

АНАЛИЗ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ И БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ

Попов* А.И., Бутин** К.П., Родионов*** А.В.

Аннотация

Повышение наблюдаемости процессов, происходящих в электроэнергетических системах, обеспеченное широким внедрением технологии синхронизированных векторных измерений, а также применение вычислительной обработки массивов измерительных данных привели к изменениям в методологии анализа функционирования энергосистем. Вместе с разработкой новых подходов к моделированию процессов и получаемых измерительных сигналов, выделилась группа методов, основанных на данных. В ряде современных исследований анализ данных синхронизированных векторных измерений в масштабе крупных энергосистем рассматривается как проблема больших данных. Несмотря на дискуссионность такой точки зрения, применение в указанной предметной области некоторых методов больших данных даёт положительные результаты. В предлагаемой работе выполнена оценка объёмов исходных и промежуточных данных в задаче анализа вынужденных низкочастотных колебаний. Показан эффект разрастания данных на промежуточных этапах вычислений. Хранение и передача этих данных могут быть заменены их вычислением при наличии хранимой и передаваемой конфигурации обобщённой вычислительной схемы. На примере диссипативной энергии показан способ компактной визуализации массива динамических параметров колебаний. Кроме того, представлен подход к конфигурированию потоков синтетических тестовых данных масштаба энергосистемы, обеспечивающих заданный результат при анализе диссипативной энергии.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, большие данные, вынужденные низкочастотные колебания, источник колебаний, диссипативная энергия, тестирование.

Введение

Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) обеспечивает получение значений параметров электроэнергетической системы в едином дискретном времени с высокой степенью детализации. Устройства с поддержкой технологии СВИ (УСВИ) и концентраторы синхронизированных векторных данных различных уровней образуют основу

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

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

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

системы мониторинга переходных режимов (СМПР). В России СМПР развивается с 2005 года. Количество установленных УСВИ в Единой энергосистеме продолжает расти и в настоящее время превышает 1000 устройств [1]. Применение анализа данных СМПР в режиме онлайн направлено на повышение ситуационной осведомлённости оперативно-диспетчерского персонала о текущем и прогнозном состоянии энергосистемы. Обработка архивных записей используется для исследования собственных свойств энергосистемы, расследования происшествий, разработки, апробации и усовершенствования методов анализа данных и др.

К одному из главных применений данных СМПР относится анализ колебательной устойчивости энергосистемы. Высокоамплитудные, незатухающие (или слабо затухающие) вынужденные низкочастотные колебания (НЧК) режимных параметров представляют собой актуальную проблему в управлении функционированием крупных энергосистем [2]. Усилия многих исследователей направлены на поиск эффективного решения задачи своевременного выявления источника вынужденных НЧК, то есть указания такой части энергосистемы, которая вносит наибольший вклад в развитие колебательного процесса.

Усложнение современных энергосистем, повышение их наблюдаемости благодаря СМПР и СВИ, а также интенсивное применение вычислительной обработки массивов измерительных данных стали важными факторами современного этапа развития методологии анализа. Наряду с разработкой новых подходов к моделированию процессов и получаемых измерительных сигналов, выделилась группа методов, основанных на данных. В ряде исследований анализ данных СВИ в масштабе крупных энергосистем рассматривается как проблема больших данных [3, 4, 5].

Согласно [6], термин «большие данные» обозначает «широкий набор технологий, включающих системы хранения и обработки огромных массивов структурированных и неструктурированных данных разнообразного состава, часто обновляемых и поступающих из различных источников». Составляющими больших данных являются объём, скорость прироста и разнообразие данных. Нечёткость критериев «больших» данных делает вопрос дискуссионным в любом случае. В случае данных СВИ наибольшее затруднение вызывает критерий разнообразия состава данных. Это несоответствие определению отчасти компенсируется проблемой аномальных данных [7] или использованием технологии СВИ совместно с другими измерительными технологиями [8, 9].

Так или иначе, привлечение некоторых методов больших данных в сферу анализа измерительной информации СМПР приносит положительные результаты. Представляет интерес документ [5], в котором содержится отчёт 2022 года по итогам 8 проектов, направленных на исследование возможностей применения методов больших данных для поиска и классификации различных событий (включая колебания) в архивах СВИ. Финансированием этих проектов занималось министерство энергетики

США. Участникам были предложены обучающая и тестовая выборки данных СВИ суммарным объёмом 25 Тбайт. По результатам проектов выпущено около 60 научных публикаций. Работа велась по следующим основным направлениям:

1. Организация хранения данных и эффективного доступа к ним.
2. Выявление нарушений качества данных, связанных со сбоями измерительного оборудования, шумами квантования, несогласованностью единиц измерения, дрожанием меток времени, использованием устаревших значений, неактуальностью битов состояния.
3. Восстановление пропущенных или плохих данных, в частности, путём интерполяции кратковременных пропусков и использования данных соседних УСВИ.
4. Поиск и классификация событий, разметка данных, формирование сигнатур событий, симуляционное моделирование для получения сигнатур редких событий. В одном из выводов утверждается, что при поиске колебательных явлений методы машинного обучения уступают методам цифровой обработки сигналов.
5. Визуализация данных, рассматриваемая, в основном, с точки зрения возможностей представления больших временных рядов. Стоит заметить, что в заключении отчёта визуализация находится на первом месте среди главных направлений предстоящей работы.

В настоящем докладе дискуссия о больших данных СВИ дополняется рассмотрением таких информационных сигналов, которые получаются путём вычислений и на определённых этапах анализа НЧК принимают форму данных. К ним относятся динамические параметры колебаний, извлекаемые из исходных сигналов и включающие признаки участия в колебательном процессе, а также синтетические данные, используемые для тестирования программного обеспечения.

Динамические параметры колебаний

Обработка потока данных в задаче анализа НЧК может быть описана следующей общей схемой: извлечение колебательных составляющих из входных измерительных сигналов; вычисление динамических параметров колебаний; принятие решения об участии и роли рассматриваемых объектов энергосистемы в развитии колебательного процесса.

Для сравнения объёмов первичных данных и сигналов, извлекаемых из них путём вычислений, рассмотрим таблицу 1. Первая строка соответствует минимальному набору входных данных: синхровекторам тока и напряжения, выдаваемым УСВИ. Частота, активная и реактивная мощности, которые обычно используются при анализе НЧК, могут быть получены из УСВИ или вычислены из синхровекторов. Динамические параметры колебаний здесь включают в себя амплитуду, полную фазу, частоту, скорость изменения величины колебаний, тот или иной показатель демпфирования колебаний, энергию колебаний. Эти сигналы являются

исходными данными для последующих этапов обработки и для визуализации при поддержке принятия решений. Колебательные составляющие извлекаются из сигналов частоты, тока, напряжения, активной и реактивной мощностей. Пусть мониторинг ведётся в 20 полосах низкочастотной области спектра. Кроме того, пусть значение сигнала представляется типом данных float32 (4 байта), что соответствует стандарту С37.118.2 [10], регламентирующему структуру кадров онлайн потока СВИ. Синхровектор, соответственно, представлен двумя значениями float32 и занимает 8 байт. Столбцы таблицы соответствуют одному кадру данных, одной секунде и одним суткам при частоте кадров данных 50 Гц.

Таблица 1. Оценка объёма данных в задаче анализа НЧК

Величины	Объём данных		
	Кадр данных (1 УСВИ)	В секунду (СМПР)	В сутки (СМПР)
Синхровекторы тока и напряжения	16 байт	~780 Кбайт	~64 Гбайт
Частота, активная и реактивная мощности	12 байт	~585 Кбайт	~48 Гбайт
Динамические параметры колебаний в 20 полосах	3360 байт	~160 Мбайт	~13.2 Тбайт

Таким образом, объём данных на этапе извлечения динамических параметров колебаний увеличивается на два порядка.

При этом имеет место следующее. Вычисление параметров НЧК может быть описано некоторыми общими схемами, однако конкретные реализации этапов таких схем образуют постоянно расширяющееся множество. В [11] исследована зависимость результатов поиска источников НЧК от выбора комбинации алгоритмов. На результат влияют также значения различных параметров используемых алгоритмов. С учётом такого комбинаторного характера задачи авторами предложена концепция обобщённых вычислительных схем, или планов [12]. План представляет собой ориентированный граф, вершины которого соответствуют работам (этапам вычислений), а дуги – потокам данных. Параметром каждой работы является т.н. исполнитель – ссылка на конкретную реализацию некоторого алгоритма обработки данных. Конфигурация плана фиксируется, например, в формате JSON, что обеспечивает повторяемость результата при повторных вычислениях. План является функциональной программой и обладает естественным параллелизмом. Это важно при обработке больших массивов данных.

Исследование и развитие концепции обобщённых вычислительных схем применительно к задачам анализа НЧК ведётся авторами при разработке программного обеспечения ES Phasor [11, 13] и параллельной вычислительной платформы Goplan [12]. Важным компонентом ES Phasor

является модуль оптимизации вычислительных схем в пространстве доступных решений и на записях реальных случаев НЧК [11].

Поток диссипативной энергии

К настоящему времени разработаны различные методы поиска источников НЧК [2]. Наиболее высокую эффективность на практике показывает [14] метод диссипативной энергии (Dissipative Energy Flow, DEF) [15]. Для понимания следующих разделов здесь приводятся основные выражения, используемые в методе DEF.

Для каждого объекта на участках сигнала вычисляется величина W_{ij}^D :

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

Символом Δ обозначена операция извлечения колебательной составляющей 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 диссипативной энергии определяется по угловому коэффициенту линейной регрессии:

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

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.

Визуализация энергии колебаний

Визуализация относится к важнейшим направлениям работы в области больших данных СВИ [5]. Информативное представление массивов измерительных сигналов, промежуточных и итоговых результатов анализа способствует повышению ситуационной осведомлённости оперативно-диспетчерского персонала [1] и может быть положено в основу средств поддержки принятия решений. Кроме того, удачные визуализации колебательных процессов уровня энергосистемы способствуют дальнейшему развитию исследований в области анализа данных СВИ.

При конфигурации данных, представленной в примере выше, исходные измерительные сигналы и вычисляемые на их основе динамические параметры колебаний в 20 полосах спектра для 1000 источников данных представляют собой 600 000 функций времени. Ясно, что для эффективного восприятия результатов анализа НЧК простой набор такого количества графиков не подходит. В [13] авторами были предложены временные, спектральные, фазовые, векторные и графовые визуализации массивов исходных данных, динамических параметров колебаний и результатов поиска источника НЧК. Здесь рассмотрим представление параметров диссипативной энергии колебаний в фазовой плоскости.

Как указано выше, для интерпретации результатов расчёта диссипативной энергии и выявления источников и «приёмников» энергии колебаний выполняется аппроксимация $W(t)$ линейными функциями и сравниваются производные этих функций. В соответствии с этим на оси абсцисс откладывается скорость изменения диссипативной энергии, а на оси ординат – её величина (что удобно при сопоставлении такого представления с графиками во времени). Интерпретация следующая. В первую четверть попадают источники колебаний, в третью – приёмники. Вторая и четвертая четверти соответствуют тенденции изменения роли объекта от приёмника к источнику и наоборот. С течением времени точка движется и оставляет затухающий след, что позволяет увидеть ближайшую историю величины для каждого кадра.

Пример описанной визуализации представлен на рис. 1. Рассматриваемый случай произошёл в южной части энергосистемы России в 2020 году. В колебательный процесс, продолжавшийся в течение трёх минут, были вовлечены около 50 объектов. На рисунке показаны два кадра: начало процесса (слева) и его развитие (справа).

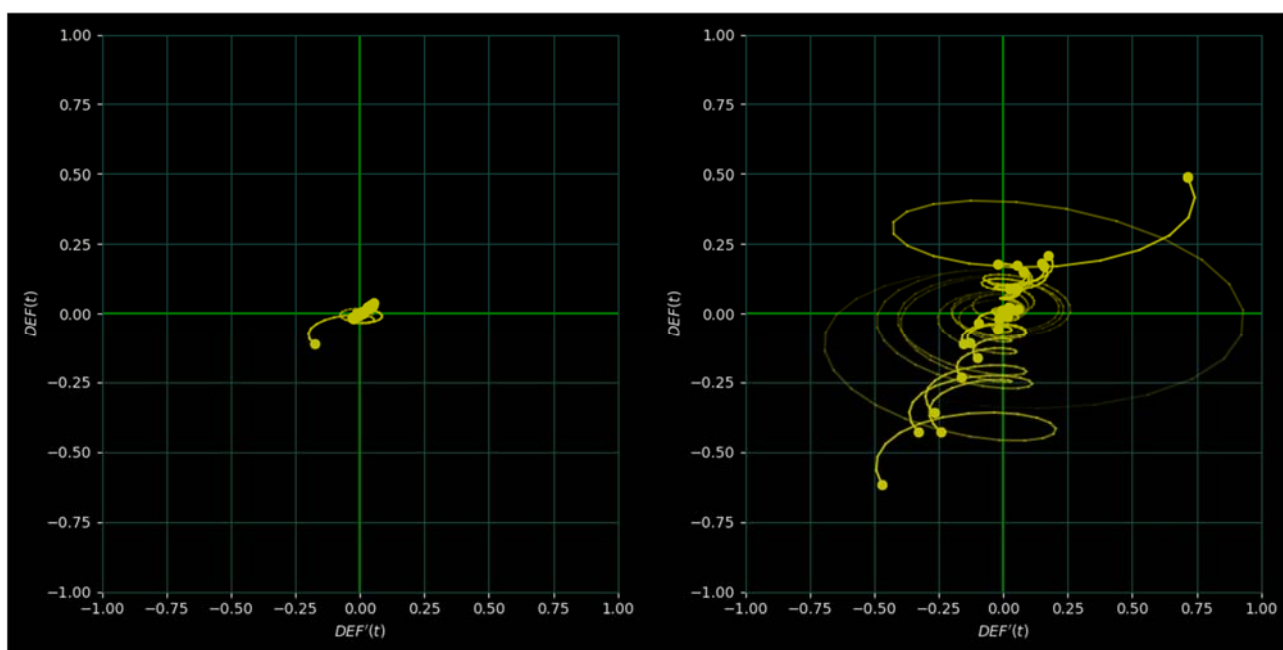


Рис. 1 – Диссипативная энергия на фазовой плоскости.

Специалистами Системного оператора установлено, что источник колебаний в рассматриваемом случае находился в энергосистеме соседнего государства. В пользу предположения об отсутствии в наборе данных сигналов от источника НЧК свидетельствует и приведённый рисунок: приёмник диссипативной энергии есть, а источника нет (слева); входящей энергии больше, чем исходящей (справа).

Синтез тестовых данных

В ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработано программное обеспечение VirtPMU, представляющее собой библиотеку и набор утилит для формирования онлайн потоков данных в соответствии с протоколом С37.118.2 [10]. Поддерживаются различные принципы получения фреймов конфигурации и данных: математическое моделирование, воспроизведение архивных записей, ретрансляция входящих потоков.

Утилита `vrpmu-wams`, являясь компонентом VirtPMU, реализует имитацию выхода СМПР. Важно заметить, что здесь не имеется в виду симуляционное моделирование энергосистемы. При разработке способа конфигурирования модели данных для `vrpmu-wams` решался вопрос: как компактно описать данные масштабного колебательного процесса, обеспечив, с одной стороны, уникальность синтезируемых сигналов для присоединений, а, с другой, получить задуманный результат анализа? Разработан и реализован следующий подход. Прежде всего, определяются т.н. профили настроек, соответствующие различным ролям в колебательном процессе. Задаются математические ожидания измеряемых параметров, параметры НЧК, модель реакции параметров на колебания, параметры гармонического и стохастического шумов. Затем перечисляются присоединения, для каждого из которых выбирается профиль. Такой подход позволяет быстро сконфигурировать тестовый поток, используя, в том числе, идентифицирующую информацию для УСВИ из реальной СМПР.

Так, для метода DEF профили «источник НЧК», «источники DEF», «приёмники DEF», «не участвующие в колебаниях» могут быть получены за счёт задания сдвига фаз колебаний активной мощности относительно колебаний частоты (см. интегральное выражение для DEF). Графики получаемых сигналов приведены на рис. 2.



Рис. 2. Пример тестовых данных НЧК.

Для отображения сигналов, принимаемых по протоколу С37.118.2 использовано программное обеспечение SynphasorTest [16], разработанное в ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Выведены графики сигналов частоты и активной мощности, получаемые от множества присоединений.

Графики сигналов от «источника НЧК» показаны синим цветом. Синфазность колебаний активной мощности и частоты обеспечивает положительное значение активной составляющей диссипативной энергии в соответствии с выражением для W_{ij}^D . Отрицательное значение W_{ij}^D получается, когда колебания активной мощности и частоты находятся в противофазе. Величину энергии можно также регулировать значением амплитуды колебаний. Реактивная компонента диссипативной энергии в данном примере не задействована.

На рис. 3 приведены результаты анализа получаемых тестовых данных на схеме фрагмента энергосистемы. Визуализация выполнена при помощи программного обеспечения ES Phasor [13] (ООО «Инженерный центр «Энергосервис»). Показан кадр, соответствующий началу процесса НЧК. Зелёным цветом раскрашены линии электропередач, для которых доступны измерения, жёлтым – линии с высоким уровнем НЧК. Красными стрелками показана исходящая энергия колебаний, синими – входящая. Свечением показана суммарная исходящая энергия колебаний, красное свечение соответствует источнику НЧК.

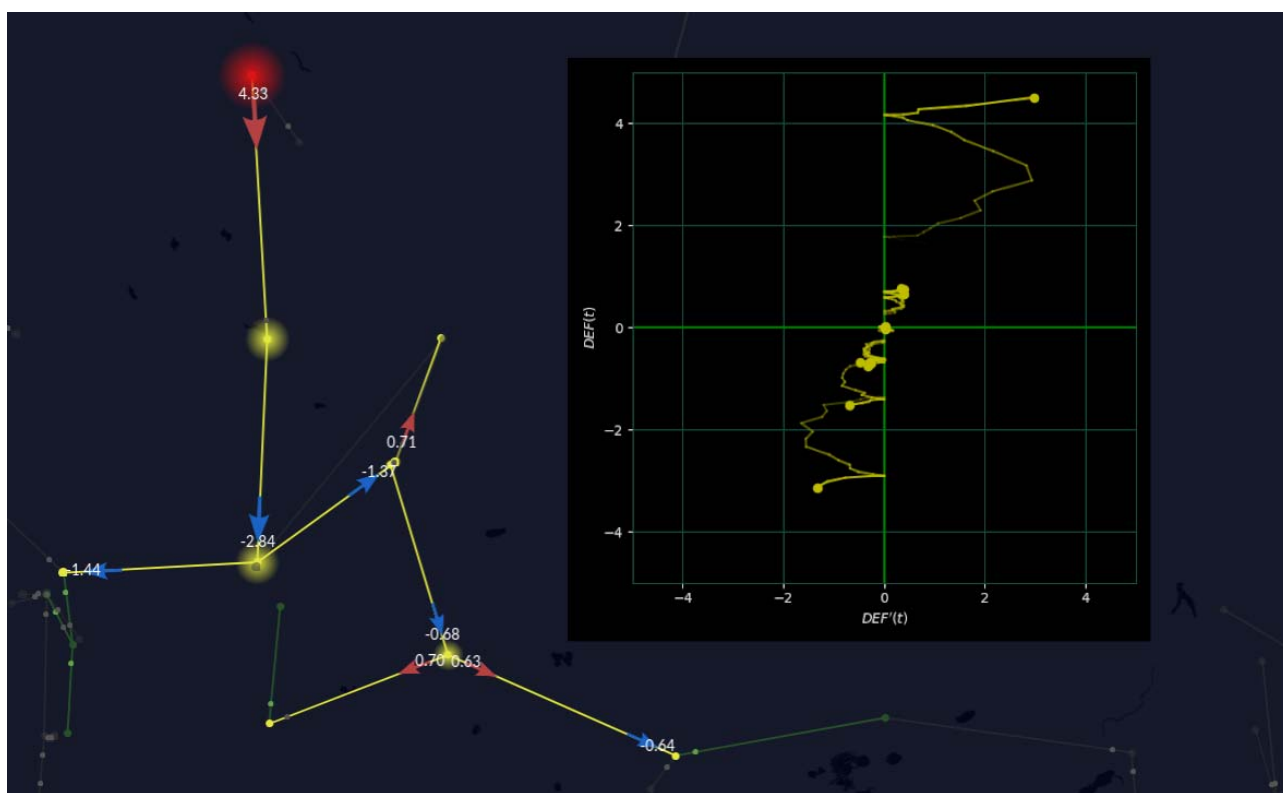


Рис. 3 – Визуализация диссипативной энергии на тестовых данных.

Дополнительной возможностью VirtPMU, полезной при тестировании систем обработки массива входящих потоков данных СВИ, является имитация различных проблемных ситуаций: задержки кадров, различные виды искажений кадров данных, отсутствие синхронизации времени для отдельных устройств и т.д. Кроме того, существует возможность воспроизведения в одном или нескольких потоках реальных данных из архивов СМНР или симуляций. Записи данных СВИ при этом должны быть представлены в формате COMTRADE, Приложение Н [17].

Заключение

Рассмотрение анализа сигналов СВИ как проблемы больших данных затрагивает широкий круг вопросов. К ним относятся организация хранения и доступа к данным, исследование качества данных, восстановление отсутствующих значений, применение высокопроизводительных вычислений, поиск и классификация событий, визуализация и др.

В представленном докладе этот список дополняется вопросом «вторичных» данных, т.е. информационных сигналов, получаемых исключительно путём вычислений, но также принимающих форму данных для определённых этапов анализа. В задаче поиска источников НЧК объём таких данных на два порядка больше, чем объём исходных измерений. Хранение и передача этих данных могут быть заменены их вычислением при наличии хранимой и передаваемой конфигурации обобщённой вычислительной схемы. Авторами предложена концепция и программная реализация таких схем. На примере диссипативной энергии показан способ визуализации массива динамических параметров колебаний. Кроме того, представлен подход к конфигурированию потоков синтетических тестовых данных масштабных НЧК, обеспечивающих заданный результат при анализе диссипативной энергии.

Литература

1. Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М., Журавлева О.В. Развитие технологий диспетчерского управления в России на платформе СВИ // Материалы международного научного семинара «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». Вып. 73. 2022. С. 465 – 474.
2. 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, P. 519–531.
3. Roy V. et al. Event detection from PMU generated big data using R programming // 2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). 2018. P. 1 – 6.
4. Kosen I. et al. UPS: Unified PMU-data storage system to enhance T+ D PMU data usability // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 11. No 1. P. 739 – 748.

5. Biswas S. et al. Big data analysis of synchrophasor data: Outcomes of research activities supported by DOE FOA 1861 // Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States). 2022. No PNNL-33548.
6. Большие данные в информатике // Большая российская энциклопедия, URL: <https://bigenc.ru/bol-shie-dannye-v-informatike-e4a22a>
7. Hart P. et al. Application of big data analytics and machine learning to large-scale synchrophasor datasets: evaluation of dataset 'machine learning-readiness' // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2022. Vol. 9. P. 386 – 397.
8. Mondal B. et al. Application of PMU and SCADA data for estimation of source of forced oscillation // 2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics. 2019. P. 1 – 7.
9. Zuo J. et al. Low-Frequency Oscillation Mode Source Identification with Wide-Area Measurement System // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2019. P. 1525 – 1539.
10. C37.118.2-2011 – IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems.
11. Бутин К.П., Попов А.И., Родионов А.В. Исследование влияния параметров вычислительной схемы на результаты определения источника низкочастотных колебаний // Материалы международного научного семинара «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». Вып. 73. 2022. С. 505 – 513.
12. Popov A., Butin K., Dubinin D., Rodionov A. Framework for synchrophasor measurements data processing and the case studies of the low-frequency oscillations URL: https://www.naspi.org/sites/default/files/2021-04/D3S7_01_butin_energосervice_naspi_20210415.pdf
13. Бутин К.П., Попов А.И., Родионов А.В. Разработка способов визуального представления параметров низкочастотных колебаний в энергосистеме // Материалы международного научного семинара «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». Вып. 74. 2023. С. 526 – 536.
14. Wang B., Maslennikov S. IEEE-NASPI Oscillation Source Location Contest-Case Development and Results // Tech. rep. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2021.
15. 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.
16. Угрюмов И.А. Разработка программного обеспечения для просмотра и воспроизведения архивных данных системы мониторинга переходных режимов // Энергия Арктики: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. 2023. С. 69 – 73.
17. C37.111-2013 – IEEE/IEC Measuring relays and protection equipment – Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems.