

Современный тестовый стенд для испытания устройств синхронизированных векторных измерений

М.А. БАЛАБИН, Н.Б. ЛАВРУШЕНКО, Р.И. НАУМКИН

Филиал ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СибНИИЭ

Россия

balabin@ntcsib.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Синхронизированные векторные измерения, стандарты IEEE, автоматическое тестирование.

1 ВВЕДЕНИЕ

Системы управления большими энергообъединениями (Wide-Area Control System - WACS) и защиты (Wide Area Protection System - WAPS) играют ключевую роль в развитии интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid). Синхронизированные векторные измерения, выполняемые УСВИ, являются важной технологией, которая делает создание WAMS/WACS – систем возможным. Устройства синхронизированных векторных измерений представляют собой сложные цифровые устройства, и существует множество алгоритмов обработки цифровых сигналов, которые можно использовать в УСВИ. Точность измерений в первую очередь зависит от выбора алгоритма. Более того, не существует единственного оптимального алгоритма, который бы превосходил все другие алгоритмы в любых возможных случаях. Любой алгоритм может предоставить лишь компромиссное решение между противоречивыми требованиями точности измерения, помехоустойчивостью и динамическими характеристиками. Точность УСВИ, особенно во время переходных процессов, является темой многочисленных публикаций как международных (например, [1,2]), так и российских (например, [3,4,5]) исследователей.

Основными документами, регламентирующими характеристики УСВИ, является серия стандартов, опубликованных IEEE. Последние версии стандартов, IEEE C37.118.1 [6] и C37.118.2 [7], были опубликованы в конце 2011. В настоящее время на рынке уже начали появляться устройства, производители которых декларируют соответствие новым стандартам.

Разработка УСВИ включает в себя обязательную стадию тестирования для оценки измерительной точности устройства и подтверждения соответствия стандартам. Такие проверки должны выполняться как производителем, так и независимыми лабораториями. Точность, надежность и легкая взаимозаменяемость УСВИ от разных производителей особенно важна для электросетевых компаний, применяющих УСВИ. Для этого необходимо как независимое тестирование УСВИ на соответствие стандарту, так и сравнительные испытания УСВИ различных производителей.

Обычные генераторы сигналов не предназначены для поставленной задачи, которая требует формирования синхронизированного по времени сигнала с динамически изменяющимися параметрами. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо было разработать специализированное решение. Такой специализированный тестовый комплекс был создан в СибНИИЭ, в рамках разработки устройства синхронизированных векторных измерений УСВИ-101, выполненной в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС». Структура испытательного комплекса, его исполнение и применение обсуждаются в данной статье.

2 СТРУКТУРА И ИСПОЛНЕНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Новый специализированный программно-аппартный комплекс для тестирования характеристик УСВИ был разработан в СибНИИЭ. Комплекс представляет собой модернизированный вариант предыдущей версии, представленной два года назад. Новый комплекс получил название «Тестово-моделирующий комплекс для тестирования УСВИ» (ТМК, сокращенно). ТМК выполняет тестирование УСВИ в пакетном режиме: оператор ТМК выбирает набор тестовых сигналов с помощью графического пользовательского интерфейса и запускает процесс тестирования. ТМК выполняет все тесты последовательно и обрабатывает получившиеся результаты тестирования в автоматическом режиме, без участия человека. Когда последовательность тестов завершена, оператор ТМК может просмотреть сгенерированные отчеты по результатам тестирования с различными уровнями детализации. Блок-схема ТМК показана на рисунке 1.

ТМК оборудован двумя приёмниками спутниковой системы навигации GPS (Global Positioning System, Глобальная Система Позиционирования) для синхронизации времени: SEL-2407 от Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. и Trimble Acutime Gold. Первый приемник имеет интерфейс IRIG-B, второй — 1PPS+NMEA. Тестируемый УСВИ может быть подключен к любому из них в зависимости от поддерживаемого интерфейса временной синхронизации. Первый GPS-приемник также используется для синхронизации сигнала генератора и концентратора данных.

Управляющий компьютер предоставляет графический интерфейс пользователя к ТМК. Перед началом процедуры тестирования управляющий компьютер используется для настройки и конфигурации испытываемого УСВИ встроенными средствами, такими как web-интерфейс, Telnet/SSH или последовательный порт. Библиотека тестовых сигналов хранится на управляющем компьютере. Пользователь ТМК имеет возможность собрать и запустить к исполнению произвольную последовательность тестов из библиотеки тестовых сигналов. Управляющий компьютер через Ethernet-соединение отправляет тестовые сигналы в цифровой форме на генератор сигналов.

Генератор сигналов (используется прецизионный испытательный стенд релейной защиты и универсальный калибратор OMICRON CMC256plus) получает цифровое представление тестового сигнала от управляющего компьютера и выдает сигналы на свои аналоговые выходы один за другим. Генерация каждого аналогового сигнала синхронизирована по времени с сигналом точного времени, полученным от GPS-приемника. Генератор сигналов создает XML-протокол испытаний, содержащий полный список запущенных тестов с UTC-метками времени, отмечающих начало запуска каждого теста. Затем тестовый протокол передается от генератора сигналов управляющему компьютеру.

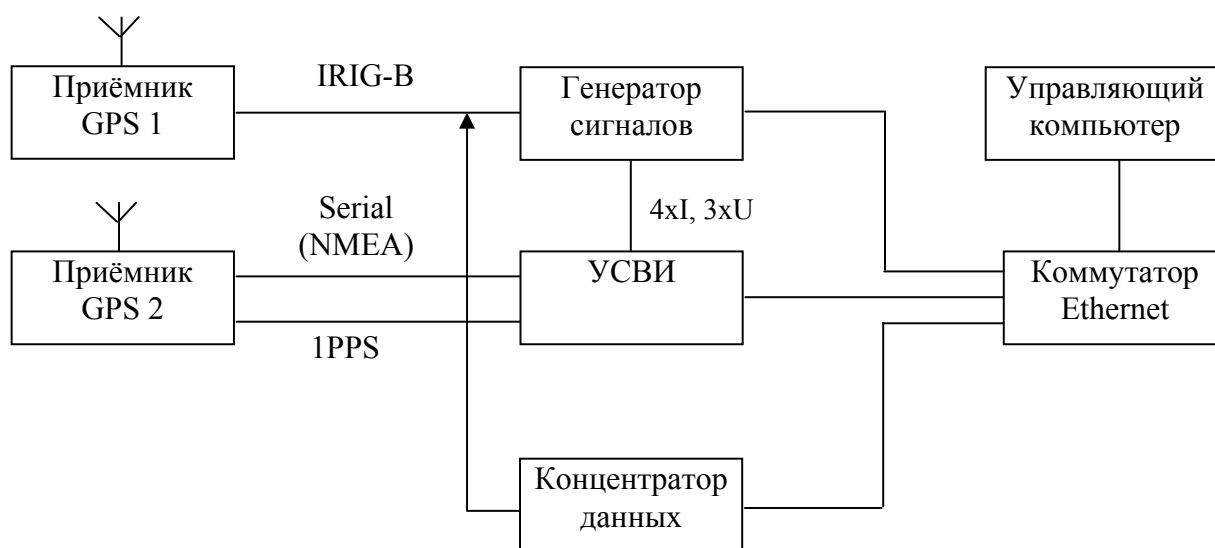


Рис. 1: Блок-схема тестово-моделирующего комплекса

Генератор сигналов может быть присоединен к УСВИ одним из двух способов в зависимости от коммуникационных возможностей УСВИ. Если УСВИ оборудован традиционными аналоговыми входами, предназначенными для соединения с измерительными трансформаторами, то УСВИ может быть подключен к аналоговым входам генератора сигнала. Если УСВИ оснащен цифровыми измерительными входами, то ТМК может передавать тестовый сигнал УСВИ, используя протокол МЭК 61850-9-2 с помощью специализированного программного генератора сигналов. Спецификации протокола доступны в [8] и [9].

УСВИ передает поток данных по протоколу IEEE C37.118 от своего коммуникационного порта (последовательный порт или Ethernet, используя TCP/IP или UDP/IP) к концентратору Данных. Концентратор представляет собой высокопроизводительный компьютер с установленной на нем операционной системой реального времени и специализированным программным обеспечением. Время на концентраторе данных синхронизируется точным временным сигналом, полученным от GPS-приемника. Концентратор получает данные от УСВИ в формате протокола C37.118 и вычисляет задержку передачи данных УСВИ. Затем, поток измеренных фазов (снова в формате протокола IEEE C37.118) передается на управляющий компьютер по TCP/IP.

Управляющий компьютер получает измерения фазов от концентратора данных и сохраняет их как файлы на жесткий диск. Затем, программное обеспечение управляющего компьютера анализирует оба файла: тестовый XML-протокол, созданный генератором сигналов, и сохраненный поток векторных измерений. Когда анализ завершен, результаты тестирования доступны пользователю в графической форме, включая таблицы с ошибками измерений и различные графики.

3 БИБЛИОТЕКА ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ

Тестовые сигналы хранятся в расширяемой библиотеке сигналов. Библиотека тестовых сигналов была составлена в соответствии с принципами, сформулированными в [3]. Все тестовые сигналы, реализованные в ТМК, можно разделить на две основные группы:

1. математически заданные сигналы
2. сигналы, полученные моделированием электромеханических переходных процессов

Сигналы первой группы составлены с учетом требований нового стандарта по синхрофазорам C37.118.1-2011. Эта группа тестов состоит из следующих множеств сигналов:

1. Тесты с отклонением значений тока, напряжения и частоты от номинальных значений.
2. Тесты с гармоническими искажениями формы сигналов тока и напряжения.
3. Тесты с интергармоническими искажениями.
4. Тест ширины полосы пропускания (с синусоидально модулированными амплитудой и углом).
5. Тесты с линейным изменением частоты сигнала.
6. Тесты со ступенчатыми изменениями амплитуды и угла сигнала.

Сигналы второй группы были сформированы моделированием электромеханических переходных процессов в крупном энергообъединении в программном комплексе Мустанг. Реализованы следующие типы аварийных возмущений:

1. КЗ с успешным ТАПВ линии (с нарушением и сохранением устойчивости).
2. КЗ с неуспешным ТАПВ линии (с нарушением и сохранением устойчивости).
3. Аварийный режим с нарушением устойчивости, в котором асинхронный режим имеет многочастотный характер.
4. Аварийный режим с аperiодической составляющей в сигнале тока.

Тестовые сигналы представлены в векторной(фазорной) форме, таки образом, результаты измерений могут быть напрямую сравнены с тестовыми сигналами для вычисления ошибок измерения УСВИ.

Анализ результатов тестирования может быть представлен различными способами. Краткий отчет содержит в себе основной обзор последовательности испытаний: количество пройденных или не пройденных тестов для УСВИ класса М или Р. Детальный отчет содержит ошибки всех измерительных каналов тока и напряжения (TVE, RMS, и ошибки фазового угла), измерений частоты и скорости изменения частоты. Вычисляются оба типа ошибок: стандартное отклонение и максимальная ошибка. Для динамических тестов имеется возможность построить графики зависимости ошибки от времени. Результаты, полученные от тестирования группы тестов, суммируются в аналитических диаграммах как зависимости ошибок от «основных влияющих величин»: например, для тестов отклонения частоты будет построена диаграмма зависимости ошибки частоты от величины отклонения частоты.

4 СРАВНИТЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ НЕСКОЛЬКИХ УСВИ

В СибНИИЭ проводилось сравнительное тестирование УСВИ нескольких производителей. Отдельные результаты этого тестирования приведены в этой главе.

На рисунке 2 изображен график для тестов с отклонением частоты, показывающий зависимость общей векторной ошибки (TVE) от отклонения частоты от ее номинального значения. Во время испытаний сигнал отклонения частоты изменялся от 45 Гц до 55 Гц ($\pm 10\%$ от номинального значения). TVE УСВИ2 и УСВИ3 линейно растет вместе с увеличением отклонения частоты от номинала, подобного роста не наблюдается у УСВИ1 и УСВИ4, что может свидетельствовать об использовании алгоритмов вычисления фазоров, корректно учитывающих отклонение частоты сигнала.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты измерений TVE для тестов ширины полосы пропускания. Во время этих тестов действующее значение и угол сигнала одновременно модулируются синусоидально. На рисунке 3 показан график зависимости TVE от частоты модуляции сигнала. Видно, что с ростом частоты модуляции ошибка измерения растет у УСВИ2 и УСВИ3, ошибка УСВИ2 возрастает особенно быстро, превосходя разрешенный стандартом предел для TVE в 3%. На рисунке 4 представлен пример графика, где показаны значения мгновенных TVE для частоты модуляции равной 0.268 Гц. На графике заметно, что у УСВИ2 и УСВИ3 имеют периодические ступенчатые изменения ошибки, причем, «пилы» скачков совпадают с началом каждой секунды UTC. Это может быть объяснено периодической коррекцией внутреннего таймера УСВИ по синхроимпульсу GPS-приемника.

На рисунках 5-7 показаны тесты со ступенчатым изменением сигнала. Рисунки 5-6 содержат графиками сигнала с 10% скачком по действующему значению.

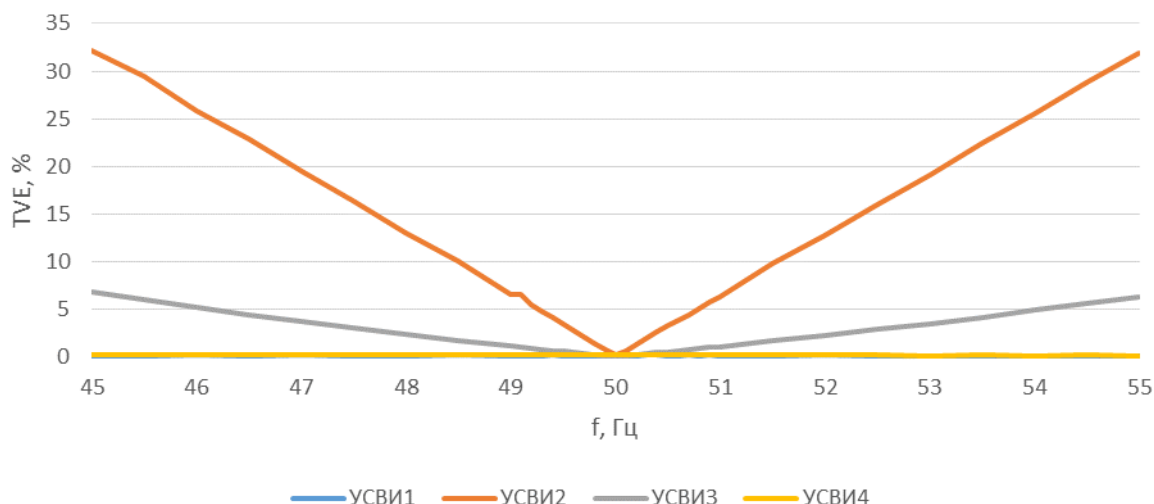


Рис. 2: Сравнение общей векторной ошибки УСВИ в тестах с отклонением частоты

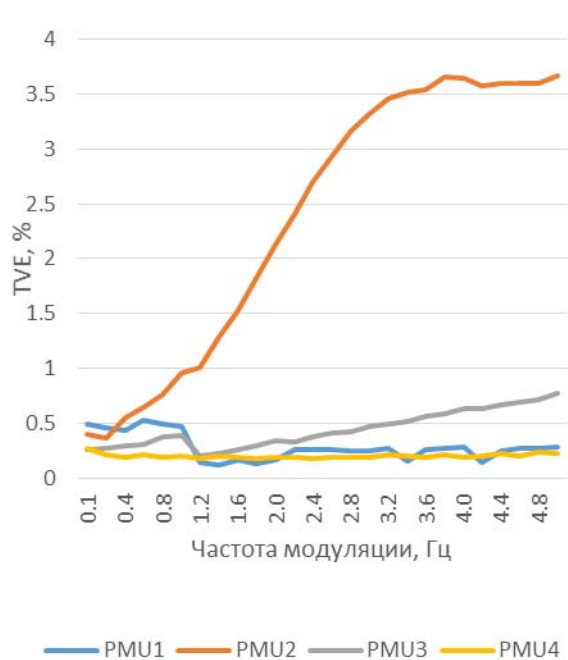


Рис. 3: Сравнение общей векторной ошибки УСВИ в тестах ширины полосы пропускания

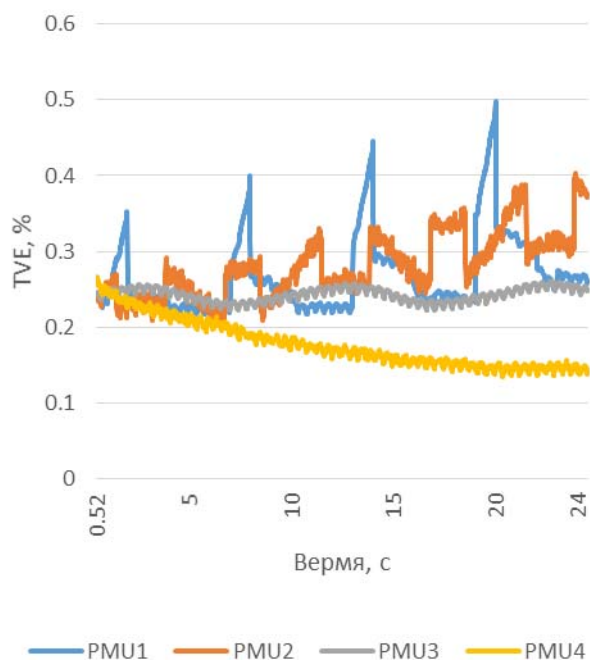


Рис. 4: Сравнение общей векторной ошибки УСВИ в тесте ширины полосы пропускания.
 $k_x=0.1$, $k_a=0.1$, $f=0.1$ Гц

На рисунке 5 отклик УСВИ2 сдвинут влево от момента скачка, а отклик УСВИ4 – вправо, что может быть вызвано неточностью компенсации задержки цифрового фильтра. На рисунке 6 видно, что в измерениях фазного угла наблюдаются небольшие осцилляции. Измерения угла особенно долго осциллируют у УСВИ2. Стандарт С37.118 определяет величину скачка только в 10%, однако, в качестве дополнительного эксперимента, был построен график зависимости, на рисунке 7, времени отклика (response time) от величины скачка. Показатель времени отклика является важной величиной, так как показывает насколько быстро восстанавливается нормальный процесс измерений после события коммутации. В зависимости от используемых алгоритмов УСВИ, это время может быть константным или зависеть от величины скачка сигнала. Включение такой информации в документацию УСВИ их производителями было бы полезно для проектировщиков WAMS/WACS систем.

На рисунке 8 приведена гистограмма задержек передачи измерений, зафиксированных при периодичности измерений 50 фазоров в секунду. Задержка передачи измерения вычисляется как разность между моментом времени, указанным в кадре УСВИ, и когда этот кадр доступен для считывания на цифровом выходе УСВИ. На гистограмме видно, что средние значения УСВИ колеблются от 30 до 40 миллисекунд. Согласно стандарту время задержки передачи при данной периодичности измерений составляет: для класса М - 60 мс, для класс Р - 40 мс. Из всех УСВИ только УСВИ 2 соответствует требованиям класса Р. Для УСВИ1 время задержки на порядок превышало аналогичное значения других УСВИ и требования стандарта, поэтому на графике оно не приводится. Несмотря на то, что средние значения УСВИ3 укладываются в требования класс Р, его распределение задержек имеет длинный «хвост», из-за которые не позволяют говорить о соответствии классу Р. Для УСВИ4 даже среднее время удовлетворяет только требованиям класса М, что можно связать с тем, что УСВИ4 использует коммуникационный протокол ТСР, который не очень пригоден для УСВИ класса Р.

На рисунках 9-10 показан тест ТАПВ с нарушением динамической устойчивости. На рисунке 9 изображены идеальные значения действующего значения и фазного угла, на рисунке 10 изображены TVE УСВИ. Для сохранения наглядности графика ошибка УСВИ2 была вынесена на правую ось. На рисунке 10 видно, что УСВИ2 и УСВИ3 показывают большую существенно большую погрешность измерений, чем другие. Подобное поведение наблюдалось во всех тестах, полученных моделированием электромеханических переходных процессов.

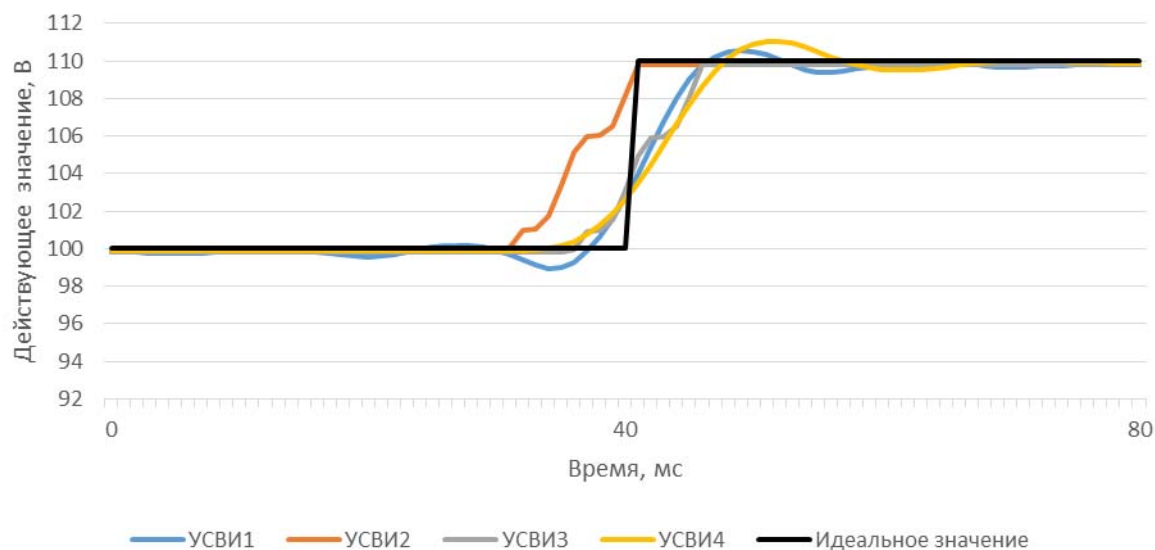


Рис. 5: Сравнение измерений действующего значения УСВИ в тестах со ступенчатым изменением сигнала

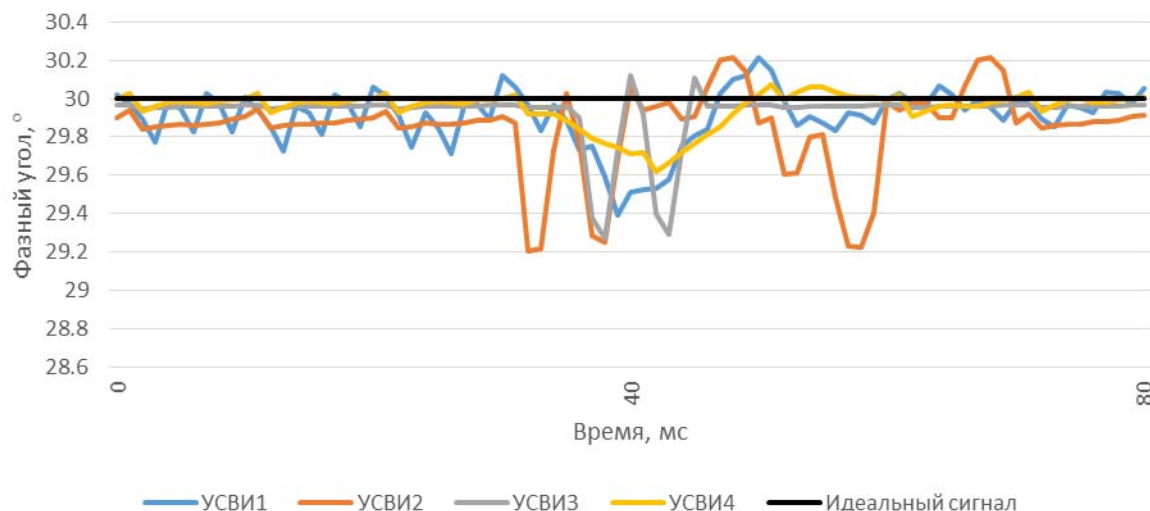


Рис. 6: Сравнение измерений фазного угла УСВИ в тестах со ступенчатым изменением сигнала

Эти же УСВИ показывали большие погрешности на тестах ширины полосы пропускания, что свидетельствует о том что, тесты ширины полосы пропускания хорошо оценивают точность измерений УСВИ при переходных электромеханических процессах. Причиной этих погрешностей является использование алгоритмов, плохо работающих при отклонении частоты от номинального значения.

Из всех протестированных УСВИ только УСВИ3 оснащен помимо аналоговых измерительных входов цифровым измерительным входом, работающим по протоколу МЭК 61850-9-2 для передачи мгновенных значений. В ходе тестирования на цифровой вход УСВИ3 подавались сигналы из той же библиотеки сигналов. Результаты испытаний, чего и следовало ожидать, совпали с результатами, полученными при тестировании с аналоговыми сигналами. Отличия сводились к отсутствию ошибок измерений, вызванных точностью калибровки и случайным шумом в аналоговых цепях.

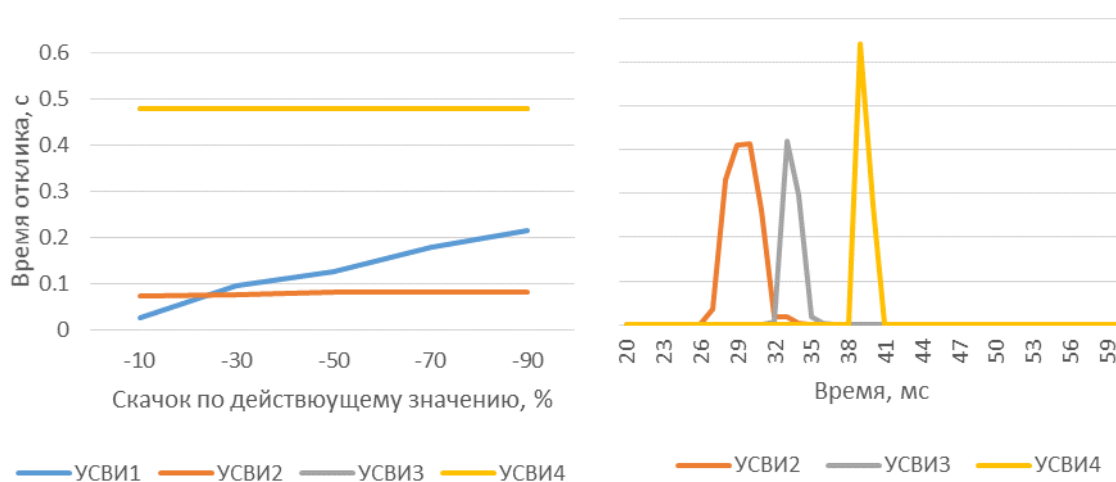


Рис. 7: Сравнение времени отклика УСВИ в тестах со ступенчатым изменением сигнала

Рис. 8: Сравнение задержек передачи УСВИ

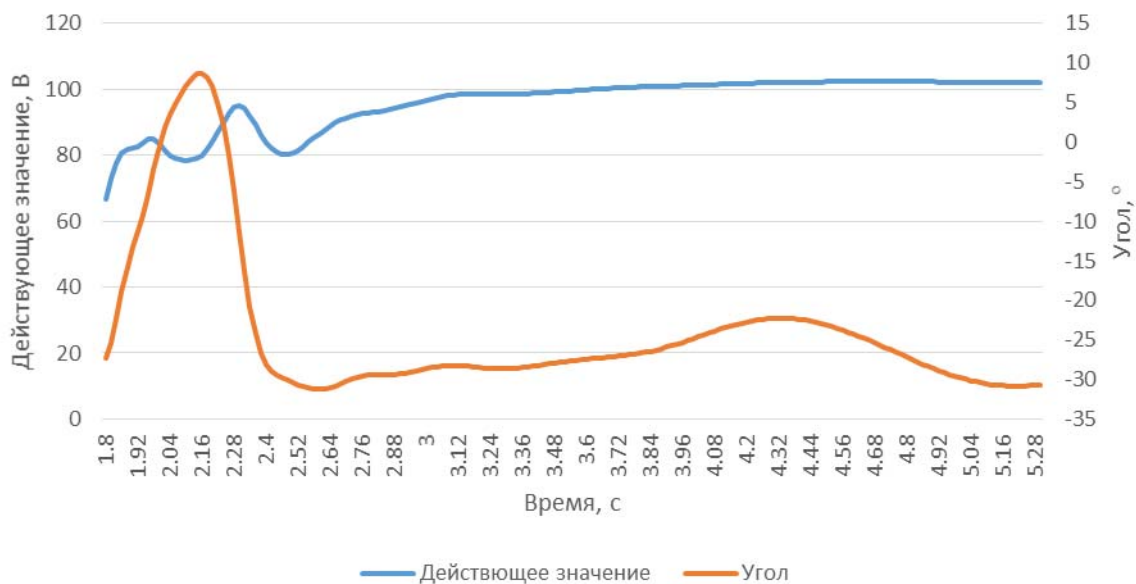


Рис. 9: ТАПВ с нарушением устойчивости

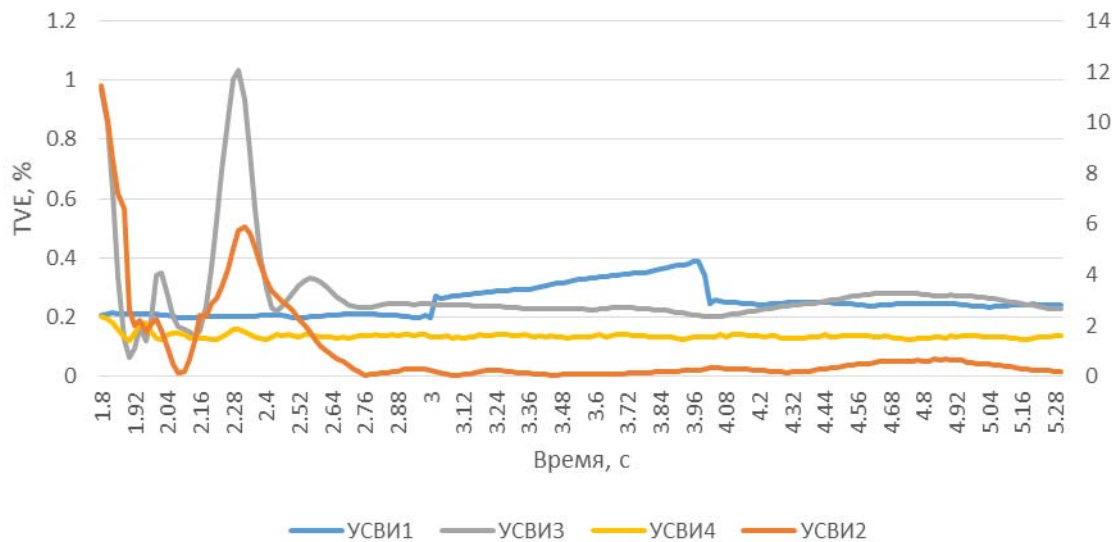


Рис. 10: Сравнение общей векторной ошибки УСВИ в тесте с ТАПВ с нарушением устойчивости

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный в СибНИИЭ ТМК является современной разработкой для тестирования УСВИ. В настоящее время ТМК удовлетворяет современным стандартам тестирования УСВИ и не имеет аналогов в России.

Во время разработки ТМК много внимания уделялось автоматическому тестированию и анализу результатов тестирования, что позволяет запускать длинные последовательности тестов без участия оператора. ТМК был собран из имеющихся на рынке готовых коммерческих компонентов, что позволяет воссоздать его с минимальными усилиями.

Тестовые сигналы хранятся в расширяемой библиотеке тестов, что делает процесс добавления новых тестов очень простым. Реализованный в настоящее время набор тестовых сигналов содержит сигналы, определенные как в стандарте IEEE C37.118.1, так и сигналы не из стандарта. Правильно подобранная коллекция тестовых сигналов очень важна для качественной оценки производительности УСВИ, таким образом, любые вклады в библиотеку тестов, особенно от международных исследователей, приветствуются.

ЛИТЕРАТУРА

1. K.E. Martin, J.F. Hauer, T.J. Faris, "PMU Testing and Installation Considerations at the Bonneville Power Administration," Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007, pp. 1-6.
2. Hu Yi, D. Novosel, "Progresses in PMU testing and calibration," Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 6-9 April 2008, pp. 150-155.
3. М.А. Балабин, К. Гёрнер, И.Е. Наумкин, К. Ретанц, "Тестовые испытания устройств синхронизированных измерений векторных величин энергосистем," Электричество, vol. 4, pp. 17-27, Apr. 2011.
4. А.В. Жуков, Ю.А. Куликов, А.С. Герасимов, А.Х. Есипович, "Программа динамических испытаний цифровых регистраторов системы мониторинга в тестовой схеме физической модели энергосистемы," in Proc. 2011 Современные Направления Развития Систем Релейной Защиты И Автоматики Энергосистем [Online]. Available: <http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/infra/html>
5. Мокеев А.В., «Интеллектуальные устройства для активно-адаптивных сетей» Энергоэксперт, №2, 2012, стр. 62-64.
6. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Std. C37-118-1-2011, 2011.
7. IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems, IEEE Std. C37-118-2-2011, 2011.
8. International Standard "IEC 61850-9-2: Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3," 2nd ed. Draft for public comment. IEC, 2009.
9. UCA International Users Group, "IEC 61850-9-2 LE: Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC61850-9-2," UCA, 2004.