



КАЗАНЬ, 1 – 3 ОКТЯБРЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2025



Подход к синтезу тестовых данных для систем анализа синхронизированных векторных измерений

Попов Александр Игоревич

Ведущий инженер-программист отдела аналитики и обработки данных, к.т.н.

ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

Россия



Введение



С развитием и распространением технологии СВИ повышается роль **вычислительной обработки цифровых измерительных данных** в управлении энергосистемами.

Вопросы надёжности программных решений для анализа данных СВИ следует рассматривать в контексте **сложных информационно-измерительных систем**; их тестирование выходит за рамки исследования методов анализа.

Дополнительные факторы:

- состояние источников данных
- качество измерений
- особенности реализации алгоритмов
- устойчивость вычислительных процедур к проблемам в данных
- производительность вычислений
- согласованность конфигураций компонентов системы
- взаимодействие между различными программными модулями
- особенности и ограничения платформы исполнения приложений и др.



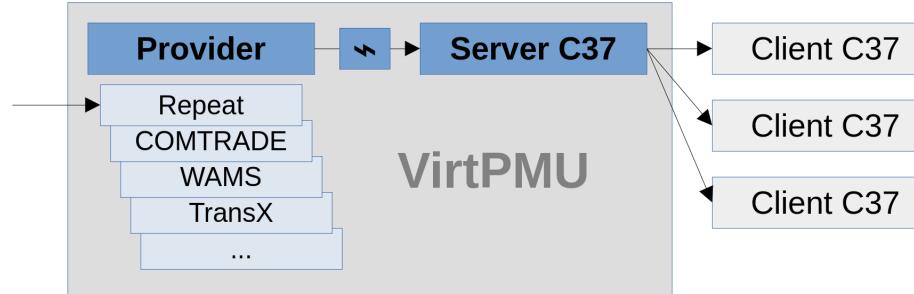
Подходы к получению тестовых данных



- **Реальные** данные
 - Натурный стенд
 - Архивная запись
- **Синтетические** данные
 - Математическое моделирование
 - Имитационное (симуляционное) моделирование
 - Генеративные нейронные сети
 - Моделирование **выходных данных УСВИ**: выход за рамки физических ограничений и получение сценариев, которые маловероятны при реальной эксплуатации, но способны выявить скрытые проблемы.



Программный комплекс VirtPMU



- Ретрансляция и разветвление потока данных
- Воспроизведение архивных записей КСВД
- Синтез данных в соответствии с моделями оборудования
- Генерация данных на основе математического описания выходных сигналов массива УСВИ

- Смещение и случайный дребезг метки времени
- Добавление шума и импульсов в сигналы
- Замена данных пустыми значениями (`Nan`, `Inf`) или случайными числами
- Удаление и искажение отдельных байтов в кадрах данных
- Подмена контрольной суммы
- Отправка корректных кадров данных, не соответствующих конфигурации
- Приостановка передачи данных
- Передача кадров с общей временной задержкой
- Редактирование флагов статуса



Примеры тестовых схем



ES Phasor – программная система для анализа потоков данных СМПР



МИСТ – модуль индикации состояния трансформатора



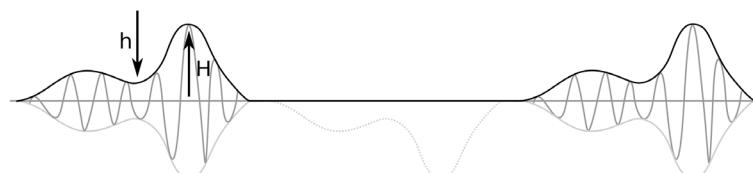


Значение в канале

$$x(t) = m + \sum_{i=1}^N k_i L_{p,i}(t - \tau_i) s_i(t) + \eta(t)$$

- m – математическое ожидание
- $L_{p,i}(t)$ – НЧК
- k_i, τ_i – параметры проявления НЧК
- $s_i(t)$ – функция возникновения НЧК
- $\eta(t)$ – шум

$$s(t) = \max(\sin(2\pi f_s t + h \sin(2\pi f_s t + H \sin(2\pi f_s t))), 0)$$



Параметры НЧК

$$p = (a_L, f_L, a_a, f_a, a_f, f_f)$$

- a_L, f_L – амплитуда и частота НЧК
- a_a, f_a – параметры модуляции амплитуды
- a_f, f_f – параметры модуляции частоты

НЧК – модулированный гармонический сигнал:

$$L_p(t) = [a_L + a_a \cos(\omega_a t)] \left[\cos\left(\omega_L t + \frac{a_f}{\omega_f} \sin(\omega_f t)\right) \right]$$

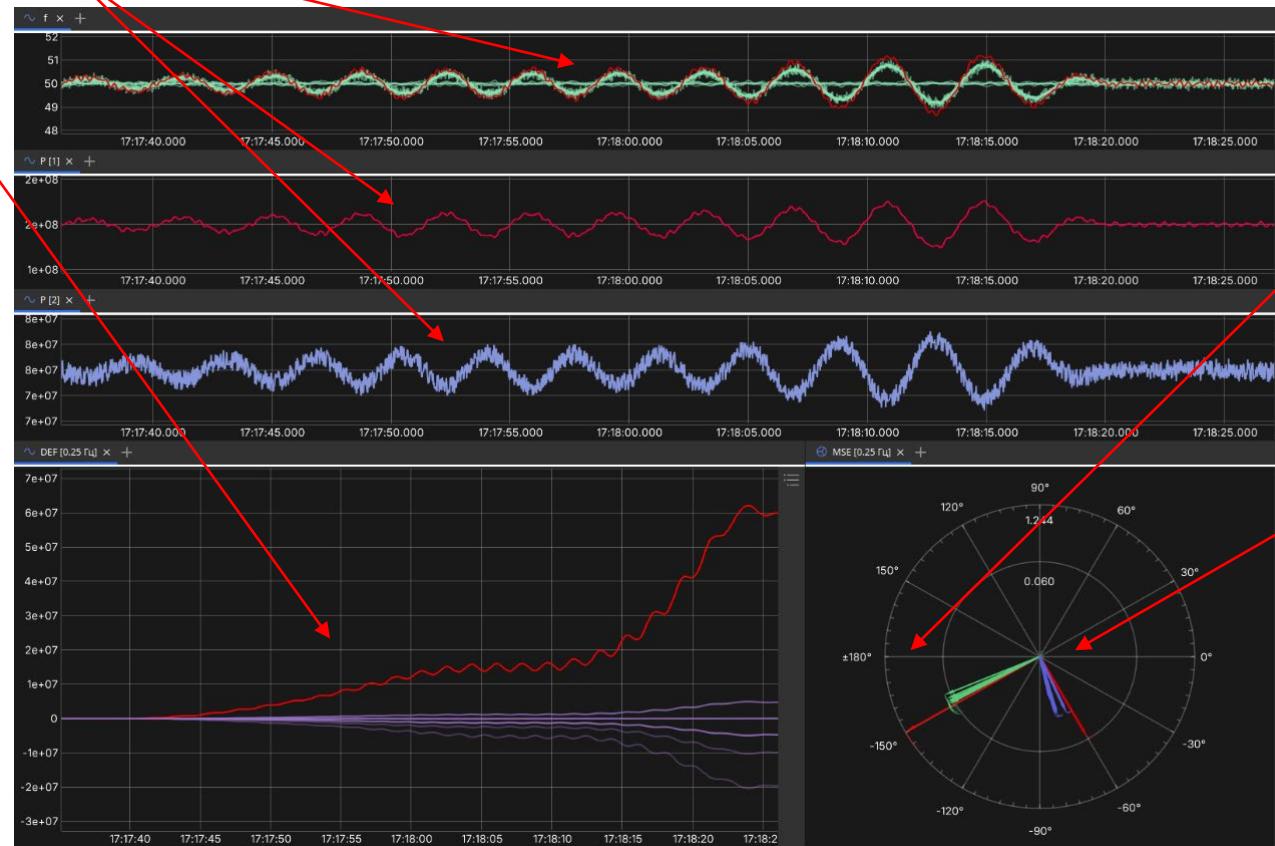
$$\omega_L = 2\pi f_L, \omega_a = 2\pi f_a, \omega_f = 2\pi f_f$$



Имитация масштабных НЧК

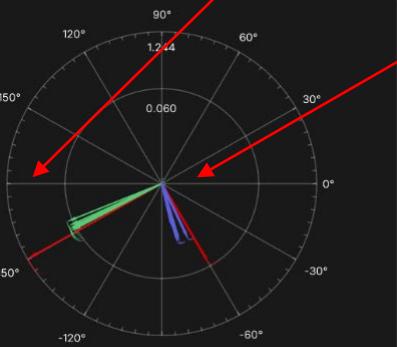


$$W_{kn}^D = 2\pi \int \Delta P_{kn} \Delta f_k dt + \int \frac{\Delta Q_{kn}}{\tilde{U}_k + \Delta U_k} d\Delta U_k \quad (\text{DEF})$$



MSE по $\angle U$

MSE по $\angle I$





Имитация потока событий



Модель трансформатора

$$(\dot{U}_i(t), \dot{I}_i(t), f_i(t)) = M_{p,L,\eta}(t)$$

- p – паспортные данные и параметры сети
- L – параметры нагрузки
- η – параметры шума
- \dot{U}, \dot{I} – синхровекторы напряжения и тока
- f – частота
- i – номер обмотки ($i \in \{1, 2\}$ или $i \in \{1, 2, 3\}$)

Поток событий

$f, |\dot{U}|, |\dot{I}|$ умножаются на коэффициенты:

$$c(t) = \begin{cases} \rho_1, \tau_0 \leq t < \tau_1 \\ \rho_2, \tau_1 \leq t < \tau_2 \\ \dots \\ \rho_n, \tau_{n-1} \leq t < \tau_n \\ \dots \end{cases},$$

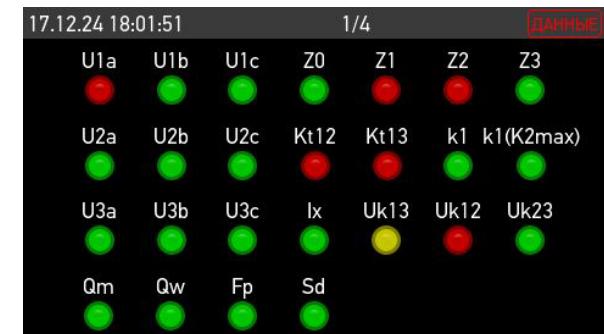
- ρ_i – нормально распределённые случайные величины с $\mu = 1$ и σ , задаваемым в конфигурации VirtPMU.
- $\tau_0 = 0, \tau_n = \tau_{n-1} + \lambda_n$, где λ_n – случайная величина с задаваемыми параметрами распределения.



Имитация потока событий



Комбинации изменений сигналов вызывают условия выявления событий и аномалий в данных и интенсивную работу модулей фиксации событий в БД, ведения аварийного архива, сигнализации и др.





Заключение



- При **системном тестировании** ПО используются только его внешние интерфейсы. При анализе данных СВИ таким интерфейсом является стандартизованный протокол передачи измерений.
- ПО **VirtPMU** развивает и объединяет различные способы получения тестовых данных и обеспечивает гибкое преобразование тестовых потоков, позволяя создавать различные схемы и сценарии тестирования систем анализа данных СВИ разного масштаба.
- Представленный инструментарий продемонстрировал свою **эффективность** при тестировании ряда систем анализа данных СВИ, разрабатываемых в ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Попов Александр Игоревич, a.popov@ens.ru



Подход к синтезу тестовых данных для систем анализа синхронизированных векторных измерений

А.И. Попов, К.П. Бутин, А.В. Родионов
ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Россия
a.popov@ens.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Синхронизированные векторные измерения, система мониторинга переходных режимов, колебательная устойчивость энергосистем, информационно-измерительная система, тестирование программного обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием и распространением технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) [1] повышается роль вычислительной обработки цифровых измерительных данных в управлении энергосистемами (ЭС). Вопросы надёжности программных решений для анализа данных СВИ следует рассматривать в контексте сложных информационно-измерительных систем. Тестирование таких решений выходит за рамки проверки работоспособности и эффективности отдельных методов анализа данных или корректности программной реализации алгоритмов. Необходимо учитывать множество дополнительных факторов: состояние источников данных, качество измерений, особенности реализации алгоритмов, устойчивость вычислительных процедур к отсутствию части данных и аномальным данным, производительность вычислений, согласованность конфигураций компонентов системы, взаимодействие между различными программными модулями, особенности и ограничения аппаратно-программной платформы исполнения приложений и др.

Предлагаемая работа проводится в целях совершенствования методического и инструментального обеспечения тестирования систем анализа данных СВИ с учётом множества факторов их практической реализации и контекста исполнения.

Как в исследовательской работе, так и при реализации решений для анализа СВИ применяются различные способы получения тестовых данных. Их следует рассматривать не как альтернативные, а как взаимодополняющие компоненты сложного процесса тестирования. Кроме доступности тех или иных способов получения тестовых данных, их выбор может определяться текущим этапом жизненного цикла решения (исследовательская работа, создание прототипа, реализация компонентов программной системы и их интеграция, тестовые испытания, сопровождение), масштабом приложения (энергообъект, энергорайон, ЭС), целью и видом тестирования (тестирование работоспособности, тестирование отдельных функций и системное тестирование, нагружочное и стресс-тестирование, тестирование устойчивости) и др.

Тестовые данные могут представлять собой результат измерений параметров реальных физических процессов (реальные данные) или быть синтезированными на основе различных математических моделей (синтетические данные). Реальные данные получают с натурных стендов или из архивных записей. Подходы к синтезу различаются по уровню абстракции применяемых моделей, а также объектом моделирования.

Для натурных испытаний [2] характерны физическая адекватность моделируемых процессов, воспроизведение условий, приближённых к эксплуатационным, возможность исследования широкого спектра режимов работы, фиксация нештатных и незапланированных



состояний в новых тестах. К ограничениям данного подхода можно отнести трудности масштабирования, высокие материальные и временные затраты.

Воспроизведение архивных данных предоставляет возможность проведения исследований в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Такой подход позволяет изучать характеристики оборудования на примерах, зарегистрированных в действующей ЭС, обеспечивая значительный масштаб данных – вплоть до уровня национальной ЭС [3]. Однако данный метод также сопряжен с рядом ограничений [4, 5]: дефицит данных, характеризующих проблемные режимы работы энергосистемы; требования информационной безопасности и конфиденциальности; накапливающееся рассогласование между архивными данными и изменяющейся конфигурацией энергосистемы; отсутствие эталонных результатов анализа; возможные нарушения целостности и полноты данных.

Математическое моделирование [5, 6] предполагает построение систем уравнений, описывающих динамические процессы в ЭС, с последующей генерацией сигналов напряжения и тока через численное решение этих уравнений. Данный подход, реализуемый с помощью специализированного программного обеспечения и математических пакетов общего назначения, позволяет получать данные о параметрах ЭС для различных режимов работы, включая нормальные, аварийные и переходные состояния. При этом высокая размерность и нелинейность математических моделей, необходимость учёта стохастических факторов, гибридная природа процессов и гетерогенность компонентов современных ЭС создают значительные трудности в обеспечении адекватности моделирования. К этому добавляется высокая вычислительная сложность решения подобных задач. Указанные проблемы делают затруднительным практическое применение данного подхода для анализа реальных ЭС крупного масштаба.

При симуляции математические модели инкапсулированы внутри абстракций реальных объектов или систем, которые взаимодействуют между собой в рамках виртуальной среды. К программным решениям для симуляционного (имитационного) моделирования относятся MATLAB/Simulink, MATLAB: PSAT, PSS/E, OPAL-RT eMEGASIM и др. Подробный обзор испытательных стендов с симуляционным моделированием приводится в [7]. Симуляция в качестве подхода для получения тестовых данных стала фактическим стандартом в современных исследованиях по анализу данных ЭС, что подтверждается её повсеместным применением, а также наличием рекомендованных типовых моделей [8]. Тем не менее, симуляция сохраняет ограничения, связанные с необходимостью постоянной актуализации моделей в условиях развития ЭС, в частности, внедрения возобновляемых источников энергии и распределённой генерации [4]. Идеализация параметров ЭС и условий передачи данных может приводить к расхождениям с реальными эксплуатационными сценариями. В настоящее время развиваются подходы, сочетающие симуляцию с реальным оборудованием: полунатурное моделирование [7], hardware-in-the-loop [9].

Ещё одно актуальное направление исследований связано с применением методов машинного обучения для синтеза тестовых сигналов, насыщенных событиями. Это направление охватывает широкий спектр методов машинного обучения, математической статистики и цифровой обработки сигналов. Важное место здесь занимают генеративные состязательные нейронные сети, воспроизводящие свойства реальных сигналов за счёт соревнования генератора данных и дискриминатора [4, 10]. При этом необходимо подчеркнуть, что на этапе обучения моделей требуется достаточное количество реальных данных.

В перечисленных подходах акцент делается на получении тестовых данных, так или иначе отражающих физические процессы в ЭС. Это крайне важно при разработке и исследовании методов и алгоритмов прикладного анализа данных СВИ. Однако тестирование комплексных программных решений этим не исчерпывается и включает в себя тестирование логики работы отдельных функций, системное тестирование, нагрузочное и стресс-тестирование, тестирование устойчивости и другие составляющие. Ошибки, подлежащие выявлению и исправлению, могут быть скрыты, например, в агрегации входных данных, работе с базами данных, ведении аварийных архивов исходных данных, формировании сигнализации о событиях, организации согласованной работы множества параллельно работающих анализаторов, обработке состояния отдельных источников данных, обработке пропущенных и искаженных кадров данных и т.д.

Моделирование непосредственно выходных данных устройств СВИ (УСВИ) [5, 11] позволяет выйти за рамки физических ограничений натурной модели и симуляции и получить



тестовые сценарии, которые маловероятны или вовсе невозможны при реальной эксплуатации, но способны выявить скрытые проблемы в тестируемой программной системе. Например, можно сгенерировать такие данные, анализ которых спровоцирует выявление интенсивного потока «аварийных» событий, вследствие чего в тестируемой системе будут задействованы и загружены компоненты, выполняющие фиксацию событий в базе данных, сохранение исходных данных в аварийном архиве, сигнализацию и т.п.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ПОТОКОВ

Специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» ведётся разработка программного обеспечения VirtPMU, представляющего собой библиотеку и набор утилит для формирования онлайн потоков тестовых данных СВИ с применением различных способов получения сигналов физических величин. VirtPMU работает с потоками данных, соответствующих стандарту C37.118.2.

Архитектура VirtPMU показана на рис. 1. Модуль, обозначенный на схеме как Server, реализует механизмы обработки входящих команд и обеспечивает выдачу кадров данных в требуемом темпе. Поддерживаются параллельные сеансы с несколькими клиентами. Исходящий поток может быть также разветвлён путём указания нескольких портов при запуске. В качестве транспортного протокола может использоваться TCP или UDP.

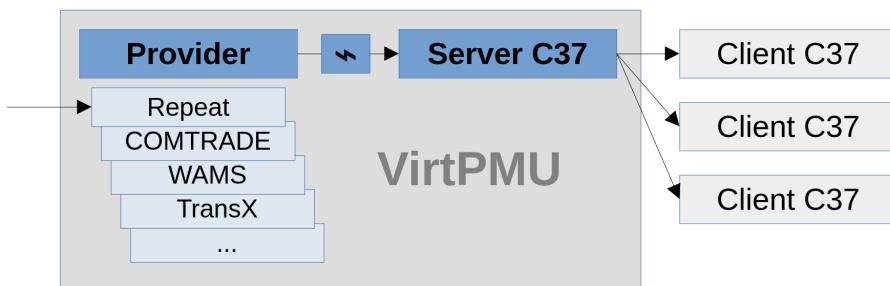


Рис. 1: Архитектура программного обеспечения VirtPMU.

Кадры конфигурации и данных сервер, в свою очередь, запрашивает у модуля Provider, который определяет конкретный способ получения данных: синтез на основе моделей силовых трансформаторов (TransX); синтез на основе моделирования низкочастотных колебаний (НЧК) в исходящих сигналах множества УСВИ (WAMS); воспроизведение архивных данных (COMTRADE); ретрансляция входящего потока (Repeat). В последнем случае источником данных может быть в том числе другой экземпляр VirtPMU, что позволяет выстраивать разнообразные цепочки подготовки тестовых данных. Библиотечная часть VirtPMU выполнена таким образом, что имеется возможность запрограммировать иные реализации модуля Provider.

В табл. 1 перечислены утилиты VirtPMU и дано краткое описание их назначения.

Программа	Назначение
vpmu-repeat	Ретрансляция и разветвление входящего потока.
vpmu-comtrade	Воспроизведение архивной записи концентратора синхронизированных векторных данных.
vpmu-wams	Генерация больших массивов данных на основе математического описания выходных сигналов УСВИ.
vpmu-trans2 vpmu-trans3	Синтез данных в соответствии с математическими моделями трансформаторов разного типа.

Табл. 1: Утилиты VirtPMU.

Между модулями Provider и Server находится ещё один компонент (рис. 1), задачей которого является выполнение различных негативных модификаций данных. К таким модификациям относятся: замена значений в каналах данных пустыми значениями (NaN) или



случайными числами; добавление импульсов в сигналы; смещение и случайный дребезг меток времени; отправка корректных фреймов данных, не соответствующих текущей конфигурации; удаление и искажение с некоторой вероятностью отдельных байтов в кадрах данных; искажение контрольной суммы кадров. Кроме перечисленных модификаций, важных с точки зрения тестирования устойчивости клиентских приложений, VirtPMU предоставляет такие возможности как приостановка передачи данных, передача кадров с общей временной задержкой, редактирование флагов статуса данных.

На рис. 2 приведены примеры совместного использования различных утилит VirtPMU для организации онлайн потоков тестовых данных. Во избежание усложнения схемы, стрелками показаны только потоки данных. В качестве объектов тестирования выбраны две системы, разрабатываемые в ООО «Инженерный центр «Энергосервис»: устройство МИСТ (модуль индикации состояния трансформатора) [12] и программный комплекс ES Phasor [13], предназначенный для анализа потоков данных системы мониторинга переходных режимов (СМПР) и, в частности, для идентификации и поиска источников НЧК в ЭС.

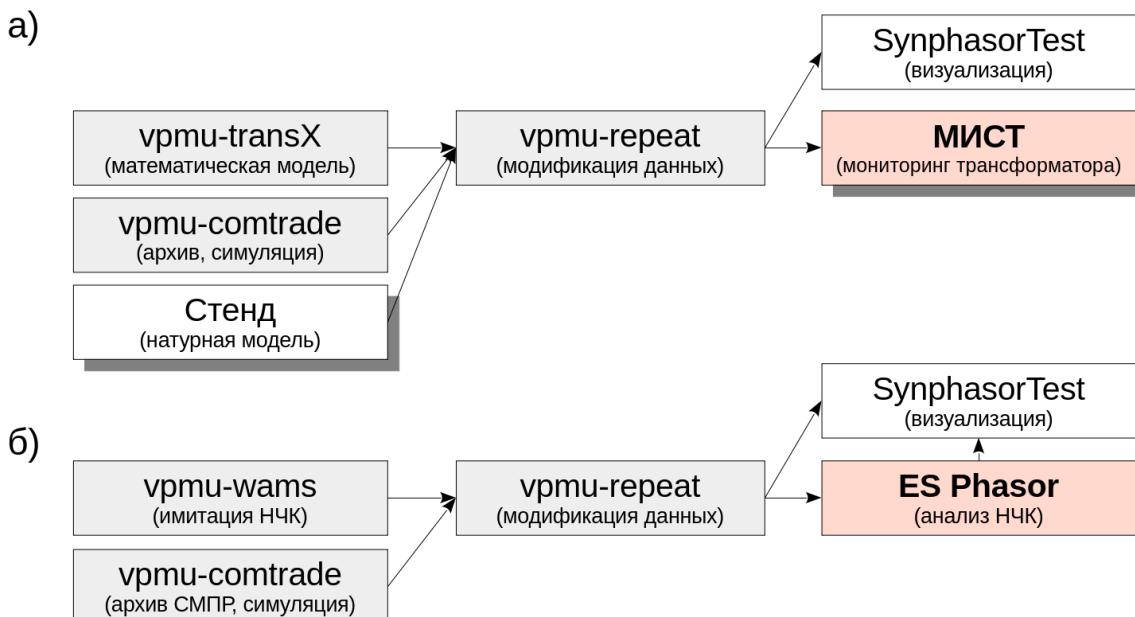


Рис. 2: Варианты совместного использования утилит VirtPMU.

В случае тестирования МИСТ (рис. 2, а) могут использоваться данные от натурного стенда, записи аварийных архивов устройств, уже установленных на объектах, а также синтезированные данные, записанные в файл или вычисляемые в режиме онлайн. При тестировании программного обеспечения анализа НЧК (рис. 2, б) используются архивные данные СМПР, отражающие реальные случаи колебаний в Единой энергетической системе России, симуляции и большие массивы данных СВИ, синтезируемые методом, описанным в следующем разделе. Приложение *vrpti-repeateat* в обоих случаях используется для ретрансляции и модификации данных. Для просмотра данных, подаваемых на тестируемый объект (а также некоторых промежуточных сигналов при анализе НЧК) используется разветвление потока и приложение *SynphasorTest* [14].

ИМИТАЦИЯ МАСШТАБНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В *vrpti-wams* применяется следующий способ конфигурирования выходного потока данных. Определяются т.н. профили настроек, соответствующие различным ролям в колебательном процессе. Задаются математические ожидания величин, параметры модели возмущения и реакции на него, параметры гармонического и стохастического шумов. Затем перечисляются присоединения, для каждого из которых выбирается профиль. Такой подход позволяет компактно описать тестовый поток, используя, в том числе, идентифицирующую информацию для УСВИ из реальной СМПР.



Синтезируемые сигналы можно описать следующим образом. Значение в канале данных вычисляется по формуле:

$$x(t) = m + \sum_{i=1}^N k_i L_{p,i}(t - \tau_i) s_i(t) + \eta(t),$$

где m – математическое ожидание величины, $L_{p,i}(t)$ – НЧК, k_i, τ_i – параметры, определяющие, с какой силой и задержкой колебания проявятся в данном сигнале, $s_i(t)$ – функция «появления» НЧК, $\eta(t)$ – шум. Параметры m, k, τ, η относятся к профилю настроек, а модель НЧК должна быть описана отдельно.

Параметры НЧК:

$$p = (a_L, f_L, a_a, f_a, a_f, f_f),$$

где a_L, f_L – амплитуда и частота НЧК, a_a, f_a – параметры модуляции амплитуды, a_f, f_f – параметры модуляции частоты. Другими словами, НЧК представляет собой модулированный гармонический сигнал:

$$L_p(t) = [a_L + a_a \cos(\omega_a t)] \left[\cos\left(\omega_L t + \frac{a_f}{\omega_f} \sin(\omega_f t)\right) \right],$$
$$\omega_L = 2\pi f_L, \omega_a = 2\pi f_a, \omega_f = 2\pi f_f.$$

Функция $s(t)$ определяет общую схему развития колебательного процесса и может быть задана по-разному, например:

$$s(t) = \max(\sin(2\pi f_s t + h \sin(2\pi f_s t + H \sin(2\pi f_s t))), 0).$$

Смысл параметров h и H схематически показан на рис. 3. В данном случае процесс развивается по такой схеме: медленное нарастание колебаний, демпфирование, резкое усиление, полное устранение, нормальный режим. Затем, через некоторое время, процесс повторяется.

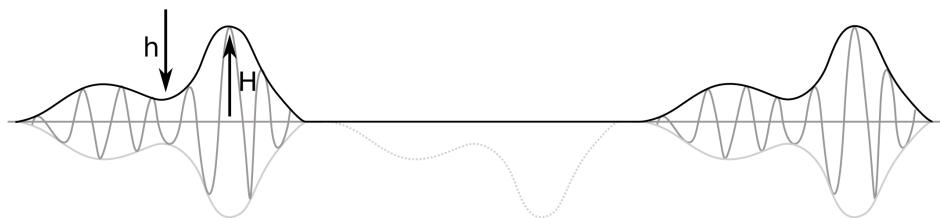


Рис. 3: Возникновение и форма НЧК.

Шум $\eta(t) = \eta_h(t) + \xi$ включает две составляющие: $\eta_h(t)$ – сумма гармоник со случайными амплитудами и частотами, ξ – случайная величина. Гармонический шум $\eta_h(t)$ обеспечивает уникальность спектра каждого сигнала в области низких частот с сохранением заданных ролей в общем процессе.

Задание уровней и фазовых сдвигов колебаний различных величин позволяет спровоцировать требуемые срабатывания алгоритмов поиска источников НЧК, реализующих методы Mode Shape Estimation (MSE) и Dissipating Energy Flow (DEF). Эффективность этих методов подтверждается практическим опытом мониторинга НЧК в Единой энергосистеме [3, 15]. В MSE [16] источник определяется по взаимному расположению полных фаз высокомощных колебаний частоты или угла вектора тока.

В DEF [17] используется интегральное выражение для оценки величины и направления распространения энергии колебаний:

$$W_{kn}^D(t) = 2\pi \int_{t-T}^t \Delta P_{kn}(\tau) \Delta f_k(\tau) d\tau + \int_{t-T}^t \frac{\Delta Q_{kn}(\tau)}{\tilde{U}_k(\tau) + \Delta U_k(\tau)} d\Delta U_k(\tau),$$

где величины ΔP_{kn} , ΔQ_{kn} , Δf_k и ΔU_k обозначают параметры изучаемой колебательной составляющей: соответственно активную и реактивную мощности на линии $k-n$, амплитуду частоты и амплитуду напряжения. \tilde{U}_k – среднее значение напряжения в точке k . Получить желаемое значение $W_{kn}^D(t)$ можно, например, задавая малую амплитуду ΔQ и настраивая амплитуды и разность фаз ΔP и Δf .



На рис. 4 показан пример синтезированных сигналов от 15 УСВИ. Для просмотра графиков и векторных диаграмм использовано приложение SynphasorTest [14]. Сигналы объекта, играющего роль источника НЧК, показаны красным цветом. Частоты всех УСВИ изображены на одном графике. Показана также активная мощность, полученная от источника НЧК и одного из приёмников. Видно, что колебания этих сигналов, соответственно, синфазны и противофазны колебаниям частоты. Величина $W_{kn}^D(t)$ показана для всех УСВИ.

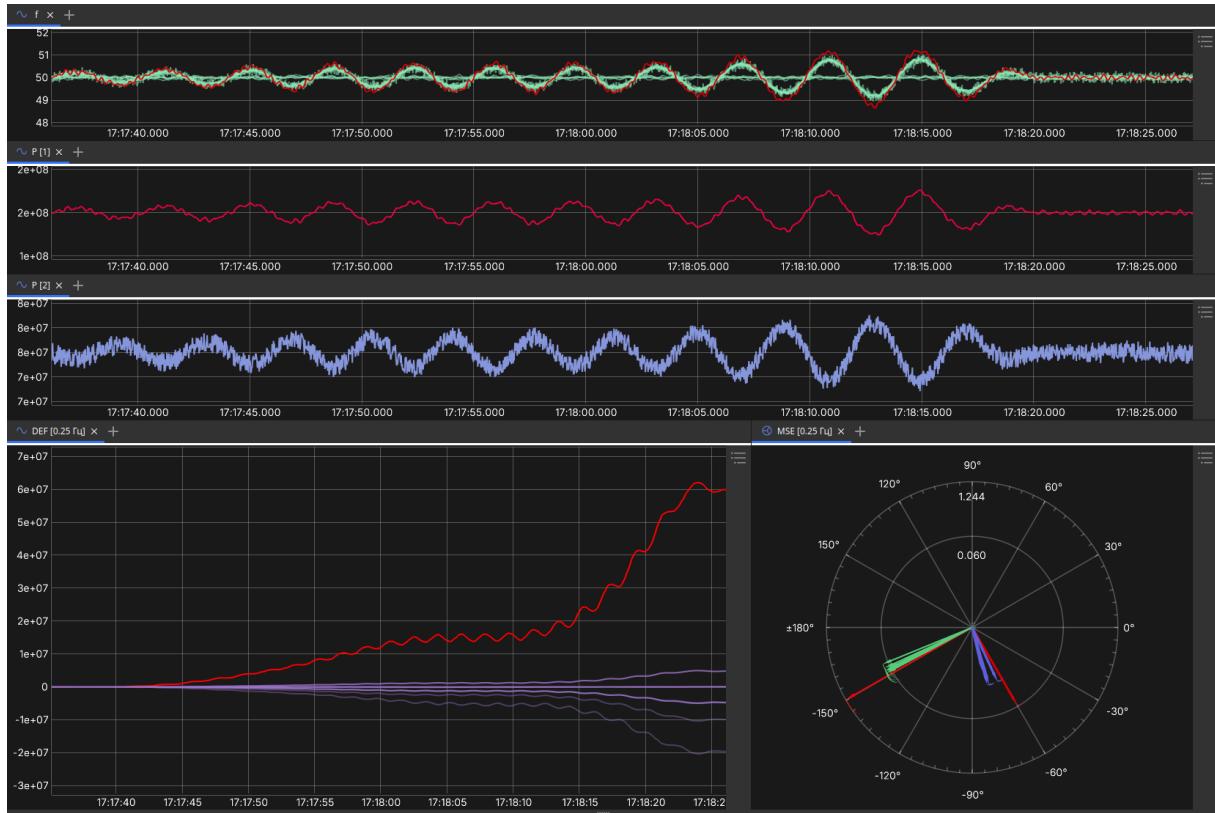


Рис. 4: Синтез данных для задачи анализа НЧК.

Амплитуды и полные фазы колебательных мод частоты, анализируемые в методе MSE, показаны на векторной диаграмме. При этом частота для MSE может быть получена как из угла синхровектора напряжения (внешняя диаграмма), так и из угла синхровектора тока [15] (внутренняя диаграмма). В приведённом примере видно, что вектор источника НЧК в обоих случаях имеет лидирующую фазу.

ИМИТАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО ПОТОКА СОБЫТИЙ

Одним из важных тестов, позволяющих задействовать компоненты системы анализа данных СВИ, обычно активизирующиеся в ненормальных режимах работы ЭС (журнал событий, аварийный архив, сигнализация и др.), является формирование такого потока данных, который приводит к интенсивному выявлению как аномальных данных, так и событий предупредительного и аварийного уровней. Рассмотрим это на примере тестирования системы мониторинга силового трансформатора.

Динамическая модель M трансформатора [2], реализованная в vpmu-transX, обеспечивает получение сигналов СВИ:

$$(\dot{U}_i(t), \dot{I}_i(t), f_i(t)) = M_{p,L,\eta}(t),$$

где p – паспортные данные трансформатора и номинальные параметры сети, L – параметры нагрузки, η – параметры гармонического и стохастического шумов; \dot{U}, \dot{I} – синхровекторы напряжения и тока (по трём фазам); f – частота; i – номер обмотки трансформатора ($i \in \{1, 2\}$ или $i \in \{1, 2, 3\}$).



Получаемые из модели M частоты и амплитуды синхровекторов умножаются на кусочно-постоянные коэффициенты $c_{f,i}$, $c_{U,i,k}$, $c_{I,i,k}$, имеющие случайный характер:

$$c(t) = \begin{cases} \rho_1, & \tau_0 \leq t < \tau_1 \\ \rho_2, & \tau_1 \leq t < \tau_2 \\ \dots & \dots \\ \rho_n, & \tau_{n-1} \leq t < \tau_n \\ \dots & \dots \end{cases},$$

где ρ_i – нормально распределённые случайные величины со средним значением, равным 1, и среднеквадратическим значением, задаваемым в конфигурации VirtPMU. Границы отрезков времени, на которых $c(t)$ постоянна, получаются следующим образом: $\tau_0 = 0$, $\tau_n = \tau_{n-1} + \lambda_n$, где λ_n – случайная величина с задаваемыми параметрами распределения.

На рис. 5 приведён пример сигналов, получаемых описанным образом.



Рис. 5: Мониторинг трансформатора. Случайные ступенчатые модификации данных.

В основе значений приведённых сигналов лежит модель двухобмоточного трансформатора, которая обеспечивает нормальные значения отклонений всех параметров, вычисляемых при мониторинге [2]. Однако всевозможные комбинации ступенчатых изменений сигналов вызывают на случайных отрезках времени превышения допустимых отклонений величин, нарушения симметрии векторов, а также события разных уровней в тех случаях, когда критерии адекватности исходных данных остаются выполненными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При системном тестировании предполагается использование только внешних интерфейсов объекта тестирования. Для систем анализа данных СВИ таким ключевым интерфейсом является стандартизованный протокол передачи измерений. Программное обеспечение VirtPMU развивает и объединяет различные способы получения тестовых данных и обеспечивает гибкое преобразование тестовых потоков, позволяя создавать различные схемы и сценарии тестирования систем анализа данных СВИ разного масштаба. Представленный инструментарий включен в процессы разработки и тестирования систем анализа данных СВИ, разрабатываемых в ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



ЛИТЕРАТУРА

- [1] Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Springer. 2017. 218 p.
- [2] Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. и др. Системы управления, мониторинга и защиты на основе синхронизированных векторных измерений // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып 72. 2021. С. 133-142.
- [3] Popov A.I., Dubinin D.M., Mokeev A.V. et al. Examples of processing low-frequency oscillations in Russia and ways to improve the analysis // 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics. 2022. P. 1-6.
- [4] Foggo B., Koji Y., Nanpeng Yu. pmuBAGE: The benchmarking assortment of generated PMU data for power system events // IEEE Transactions on Power Systems. 2023. V. 39, № 2. P. 3485-3496.
- [5] Toro G.F, Guglielmo F. Synthetic PMU Data Generator for Smart Grids Analytics // Metrology 5.1. 2025. P. 12.
- [6] Kundur P., Paserba J., Ajjarapu V. et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions // IEEE transactions on Power Systems. 2004. 19(3). P. 1387-1401.
- [7] Хохлов М.В. Полунатурное моделирование в исследовании задач мониторинга и управления ЭЭС по синхронизированным векторным измерениям // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Вып. 75. 2024. С. 655-664.
- [8] Canizares C., Fernandes T., Geraldi E. et al. Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. V. 32, № 1. P. 715-722.
- [9] Rebello E., Luigi V., Muhammad Sh. A. Experimental testing of a real-time implementation of a PMU-based wide-area damping control system // IEEE Access. 2020. №. 8. P. 25800-25810.
- [10] Zheng X., Pinceti A., Sankar L. et al. Synthetic PMU data creation based on generative adversarial network under time-varying load conditions // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2022. V. 11, №. 1, P. 234-242.
- [11] Kumar L., Ahmed S., Vanfretti L. et al. Real-time testing of synchrophasor-based wide-area monitoring system applications acknowledging the potential use of a prototyping software toolchain // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2022. № 1, P. 6215040.
- [12] Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Автоматизация понизительных подстанций на основе технологии синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. 2024. №3 (56). С.10-19.
- [13] Попов А.И., Бутин К.П., Родионов А.В. Разработка способов визуального представления параметров низкочастотных колебаний в энергосистеме // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 2023. С. 526-535.
- [14] 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.
- [15] Мокеев А.В., Ачитаев А.А., Попов А.И. и др. Идентификация и поиск источника низкочастотных колебаний на основе синхронизированных векторных измерений // Электричество. 2024. № 9, С. 23-36.
- [16] Rahul S., Sunitha R. Nonlinear nonstationary analysis techniques for mode shape estimation in power systems. – Innovations in Power & Advanced Computing Technologies. 2019. V.1, P.1-6.
- [17] Maslennikov S., Wang B., Litvinov E. Dissipating energy flow method for locating the source of sustained oscillations. – International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017. P. 55-62.