

О. Г. ГРИБ, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автоматизация энергосистем», НТУ «ХПИ»;
Д. А. ГАПОН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Ю. А. СИРОТИН, д-р техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Т. С. ИЕРУСАЛИМОВА, ассистент НТУ «ХПИ»;
А. В. ДЯЧЕНКО, аспирант НТУ «ХПИ».

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Вступление. Электрическая энергия используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует в создании других видов продукции, влияя на их качество. Каждый электроприемник (ЭП) предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальной частоте, напряжении и т. п., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое качество электрической энергии (КЭ). Поэтому к качеству электрической энергии предъявляются повышенные требования. На сегодняшний день в Украине показатели качества электрической энергии регламентируются межгосударственными стандартами ГОСТ 13109 – 97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1-2] и ДСТУ EN – 50160:2014 «Характеристики напряуги электропоставчання в електричних мережах загальної призначеності». Методика определения показателей качества напряжения описана в группе стандартов EN 61000-4.

Анализ последних достижений и литературы. На сегодняшний день в системах электроснабжения страны и за рубежом используются и постоянно вводятся в эксплуатацию устройства, предназначенные для контроля КЭ. Эти устройства имеют различное назначение, отличаются по классу точности, составу и количеству выполняемых функций. Общим является то, что они производят измерения заданного набора показателей качества электрической энергии (ПКЭ). В большинстве случаев использование результатов измерений имеет информативный характер. В первую очередь это обусловлено несовершенством нормативно-правовой базы. Кроме того, существующие методики, обычно, используют полученную информацию для того, чтобы зафиксировать факт нарушения требований по одному или нескольким ПКЭ но не позволяют определить ответственного за возникновение данного нарушения.

В работе приборов и перспективных разработках, предназначенных для контроля ПКЭ, используется широкий спектр алгоритмов для выполнения оценки качества электрической энергии. Наиболее распространенными алгоритмами являются: дискретное преобразование Фурье, вычисление среднеквадратических значений, адаптивные фильтры, Вейвлет преобразование, Stockwell-преобразование. Существенным недостатком большинства указанных методов является то, что они не способны корректно учитывать те или иные искажения входного сигнала, что может негативно отразиться на точности измерения и работоспособности устройства при возникновении различных переходных процессов.

В настоящее время представлен большой выбор выпускаемых серийно устройств, предназначенных для контроля качества электрической энергии, в которых реализованы вышеописанные алгоритмы. Рассмотрим более подробно серийные приборы для контроля ПКЭ: микропроцессорный регистратор напряжения и тока ПАРМА РК 6.05; анализатор показателей качества электрической энергии АПКЭ-1; измерительный многофункциональный переносной прибор - ППКЭ-1-50.М; переносной анализатор ЭРИС - КЭ.02; прибор для измерения электроэнергетических величин и ПКЭ - Энергомонитор 3.3.; Ресурс UF2, UF2С-измеряют параметры тока, мощности, энергии, представляют данные для анализа качества электроэнергии, регистрируют переходные процессы; Ресурс UF2М – мобильный анализатор с токовыми клещами – измеряет все показатели качества, токовые клещи на 5А, 100А, 1000А, 3000А. Определяет погрешность счетчиков электроэнергии; Ресурс ПКЭ - стационарный анализатор качества э/энергии; Мультиметр Ресурс-ПЭ5 (однофазный) и Ресурс-МТ(3-х фазный); Ресурс-Е4 - счетчик электроэнергии вместе с измерителем показателей качества электроэнергии; Калибраторы переменного тока Ресурс-К2; К2М, К3; АИИС КУЭ Ресурс.

Цель статьи. Разработка перспективной системы мониторинга качества электрической энергии по фидерам цифровой подстанции на базе распределенной системы.

Постановка проблемы. Для качественной реализации определения ответственности за ухудшение качества электрической энергии мониторинг на цифровых подстанциях должен осуществляться одновременно как по вводу, так и по отходящим фидерам. Для решения этой проблемы была разработана распределенная системы контроля показателей качества электрической энергии.

Материалы исследований. Учеными и аспирантами кафедры автоматизации энергосистем НТУ «ХПИ» в течение значительного времени велись работы по разработке и совершенствованию анализаторов режимов электрических сетей и измерителей ПКЭ с целью совершенствования средств мониторинга качества электрической энергии [3-6].

Так, сотрудниками НТУ «ХПИ», был разработан анализатор напряжения и токов в электрических сетях, АНТЭС – АК 3Ф, который позволяет контролировать 64 параметра электрической сети, включая все показатели качества электрической энергии и электропотребления. Но недостатком этого прибора, является то, что он

© О.Г. Гриб, Д.А. Гапон, Ю.А. Сиротин, Т.С. Иерусалимова, А.В. Дяченко, 2015

может контролировать показатели качества электрической энергии только в одной точке измерения. Более перспективным направлением является разработка приборов, которые позволяют контролировать множество измерительных точек на подстанции, то есть осуществлять распределенный мониторинг.

Предложена распределенная система мониторинга ПКЭ построенная на базе сети Ethernet, т.к. такое решение позволяет обеспечить необходимую пропускную способность для сбора информации из нескольких удаленных источников в реальном масштабе времени и, при этом, требует минимального количества уникального узкоспециализированного оборудования. Структура системы показана на рис.1.

Объем данных, пересылаемых от одного устройства дискретизации не превышает 5 Мбит/с. Это означает, что интерфейс 100BASE-TX позволяет обслуживать одновременно до 20 таких дискретизаторов. Кроме того, использование стандарта Ethernet позволяет применять в составе системы стандартное оборудование, в частности - маршрутизаторов. Между такими маршрутизаторами может быть использован оптический канал, благодаря чему дальность передачи данных может достигать 2 км на один сегмент. При применении проводных соединений стандартным ограничением является дальность 100м. Наиболее сложным вопросом при организации такой системы является синхронизации включенных в нее устройств [7]. Наличие рассогласования между устройствами не позволяет максимально эффективно проводить анализ событий приводящих к ухудшению качества ЭЭ.

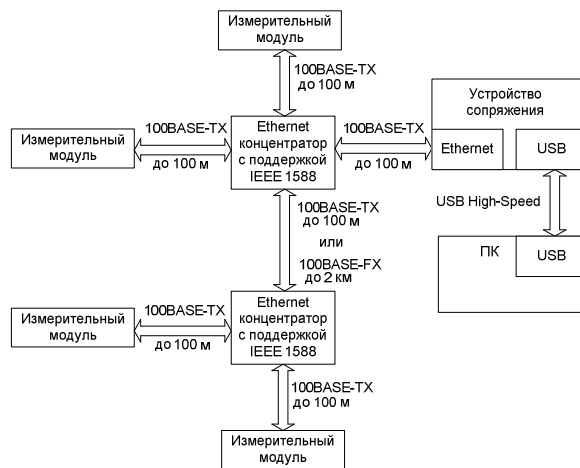


Рис. 1 Структура распределенной системы мониторинга ПКЭ

Синхронизация устройств осуществляется согласно стандарту IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP). Существует 2 версии стандарта [8]. Разработка первой версии была закончена в 2002 году, затем стандарт был доработан и в 2008 году вышла вторая ревизия. Современные микроконтроллеры, например семейства STM32, оснащены интерфейсом Ethernet и поддерживают работу с указанным протоколом на аппаратном уровне. Точность синхронизации в этом случае, теоретически, достигает десятков наносекунд.

Ошибки синхронизации возникают вследствие того, что частота тактовых генераторов в устройствах отличается и вероятность того, что два разных устройства будут работать синфазно, крайне мала. Кроме того, на частоту работы генераторов также влияет температура окружающей среды.

Возможна исключительно программная реализация синхронизации, однако она не позволит добиться максимальной точности. Время, прошедшее с момента получения сообщения (точнее получения сигнала на прием сообщения в устройстве) до перехода на точку входа в прерывание или на заданную функцию не может быть строго определенным. Устройства с аппаратной поддержкой PTP проставляют так называемые таймштампы в моменты приема или передачи сообщений, что позволяет точно определить моменты отправки и получения независимо от степени загрузки процессора устройства.

PTP является клиент-серверным протоколом синхронизации, т.е. для реализации протокола требуется как минимум 2 устройства. В качестве ведущего устройства в системе регистрации ПКЭ выступает устройство сопряжения, а в качестве ведомых устройств – концентраторы и устройства дискретизации, которые должны работать синхронно. Возможны два основных режима работы протокола End-to-end и Peer-to-peer. Так как в системе регистрации ПКЭ, как правило, количество узлов невелико, то наиболее целесообразным является режим End-to-end.

Процесс синхронизации в режиме End-to-end показан на рис. 2 и состоит из нескольких этапов.

Ведущим устройством отправляются сообщения Sync, Follow Up, и DelayResp. Запросы ведомых устройств обозначены как DelayReq.

Отправка сообщений Sync и Follow Up ведущим устройством осуществляется на групповые адреса, строго определенные в стандарте (01-1B-19-00-00-00). Пакеты отличаются полями ClockIdentity (идентификатор часов) и SequenceId (идентификатор пакета).

Существует одно- и двухэтапные режимы работы.

На первом шаге ведущее устройство отправляет сообщение Sync и одновременно записывает время отправки t_1 .

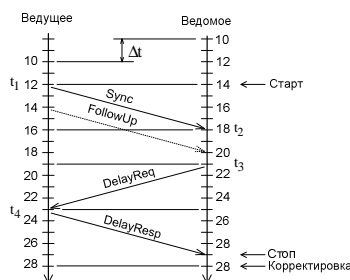


Рис. 2 Процесс синхронизации по протоколу PTP

При наличии сообщения FollowUp – имеет место двухэтапная реализация, пунктирной стрелкой показано необязательное сообщение. FollowUp сообщение отправляется вслед за Sync и содержит время t_1 . Если осуществляется передача в один этап, то Sync содержит t_1 в теле сообщения. В любом случае t_1 будет получено ведомыми устройствами. В момент получения сообщения Sync на ведомом устройстве генерируется таймштамп t_2 . Таким образом, каждым ведомым устройством запоминаются значения t_1 и t_2 .

Далее каждое ведомое устройство генерирует сообщение DelayReq одновременно с запоминанием t_3 . Ведущее устройство при получении DelayReq сообщения генерирует t_4 и отправляет его ведомому устройству в в DelayResp сообщении.

Каждое ведомое устройство осуществляет вычисление расхождения часов и их коррекцию из соотношений:

$$t_2 = t_1 + t_{\text{смещения}} + t_{\text{доставки}} \quad (1)$$

$$t_4 = t_3 - t_{\text{смещения}} + t_{\text{доставки}} \quad (2)$$

откуда:

$$t_{\text{смещения}} = \frac{(t_2 - t_4) - (t_1 - t_3)}{2} \quad (3)$$

$$t_{\text{доставки}} = \frac{(t_2 + t_4) - (t_1 + t_3)}{2} \quad (4)$$

С помощью рассмотренного сеанса обмена, можно добиться синхронности устройств, если частоты их тактовых генераторов идеально совпадают [9]. На практике же частота часов устройств отличается, т.е. на одном устройстве за 1 секунду значение часов увеличится, например, на 1 секунду, а на другом - на 1.000001 секунду.

Таким образом, с течением времени синхронизация устройств будет нарушаться. Для устранения этого недостатка указанную процедуру необходимо повторять постоянно, с небольшими интервалами либо выполнять коррекцию скорости хода часов ведомых устройств.

В стандарте предусмотрена процедура вычисления отношения времени, прошедшего на ведущем и ведомом устройствах за определенный интервал (рис. 3).

После выполнения обмена, вычисление коэффициента корректировки производится по формуле

$$k = \frac{(t_{1,n} - t_{1,0})}{(t_{2,n} - t_{2,0})} \quad (5)$$

Такой алгоритм применим при условии, что интервал между процедурами синхронизации многократно превышает время доставки.

Результаты исследований. Ниже приведены результаты исследования качества электрической энергии в энергосистеме. Высшие гармоники характеризуются коэффициентом n-ой гармонической составляющей. Коэффициент n-ой гармонической составляющей выходит за границы нормально и предельно допустимых значений, что отрицательно сказывается на работе электрооборудования [10-12].

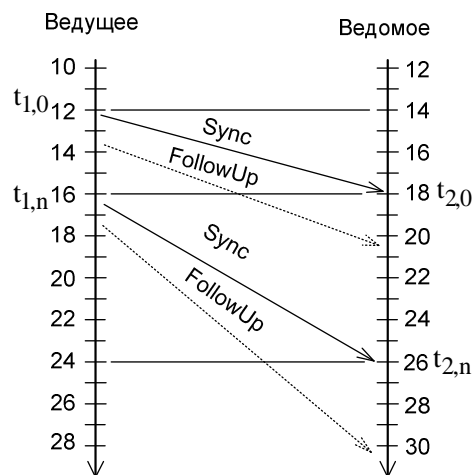


Рис. 3 Процедура определения отношения скоростей часов

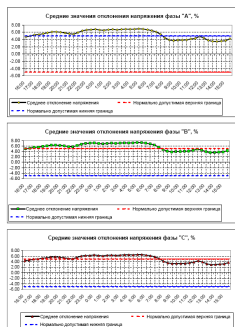


Рис. 4 Установившееся отклонение напряжения по фазам «А», «В», «С»

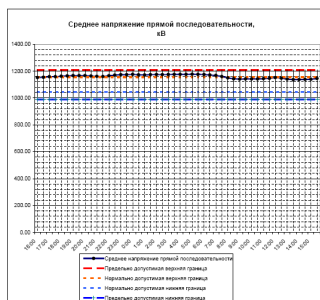


Рис. 5 Установившееся отклонение напряжение прямой последовательности

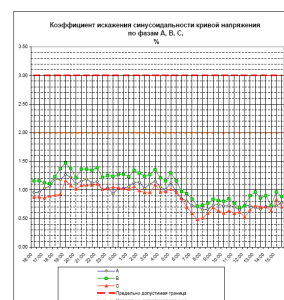


Рис. 6 Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения

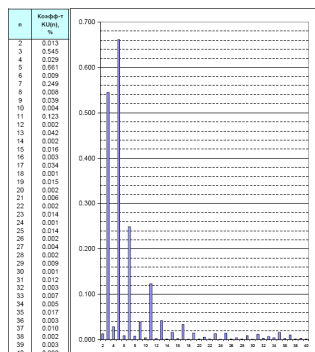


Рис. 7 График коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения в фазе «А»

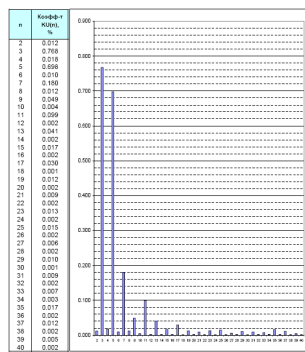


Рис. 8 График коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения в фазе «В»

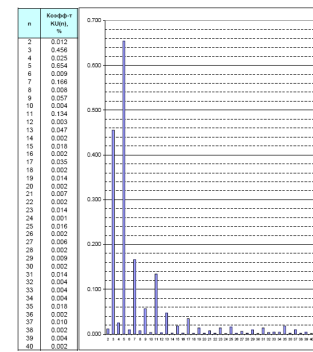


Рис. 9 График коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения в фазе «С»

Выводы. Преимуществом разработанной распределенной системы контроля качества электрической энергии, является то, что все замеры на цифровой подстанции синхронизированы во времени, поэтому такая система позволяет с высокой точностью выделять источник искажений и ответственного за нарушение норм качества. Экспериментальные исследования показали, что качество электроэнергии на одном из присоединений (установившееся отклонение напряжения прямой последовательности основной частоты, установившееся отклонение напряжения, коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения) за 24 ч не соответствует нормам ГОСТ 13109-97 и ДСТУ EN – 50160:2014.

Список литературы: 1. Качество электрической энергии Том 1 «Экономико-правовая база Качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе» / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП «Граф-Икс». Харьков: 2014г.-300 с. 2. Качество электрической энергии Том 2 Контроль качества электрической энергии / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП «Граф-Икс». Харьков: 2014г.-244 с. 3. Васильченко В.И., Виноградов А.А., Гриб О.Г., и др.. Современные приборы учета электрической энергии. – Белгород: Изд-во БГТУ; Харьков: ХНАГХ, 2008. – 139 с. 4. С. Гамазин, В. Пупин, О. Ивкин. Новые устройства обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии потребителей. / Рынок электротехники. – 2006. – № 2. 5. В. Тубинис. Как выбрать электросчетчик. / Новости электротехники. – 2005. – № 5. 6. Коррекция коэффициента мощности в электросетях Перу. / Компоненты Epcos AG. – 2006. – № 1. 7. A Power Quality Monitoring System over the Internet // Ming Zhang ; Kaicheng Li Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on DOI: 10.1109/ICISE.2009.136 Publication Year: 2009 , Page(s): 1577 – 1580. 8. Reference grade calibrator for the testing of the dynamic behavior of phasor measurement units // Braun, J. ; Mester, C. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012 Conference on DOI: 10.1109/CPEM.2012.6250977 Publication Year: 2012 , Page(s): 410 – 411. 9. Embedding Synchronized Measurement Technology for Smart Grid Development // Moreno-Munoz, A. ; Pallares-Lopez, V. ; Gonzalez de la Rosa, J.J. ; Real-Calvo, R. ; Gonzalez-Redondo, M. ; Moreno-Garcia, I.M. Industrial Informatics, IEEE Transactions on Volume: 9 , Issue: 1 DOI: 10.1109/II.2012.2209659 Publication Year: 2013 , Page(s): 52 – 61. 10. Кучинский Г.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов / Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. Г.С. Кучинского. - М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с. 11. Техника высоких напряжений / под общей ред. Д.В. Разевига. - изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Энергия, 1976. – 488с. 12. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.

Bibliography(translation): 1. The quality of electric power Volume 1 «Legal and Economic framework of Quality of electric energy in Ukraine and the European Union» / edited by Gryb O. / Monograph PP "Graf-X". Kharkiv: 2014.-300 p. 2. The quality of electric power Volume 2 «Monitoring of power quality» / edited by Gryb O. / Monograph PP " Graf-X". Kharkiv: 2014.-244 p. 3. Vasilchenko V. I., Vinogradov A. A., Gryb O. G., et al. Modern metering devices of electric energy. – Belgorod: Publishing house of the University; Kharkiv: kname, 2008. – 139 p. 4. S. Gamazin, V. Pupin, A. Ivkin. New devices ensure reliability of supply and quality of electricity consumers. / Electrical engineering market. – 2006. – № 2. 5. V. Tubinis. How to choose the meter. / Electrical engineering news. – 2005. – № 5. 6. The power factor correction in electrical networks Peru. / Components Epcos AG. – 2006. – No. 1. 7. A Power Quality Monitoring System over the Internet // Ming Zhang ; Kaicheng Li Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on DOI: 10.1109/ICISE.2009.136 Publication Year: 2009 , Page(s): 1577 – 1580. 8. Reference grade calibrator for the testing of the dynamic behavior of phasor measurement units // Braun, J. ; Mester, C. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012 Conference on DOI: 10.1109/CPEM.2012.6250977 Publication Year: 2012 , Page(s): 410 – 411. 9. Embedding Synchronized Measurement Technology for Smart Grid Development // Moreno-Munoz, A. ; Pallares-Lopez, V. ; Gonzalez de la Rosa, J.J. ; Real-Calvo, R. ; Gonzalez-Redondo, M. ; Moreno-Garcia, I.M. Industrial Informatics, IEEE Transactions on Volume: 9 , Issue: 1 DOI: 10.1109/II.2012.2209659 Publication Year: 2013 , Page(s): 52 – 61. 10. Kuchinsky G. S. Insulation systems of high voltage: a Textbook for universities / G. S. Kuchinsky, V. E. Kiesewetter, J. S. Pental; ed. by G. C. Kuczynski. - M. : Energoatomizdat, 1987. – 368 p. 11. High voltage equipment / under the General editorship of D. V. Razevig. - ed. 2nd, revised and enlarged extra - M. :Energy, 1976. – S. 12. GOST 13109-97. The electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Norms of quality of electric energy in power supply systems of General purpose. — Minsk.: IPK Publishing house of standards. — 1998. 30 s.

Поступила (кусушмув) 10.07.2015