максимальному значению угла (2), как того требует метод, а по максимальному значению его модуля.

Таким образом, по имеющимся данным наиболее вероятным направлениям источника НЧК соответствуют линии 47 и 29.

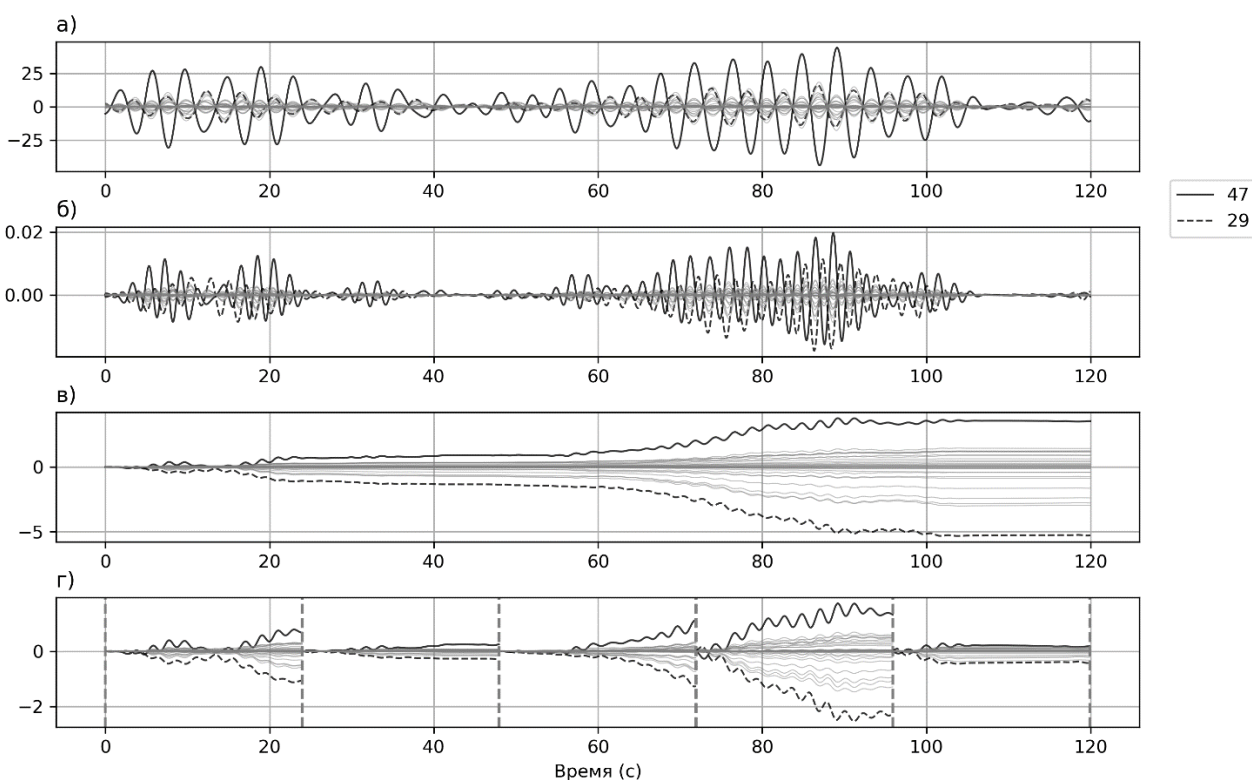


Рис. 5 – DEF: а) активная мощность, б) подынтегральное выражение DEF, в) интеграл DEF на полном промежутке времени, г) интегралы DEF за небольшие промежутки времени.

На рис. 6 приведены результаты MSE для тех же данных. Выделены номера 47 и 29. Лидером по фазе моды является 29, для которого угол DEF отрицательный (рис. 5, в, г), но максимальный по абсолютному значению. Вектор 47, наоборот, «отстает» от основной группы.

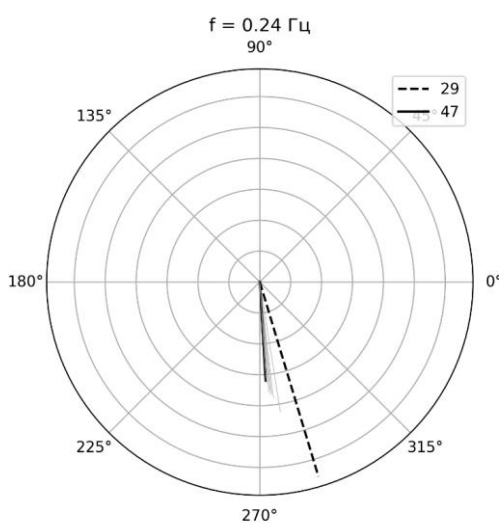


Рис. 6 – Поиск лидера по фазе.

Известно также, что линия 29 проходит через границу России. По совокупности результатов делается вывод о том, что источник находится

либо на линии 29, либо за пределами рассматриваемого региона. После дополнительного изучения ситуации специалистами Системного оператора было установлено, что источник НЧК находился за рубежом в направлении, задаваемом линией 29. Таким образом сопоставление результатов DEF и MSE позволило правильно определить направление источника.

Заключение

Мониторинг колебательной устойчивости энергосистемы является одним из самых актуальных способов применения синхронизированных векторных измерений. Однако, в виду масштабности и неоднородности реальных энергосистем, методология анализа колебательных процессов нуждается в дальнейшем развитии. Одно из направлений работы состоит в применении наборов различных методов с учетом их сильных и слабых сторон для уменьшения неоднозначности принимаемых решений. При этом комбинирование методов следует рассматривать как в аспекте эффективной организации вычислений, так и с точки зрения интерпретации совокупности результатов.

В работе реализована объединённая обобщённая схема вычислений для методов поиска источника вынужденных низкочастотных колебаний, которые с разных сторон подходят к решению данной задачи. В качестве основного выбран метод DEF, так как он в большей степени отражает предметную область. Уточняющую роль играет метод MSE, основанный на более общих представлениях. Рассмотрен пример, в котором использование только DEF дало бы ошибочный результат. MSE позволил скорректировать вывод.

Литература

1. Kundur P. et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions // IEEE transactions on Power Systems, 2001, Vol.19, No.3, pp. 1387–1401.
2. Wang B., Sun K. Location methods of oscillation sources in power systems: a survey // Journal of modern power systems and clean energy, 2017, Vol.5, No.2, pp. 151–159.
3. Meegahapola L.G. et al. Review on Oscillatory Stability in Power Grids with Renewable Energy Sources: Monitoring, Analysis, and Control using Synchrophasor Technology // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, Vol.68, No.1, pp. 519–531.
4. Chen L., Min Y., Hu W. An energy-based method for location of power system oscillation source // IEEE Transactions on Power Systems, 2013, Vol.28, No.2, pp. 828–836.

5. Maslennikov S. et al. Dissipating energy flow method for locating the source of sustained oscillations // International Journal of Electrical Power & Energy Systems 88, 2017, P. 55-62.
6. Chen Shen et al. Measurement-based solution for low frequency oscillation analysis // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy 4.3, 2016, pp. 406–413.
7. Ghorbaniparvar F., Sangrody H. PMU application for locating the source of forced oscillations in smart grids // IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2018, pp. 1–5.
8. Bañuelos-Cabral E.S. et al. Spectral fitting approach to estimate electromechanical oscillation modes and mode shapes by using vector fitting // Electric Power Systems Research, 2019, No. 176, p. 105958.
9. Sudhansu K.S., Bidyadhar S. New signal subspace approach to estimate the inter-area oscillatory modes in power system using TLS-ESPRIT algorithm // IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, Vol.13, No.18, pp. 4123–4140.
10. Antonello, M., Muscas C., Ponci F. Phasor measurement units and wide area monitoring systems. Academic Press, 2016. 298 p.
11. Rodionov A.V., Blinov A.N., Butin K.P., Mokeev A.V. Popov A.I. Practical Issues of Processing Synchrophasor Measurement Data in the Analysis of Low-Frequency Oscillations in Power System // 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). IEEE, 2019. pp. 1-16.
12. Danilov M.A., Butin K.P., Rodionov A.V., Popov A.I. Improving the Efficiency and Performance of Calculations in the Analysis of Low-Frequency Oscillations // 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). IEEE, 2020, pp. 1–13.
13. Popov A., Butin K., Dubinin D., Rodionov A. Framework for synchrophasor measurements data processing and the case studies of the low-frequency oscillations [Электронный ресурс]. URL: https://www.naspi.org/sites/default/files/2021-04/D3S7_01_butin_energосervice_naspi_20210415.pdf (дата обращения: 04.08.2021).
14. Rodionov A., Ulyanov D., Dubinin D., Mokeev A., Popov A. Application of modern information and communication technologies for improving the effectiveness of control, protection and automation systems” // CIGRE SESSION 48, France, Paris, 2020, pp. 1–10.
15. Möller H. The Dissipating Energy Flow method for analysing generator contribution to power system damping – evaluation and interpretation. CODEN: LUTEDX/TEIE, 2019. 44 p.