

Синхронизированные векторные измерители параметров режима электроэнергетических систем в различных условиях работы

МАКСИМОВ Б.К., КЛИМОВА Т.Г., ЖУКОВ А.В., ДУБИНИН Д.М.

Современное развитие технологий диспетчерского и автоматического управления режимом работы электроэнергетических систем требует постоянного повышения уровня технического совершенства и функциональности технических средств, в том числе устройств синхронизированных векторных измерений параметров электроэнергетического режима. Роль синхронизированных векторных измерений при оценивании и управлении режимом работы энергосистемы постоянно увеличивается. В статье анализируется поведение синхронизированных векторных измерителей при детерминированных изменениях параметров режимов ЭЭС (сертификационные испытания) и флуктуационных изменениях этих параметров (реальные условия работы измерителей). Показано, что для правильного выбора синхронизированного векторного измерителя для решения конкретных задач необходимо проверить его погрешность и возможность работы в предполагаемых условиях работы в энергосистеме.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энергосистема, режим работы, векторные измерения, оценивание

Роль синхронизированных векторных измерений в мире и, в частности, в России, при оценивании и управлении режимом работы энергосистемы постоянно увеличивается. При этом основным пользователем данных синхронизированных векторных измерителей (СВИ или УСВИ – устройства СВИ, зарубежный аналог – Phasor Measurement Unit – PMU) в настоящее время является технологический и диспетчерский персонал диспетчерских центров. Системные операторы более чем 30 стран разрабатывают идеологию применения синхронизированных векторных измерений в задачах диспетчерского и автоматического управления [1–4].

Основным преимуществом синхронизированных векторных измерений в сравнении с телеизмерениями являются высокая скорость обновления информации (от 1 до 4 измерений на период промышленной частоты), точность измерения параметров электроэнергетического режима, а также высокая точность синхронизации времени с глобальными навигационными спутниковыми системами (не хуже 1 мкс). Точность синхронизации времени СВИ является важным параметром в связи с тем, что, во-первых, от нее непосредственно зависит точность фиксации абсолютного угла, а во-вторых, она обеспечивает корректность работы алгоритмов приложений, применяющих данные СВИ и построенных на использовании измерений, сделанных в разных частях энергосистемы. Измерения параметров режима проводятся при изменении различных характеристик анализируемого сигнала: изменяются амплитуда, частота, фаза напряжения в заданных точках, в том числе и случайным

образом. При этом могут наблюдаться гармонические и интергармонические искажения синусоидального напряжения.

Требования к точности измерения параметров электроэнергетического режима при детерминированных параметрах режимов ЭЭС (сертификационные испытания) определены в [1, 2]. Они установлены одинаковыми для обеспечения соответствия СВИ российских производителей зарубежным требованиям. Эти результаты являются паспортными данными СВИ, полученными в условиях детерминированных изменений параметров.

Таким образом, в паспортных данных измерительных векторных измерителей не приводятся результаты метрологических испытаний, характеризующих поведение устройств в условиях реальных энергосистем, поэтому необходимо рассматривать возможности выбранного измерителя в предполагаемых условиях работы в энергосистеме. Далее анализируется поведение синхронизированных векторных измерителей при детерминированных параметрах режимов ЭЭС (сертификационные испытания) и флуктуационных изменениях этих параметров (реальные условия работы измерителей). Показано, что перед выбором нужного для решения конкретных задач СВИ необходимо проверить погрешность и возможности работы выбранного измерителя в предполагаемых условиях работы в энергосистеме.

Тестовая схема для проведения сертификационных испытаний СВИ должна быть собрана в соответствии с рис. 1.



Рис. 1. Тестовая схема для проведения сертификационных испытаний СВИ

Тестовая схема для проведения сертификационных испытаний СВИ должна включать:

- программно-аппаратный комплекс (ПАК);
- устройства ввода-вывода сигналов через цифровые интерфейсы и/или аналоговые усилители напряжения и тока (полная погрешность усилителей должна быть не более 0,25%);
- источник(и) точного времени;
- архиватор векторных измерений;
- тестируемые СВИ.

На рис. 2 показаны основные элементы программно-аппаратного комплекса на основе симулятора реального времени RTDS (Real Time Digital Simulator) и усилителей тока и напряжения, имитирующих сигналы измерительных трансформаторов напряжения и тока. Векторные измерители подключаются к усилителям напряжения и тока.

Приемники сигналов точного времени устанавливаются и подключаются в соответствии с указаниями соответствующих эксплуатационных документов. Для синхронизации измерений СВИ рекомендуется использовать приемники сигналов синхронизации времени того типа, с которым СВИ функционирует на объектах электроэнергетики.



Рис. 2. Элементы ПАК RTDS для сертификационных испытаний

Полная погрешность измерения вектора (TVE-Total Vector Error) – величина, характеризующая отклонение амплитуды и фазы измеренного вектора от их заданных значений, определяется по формуле:

$$P_{TVE} = \sqrt{\frac{(\hat{x}_r - x_r)^2 + (\hat{x}_i - x_i)^2}{x_r^2 + x_i^2}} 100,$$

где \hat{x}_r – действительная часть измеренного вектора; x_r – действительная часть истинного вектора; \hat{x}_i – мнимая часть измеренного вектора; x_i – мнимая часть истинного вектора; (P_{TVE} , %).

В сертификационных испытаниях изменяются амплитуда, частота, фаза напряжения по заданным детерминированным законам, а также добавляются гармонические и интергармонические искажения синусоидального напряжения.

На рис. 5 показаны рассчитанные значения суммарной векторной погрешности в опыте изме-

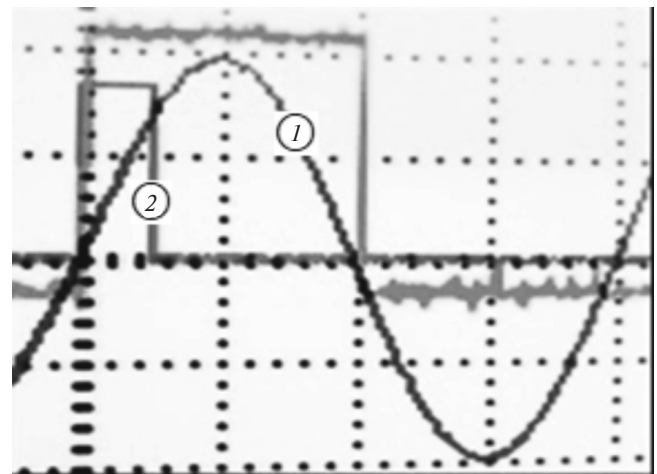


Рис. 3. Синхронизация тестовых сигналов RTDS (1) по сигналу точного времени 1PPS (2)

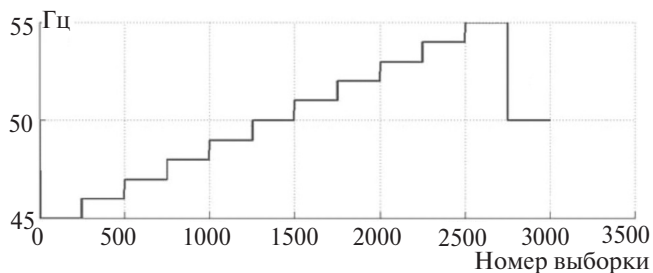


Рис. 4. Пример тестового изменения параметров – скачкообразного изменения частоты тестового сигнала

нения частоты, полученные в ходе проведения тестовых испытаний восьми СВИ. Видно, что СВИ 1 ни при каком значении частоты не удовлетворяет по точности требованиям [1, 2]. Во всем диапазоне изменения тестовых значений частоты значения полной ошибки $\Pi_{TVE} > \Pi_{TVE_{доп}} = 1\%$. Еще два СВИ (2 и 3) обеспечивают нужную точность не во всем диапазоне заданных частот. Остальные пять устройств полностью удовлетворяют в данном опыте требованиям [1, 2]. Следовательно, алгоритмы трех СВИ требуют доработки.

Кроме полной общей ошибки измерения синхронизированного вектора определяются также погрешности измерения частоты и скорости ее изменения. Погрешность измерения частоты Π_{FE} (FE – Frequency Error) – абсолютная погрешность измерения частоты основной гармоники напряжения электрического тока: $\Pi_{FE} = |\hat{f}(n) - f(n)|$ – погрешность измерения частоты в момент времени n , где $\hat{f}(n)$ – измеренное в момент времени n значение частоты; $f(n)$ – истинное значение частоты в момент времени n .

Погрешность измерения скорости изменения частоты (Π_{RFE} – Rate of change of Frequency Error) – абсолютная погрешность скорости измерения

частоты основной гармоники напряжения переменного тока:

$$\Pi_{RFE} = \left| \frac{d\hat{f}(n)}{dt} - \frac{df(n)}{dt} \right|,$$

где $\frac{d\hat{f}(n)}{dt}$ – измеренная в момент времени n скорость изменения частоты; $\frac{df(n)}{dt}$ – истинное значение скорости изменения частоты в момент времени n .

Задаются характеристики переходных процессов СВИ (время отклика, время реакции, перерегулирование, их определения даны на рис. 6) и требования к ним.

На рис. 7 представлены варианты полученных оценок временных характеристик одного из СВИ в серии тестов со ступенчатым изменением амплитуды напряжения. В характеристиках данного измерителя наблюдаются чрезмерное перерегулирование (больше допустимых 5 % скачка амплитуды) и появление отклика на скачок параметра существенно раньше момента возникновения этого скачка, что связано с правилом записи в архив данных.

Допустимые значения погрешностей измерений СВИ классов М и Р приведены в [1, 2]. Классы измерителей различаются по их назначениям: Р (protection) предназначен для приложений (сервисов), функционирующих в переходных режимах работы энергосистемы, измерения СВИ класса Р характеризуются высоким быстродействием; М (measurement) предназначен для точных измерений в стационарных режимах работы энергосистемы в расширенном диапазоне; повышенных требований к быстродействию не предъявляется.

Критерием соответствия СВИ требованиям [1, 2] является соответствие во всех основных тестах значений Π_{TVE} , Π_{FE} , Π_{RFE} этим требованиям для

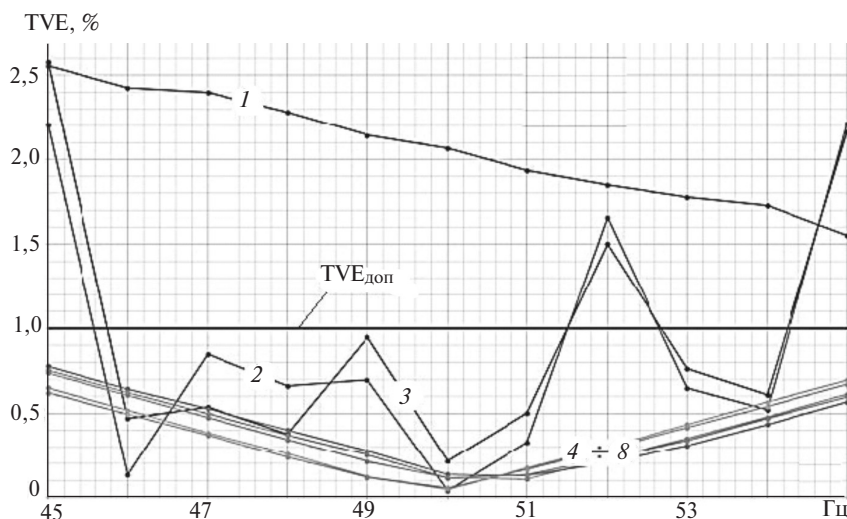


Рис. 5. Сопоставление результатов тестирования разных синхронизированных векторных измерителей (1–8 – номера СВИ)

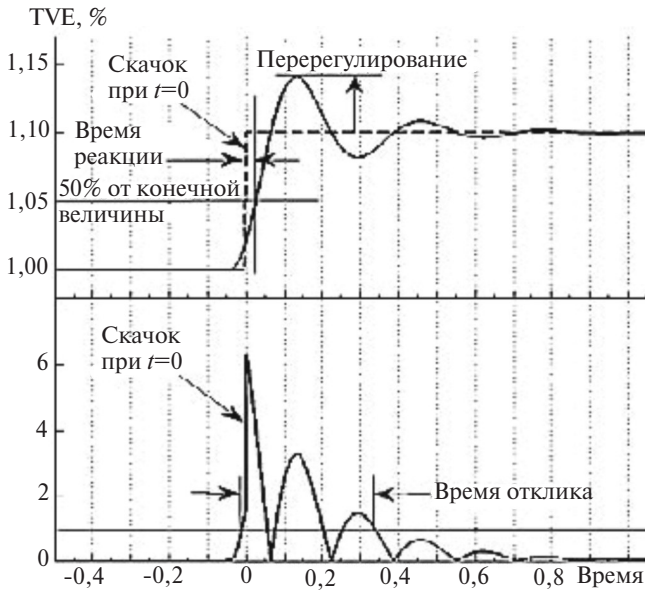


Рис. 6. Характеристики переходных процессов синхронизированных векторных измерителей

указанного заявителем класса СВИ. Эти результаты являются паспортными данными СВИ, полученными в условиях детерминированных изменений параметров.

Для применения СВИ в перспективных системах управления и защиты (в иностранной литературе WAMPAC – Wide Area Monitoring, Protection and Control Systems) в качестве измерительного органа они должны обеспечивать точность измерений в ходе переходных процессов, соответствующих процессам в электроэнергетических системах. Необходимо проводить опыты, имитирующие лавину частоты (с параметрами, близкими к реальным) и короткое замыкание, и определять возможные дос-

тижимые TVE, FE, RFE. Кроме того, в реальных условиях работы измерения векторов проводятся в условиях флуктуаций всех режимных параметров. В связи с этим необходимо рассмотреть и влияние указанных флуктуаций на точность оценки параметров вектора в тестах, регламентированных [1, 2], и дополнительными возможными рабочими ситуациями.

Использование ПАК RTDS в качестве испытательного оборудования позволило провести ряд дополнительных тестов, в которых определяются точностные характеристики испытуемых СВИ в режимах, не регламентированных в [1, 2]. Проведены испытания в реальном времени пяти промышленных образцов синхронизированных векторных измерителей.

Для иллюстрации проведенных испытаний в статье представлены результаты оценки частоты в дополнительных исследованиях, соответствующих первому тесту стандартов [1, 2]; в данном тесте частота тестового синусоидального сигнала меняется скачком от 45 до 55 Гц с шагом 1 Гц, амплитуда равна номинальному значению. Длительность каждой ступени установлена равной 10 с. Для проверки работы СВИ в условиях, близких к работе в энергосистеме, формируется тестовый сигнал, в котором к эталонному изменению частоты добавляются флуктуации локальной частоты и напряжения энергосистемы, измеряемые приборами RTDS, подключенными к электросети.

На рис. 8,а отображаются эталонное изменение частоты и сигналы, измеренные СВИ. Все измерения в данном масштабе практически повторяют эталонные значения частоты, вследствие этого все кривые совпадают.

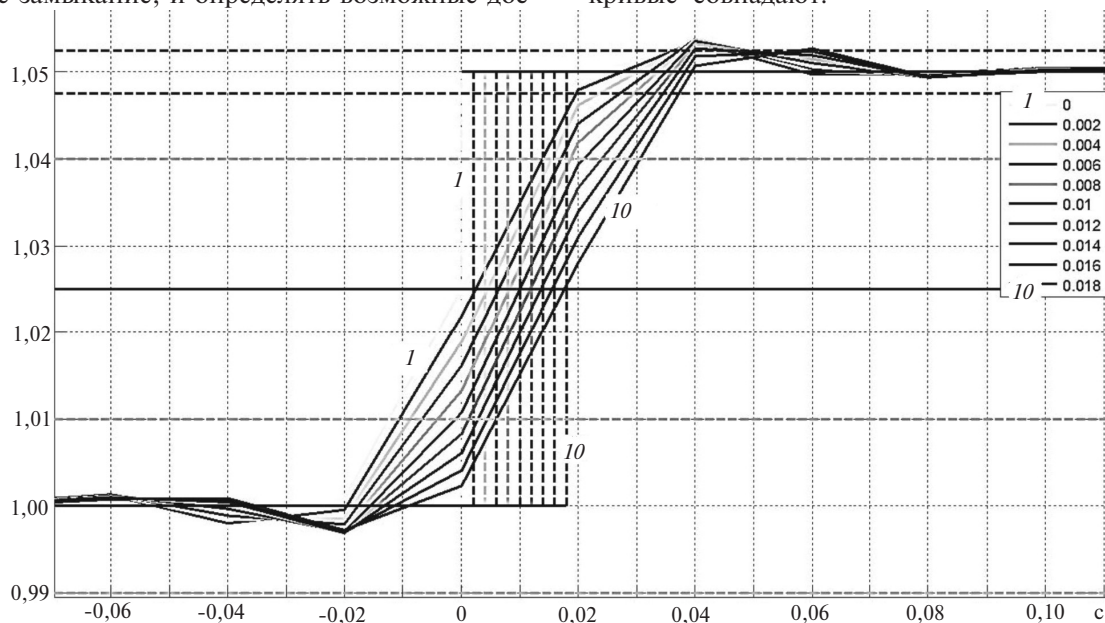


Рис. 7. Временные характеристики СВИ ((1)–(10)) в серии тестов со ступенчатым изменением амплитуды напряжения, моменты скачков амплитуды сдвигаются на 0,002 с

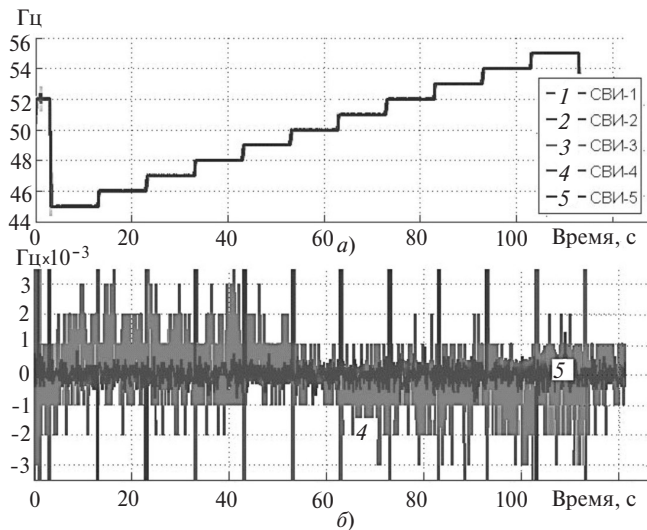


Рис. 8. Работа синхронизированных векторных измерителей при ступенчатом изменении частоты тестового сигнала в детерминированной ситуации

На рис. 8,б в увеличенном масштабе показаны результаты измерения частоты в детерминированной ситуации всеми СВИ. Вычисляются отклонения измерений от эталонных значений при детерминированном сигнале для всех измерителей. Из измеренных значений частоты вычитается эталонный сигнал. Переходный процесс измерений при скачке частоты определяет естественную границу различных значений частоты. Видно, что измерители разных производителей имеют среднюю ошибку частоты менее 0,001 Гц, что соответствует требованиям стандартов.

Работа синхронизированных векторных измерителей при тестовом сигнале с шумом показана на рис. 9. При формировании тестового сигнала его частота искажается шумом, полученным из электрической сети. Следовательно, частота трехфазного сигнала меняется в соответствии с изменением локальной частоты энергосистемы.

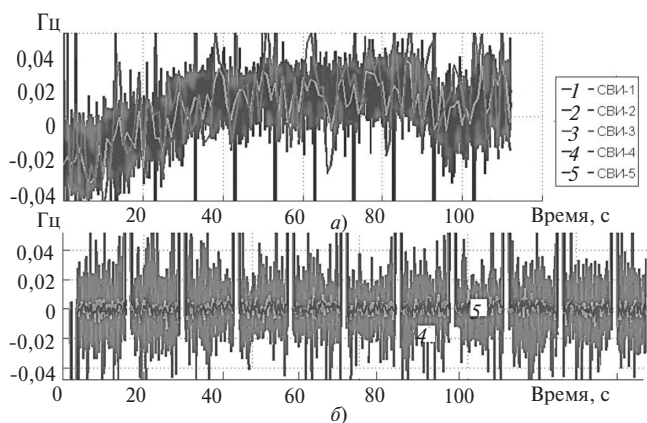


Рис. 9. Работа синхронизированных векторных измерителей при ступенчатом изменении частоты тестового сигнала с шумом

На рис. 9,а показана ситуация, когда измеряется эталонное значение частоты тестового сигнала, измеренное значение сравнивается с точным значением частоты, определяемым эталонным сигналом (рис. 5, первый вариант эталонного сигнала). Из измеренных значений частоты вычитается эталонный сигнал. Видна естественная граница различных значений частоты. Влияние шума визуализируется при большом увеличении сигнала (рис. 9,а), при этом измерения СВИ отражают флуктуации сетевой частоты. Разброс в оценках значений частоты существенно зависит от используемого СВИ.

Однако правильной предположить, что измеряется изменяющаяся частота тестового сигнала, которая меняется в соответствии с изменением частоты энергосистемы. Эта сетевая частота записывается приборами RTDS, эта выборка случайного процесса и считается эталоном частоты (второй вариант эталонного сигнала). Из измеренных значений частоты вычитается зафиксированное значение (рис. 9,б). При таком формировании эталонной сетевой частоты существенно уменьшается среднее значение ошибки по сравнению с эталонной точно заданной частотой, однако максимальные выбросы измерений и их разброс сопоставимы в обоих случаях, что видно на осциллограммах рис. 9. Разные СВИ имеют разный разброс измерений. Например, измеритель СВИ-5 имеет разброс на порядок меньше, чем СВИ-4.

Для количественного сопоставления работы СВИ целесообразно рассчитывать наиболее информативные статистические характеристики, например: среднее и максимальное (или абсолютное максимальное) значения ошибки измерения частоты и среднеквадратическое отклонение (СКО) от среднего значения измерения (характеристика разброса измерений) при детерминированном эталонном сигнале и двух вариантах измерения частоты при зашумленном сигнале. Для иллюстрации выбрано представление средней ошибки оценки частоты на каждой ступеньке заданного изменения частоты в разных ситуациях и разброс этих измерений вокруг среднего значения.

На рис. 10,а дано сопоставление средних значений ошибки измеренных значений частоты на каждой ступеньке установленного значения тестового изменения частоты (на горизонтальной оси) в детерминированной ситуации и с шумом при первом варианте задания эталонного сигнала. Результаты позволяют количественно сравнить работу всех СВИ. Как и ожидалось, средние значения измерений частоты в детерминированной ситуации сосредоточены у нулевой линии (пунктирные кривые), значения погрешности меньше 1 мГц. Причем и внутри заявленного диапазона наблюдается разная

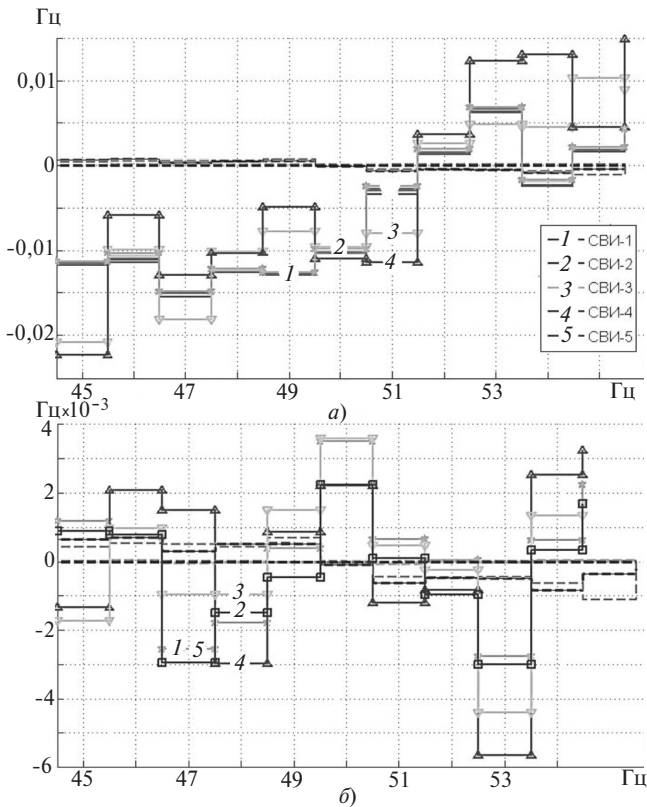


Рис. 10. Средняя погрешность оценки частоты при детерминированном тестовом сигнале и двух типах эталонных значений частоты

точность измерения частоты. Сплошной линией показаны средние ошибки оценки частоты на фоне шума, когда сетевые флуктуации частоты считаются помехой. Погрешность измерений существенно

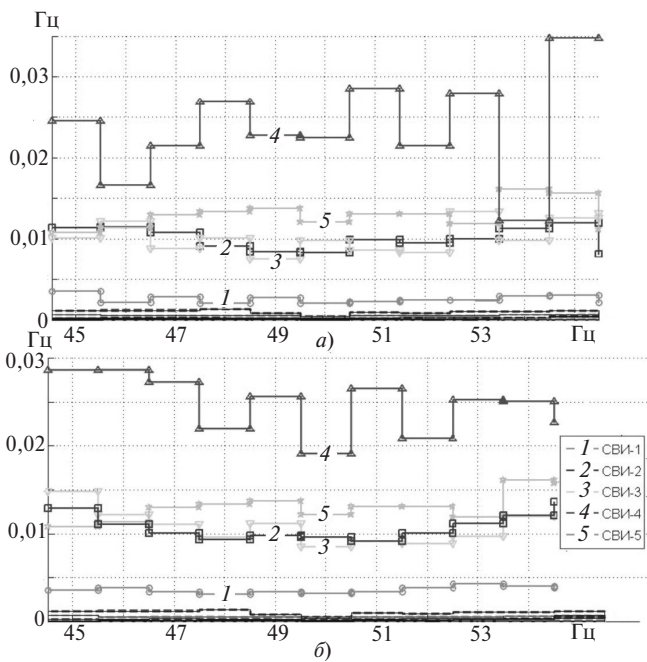


Рис. 11. Среднеквадратический разброс оценки частоты при детерминированном тестовом сигнале и двух типах эталонных значений частоты

увеличилась, причем в разной степени для разных SVI.

На рис. 10,б сопоставляется точность оценки частоты разными SVI в детерминированной ситуации при отсутствии шума и ступенчатом изменении частоты (штриховые линии). Сплошной линией показаны средние ошибки оценки частоты на фоне шума, когда сетевая частота записывается и считается измеряемым эталоном – второй вариант эталонного сигнала.

Средняя погрешность измерений каждой ступеньки эталонных значений частоты в этом случае существенно ниже, чем при измерении детерминированной значения частоты на фоне флуктуаций сетевой частоты, но в любом случае несколько выше допустимой погрешности измерений.

Как и отмечалось при рассмотрении осциллограмм измерения частоты, среднеквадратический разброс точности измерения частоты при двух вариантах использования сетевого шума частоты практически не различается для всех SVI (рис. 11).

Однако следует отметить, что SVI автоматически разделились на три группы точности (рис. 11). Минимальным разбросом измерений частоты обладает SVI-1, а SVI-4 – максимальным. Следовательно, SVI-1 является предпочтительным для обеспечения фиксации наиболее достоверных значений частоты.

Дополнительные испытания при любых возможных рабочих ситуациях позволяют найти ошибки алгоритмов работы SVI. Так, при исследовании восприятия измерителями «провалов» входных сигналов разной длительности было обнаружено, что два SVI автоматически изменили диапазон записи информации (рис. 12), что является недопустимым. Работа остальных SVI была штатной и соответствует осциллограммам рис. 13,а.

Результаты исследования еще одной рабочей ситуации показаны на рис. 13,б-г. В данной ситуации проверяется реакция SVI на линейное уменьшение с разной скоростью амплитуды входного

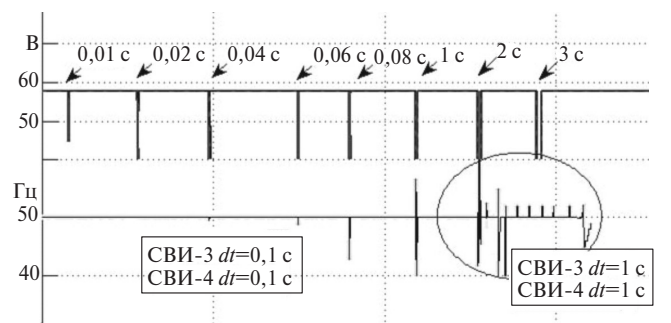


Рис. 12. Иллюстрация перехода SVI-3,4 после провала напряжения длительностью 2 с на другой интервал дискретизации (0,1 с±1 с)

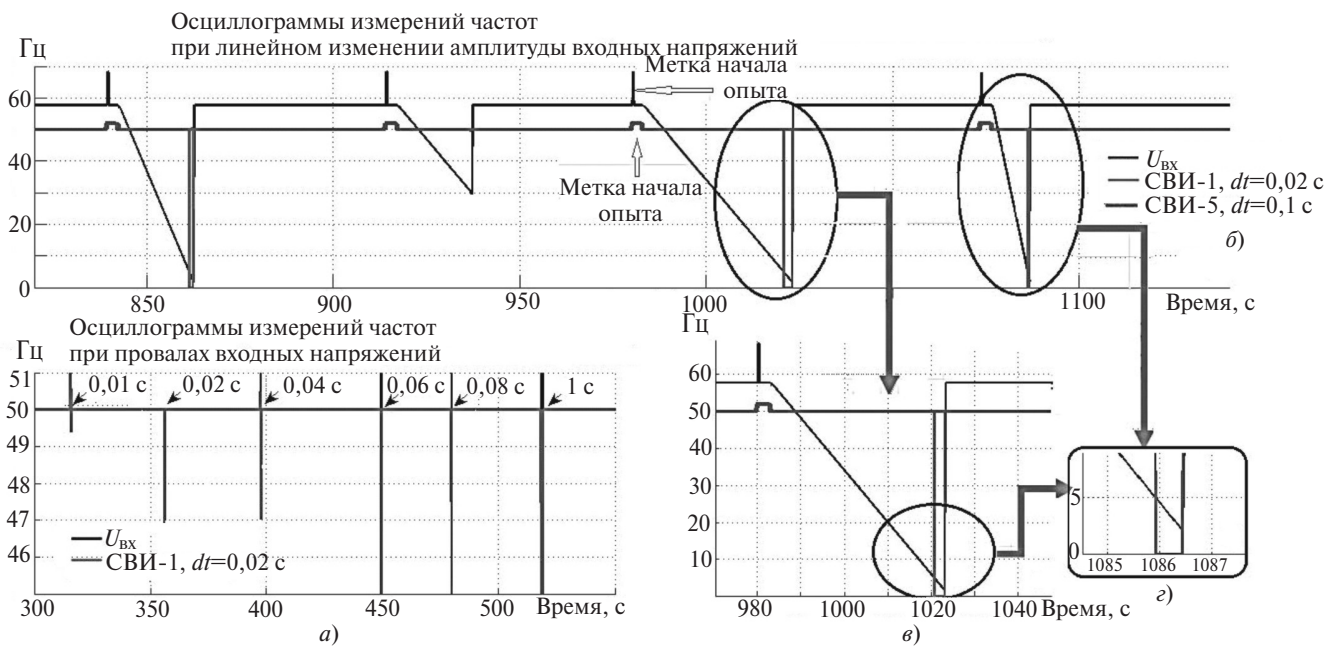


Рис. 13. Осциллограммы работ СВИ при провалах входного тестового напряжения, длительность указана (а); при линейном уменьшении амплитуды входного тестового напряжения (б–г)

сигнала номинальной частоты с целью определения параметров обнуления результатов измерений частоты.

На рис. 13,б–г показаны метки начала опытов. Метки необходимы для автоматического нахождения начала опыта при любых вариациях условий измерения частоты. В каждом опыте используется метка, предшествующая началу опыта. В течение первых 3 с увеличивается значение частоты на 2 Гц, а также в течение двух периодов промышленной частоты на 10% увеличивается амплитуда напряжения. Этот диапазон нерегламентированных значений исключен из обработки данных.

Тестирование измерителей показывает, что СВИ-5 при провалах напряжения и линейного уменьшения амплитуды напряжения номинальной частоты до нуля определяет частоту, равную номинальной. Остальные измерители при провалах напряжения определяют значение частоты, приближающееся к нулю, в зависимости от длительности провалов (рис. 14,а). Установлено, что при линейном уменьшении амплитуды входного сигнала все СВИ (кроме СВИ-5) независимо от скорости уменьшения амплитуды имеют одинаковое напряжение обнуления измерений частоты, примерно равное 0,09 отн. ед.

Заключение. Проведенные исследования выявили особенности работы всех видов СВИ при работе в энергосистемах. Ни один из исследуемых измерителей не обеспечивает заявленную точность в условиях работы, близких к реальным.

Отсюда следует необходимость доработки методики сертификационных испытаний в части уточнения требований к точности СВИ в переходных режимах и при работе в условиях флуктуационных изменений режимных параметров, показана необходимость проверки алгоритмов СВИ в различных рабочих ситуациях.

Вывод по результатам исследований: перед выбором синхронизированных векторных измерителей для решения конкретных задач необходимо оценить погрешность и возможность работы выбранного измерителя в предполагаемых условиях работы в энергосистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Std C37.118.2–2011. – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
2. СТО 59012820.29.020.011–2016. Стандарт релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования.
3. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications – Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 243 p.
4. Иванов Ю.В., Черепов А.С., Дубинин Д.М., Климова Т.Г., Расщепляев А.И. Аттестация устройств системы мониторинга переходных режимов. Практические исследования и вопросы усовершенствования процедуры испытаний. – 5-я Международ. научно-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматике энергосистем». Сочи, 1–5 июня 2015.

[19.02.2018]

А в т о р ы: **Максимов Борис Константинович** окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ – ныне Национальный исследовательский университет

«МЭИ» – НИУ «МЭИ») в 1959 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по технике высоких напряжений во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина. Профессор кафедры релейной защиты и автоматики (РЗ и АЭС) НИУ «МЭИ».

Климова Татьяна Георгиевна окончила радиотехнический факультет МЭИ в 1973 г. В 1981 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Фазовая синхронизация пространственно-разнесенных автогенераторов». Доцент кафедры РЗ и АЭС НИУ «МЭИ».

Жуков Андрей Васильевич окончил ЭЭФ МЭИ в 1977 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Совершенствование систем технологического управления сетями сверхвысокого напряжения энергообъединений» в МЭИ. Заместитель директора по управлению режимами ЕЭС ОАО «СО ЕЭС».

Дубинин Дмитрий Михайлович окончил электроэнергетический факультет Ивановского энергетического университета в 1997 г. Начальник отдела мониторинга переходных режимов ОАО «СО ЕЭС».

Elektrichestvo, 2018, No. 6, pp. 16–23

DOI:10.24160/0013-5380-2018-6-16-23

Devices for Synchronized Phasor Measurements of Electric Power System Operating Parameters under Different Conditions of Their Operation

MAKSIMOV Boris K. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KLIMOVA Tat'yana G. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

ZHUKOV Andrei V. (OJSC «System Operator of the Unified Energy System») – Deputy Director, Cand. Sci (Eng.)

DUBININ Dmitrii M. (OJSC «System Operator of the Unified Energy System») – Chief of Department

The modern development of technologies for supervisory and automatic control of the electric power system operating modes entails the need of constantly increasing the technical perfectness and scope of functions performed by the instrumentation and control equipment, including the devices for performing synchronized phasor measurements of electric power system operating parameters. The role of synchronized phasor measurements in estimating and controlling the power system operating modes is constantly growing. The article analyzes the behavior of devices performing synchronized phasor measurements under the conditions of deterministic changes of electric power system operating parameters (certification tests) and their fluctuations (that take place under real operating conditions of measuring devices). It is shown that for correctly selecting a device for synchronized phasor measurements suitable for solving particular tasks, it is necessary to check its error and ability to operate under the anticipated conditions of its operation in the power system.

Key words: power system, operating mode, phasor measurements, estimation

REFERENCES

1. STO 59012820.29.020.011–2016. *Releynaya zashchita i avtomatika. Ustroystva sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii. Normy i trebovaniya* (Relay protection and automation. Devices...). Normy i trebovaniya (Relay protection and automation. Devices...).
2. IEEE Std C37.118.2–2011. – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
3. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. – Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 243 p.

4. Ivanov Yu. V., Cherepov A.S., Dubinin D.M., Klimova T.G., Rasshcheplyayev A.I. 5-ya Mezhdunarod. nauchno-tekhn. conf. «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem...» (5th International science and technology. conf. «Modern directions of development of relay protection systems...»). Sochi, 1–5 June 2015.

[19.02.2018]