

УДК 004.75

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ ПЕРЕДАЧИ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ В СООТВЕТСТВИИ СО СТАНДАРТОМ МЭК 61850

Баранов Павел Федорович,

канд. техн. наук, инженер кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: bpf@tpu.ru

Муравьев Сергей Васильевич,

д-р техн. наук, зав. кафедрой компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: muravyov@tpu.ru

Сулайманов Алмаз Омурзакович,

канд. техн. наук, начальник научного отдела Энергетического института Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: sao@tpu.ru

Леванова Вероника Сергеевна,

студент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: levanova@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью анализа требований стандарта МЭК 61850–9-2 к передаче мгновенных значений измерений от цифровых трансформаторов тока и напряжения к устройствам защиты, автоматики, контроля и учета качества электрической энергии. Эти требования необходимо также учитывать при разработке программных и аппаратных средств для эмуляции передачи измеренных мгновенных значений параметров электрической энергии.

Цель работы: выявить особенности процесса передачи мгновенных значений измерений от цифровых трансформаторов тока и напряжения в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850–9-2 и разработать программное обеспечение для эмуляции данного процесса.

Методы исследования: моделирование систем и данных.

Результаты: представлено разработанное программное обеспечение для эмуляции передачи мгновенных значений измерений в соответствии со стандартом МЭК 61850–9-2 и рекомендациями МЭК 61850–9-2 LE, позволяющими эмулировать передачу мгновенных значений измерений с частотой 80 или 256 выборок на период для четырех синусоидальных токов и четырех синусоидальных напряжений, и результаты проверки правильности его функционирования с помощью двух независимых программ. Приведено описание протокола МЭК 61850–9-2 и полей данных, которое может быть использовано для разработки программного обеспечения цифровых подстанций.

Ключевые слова:

Мгновенные значения, эмуляция электрических систем, интеллектуальные электрические сети, стандарты МЭК, протоколы, цифровая подстанция.

Введение

Современные тенденции в области электроэнергетики направлены на построение цифровых подстанций и создание интеллектуальных распределенных сетей (Smart grid) [1–5]. Цифровая подстанция представляет собой комплекс интеллектуальных электронных устройств, реализующих задачи контроля и учета качества электрической энергии, релейной защиты и автоматики, а также регистрации аварийных событий [6–9].

Для решения задач стандартизации при построении цифровой подстанции Международная электротехническая комиссия (МЭК) опубликовала стандарт МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях» [10], в котором регламентируются схемные решения для подстанции, защиты, автоматики и измерений, а также конфигурация

устройств и вопросы передачи информации между отдельными устройствами. В части стандарта МЭК 61850-9-2 [11] регламентируется передача мгновенных значений измерений от цифровых трансформаторов тока и напряжения по цифровым сетям передачи данных к устройствам защиты, автоматики, контроля и учета качества электрической энергии.

Для настройки, тестирования и ввода в эксплуатацию узлов цифровых подстанций разработчику необходимо иметь программные и аппаратные средства для эмуляции передачи измеренных мгновенных значений параметров электрической энергии в соответствии с требованиями МЭК. Под эмуляцией будем понимать процесс воспроизведения сигналов и данных, передаваемых по интерфейсным линиям стандарта МЭК 61850, для

имитации работы реальных цифровых трансформаторов тока и напряжения.

Несмотря на то, что многие разработчики ведут работы в данном направлении [12–16], эмуляторы, реализующие полный набор описанных в стандарте функций, не существуют. Так, например, в существующих эмуляторах не поддерживаются требования к передаче данных с частотой 256 выборок на период, отсутствует возможность изменения коэффициента нелинейных искажений и т. д.

Цель данной статьи состоит в описании реализующего полный набор функций протокола МЭК 61850-9-2 для передачи мгновенных значений измерений, соответствующих полей данных и разработанного программного обеспечения (ПО) для эмулярования с учетом дополнительных рекомендаций МЭК 61850-9-2 LE [17].

Формирование пакета мгновенных значений измерений

Стандарт МЭК 61850 определяет пять типов сообщений для передачи данных:

- Sampled Values (SV) – передача мгновенных значений измерений тока и напряжения;
- Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) – передача объектно-ориентированных событий;
- Time Sync – передача меток синхронизации устройств;
- Manufacturing Messaging Specification (MMS) – передача сообщений внутри подстанции;
- Generic Substation Status Event (GSSE) – передача общих событий состояния на подстанции.

Для обмена данными в соответствии со стандартом МЭК 61850 используется сетевая модель OSI, в зависимости от типа сообщения используются раз-

личные коммуникационные профили, представленные на рис. 1.

Для SV, GOOSE и GSSE сообщений критично время доставки, поэтому они реализуются непосредственно на канальном уровне.

Сообщения MMS представляют собой стандартный клиент-серверный протокол поверх стека TCP/IP.

Сообщения Time Sync рассылаются всем интеллектуальным электронным устройствам на подстанции поверх стека UDP/IP.

Для передачи SV, GOOSE и GSSE сообщений формируется стандартизированный Ethernet кадр [17], структура которого показана на рис. 2.

Кадр начинается с преамбулы (Preamble), длина поля которой составляет 7 байт. Каждый байт содержит последовательность битов – 10101010. Преамбула используется для синхронизации приемопередатчиков. 8-ой байт кадра (Start of frame) содержит последовательность битов – 10101011 и указывает на начало кадра.

MAC адрес приемника (ов) (Destination address) – адрес устройства, которому направляется сообщение, длина поля 6 байт. Рассылка сообщений может быть одноадресной и многоадресной; для многоадресной рассылки SV сообщений стандарт МЭК 61850 регламентирует набор адресов от 01-0C-CD-04-00-00 до 01-0C-CD-04-01-FF.

MAC адрес источника (Source address) – уникальный адрес передающего интеллектуального электронного устройства (ИЭУ), длина поля 6 байт.

Идентификатор протокола (TPID, Tag Protocol Identifier) указывает, какой тип протокола используется. Длина поля 2 байта. Стандарт МЭК 61850 регламентирует использовать значение 0x8100.

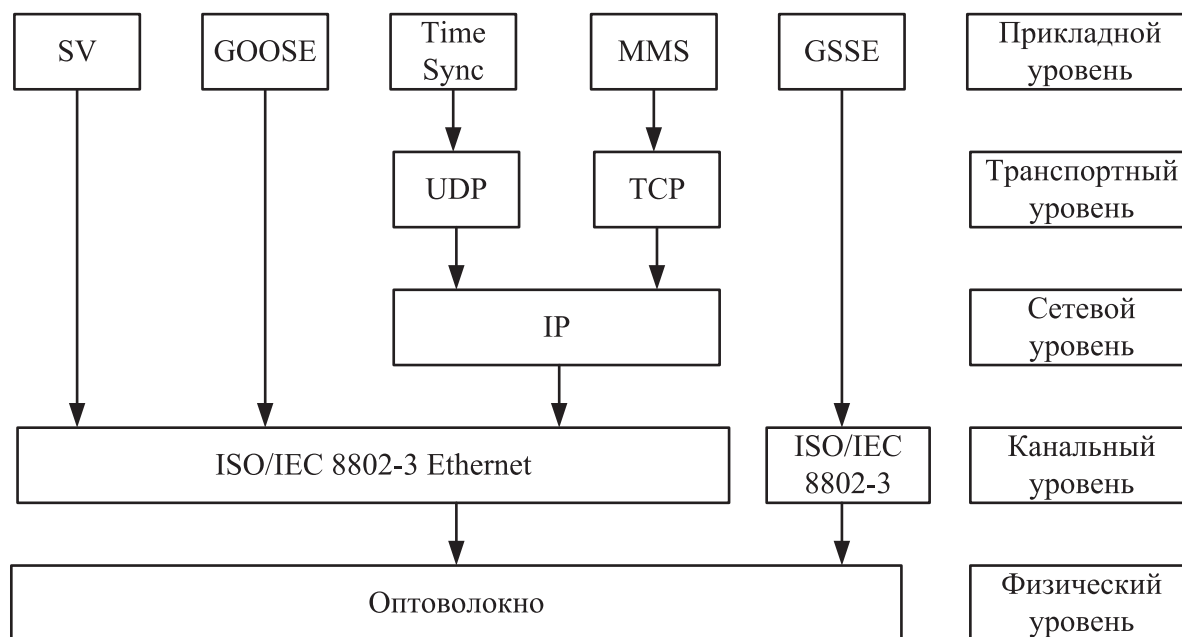


Рис. 1. Коммуникационные профили стандарта МЭК 61850

	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Preamble							
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8	Start of frame							
9	Destination address							
10								
11								
12								
13								
14								
15	Source address							
16								
17								
18								
19								
20								
21	TPID							
22								
23	User priority		CFI	VID				
24	VID							
25	Ethertype							
26								
27	APPID							
28								
29	Length							
30								
31	reserved 1							
32								
33	reserved 2							
34								
35	APDU							
.								
.	Frame check sequence							
.								
.								

Рис. 2. Формат стандартизированного Ethernet кадра

Приоритет (User priority) используется для задания приоритета передаваемого трафика. Длина поля 3 бита. Значение для SV сообщений устанавливается равным 0b100.

Индикатор канонического формата (CFI, Canonical Format Indicator) указывает на формат MAC-адреса. 0 – канонический, 1 – неканонический. Длина поля 1 бит.

Идентификатор виртуальной локальной компьютерной сети (VID, Virtual Local Area Network Identifier) указывает, какой сети принадлежит кадр. Длина поля 12 бит.

Идентификатор сообщения (Ethertype) – зарезервированное значение, непосредственно определяющее используемый тип сообщений. Длина поля 2 байта. Значение для SV сообщений устанавливается равным 0x88BA

Идентификатор приложения (APPID, Application Identifier) используется для разделения сообщений. Длина поля 2 байта. Значение для SV сообщений устанавливается равным 0x4000

Длина данных (Length) – суммарная длина полей APPID, Length, reserved 1, reserved 2 и APDU. Длина поля 2 байта.

Зарезервировано 1 (reserved 1) – зарезервированное поле, по умолчанию значение 0x0000. Если старший байт установлен в 1, то ИЭУ находится в режиме тестирования. Длина поля 2 байта.

Зарезервировано 2 (reserved 2) – зарезервированное поле для дополнительных параметров безопасности, по умолчанию значение 0x0000. Длина поля 2 байта.

Прикладной протокол данных (APDU, Application Protocol Data Unit) непосредственно содержит измерительную информацию.

Контрольная сумма (Frame check sequence) – контрольное значение, вычисляемое по алгоритму CRC-32. Длина поля 4 байта.

Структура прикладного протокола данных APDU для сообщений SV 256 выборок на период показана на рис. 3.

Синтаксис передачи сообщений имеет формат тройки TLV (Tag, Length, Value) (Метка, Длина, Значение), как показано на рис. 3. Все поля (T, L, V) являются последовательными октетами. Значение V может быть тройкой самой TLV, если оно составное. Для сообщений SV 256 информация об одном периоде измерений передается с помощью 32 пакетов по 8 мгновенных значений в каждом.

Поле savPdu – начало сообщения. Длина поля 4 байта, первый байт 0x60 – метка поля, второй байт 0x82, с третьего байта длина сообщения.

Поле noASDU – количество блоков данных (ASDU). Длина поля 3 байта, первый байт 0x80 – метка поля, второй байт 0x01 – длина значения, третий байт 0x08 – значение.

Поле Sequence of ASDU – начало блоков данных. Длина поля 4 байта, первый байт 0xA2 – метка поля, второй байт 0x82, с третьего байта общая длина блоков данных.

Поле Sequence ASDU 1 – идентификатор начала блока данных. Длина поля 2 байта, первый байт 0x30 – метка поля, второй байт – длина блока данных.

Поле svID – идентификатор мгновенных значений. Длина поля от 21 до 69 байт, первый байт 0x80 – метка поля, второй байт – длина значения идентификатора мгновенных значений (от 10 до 34 байт), с третьего байта значение идентификатора мгновенных значений длиной от 10 до 34 байт соответственно.

Поле smpCnt – номер выборки. Длина поля 4 байта, первый байт 0x82 – метка поля, второй

savPdu	60	L(751...943)					
noASDU		80	L (1)	8			
Sequence of ASDU		A2	L(744...936)				
Sequence ASDU1			30	L (91...115)			
svID			ASDU 1	80	L (10...34)	Values	
smpCnt				82	L (2)	Values	
confRev				83	L (4)	Values	
smpSynch				85	L (1)	Values	
Sequence of Data				87	L (64)	Values	
						Data set	Values
							Values
							Values
							Values
							Values
Sequence ASDU 2			30	L (91...115)	ASDU 2		
Sequence ASDU 3			30	L (91...115)	ASDU 3		
Sequence ASDU 4			30	L (91...115)	ASDU 4		
Sequence ASDU 5			30	L (91...115)	ASDU 5		
Sequence ASDU 6			30	L (91...115)	ASDU 6		
Sequence ASDU 7			30	L (91...115)	ASDU 7		
Sequence ASDU 8			30	L (91...115)	ASDU 8		

Рис. 3. Структура протокола данных APDU для сообщений SV 256 выборки на период

байт – 0x02 длина значения, с третьего байта значение номера выборки.

Поле confRev – номер конфигурации. Длина поля 6 байт, первый байт 0x83 – метка поля, второй байт – 0x04 длина значения, с третьего байта значение номера конфигурации.

Поле smpSynch – метка наличия синхронизации. Длина поля 3 байта, первый 0x85 – метка поля, второй байт – 0x01 длина значения, третий байт – значение.

Поле Sequence of Data – последовательность мгновенных значений. Длина поля 66 байт, первый байт 0x87 – метка поля, второй байт – 0x40 длина последовательности мгновенных значений, с третьего байта последовательность мгновенных значений. Поле Sequence of Data содержит информацию о мгновенных значениях токов и напряжений фаз А, В, С и нейтрали N. Каждое измеренное значение кодируется 8-ми байтным кодом, формат кадра для одного мгновенного значения тока показан на рис. 4.

Поле InnxTCTR1.Amp.instMag.i – амплитудная величина мгновенных значений тока, где x – фаза А, В или С. Масштабный коэффициент: 1 бит = 1 мА. Длина поля 4 байта.

	8	7	6	5	4	3	2	1
1	InnxTCTR1.Amp.instMag.i							
2								
3								
4								
5	InnxTCTR1.Amp.q							
6								
7			der	OpB	Test	Src	DetailQual	
8	DetailQual						validity	

Рис. 4. Формат кадра значения тока

Поле InnxTCTR1.Amp.q – дополнительная информация о мгновенных значениях тока, где x – фаза А, В или С. Длина поля 2 байта, значение по умолчанию 0x0000.

Поле der – идентификатор значения. Длина поля 1 бит. Значение показывает, являются ли мгновенные значения результатами измерений (0b0) или результатами расчета (0b1).

Поле OpB – идентификатор блокировки, устанавливается в случае, если оператор блокирует дальнейшее обновление значений. Значением является информация, полученная перед блокировкой.

кой. Длина поля 1 бит. Если этот идентификатор установлен, должен быть также установлен флаг oldData идентификатора detailQual.

Поле Test – идентификатор для указания тестового значения, которое не предназначено для использования в операционных целях. Длина поля 1 бит.

Поле Src – идентификатор происхождения значения. Длина поля 1 бит. Значение может быть получено из процесса (process, 0b0) или может быть установленным пользователем (substituted, 0b1).

Поле DetailQual – дополнительный идентификатор качества. Длина поля 1 байт. Устанавливаемые флаги идентификатора DetailQual приведены в таблице.

Таблица. Идентификатор DetailQual

Бит	Флаг
1	overflow (переполнение)
2	outOfRange (за пределами диапазона)
3	badReference (требуется калибровка)
4	oscillatory (колебательный)
5	failure (повреждение)
6	oldData (старые данные)
7	inconsistent (несогласованный)
8	inaccurate (неточный)

Поле validity – идентификатор качества может быть хорошим (good), сомнительным (questionable) или недействительным (invalid). Длина поля 2 бита. Значение по умолчанию good – 0b00.

При наличии одного из флагов идентификатора DetailQual и идентификатор Validity должен быть настроен на значение invalid (0b01) или questionable (0b11).

В случае если величины тока и/или напряжения не измеряются, то они транслируются в канал

передачи данных с нулевыми значениями. Кроме того, для этих значений должен быть установлен идентификатор качества invalid.

Программное обеспечение для эмулирования передачи мгновенных значений измерений

Для эмулирования процесса передачи мгновенных значений измерений и тестирования оборудования цифровых подстанций в среде графического программирования LabVIEW было разработано специальное ПО – виртуальный прибор «IED Emulator».

Лицевая панель разработанного виртуального прибора представлена на рис. 5.

Виртуальный прибор позволяет выбрать сетевой адаптер, через который будет формироваться передача мгновенных значений, настроить параметры передачи (Destination address, TPID, User priority, CFI, VID, svID, reserved 1, reserved 2, smpSynch, confRev), эмулировать передачу мгновенных значений измерений с частотой 80 или 256 выборок на период для четырех синусоидальных токов и четырех синусоидальных напряжений.

Виртуальный прибор позволяет непосредственно во время эмулирования сигналов изменять их амплитуды и спектральный состав, значения флагов качества и флага синхронизации по времени и другие параметры. Благодаря этому, в отличие от других существующих эмуляторов, разработанное ПО позволяет тестировать оборудование подстанции в динамическом режиме, т. е. отслеживать результаты воздействия передаваемых параметров на устройства защиты, автоматики, контроля и учета качества электрической энергии.

Для работы непосредственно с канальным уровнем на языке программирования C++ разработана динамически подключаемая библиотека (DLL) с использованием библиотеки WinPcap (Windows Packet Capture) [18].

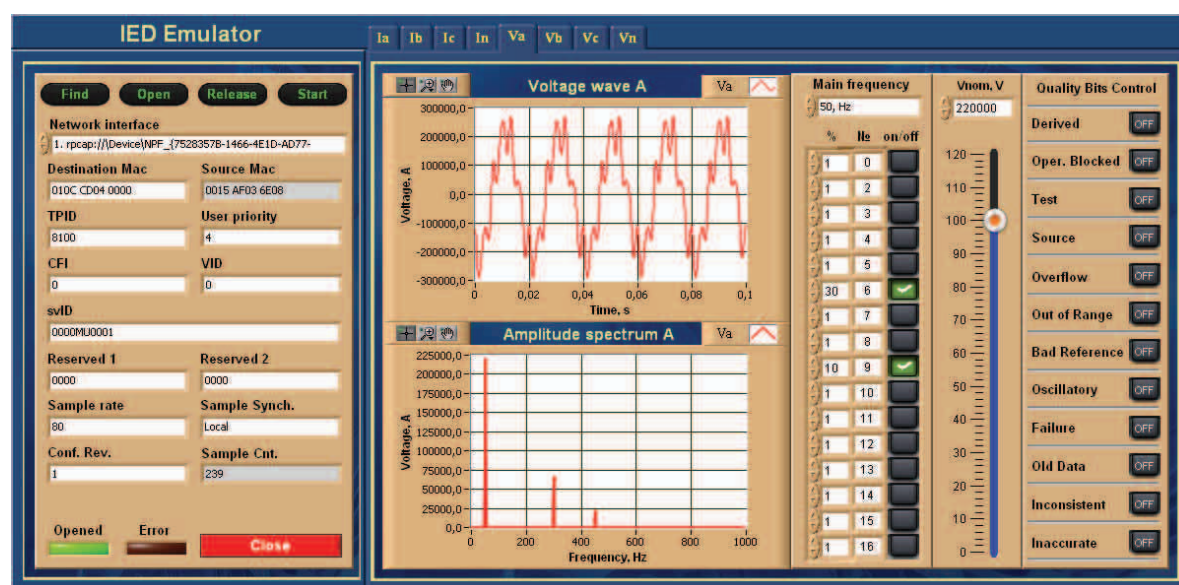


Рис. 5. Лицевая панель виртуального прибора «IED Emulator»

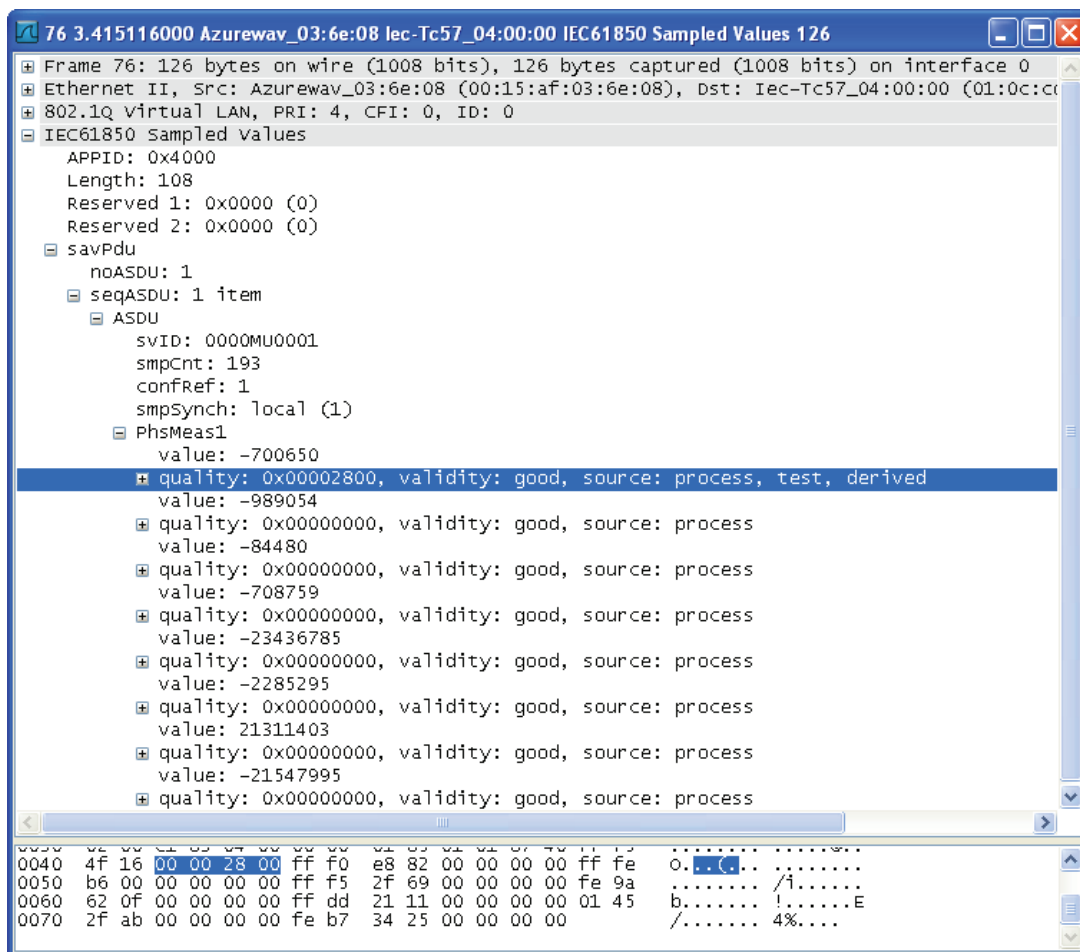


Рис. 6. Декодированный первый блок данных

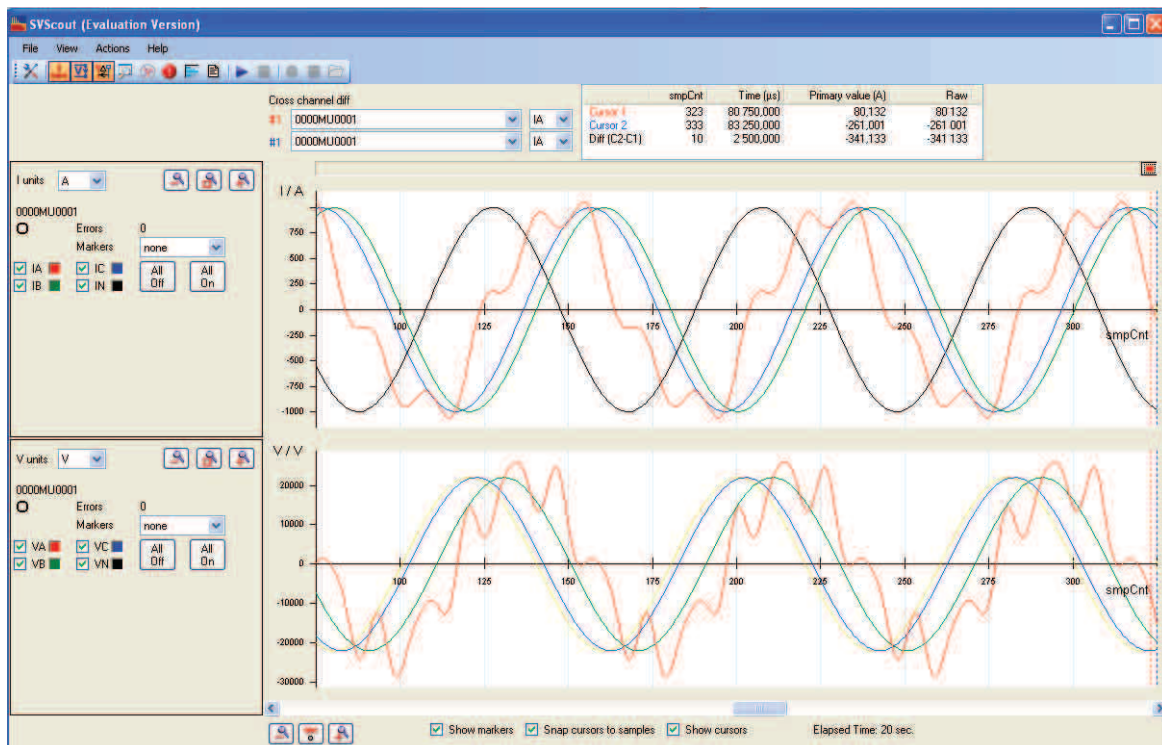


Рис. 7. Визуальный анализ передаваемого пакета данных

Проверка разработанного программного обеспечения

Для проверки правильности функционирования виртуального прибора использовался сетевой анализатор Wireshark [19]. Данный анализатор поддерживает протоколы стандарта МЭК 61850 и позволяет регистрировать соответствующий трафик. На рис. 6 приведен результат анализа передаваемых мгновенных значений измерений.

Для визуального анализа правильности функционирования разработанного виртуального прибора использовалось ПО SVScout [20]. SVScout декодирует потоки выборочных значений измерений с частотой 80 выборок на период от интеллектуальных устройств и отображает формы колебаний напряжений и токов в окне осциллографа. Результаты анализа эмулированных сигналов с помощью ПО SVScout представлены на рис. 7.

Результаты проверки правильности функционирования виртуального прибора с помощью двух независимых программ показали, что пакет данных сформирован и транслируется без ошибок, данные однозначно декодируются. Интервалы времени между передаваемыми пакетами не превышали 120 мкс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Concept for intelligent distributed power system automation with IEC 61850 and IEC 61499 / N. Higgins, V. Vyatkin, N.C. Nair, K. Schwarz // Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. – Singapore, October 12–15, 2008. – P. 36–41.
2. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., et al. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards // Industrial Informatics. – 2011. – V. 7. – № 4. – P. 529–539.
3. Apostolov A. IEC 61850 9-2 process bus applications and benefits // Proceedings of XX IET International Conference on Developments in Power System Protection, DPSP 2010. – United Kingdom, Manchester, March 29 – April 1, 2010. – P. 48–53.
4. Ruihua Z., Yumei D., Yuhong L. New challenges to power system planning and operation of smart grid development in china // Proceedings of International conference on power system technology: Technological innovations making power grid smarter, POWERCON 2010. – China, Hangzhou, October 24–28, 2010. – P. 1–8.
5. Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities / Z. Fan, P. Kulkarni, S. Gormus, C. Efthymiou, G. Kalogridis, M. Sooriyabandara, et al. // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2013. – V. 15. – № 1. – P. 21–38.
6. McGhee J., Goraj M. Smart High Voltage Substation Based on IEC 61850 Process Bus and IEEE 1588 Time Synchronization // Proceedings of First IEEE International Conference Smart Grid Communications. – USA, Gaithersburg, October 4–6, 2010. – P. 489–494.
7. Andersson L., Brunner C., Engler F. Substation automation based on IEC 61850 with new process-close technologies // Proceedings of IEEE Bologna Power Tech Conference. – Italy, Bologna, June 23–26, 2003. – P. 271–276.
8. Ikbali Ali Mini S. Sunil Gupta. Substation communication architecture to realize the future Smart Grid // Journal of energy technologies and policy. – 2011. – V. 1. – № 4. – P. 25–35.
9. Improvements in dependability and usability for a substation automation system with redundancy / H. Ito, K. Kaneda, K. Hamamatsu, T. Tanaka, K. Nara // Proceedings of XII WSEAS Inter-

Выводы

1. Для эмулирования процесса передачи мгновенных значений измерений в соответствии со стандартом МЭК 61850 с частотой 80 или 256 выборок на период разработано специальное программное обеспечение – виртуальный прибор «IED Emulator».
2. Проверка правильности функционирования виртуального прибора с помощью двух независимых программ показала, что виртуальный прибор работает без ошибок и пригоден для тестирования оборудования на соответствие стандарту МЭК 61850 в части приема и декодирования мгновенных значений измерений.
3. Разработанный виртуальный прибор можно использовать для тестирования программного обеспечения и приборов учета электрической энергии на подстанции.
4. Приведенные в статье описания протокола МЭК 61850–9-2 и полей данных могут быть использованы для разработки программного обеспечения цифровых подстанций.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» (государственный контракт № 14.516.12.0009).

- national Conference on Systems. – Greece, Heraklion, July 22–24, 2008. – P. 713–721.
10. ГОСТ Р 54835–2011/IEC/TR 61850–1:2003. Сети и системы связи на подстанциях. Ч. 1. Введение и обзор. – Введ. с 2012–09–01 – М.: Стандартинформ, 2012. – 45 с.
11. IEC 61850–9-2 Sampled values over ISO/IEC 8802–3. – Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2004. – 34 p.
12. Kuffel R., Ouellette D., Forsyth P. Real time simulation and testing using IEC 61850 // Proceedings of the International Symposium Modern Electric Power Systems (MEPS). – Poland, Wroclaw, September 20–22, 2010. – P. 1–8.
13. Triangle MicroWorks – Protocol Solutions for IEC 61850. URL: <http://www.trianglemicroworks.com/ProductPage.aspx> (дата обращения: 05.07.2013).
14. OMICRON – Испытание с протоколами обмена данными. URL: <http://www.omicron.at/ru/products/pro/communication-protocols/> (дата обращения: 07.07.2013).
15. TEKVEL – IEC 61850. URL: <http://tekvel.ru> (дата обращения: 02.08.2013).
16. PETOM-61850 – Устройство испытательное. URL: <http://www.dynamics.com.ru/production/retom-61850/> (дата обращения: 12.07.2013).
17. IEC 61850–9-2 LE: Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850–9-2. URL: <http://www.ucainternational.org> (дата обращения: 05.07.2013).
18. Winpcap – Industry-standard tool for link-layer network access in Windows. URL: <http://www.winpcap.org> (дата обращения: 11.07.2013).
19. Wireshark – Network Protocol Analyzer. URL: <http://www.wireshark.org> (дата обращения: 15.07.2013).
20. SVScout – Программные средства для визуального представления результатов работы IEC 61850 Sampled Values. URL: <http://www.omicron.at/ru/products/pro/communication-protocols/svscout/> (дата обращения: 15.07.2013).

Поступила 17.09.2013 г.

UDC 004.75

SOFTWARE FOR EMULATING THE SAMPLED VALUES TRANSMISSION IN ACCORDANCE WITH IEC 61850 STANDARD

Pavel F. Baranov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bpf@tpu.ru

Sergey V. Muravyov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: muravyov@tpu.ru

Almaz O. Sulaymanov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sao@tpu.ru

Veronika S. Levanova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: levanova@tpu.ru

The importance of the work is conditioned by the need to analyze the requirements of IEC 61850-9-2 for transmission of measured sampled values from the non-conventional current and voltage transformers to units of relay protection and automation, control and electric power fiscal accounting. These requirements should be also taken into account when developing both software and hardware for emulation of transmission of measured instantaneous values of electric energy.

The main aim of the study: to identify the features of the sampled values transmission from non-conventional current and voltage transformers in accordance with IEC 61850-9-2 and to develop software to emulate this process.

The methods used in the study: modeling of systems and data.

The results: The paper introduces the developed software for emulating transmission of sampled values at 80 or 256 samples per period for phase and neutral line sinusoidal currents and voltages in accordance with IEC 61850-9-2 and IEC 61850-9-2LE and the results of verification of the software operation using two independent programs. The authors have described the protocol of IEC 61850-9-2 and appropriate data fields that can be used to develop the software of digital substations.

Key words:

Sample values, power system emulation, smart power grids, IEC standards, protocols, digital substation.

REFERENCES

- Higgins N., Vyatkin V., Nair N. C., Schwarz K. Concept for intelligent distributed power system automation with IEC 61850 and IEC 61499. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Singapore, October 12–15, 2008. pp. 36–41.
- Gungor V.C., Sahin D., Kocak T. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *Industrial Informatics*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 529–539.
- Apostolov A. IEC 61850 9-2 process bus applications and benefits. *Proceedings of XX IET International Conference on Developments in Power System Protection, DPSP 2010*. United Kingdom, Manchester, March 29 – April 1, 2010. pp. 48–53.
- Ruihua Z., Yumei D., Yuhong L. New challenges to power system planning and operation of smart grid development in china. *Proceedings of International conference on power system technology: Technological innovations making power grid smarter, POWERCON 2010*. China, Hangzhou, October 24–28, 2010. pp. 1–8.
- Fan Z., Kulkarni P., Gormus S., Efthymiou C., Kalogridis G., Soriyabandara M. Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2013, vol. 15, no. 1, pp. 21–38.
- McGhee J., Goraj M. Smart High Voltage Substation Based on IEC 61850 Process Bus and IEEE 1588 Time Synchronization. *Proceedings of First IEEE International Conference Smart Grid Communications*. USA, Gaithersburg, October 4–6, 2010. pp. 489–494.
- Andersson L., Brunner C., Engler F. Substation automation based on IEC 61850 with new process-close technologies. *Proceedings of IEEE Bologna Power Tech Conference*. Italy, Bologna. June 23–26, 2003. pp. 271–276.
- Ikbali Ali Mini S., Sunil Gupta. Substation communication architecture to realize the future Smart Grid. *Journal of energy technologies and policy*, 2011, vol. 1, no. 4, pp. 25–35.
- Ito H., Kaneda K., Hamamatsu K., Tanaka T., Nara K. Improvements in dependability and usability for a substation automation system with redundancy. *Proceedings of XII WSEAS International Conference on Systems*. Greece, Heraklion, July 22–24, 2008. pp. 713–721.
- GOST R 54835–2011/IEC/TR 61850–1:2003. *Seti i sistemy svyazi na podstancijah. Ch. 1. Vvedenie i obzor* [State Standard R 54835–2011/IEC/TR 61850–1:2003. Communication networks and systems in substations. P. 1. Introduction and overview]. Moscow, Standartinform, 2012. 45 p.
- IEC 61850-9-2 Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2004. 34 p.
- Kuffel R., Ouellette D., Forsyth P. Real time simulation and testing using IEC 61850. *Proceedings of the International Symposium Modern Electric Power Systems (MEPS)*. Poland, Wroclaw, September 20–22, 2010. pp. 1–8.
- Triangle MicroWorks – Protocol Solutions for IEC 61850. Available at: <http://www.trianglemicroworks.com/ProductPage.aspx> (accessed 5 July 2013).
- OMICRON – Ispytanie s protokolami obmena dannymi [Test with communication protocols]. Available at: <http://www.omicron.com>

- ron.at/ru/products/pro/communication-protocols/ (accessed 7 July 2013).
15. *TEKVEL – IEC 61850*. Available at: <http://tekvel.ru> (accessed 2 August 2013).
16. *RETOM-61850 – Ustroystvo ispytatelnoe* [Testing instrument]. Available at: <http://www.dynamics.com.ru/production/retom-61850/> (accessed 12 July 2013).
17. *IEC 61850–9-2 LE: Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850–9-2*. Available at: <http://www.ucainter-national.org> (accessed 5 July 2013).
18. *Winpcap – Industry-standard tool for link-layer network access in Windows*. Available at: <http://www.winpcap.org> (accessed 11 July 2013).
19. *Wireshark – Network Protocol Analyzer*. Available at: <http://www.wireshark.org> (accessed 15 July 2013).
20. *SVScout – Programmnye sredstva dlya vizualnogo predstavleniya rezultatov raboty* [Software Tool for Visualizing IEC 61850 Sampled Values]. Available at: <http://www.omicron.at/ru/products/pro/communication-protocols/svscout/> (accessed 15 July 2013).