

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ PMU ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Мокеев¹ А.В.

Введение

Успешное внедрение автоматизированных систем мониторинга переходных режимов WAMS (Wide Area Measurement Systems) на основе специализированных устройств PMU (Phasor Measurement Unit), предопределило перспективность использования ИЭУ на основе технологии векторных измерений для решения других важных задач, связанных с повышением надежности и экономичности функционирования энергосистем [1-5].

Перспективными областями применения подобных ИЭУ являются SCADA, АСУ ТП подстанций, автоматизированные системы технологического управления нового поколения WACS (Wide Area Control Systems), распределенные системы релейной защиты и автоматики WAPS (Wide Area Protection System), активно-адаптивные сети.

При использовании в SCADA комбинации данных от многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики (МИП) и PMU важно обеспечить необходимое качество измерений как от МИП, так и PMU. Рассмотрим вопросы повышения качества телеизмерений.

1. Повышения качества телеинформации

В качестве источников телеизмерений могут использоваться различные устройства: МИП, измерительные устройства, в ряде случаев регистраторы аварийных процессов, PMU, микропроцессорные устройства РЗА.

Перечисленные ИЭУ обеспечивают различное качество телеизмерений. К основным показателям качества ИЭУ относят быстродействие, точность, перерегулирование. Дополнительно необходимо учитывать погрешности, связанные с изменением параметров сигнала, с задержками в обработке сигнала, с погрешности АЦП, чувствительностью к изменению температуры, влиянием неблагоприятной электромагнитной обстановки и т.д. На динамические характеристики ИЭУ влияют также способы реализации алгоритмов обработки сигналов. Так в ряде ИЭУ основные измерения в ИЭУ производятся с каждым новым отсчетом сигнала, а в других производятся циклические измерения, часто через интервал, равный длительности импульсных функций цифровых фильтров.

Большинство устройств РЗА и регистраторов аварийных процессов, не обеспечивают требуемые характеристики по точности и диапазонам

¹Северный (Арктический) федеральный университет,
ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис"
a.mokeyev@ens.ru

измерений токов в нормальных режимах энергосистем.

Наиболее массовыми являются измерительные ИЭУ с невысоким быстродействием. Зачастую очень трудно провести грань между различными классами ИЭУ, так как часто в документации заводов-производителей не указано основное их назначения. Наибольшая путаница – между измерительными преобразователями телемеханики и щитовыми измерительными приборами. Последние, как и большинство счетчиков электроэнергии, ориентированы на “медленные” измерения.

Основными источниками телемеханической информации для SCADA являются МИП телемеханики. Согласно требований системного оператора суммарное время на измерение и передачу телеизмерений в диспетчерский центр не должно превышать 1-2 секунды. При этом не предъявляются четкие требования по быстродействию ИЭУ, точности присвоения меток времени и синхронности телеизмерений. Для большинства МИП о быстродействии можно судить по времени усреднения, приводимом в документации производителей. Имеет место большой разброс по времени усреднения МИП различных производителей: от 20 мс до 200 мс, а в ряде случаев 750 мс, 1 сек. и даже 3 сек. Дополнительная задержка во многих МИП связана с использованием циклического способа измерений.

При использовании быстродействующих МИП необходимо учитывать нестационарный характер входных сигналов, связанных с изменением нагрузки, изменением конфигурации электрической сети и т.д. Но большинство быстродействующих МИП российских и зарубежных производителей, имеют значительные динамические погрешности измерений при возникновении электромагнитных переходных процессов [6].

Применяемые в системах сбора телемеханической информации МИП имеют большой разброс относительно точности меток времени и обеспечения синхронности измерений. Расхождение меток времени измерений с различных МИП определяется количеством последовательно опрашиваемых устройств, скоростью обмена, типом протокола, временем реакции устройства и может достигать 1-2 секунды.

Вместе с тем, МИП постоянно совершенствуются. В качестве примера можно привести многофункциональный измерительный преобразователь ЭНИП-2, который обеспечивает сочетание высокого быстродействия (40 мс) и высокой точности обработки сигналов (класс точности 0,2), измерение параметров режима энергосистемы в расширенных диапазонах токов и напряжений, подавление свободных составляющих электромагнитных переходных процессов. Наряду с быстрыми измерениями по RMS и по основной гармонике имеется возможность использования параметров режима энергосистемы с дополнительным усреднением, например 1 сек. Таким образом, в SCADA каждую секунду с большого количества подстанций с разрешением 1 или 0,1 мс могут передаваться как быстрые измерения, так и медленные измерения. Первые измерения характеризуют последние изменения параметров режима энергосистемы за интервал времен 1 сек., а вторые – средние значения параметров за указанный период.

Организация синхронных измерений, или по-другому, срезов параметров режима энергосистемы, с большого количества подстанций, при сочетании "медленных" и "быстрых" измерений по основной гармонике и RMS, позволит существенно улучшить оценку состояния энергосистем.

Следующий шаг – использование дополнительно к телеизмерениям векторных измерений. При этом, если на первом этапе для этой цели использовались специализированные устройства PMU, то в дальнейшем функции векторных измерений будут выполнять и другие ИЭУ. На основе ЭНИП-2 разработаны сопоставимые по стоимости устройства ЭНИП-3, которые дополнительно по сравнению с ЭНИП-2 выполняют функции векторных измерений. Практически все новые разработки ИЭУ американской фирмы SEL, включая счетчики электроэнергии, обладают функциями векторных измерений [7].

2. Особенности применения PMU в SCADA

Рассмотрим основные положения стандарта IEEE C37.118.1 для аналоговой системы-прототипа с точки зрения эффективности использования информации от PMU в SCADA [8].

Входной сигнал (ток или напряжение) при отсутствии помех

$$x(t) = X_m(t) \cos(\psi(t)). \quad (1)$$

Амплитуда входного сигнала $X_m(t)$ и полная фаза $\psi(t)$ в общем случае являются функциями времени. Полная фаза определяется как

$$\psi(t) = 2\pi \int f(t) dt + \phi.$$

Частота определяется как производная от полной фазы

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi(t)}{dt}.$$

Частота представляется в виде двух слагаемых: постоянной составляющей f_0 (номинальная частота) и переменной составляющей $\Delta f(t)$

$$f(t) = f_0 + \frac{d\varphi(t)}{2\pi dt} = f_0 + \Delta f(t),$$

где $\varphi(t) = 2\pi \Delta f(t)t + \phi$, f_0 – номинальная частота.

Синхрофазор определяется следующим образом

$$\dot{X}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} X_m(t) e^{j\varphi(t)}. \quad (2)$$

При синусоидальном входном сигнале синхрофазор напряжения совпадает с точностью до 0,7071 с комплексной амплитудой напряжения.

Алгоритм PMU согласно IEEE C37.118 основан на оценке синхрофазора на основе оконного преобразования Фурье на номинальной частоте

$$\hat{X}(t) = \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-j2\pi f_0 \tau} g(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

Другая интерпретация алгоритма (3) связана с использованием опе-

рации перемножения входного сигнала на комплексную экспоненциальную функцию с последующим использованием усредняющего КИХ-фильтра с импульсной функцией $g(t)$ и длиной фильтра T .

Входной сигнал согласно стандарта IEEE C37.118.1 представляет модулированный по амплитуде и/или по частоте синусоидальный сигнал. Из теории цифровой обработки сигналов известно, что для таких сигналов при обеспечении линейности ФЧХ фильтра в полосе пропускания и при учете группового времени задержки с высокой точностью может быть определены огибающая, фаза и частота сигнала [9,10].

При выполнении указанных условий при электромеханических переходных процессах, когда входные сигналы РМУ описываются согласно (1), переходные процессы в фильтре отсутствуют, но имеет место запаздывание в оценке параметров сигнала (1), обусловленное групповым временем задержки фильтра. При этом присвоение меток времени измеряемых параметров в РМУ необходимо производить с учетом указанного времени задержки.

На рис.1 приведены графики оценки параметров сигнала (1) при известных законах изменения данных параметров при электромеханических переходных процессах. На графике используются следующие обозначения: 1 - входной сигнал $x(t)$, 2 и 3 – модуль синхрофазора $X(t)$ и его оценка $\hat{X}(t)$ (показана точками, темп передачи 100 раз/сек), 4 и 5 – частота $f(t)$ оценка частоты $\hat{f}(t)$, 6 и 7 – аргумент синхрофазора $\varphi(t)$ и его оценка $\hat{\varphi}(t)$.

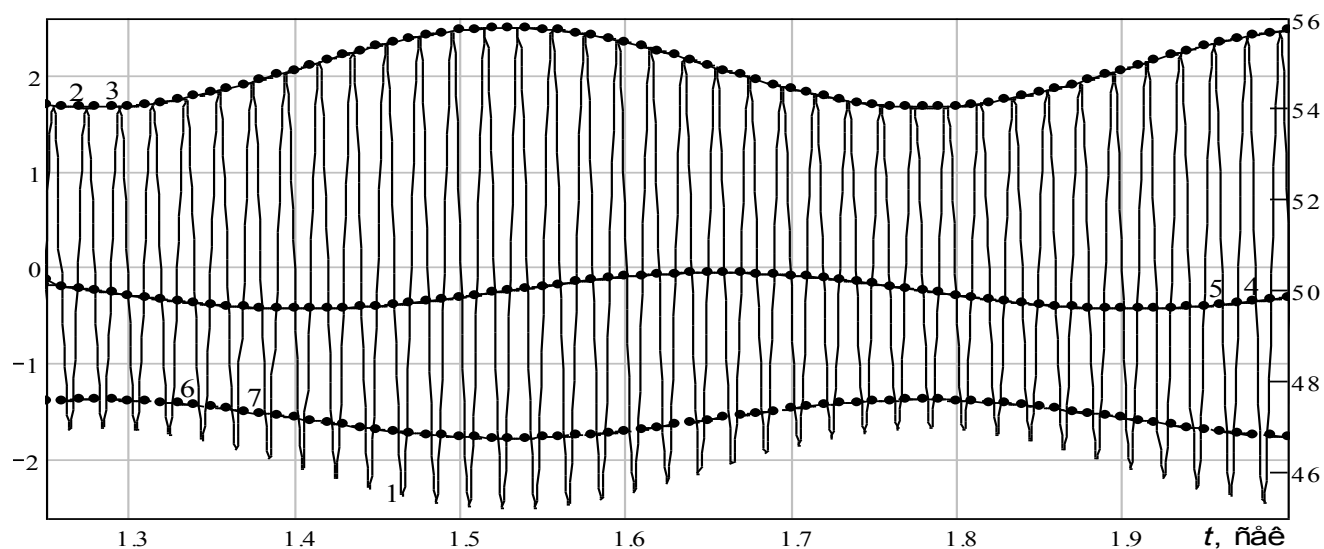


Рис. 1. Оценка параметров сигнала при электромеханических ПП

Вместо измерения начальной фазы ϕ входного сигнала в РМУ измеряется $\varphi(t)$. Начальная фаза подаваемого на вход РМУ сигнала постоянна, а измеряемый параметр в случаях, когда частота отлична от номинальной, является функцией времени. Имеется возможность вычисления начальной фазы сигнала за счет усовершенствования алгоритма РМУ [11].

Реальные входные сигналы PMU могут существенно отличаться от сигналов (1) за счет присутствия гармонических составляющих и свободных составляющих электромагнитных переходных процессов. Наличие таких составляющих, которые условно отнесены к помехам, могут приводить к значительным статическим и динамическим погрешностям измерений.

Стандартом IEEE C37.118 предусмотрено подавление в PMU помех только в виде высших гармоник и интегармоник. Следует отметить, что максимальный уровень любой высшей гармоники для PMU класса M принимается равным 10%, что значительно выше предельных значений согласно ГОСТ Р 54149-2010. Но при разработке PMU несложно обеспечить заданные требования по точности и быстродействию и при значительно более высоком уровне гармоник.

Определенные сложности связаны с разработкой устройств, выполняющие одновременно функции PMU классов M и P, обеспечивающих подавление субгармоник с частотами в диапазоне 10÷25 Гц. Следует отметить, что уровень субгармоник чрезмерно завышен (10 %), так как в реальных условиях он редко превышает значение 0,5 % от значения амплитуды основной гармоники [12]. К тому же, к настоящему времени нет полного понимания природы и источников интергармоник [12]. Одну из причин возникновения интергармоник при отсутствии источников их возникновения иногда связывают с изменениями во времени амплитуд или фаз напряжений (токов) при изменении нагрузки. Но это противоречит подходу, принятому в стандарте IEEE C37.118.1. Несмотря на то, что при использовании классических представлений спектры напряжений (токов) действительно имеют максимумы в области низких частот, в таких случаях целесообразно использовать другие спектральные представления [13].

Следует отметить, что стандарт IEEE C37.118.1-2011 ориентирован на применение устройств синхронизированных векторных измерений для WAMS и не отражает специфических требований к SCADA и WAMPAC, прежде всего связанных с необходимостью обеспечения требуемого качества обработки при нестационарных входных сигналах и необходимостью более высокого темпа передачи данных, а также необходимостью обеспечения достоверности измерений в режимах, сопровождающихся резким изменением амплитуды или фазы тока (напряжения) основной гармоники.

В SCADA и в WAMPAC в отличие от WAMS необходимо использовать не только синхрофазоры напряжения, но и тока. Уровень гармоник и свободных составляющих переходных процессов в токе значительно выше, чем в напряжении. PMU, применяемые в данных системах, должны обеспечивать эффективное подавление указанных помех.

Следует обратить внимание на работу PMU при электромагнитных переходных процессах. В отличии от электромеханических переходных процессов присвоение меток времени измеряемых параметров с учетом группового времени задержки фильтра приводит к тому, что по данным PMU переходный процесс в PMU начинается раньше, чем в энергосистеме. Это наглядно иллюстрирует рис.2, соответствующий возникновению

аварийного режима энергосистемы, связанного со скачкообразным изменением амплитуды и фазы сигнала.

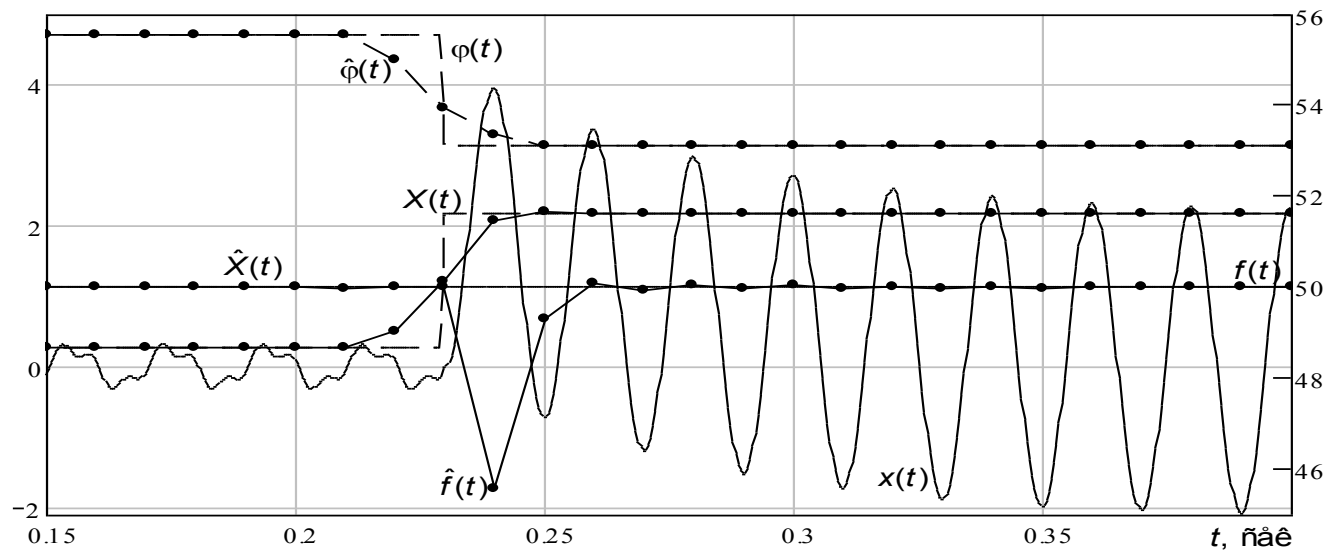


Рис. 2. Оценка параметров сигнала при электромагнитных ПП

Таким образом, при электромагнитных переходных процессах в отличие от электромеханических переходных процессов возникают динамические погрешности измерений в силу наличия собственного переходного процесса в фильтре. Кроме того, дополнительные искажения измерений связаны с задержкой в обработке сигналов.

Необходимо отметить существенный недостаток стандарта IEEE C37.118.1-2011, связанный с используемой математической моделью входных сигналов (1). Из указанного выражения следует, что функциями времени является только амплитуда и частота, а начальная фаза является неизменной. В действительности же начальная фаза также изменяется с течением времени – непрерывно или скачкообразно. В случае в РМУ при скачкообразном изменении одного или нескольких параметров можно точно определить параметры сигнала после окончания переходных процессов в фильтре. Но такой подход не позволит “разделить” частоту и начальную фазу при непрерывном характере изменений фазы. Все изменения начальной фазы будут отражаться на частоте, а при скачкообразном изменении фазы будет иметь место значительные динамические погрешности измерения частоты (рис. 2).

Имеются и дополнительные вопросы относительно принятого в стандарте алгоритма определения частоты. Речь идет о так называемой мгновенной частоте [14]. Но известно, что мгновенная частота, определяемая согласно алгоритму стандарта IEEE C37.118.1, не всегда может отражать реальный закон изменения частоты. Можно сослаться авторитетный источник [14], в котором говорится, что “если сигнал не удовлетворяет условиям квазигармоничности (узкополосности), то нельзя требовать, чтобы огибающая и мгновенная частота обладали простым и наглядным физическим смыслом”. Еще в большей степени это относится к нестационарным

сигналам. Для исключения значительных погрешностей измерения частоты обязательна эффективная фильтрация сигналов с целью подавления не только гармоник и интергармоник, но и свободных составляющих переходных процессов в энергосистеме. Для повышения достоверности измерений измерение частоты по стандарту должно производиться дополнительно по другим алгоритмам.

Как указывалось ранее, стандарт IEEE C37.118.1 предусматривает завышенный уровень интергармоник, но использовании PMU в WAMPAC и SCADA необходимо в ряде случаев считаться с более серьезными помехами, связанными с электромагнитными переходными процессами, прежде всего с экспоненциальными составляющими и затухающими колебательными составляющими с частотой выше номинальной. А в длинных линиях электропередачи 500 кВ и выше при наличии продольной компенсации вместо апериодических составляющих возникают затухающие колебательные составляющие с частотой ниже номинальной. Возможны ситуации, когда частота одной из затухающей колебательной составляющей будет очень близка к номинальной [15]. В таких случаях стационарная фильтрация неэффективна по причине невозможности обеспечения требуемого сочетания быстродействия и точности обработки сигналов.

Рассмотрим возможные способы повышения достоверности измерений PMU с целью улучшения оценки состояния энергосистем.

3. Повышение достоверности измерений PMU

При разработке алгоритмов обработки сигналов PMU для WAMPAC и SCADA необходимо учитывать нестационарный характер контролируемых процессов и обеспечить выполнение требований к показателям качества обработки сигналов при различных сочетаниях параметров принужденных и свободных составляющих токов и напряжений контролируемого энергообъекта.

Стандарт IEEE C37.18.1 предусматривает реализацию в PMU алгоритма оконного преобразования Фурье на номинальной частоте с применением, как правило, одного из существующих временных окон, разработанных для других областей применения. Поэтому эффективным способом повышения достоверности измерений PMU является синтез временных окон (импульсных функций фильтров) в соответствии с конкретными требованиями условий эксплуатации PMU. Требования должны учитывать заданные уровни и параметры помех, в том числе гармоник, интергармоник, свободных составляющих переходных процессов, и возможность минимизации группового времени задержки усредняющего фильтра [16,17].

В устройстве синхронизированных векторных измерений ЭНИП-3 используются фильтры, спроектированные с помощью специально разработанного метода синтеза фильтров, основанного на спектральных представлениях преобразования Лапласа и многокритериальной оптимизации с ограничениями [17]. Разработанный метод синтеза позволяет получить импульсные функции усредняющих КИХ-фильтров, обеспечивающие соче-

тание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов при заданных диапазонах изменения параметров полезного сигнала и помехи. При этом временные окна могут быть синтезированы под конкретную область применения с целью обеспечения заданного качества обработки сигналов при заданных диапазонах изменения параметров полезного сигнала и помехи [11].

Наряду с ЭНИП-3 указанные алгоритмы обработки сигналов реализованы в объединяющих устройствах (Merging Unit) ENMU. Отличительной особенностью ENMU является реализация в одном устройстве функций двух устройств: Merging Unit и PCMU (Phasor Control and Measurement Unit). В ENMU наряду с IEC 61850-9-2LE реализована поддержка протокола IEEE C37.118.2 и ведутся работы по поддержке протокола IEC 61850-90-5. Использование векторных измерений можно рассматривать как альтернативу samples values, так как для многих ИЭУ достаточно использование синхрофазоров токов и напряжений основной гармоники для вычисления параметров режима энергосистемы [18]. Дополнительно в ENMU обеспечивается измерение среднеквадратических значений токов и напряжений, а также эквивалентных углов между ними.

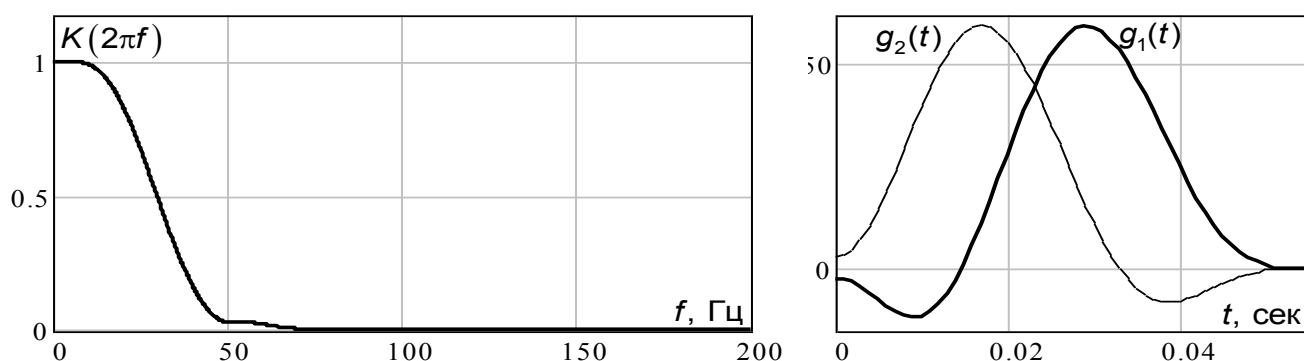


Рис. 3. АЧХ и импульсные характеристики фильтров

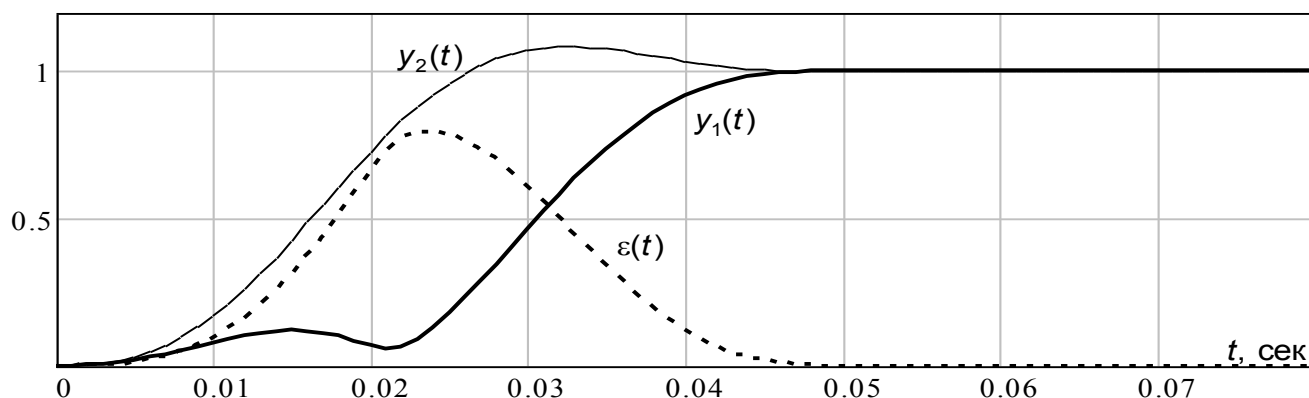


Рис. 4. Выявление электромагнитных переходных процессов

Одним из простых способов повышения достоверности измерений PMU связан с использованием пары фильтров с практически идентичными АЧХ и разными ассиметричными импульсными характеристиками. Применение таких фильтров позволит распознавать электромагнитные переходные процессы в энергосистеме. На рис. 3 представлены АЧХ фильтров и

импульсные характеристики фильтров $g_1(t)$ и $g_2(t)$.

В силу различия импульсных характеристик фильтров (зеркальных относительно друг друга) имеет место различный характер переходного процесса в фильтрах при электромагнитных переходных процессах в энергосистеме. Модуль разности $\varepsilon(t)$ выходных сигналов фильтров $y_1(t)$ и $y_2(t)$ позволяет распознать наличие переходных процессов и сформировать флаг недостоверности измерений.

Следует учитывать, что в SCADA темп передачи данных редко превышает 1 раз в секунду. При обработке результатов измерений в PMU (например, 4000 раз/сек.) и в PDC (50 раз/сек) необходимо сформировать наиболее достоверные результаты измерений синхрофазоров тока и напряжения.

Следующий шаг в совершенствовании PMU связан с использованием адаптивных алгоритмов обработки сигналов.

4. Выводы

Совершенствование SCADA требует сближения характеристик МИП и PMU с точки зрения синхронности измерений, одинакового характера функционирования данных устройств при электромеханических и электромагнитных переходных процессах.

В случае применения PMU в SCADA и WAMPAC к ним предъявляются повышенные требования по достоверности результатов измерений в условиях интенсивных электромагнитных переходных процессов. Для решения этой задачи необходимо использовать специальные методы синтеза частотных фильтров или использовать адаптивные алгоритмы обработки сигналов. Использование дополнительных измерений в PMU и специальная обработка всех измерений позволит повысить достоверность измерений синхрофазоров тока и напряжения.

Литература

1. Гамм А.З., Гришин Ю.А., Колосок И.Н. Оценивание состояния ЭЭС на основе интеграции данных SCADA и PMU // Тез. докл. I междунар. науч.-техн. конф. "Мониторинг параметров электроэнергетической системы". – М., 2006. – Режим доступа: <http://www.wams-conf.ru>.
2. Кондрагунта Л., Моор Э.. Использование данных векторных измерений для улучшения оценки состояния энергосистем // Мониторинг параметров электроэнергетической системы: Материалы II междунар. науч.-техн. конф. – СПб, 2008. – Режим доступа: <http://www.wams-conf.ru>.
3. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы на основе интеграции данных SCADA и PMU. Электричество. 2009. – № 6. – С. 2-9.
4. Жуков А.В., Демчук А.Т., Дубинин Д.М.. Развитие технологий век-

торной регистрации параметров для противоаварийного и режимного управления электрическими режимами энергосистем / РЗА 2012 // Тез. докл. XXI междунар. науч.-техн. конф. – М.: ВВЦ, 2012. – С. 232-245.

5. Гельфанд А.М., Курмак В.В., Наровлянский В.Г. Развитие систем мониторинга переходных режимов в ЕЭС России. Электрические станции. №6, 2012. – С. 43-46.

6. Мокеев А.В. Повышение качества телеинформации, используемой для оценки состояния и управления энергообъектами // Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. “Современные энергетические системы и управление ими”. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – Ч.1. – С. 54-60.

7. Héctor J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer, III et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems / SEL, 2010. – P. 361.

8. IEEE C37.118.1-2011 // Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.

9. Основы цифровой обработки сигналов: курс лекций / А.И. Солонина [и др.]. - СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – С. 768.

10. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит. – М: Додэка-XXI, 2008. – С. 720.

11. Мокеев А.В. Разработка и испытания интеллектуальных электронных устройств ЭНИП-3 на основе технологии векторных измерений // Сб. 5 Всерос. науч.-техн. конф. “Энергия белых ночей”. – 2012. – С. 81-91.

12. Ханзелка З., Бьень А. Интергармоники // Энергосбережение 2005 – №7. – С. 80-84.

13. Digital Filters / A.V. Mokeev and etc., Ed. F.P.G. Márquez. – Rijeka, InTech, 2011. – P.290.

14. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высш. школа, 2005. – 462 с.

15. Лосев С.Б., Чернин А.Б. Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности. – М.: Энергия, 1972. – 144 с.

16. Мокеев А.В. Алгоритмы обработки сигналов ИЭУ на основе технологии векторных измерений / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. М., 2011. Режим доступа: www.relayprotect.ru.

17. Digital Filters and Signal Processing / A.V.Mokeev and etc., Ed. F.P.G. Márquez and N. Zaman. Rijeka. – InTech, 2013. – P. 307.

18. Мокеев А.В. Продукция и решения ЗАО “Инженерный центр ”Энергосервис” для цифровой подстанции // Сб. 6 Всерос. науч.-техн. конф. “Энергия белых ночей”. – 2013. – С. 107-115.