

МОДЕЛИ СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Жматов Д.В.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65*

absh-sila@rambler.ru

Аннотация В работе представлена однокомпонентная модель переходного процесса в системе электроснабжения. Показаны методы применения синхронизированных векторных измерений для определения и фильтрации несущей частоты. Предложены методы анализа, основанные на спектральных представлениях преобразования Лапласа. На основании этого подхода показаны математические модели сигналов, используемые на цифровых подстанциях. Осуществлен выбор адекватной модельной структуры моделируемых электротехнических устройств синхронизированных векторных измерений. Результаты анализа частоты используются в качестве исходных данных для диагностики устройств цифровой подстанции. Для решения этой задачи представлено разработанное программное обеспечение процесса диагностики частоты с использованием КИХ-фильтра. В статье обсуждаются перспективы применения предложенного подхода к решению проблем для определения основной частоты в цифровой подстанции.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, цифровая подстанция, КИХ-фильтр, синхрофазор

Введение

В настоящее время активно развивается сфера применения информационно-измерительных систем синхронизированных векторных измерений. В ряде случаев необходимо повышение достоверности измерений в условиях не только электромеханических, но и электромагнитных переходных процессов в цифровых подстанциях. При электромагнитных переходных процессах многие устройства синхронизированных векторных измерений обладают большими погрешностями, особенно при измерении мгновенной частоты в начальной стадии развития электромагнитного переходного процесса. Один из возможных способов - использование в устройстве частотных фильтров с зеркально противоположными асимметричными импульсными характеристиками [1–4].

Расширение сферы применения устройств с поддержкой технологии синхронизированные векторные измерения (СВИ) для цифровых подстанций напрямую связано совершенствованием алгоритмов обработки сигналов для улучшения основных показателей качества указанных устройств, например, быстродействия при заданной точности обработки сигналов. В большинстве случаев показатели качества обработки сигналов определяются частотными фильтрами, используемыми в устройствах релейной защиты. Возможность сферы применения устройств с поддержкой технологии СВИ напрямую связано совершенствованием алгоритмов обработки сигналов для улучшения основных показателей качества указанных устройств, например, быстродействия при заданной точности обработки сигналов. В большинстве случаев показатели качества обработки сигналов определяются частотными фильтрами, используемыми в устройствах релейной защиты [1–4]. Поэтому для анализа и совершенствования цифровых измерительных устройств необходимо использовать эффективные методы анализа функционирования фильтров и новые методы синтеза фильтров

Например, в новом поколении защит Siprotec 5 фирмы Siemens реализован отдельный модуль PMU (Phasor Measurement Unit). А у одного из мировых лидеров по продвижению устройств векторных измерений американской фирмы SEL измерения синхрофазоров производятся не только в устройствах СВИ, но и в многофункциональных измерительных преобразователях телемеханики, устройствах релейной защиты и автоматики (РЗА) и даже в цифровых измерительных устройствах (счетчики электроэнергии, анализаторы приборы измерения качества электроэнергии) [2].

В связи с расширением областей использования информационно-измерительных систем с поддержкой синхронизированных векторных измерений в ряде случаев необходимо повышение достоверности измерений в условиях не только электромеханических, но и электромагнитных переходных процессов. При электромагнитных переходных процессах многие устройства СВИ обладают большими погрешностями измерений, особенно при измерении мгновенной частоты в начальной стадии развития электромагнитного переходного процесса. Поэтому в цифровых подстанциях необходимо предпринимать меры по повышению достоверности измерений. Один из возможных способов – использование в устройстве частотных фильтров с зеркально противоположными асимметричными импульсными характеристиками [3]. Расширение возможностей цифровых подстанций может быть осуществлено благодаря дополнительным

измерениям, поддержке различных протоколов обмена и увеличение скорости передачи данных, реализации более эффективны алгоритмов обработки сигналов. Синхрофазоры фазных токов и напряжений позволяют вычислять параметры режима электрической сети по основной гармонике. Предлагается в устройствах СВИ выполнять измерения псевдо-синхрофазоров (эквивалентных комплексных амплитуд), обеспечивающих вычисление параметров режима электрической сети с учетом влияния высших гармоник. Дополнительно в ряде случаев в СВИ целесообразно выполнять измерения синхрофазоров некоторых гармоник. Для современных СВИ важна поддержка не только специализированного протокола обмена согласно IEEE C37.118.2, но и протоколов обмена, позволяющих выполнить интеграцию СВИ в автоматизированные системы технологического процессов управления верхнего уровня, в частности протоколов МЭК 60870-5-101/104 и МЭК 61850.

Повышение скорости передачи данных позволяет повысить достоверность измерений, эффективнее использовать данные векторных измерений в цифровых подстанциях, в устройствах централизованного регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, для целей релейной защиты и автоматики.

1 Синтез фильтров

Входные сигналы устройств релейной защиты и автоматики имеют аналоговую природу, и с точки зрения теории идеальной является аналоговая система обработки сигналов. Поэтому далее рассматриваются вопросы анализа и синтеза для аналоговых фильтров-прототипов, в том числе аналоговых КИХ-фильтров. При переходе к цифровым фильтрам в этом случае имеется возможность получения быстрых алгоритмов реализации КИХ-фильтров [1].

Частными случаями затухающей колебательной составляющей являются экспоненциальный, синусоидальный и постоянный сигналы. Для анализа фильтров в этом случае целесообразно использовать вместо преобразования Фурье преобразование Лапласа. Преобразование Лапласа оперирует комплексной частотой, где затухающая колебательная составляющая является базовой функцией преобразования [1, 2]. При этом сигналы и импульсные функции фильтров полностью определяются набором комплексных амплитуд и комплексных частот. Рассмотрим метод анализа на основе использования обобщенной передаточной функции фильтра:

$$M(p, t) = \int_0^t \delta(\tau) e^{-f\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $\delta(\tau)$ – импульсная характеристика фильтра.

При сигналах с постоянными параметрами, описываемых набором комплексных амплитуд \dot{U} и частот f , набор обобщенных комплексных амплитуд реакции фильтра может быть определен следующим образом [2]:

$$\dot{Y}(t) = \dot{U} \cdot M(f, t), \quad (2)$$

В каждой обобщенной комплексной амплитуде вектора заключена информация о принужденной и свободных составляющих собственного переходного процесса в фильтре.

Обобщенную передаточную функцию представим в виде двух составляющих:

$$K(p, t) = K(p) - K_v(f, t). \quad (3)$$

где $K(f)$ – передаточная функция фильтра $K_v(f, t)$ – переменная компонента обобщенной передаточной функции.

Тогда выражение может быть записано следующим образом:

$$\dot{Y}(t) = \dot{U} \cdot K(p) - \dot{U} \cdot K_v(f, t) \quad (4)$$

При типовом способе реализации устройства с поддержкой СВИ реализуют две основные операции: преобразование спектра входного сигнала путем умножения на комплексную экспоненту с последующей фильтрацией сигнала с помощью усредняющего КИХ-фильтра, показано на рис. 1.

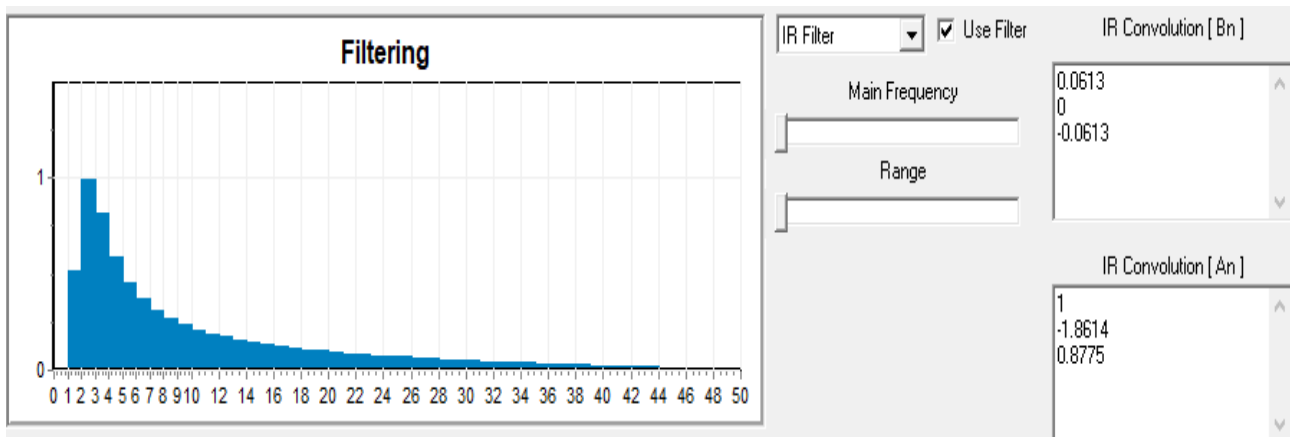


Рис. 1. Фильтрация входного сигнала с использованием КИХ-фильтра

Рассмотрим анализ фильтров, импульсные характеристики которых представлены на рис. 2: фильтр 1 с прямоугольной импульсной характеристикой широко применяется в устройствах релейной защиты (алгоритм Фурье), КИХ-фильтр на рис. 1 рекомендован для устройств СВИ. Остальные фильтры синтезированы с помощью упомянутого выше метода синтеза.

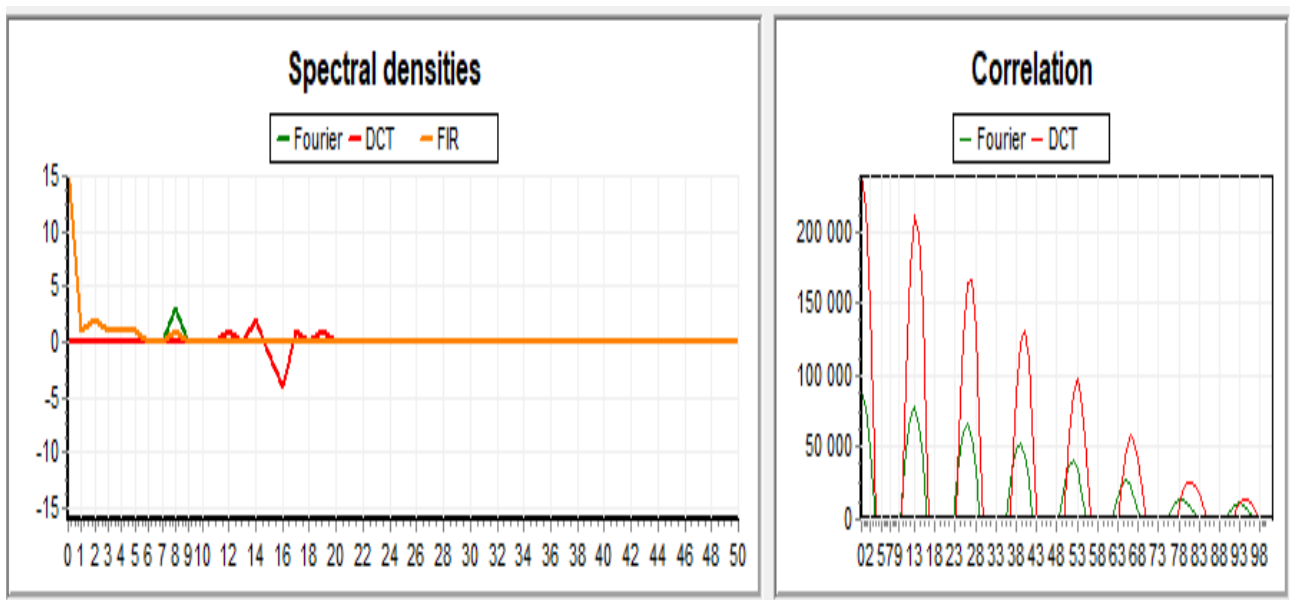


Рис. 2. Спектральные характеристики входного сигнала

Статические и динамические характеристики устройства при этом полностью определяются используемыми фильтрами. Использование расширенных спектральных представлений сигналов позволяет формализовать требования к синтезу частотных фильтров и в сочетании с современными методами оптимизации с ограничениями позволяет найти наилучшие решения по быстродействию при заданных ограничениях, связанных с диапазонами измерения параметров входных сигналов [1, 3].

2 Модель входных сигналов

Математическая модель входного сигнала устройств СВИ, реально отображает электромеханические переходным процессам в системе электроснабжения. Предложенные математические модели основана на расширении традиционного представления о комплексной амплитуде и основаны на использовании представлений модулированных сигналов в цифровых подстанциях.

Определим комплексную амплитуду входного сигнала:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= U_{m1}(t) \cos(\omega_1(t)t + \phi_1(t)) \\
 u(t) &= \text{Re}(\dot{U}_1(t)e^{j\omega_1(t)}) = \dot{U}_1(t)e^{j\omega_1(t)} + \bar{U}_1(t)e^{-j\omega_1(t)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где $\dot{U}(t) = U_{m1}(t)e^{j\varphi_2(t)}, \bar{U}(t)$ – комплексная амплитуда сигнала.

Определим синхрофазор как:

$$u(t) = U_{m1}(t)\cos(\omega_0(t) + \varphi_1(t)),$$

$$u(t) = \text{Re}(k_1\dot{U}_{m1}(t)e^{j\omega_0 t}) = k_1\dot{U}_1(t)e^{j\omega_0 t} + k_1\bar{U}_1(t)e^{j\omega_0 t},$$

$$k_1 = \sqrt{2},$$

$$\dot{U}_1(t) = k_1U_{m1}(t)e^{j\varphi_1(t)},$$

$$\dot{U}_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}\dot{X}_1(t)e^{j(\omega_1(t)-\omega_0)t}, \quad (6)$$

$$\omega_1(t) = 2\pi f_1(t),$$

Сигнал на входе фильтра

$$\dot{z}(t) = u(t)2e^{-j\omega_0 t} = \dot{U}_1(t)e^{j(\omega_1(t)-\omega_0)t} + \bar{U}_1(t)e^{-j(\omega_1(t)+\omega_0)t} \quad (7)$$

Сигнал на входе фильтра

$$\dot{z}(t) = u(t)2e^{-j\omega_0 t} = k_1\dot{U}_1(t) + k_1\bar{U}_1(t)e^{j2\omega_0 t} \quad (8)$$

На рис. 3 показано расширения традиционного представления синусоидального сигнала на случай электромеханических процессов следует, что в общем случае комплексная амплитуда входного сигнала $\dot{U}_1(t)$, обычная амплитуда $\dot{U}_{m1}(t)$, начальная фаза $\varphi(t)$ и частота входного сигнала $\omega_1(t)$ в общем случае являются функциями времени. Это значительно усложняет анализ фильтров.

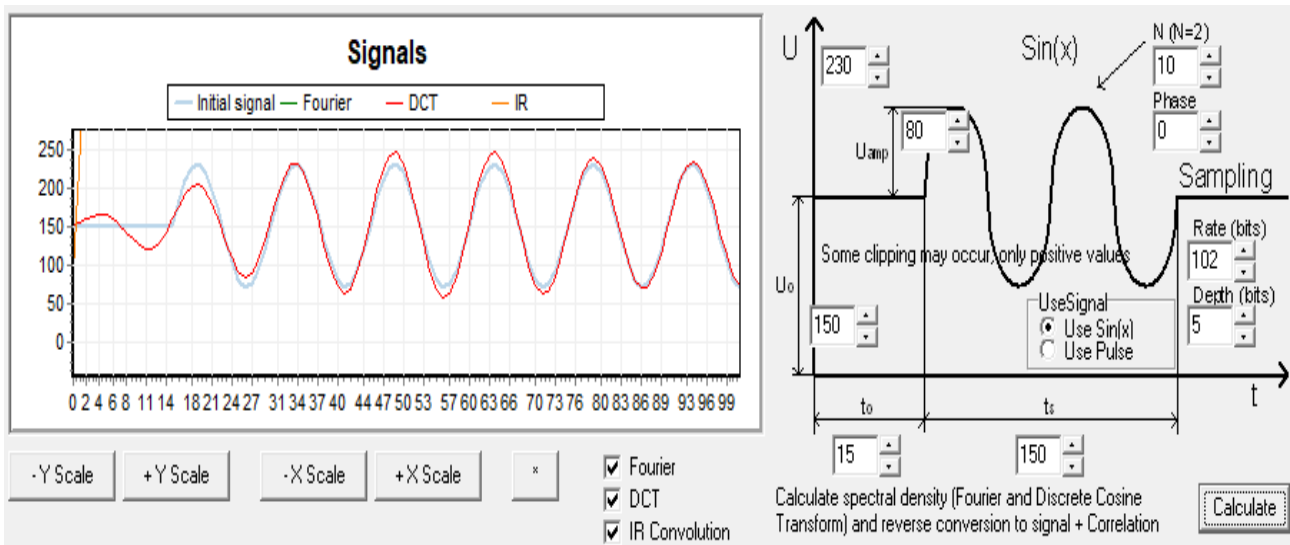


Рис. 3. Входной сигнал напряжения в цифровой подстанции

Как и для узкополосных сигналов в радиотехнике, изменение частоты в цифровых подстанциях характеризуется изменением аргумента синхрофазора $\dot{U}_1(t)$ одной от начальной фазы $\varphi(t)$. В этом случае говорят о так называемой мгновенной частоте [8, 9]. Для электромеханических переходных процессов, как и для узкополосных процессов в радиотехнике, мгновенная частота имеет строгий физический смысл.

Синхрофазор $\dot{U}_1(t)$ при номинальном значении частоты совпадает с точностью полосы пропускания до 0,7071 с комплексной амплитудой $\dot{U}_1(t)$. Но при частоте сети отличной от номинальной, в синхрофазоре $\dot{U}_1(t)$ появляется дополнительная компонента, зависящая от разности частот.

Поэтому даже при постоянной начальной фазе сигнала и постоянной частоте сети электроснабжения, отличной от номинальной, оценка начальной фазы в устройствах СВИ, будет зависеть от времени.

Модель сигнала выбирается в зависимости от типа решаемой задачи, например, при постоянной частоте сети удобнее пользоваться первой моделью сигнала, а при сложных сигналах второй моделью. Но в общем случае, модель синхрофазора предпочтительней, так дает полное представление о времени переходного процесса. Фильтр должен выделять первую низкочастотную составляющую $k\dot{U}_1(t)$ сигнала $\dot{z}(t)$ подавить высокочастотную составляющую.

3. Идентификация основной частоты

Входной сигнал представим как совокупность затухающих колебательных составляющих с комплексными амплитудами, зависящими от времени:

$$u(t) = \text{Re}(k_1 \dot{U}(t)^T e^{pt}) = k_1 \dot{U}(t)^T e^{pt} + k_1 \bar{U}(t)^T e^{\bar{p}t}, \quad (9)$$

где $\dot{U}(t) = [\dot{U}_n(t)]_m = [k_1 U_{m_n}(t) e^{-j\varphi_n(t)}]_m$ – вектор синхрофазоров входного сигнала и вектор комплексных частот $p = [p_n]_m = [-\beta_n + j\omega_n]_m$, $\dot{U}_1(t) = k_1 U_{m1}(t) e^{j\varphi_1(t)}$, $p_1 = j\omega_0$.

В случае, когда вещественная часть комплексных корней равна нулю, сигнал (9) представляет собой рассмотренный ранее набор сигналов. При этом первая компонента соответствует полезному сигналу. Модель сигнала представлена относительно синхрофазоров, но достаточно просто привести аналогичную зависимость для первой версии однокомпонентной модели входного сигнала устройств СВИ.

Использование комплексных частот существенно расширяет перечень описываемых с помощью выражения (9) сигналов и дает возможность использовать эффективные методы анализа, основанные на спектральных представлениях преобразования Лапласа [5-7].

Сигнал на входе фильтра

$$\dot{z}(t) = k_1 \dot{U}(t)^T e^{(p-cj\omega_0)t} + k_1 \bar{U}(t)^T e^{(\bar{p}-cj\omega_0)t} \quad (10)$$

С помощью выражения (10) могут быть описаны сигналы цифровых устройств СВИ, соответствующим сложным электромагнитным и электромеханическим переходным процессам.

Для идентификации эквивалентной модели в общем случае необходимо пользоваться результатами измерений, соответствующих определенному переходному процессу. Схема идентификации основной частоты показана на рис. 4.

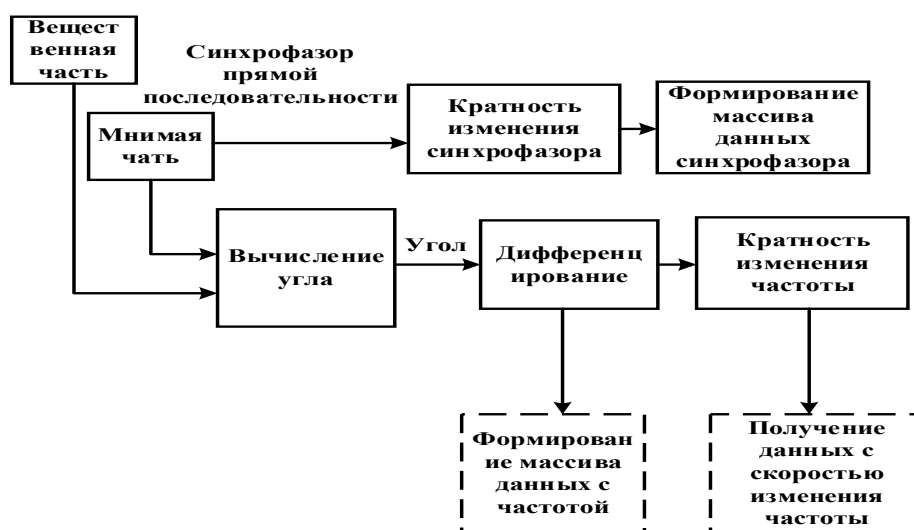


Рис. 4. Схема идентификации основной частоты

В описываемом подходе для идентификации эквивалентной модели использовался определенный переходный процесс, который провоцировался ступенчатым изменением уставки регулятора

возбуждения по напряжению. Затем данное значение уставки использовалось в качестве входного сигнала. В качестве выходного сигнала использовалось значение отклонения частоты напряжения на зажимах того генератора, для которого будет выполняться настройка, чье изменение уставки вызвало переходный процесс.

Заключение

При использовании упрощенных зависимостей для определения комплексных амплитуд выходного сигнала фильтра становится возможным использование диагностики на основе частотных характеристик в координатах комплексной частоты и времени для цифровых подстанций. Сечения указанных частотных характеристик представляют собой реакцию фильтров на заданной комплексной частоте. Поэтому по АЧХ в координатах комплексной частоты и времени можно судить об изменении огибающей синхрофазора, а при ФЧХ – его аргумента.

Предложенный метод анализа частотных фильтров при сигналах с переменными параметрами позволяет определять отклонения частоты при анализе фильтров комплексными амплитудами входных и выходных сигналов, зависящими от времени. Предложены математические выражения для определения комплексной амплитуды выходного сигнала при различных видах модуляции, максимально близкие к символическому методу Лапласа. Использование расчетных моделей значительно упрощает анализ цифровых устройств СВИ и упрощает формирование требований к частотным характеристикам фильтров при их синтезе.

Работа осуществлялась в рамках комплексного проекта Минобрнауки России №13. 331-2 «Моделирование и интеллектуальное управление производственными процессами в промышленности и электроэнергетике».

Литература

1. A.V. Mokeev, "Direct Methods for Frequency Filter Performance Analysis" (Digital Filters and Signal Processing, InTech, 2013, pp. 81–107).
2. A.V. Mokeev, "Filter synthesis for УСВИ" (IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2017, Astana, 2017).
3. A.V. Mokeev, "The General Approach to the Analysis of Filters for Signals with Constant and Variable Parameters" (IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. Tomsk, 2019 to appear).
4. Working Group I16 of the Relaying Practices Subcommittee IEEE. "Understanding microprocessor-based technology applied to relaying" (Report IEEE, 2004).
5. E.O. Schweitzer III, D. Whitehead, et al., "Synchrophasor-Based Power System Protection and Control Applications" (36th Annual Western Protective Relay Conference, 2009).
6. Working Group C-14 of the System Protection Subcommittee IEEE. "Use of synchrophasor measurements in protective relaying applications" (Report IEEE, 2013).
7. I.A. Telgaev "Creation of a Synchronized Vector Measurement System in Smart Clusters of UES East Synchrophasor systems implementation in intellectual clusters of Eastern IPS" (Actual trends in the development of Power System Relay Protection and Automation, Yekaterinburg, 2015).
8. V.N. Bovykin, E.I. Khromtsov, et al., "Features of realization of technology of digital substation in switchgear medium voltage" (International Conference Relay Protection and Automation, Moscow, 2018).
9. IEEE/IEC 60255-118-1-2018/ IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements.