

# Новое в российской электроэнергетике



**НОВОЕ В РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**  
**Ежемесячный научно-технический электронный журнал**  
**№ 4 апрель 2015 г.**

Издаётся с января 1997 года

**Редколлегия**

*Главный редактор*

**Н.Д. Рогалев,**

доктор технических наук, профессор. Ректор НИУ “МЭИ”

*Первый заместитель главного редактора*

**В.Д. Буров,**

кандидат технических наук, профессор НИУ “МЭИ”

*Ответственный секретарь*

**Е.Ф. Галтеева,**

кандидат технических наук, ООО Информационное агентство “Энерго-пресс”

**Члены редколлегии:**

**Э.К. Аракелян**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**А.В. Богловский**, канд. техн. наук, ст.н.с.  
НИУ “МЭИ”

**И.П. Верещагин**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**В.А. Гашенко**, доктор техн. наук. Зам. директора  
ОАО “ЭНИЦ”

**В.В. Жуков**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**Ю.И. Жуков**, канд. техн. наук. ОАО “Россети”

**В.М. Зорин**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**А.Т. Комов**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**А.Я. Консов**, доктор техн. наук, профессор.  
Президент ООО “ИЦ-ГТ”

**В.М. Лавыгин**, канд. техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**А.С. Осыка**, канд. техн. наук. Зам. генерального  
директора по производству ОАО “МОСЭНЕРГО”

**Ю.В. Парфенов**, доктор техн. наук, доцент  
НИУ “МЭИ”

**Т.И. Петрова**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**А.П. Пильщикова**, канд. техн. наук, доцент.  
ООО Информационное агентство “Энерго-пресс”

**П.В. Росляков**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**Б.А. Рыбаков**, канд. техн. наук. Директор  
по развитию ООО “Интерэнерго”

**В.К. Соляков**, канд. техн. наук, доцент.  
ООО Информационное агентство “Энерго-пресс”

**А.А. Сухих**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**Г.В. Томаров**, доктор техн. наук, профессор.  
Генеральный директор ЗАО “Геотерм-ЭМ”

**М.Г. Тягунов**, доктор техн. наук, профессор  
НИУ “МЭИ”

**Р.М. Хазиахметов**, директор по технической  
политике и развитию ОАО “РусГидро”

Научное редактирование **А.П. Пильщикова**

Корректура *Г.Н. Грошева*  
Верстка *Л.В. Софейчук*

Подписано к выпуску 20.04.15 Объем 4.3 уч.-изд. л.

Адрес редакции: 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 17

Телефон/факс (495) 362-7589

E-mail: [avs@energo-press.ru](mailto:avs@energo-press.ru) <http://www.energo-press.info>

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## Номер 4, 2015

---

О подписке на электронный журнал “НОВОЕ В РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ”

4

### Общие вопросы электроэнергетики

Разработка устройств передачи команд релейной защиты и противоаварийной автоматики по цифровым системам передачи информации

**В.А. Харламов**

6

### Технологическое оборудование электростанций и тепловых сетей

Контроль коррозионных процессов на поверхностях нагрева котла

**П.В. Росляков, И.В. Морозов, J. Trefner**

19

Расчет коэффициента интенсивности напряжений в стали марки 10ГН2МФА с учетом влияния коррозионной среды

**В.П. Горбатых, Нгуен Тхи Нгует Ха, С.О. Иванов**

30

### Системы измерений, автоматизации и информатизации

Интеллектуальные электронные устройства для цифровых подстанций

**А.В. Мокеев, В.Н. Бовыкин**

40

---

Журнал перерегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации: ИА № ФС77-41829 от 14.09.2010.

## Системы измерений, автоматизации и информатизации

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

© 2015 г. Мокеев А.В.<sup>1</sup>, Бовыкин В.Н.<sup>2</sup>

**Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова<sup>1</sup> – ЗАО Инженерный центр “Энергосервис”<sup>2</sup>**

e-mail: a.mokeev@ens.ru

**Рассматриваются вопросы актуальности разработок и внедрения интеллектуальных электронных устройств с поддержкой шины подстанции и шины процесса в распределительных устройствах 6–20 кВ.**

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, цифровая ячейка, интеллектуальное электронное устройство, устройство сопряжения с шиной процесса.

Российская электроэнергетика должна развиваться по пути инновационного развития, прежде всего связанного с повышением степени автоматизации энергообъектов. Преимущество внедрения новых технологий очевидны:

- повышение эффективности использования сетей и электростанций;
- повышение надежности электроснабжения потребителей;
- сокращение сроков проектирования и строительства энергообъектов;
- снижение затрат на эксплуатацию сетей и электростанций.

Очевидно, что внедрение инноваций в электроэнергетике будет зависеть от ряда причин, с одной стороны, тормозящих, с другой стороны, подталкивающих к изменениям. В частности, замедление темпов экономического развития и кризисные явления в экономике отражаются на состоянии и темпах развития электроэнергетики Российской Федерации. Повышение стоимости импортного оборудования стимулирует импортозамещение, дает шанс российским производителям укрепиться на внутреннем и внешних рынках. Но при этом продукция отечественных производителей должна быть конкурентоспособной, соответствовать самым последним тенденциям в развитии автоматизации в электроэнергетике. Последнее возможно только в том случае, если цена инновационной российской продукции более привлекательна в сравнении с зарубежной. Задача импортозамещения упрощается, если производители уже провели соот-

<sup>1</sup> 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17. ФГАОУ “САФУ”.

<sup>2</sup> 163046, Россия, г. Архангельск, Котласская ул., д. 26. ЗАО Инженерный центр “Энергосервис”.

ветствующий объем научно-исследовательских работ и на российском рынке есть спрос на такую продукцию.

Следует отметить, что в последние годы ОАО “Россети” и ряд других крупнейших компаний провели большую работу по стимулированию российских производителей по разработке и производству современных интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) различного функционального назначения, в том числе устройств релейной защиты и автоматики, устройств телемеханики и измерительных устройств. В технической политике ОАО “Россети” большое внимание уделяется внедрению новых инновационных технологий для автоматизации электрических сетей, в том числе связанных с внедрением цифровых подстанций и активно-адаптивных сетей [1].

Наиболее актуальным представляется применение новых технологий в распределительных устройствах (РУ) 6–20 кВ, на которые приходится наибольшее количество присоединений высоковольтных подстанций. Массовое внедрение ИЭУ в РУ 6–20 кВ возможно, если на рынке появятся устройства, сопоставимые по стоимости с обычными микропроцессорными устройствами защиты, телемеханики и измерений.

Специалистами ЗАО Инженерный центр “Энергосервис” за последние годы произведена разработка ряда ИЭУ, предназначенных для использования на присоединениях различного класса напряжения, в том числе и на присоединения распределительных устройств 6–20 кВ.

На базе разработанных ИЭУ имеется возможность реализации экономичных решений для распределительных устройств необслуживаемых подстанций 6–110 кВ и создания полноценных решений по цифровой подстанции с поддержкой шины процесса.

### **Автоматизация необслуживаемых подстанций**

Для электрических сетей традиционно актуальными являются задачи обеспечения наблюдаемости и управляемости подстанций, организации технического учета и мониторинга качества электроэнергии, снижения затрат на создание и эксплуатацию систем автоматизации необслуживаемых подстанций.

Указанные задачи могут быть успешно решены при использовании интеллектуальных электронных устройств ЗАО Инженерный центр “Энергосервис”: многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики ЭНИП-2 и устройств дискретного ввода/вывода ЭНМВ с поддержкой протоколов МЭК 61850-8-1, устройств сбора данных ЭНКС-ЗМ. Применение указанных ИЭУ обеспечивает реализацию доступных по стоимости решений автоматизации необслуживаемых подстанций [2].

Устройства ЭНИП-2 выполняют функции телеизмерений, телесигнализации и телеуправления, мониторинга качества электроэнергии, технического учета электроэнергии, замещения щитового измерительного прибора. Для расширения функциональных возможностей устройства ЭНИП-2 дополняются модулями дискретного ввода/вывода, блоками телеуправления и модулями индикации (рис. 1).



**Рис. 1.** Интеллектуальное электронное устройство ЭНИП-2 с модулями расширения

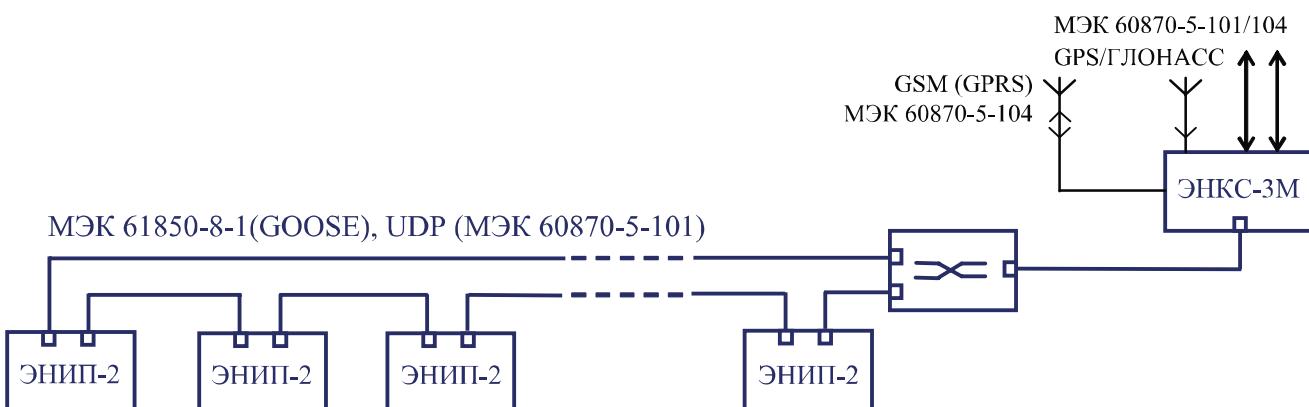
Отличительными особенностями ЭНИП-2 является сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов в расширенных диапазонах токов и напряжений, точные измерения реактивной мощности и энергии при большом уровне несинусоидальности входных сигналов, подавление помех во входных сигналах в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник. Перечисленные выше преимущества ЭНИП-2 обеспечиваются за счет применения оригинальных алгоритмов обработки сигналов [3–5].

ЭНИП-2 совместно с модулями расширения, по сути, представляет собой миниконтроллер присоединения с поддержкой протоколов шины подстанции согласно МЭК 61850-8-1. В ЭНИП-2 реализован сервер MMS-сообщений, публикатор и подписчик GOOSE-сообщений для реализации оперативных блокировок и управления.

Также в ЭНИП-2 поддерживаются протоколы МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-104, Modbus RTU, МЭК 60870-5-101 поверх UDP, Modbus TCP, а также протоколы локальных сетей SNMP, NetBIOS, протоколы резервирования PRP и RSTP. Обеспечивается синхронизация внутренних часов по протоколам SNTP, МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-104. В модификации ЭНИП-2 с двумя портами Ethernet (100BASE-TX или 100BASE-FX) возможна как независимая работа портов, так и работа через встроенный сетевой коммутатор.

Обычно при реализации шины подстанции согласно МЭК 61850-8-1 необходимо использовать коммуникационное оборудование промышленной сети Ethernet, что существенно удороожает автоматизацию подстанции. Для снижения стоимости во многих случаях целесообразно применение ЭНИП-2 с использованием встроенного сетевого коммутатора поддержкой протокола резервирования RSTP. Такой вариант обеспечит эффективный переход от использования промышленной сети RS-485 с протоколами Modbus, МЭК 60870-5-101 и т.д. к более производительной сети на базе Ethernet и протокола МЭК 61850-8-1. При практически одинаковой стоимости двух рассмотренных выше решений по автоматизации подстанций использование второго варианта позволяет обеспечить эффективное внедрение на указанных подстанциях новых технологий согласно МЭК 61850. Дополнительным плюсом такого решения является возможность реализации кольцевой сети с резервированием.

Для необслуживаемых подстанций нет необходимости в создании АСУ ТП, а следовательно, нет принципиальной необходимости в передаче MMS-сообщений. В этом случае предлагается очень экономичное решение, представленное на рис. 2.



**Рис. 2.** Автоматизация необслуживаемой подстанции

Для сбора данных и передачи в автоматизированные системы технологического управления используется устройство сбора данных ЭНКС-3М, которое производит опрос ЭНИП-2 по протоколу МЭК 60870-5-101 поверх UDP, обеспечивает консолидацию и передачу данных в автоматизированные системы технологического управления по протоколам МЭК 60870-5-101 и/или МЭК 60870-5-104 при использовании проводных каналов связи или МЭК 60870-5-104 через GSM-канал. ЭНКС-3М содержит встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник, что обеспечивает синхронизацию времени для всех устройств в рамках системы.

Дополнительно в этом решении используется протокол МЭК 61850-8-1 для организации горизонтальных связей между ЭНИП-2. Это позволяет реализовать оперативные блокировки посредством GOOSE-сообщений.

Для ответственных применений ЭНИП-2 совместно с микропроцессорными устройствами релейной защиты и автоматики в ряде случаев предпочтительно использовать раздельную работу портов Ethernet с использованием протокола бесшовного резервирования сети PRP (МЭК 62439-3).

## Новые разработки

В настоящее время специалисты ЗАО Инженерный центр “Энергосервис” завершают работы по разработке нового многофункционального интеллектуального устройства ESM (рис. 3), которое в дополнении к возможностям ЭНИП-2 выполняет функции счетчика коммерческого учета электроэнергии, прибора измерения показателей качества электроэнергии, мониторинга электрооборудования и устройства синхронизированных векторных измерений (для одной из модификаций).

Интеллектуальное электронное устройство ESM имеет 3 основные модификации:

- с аналоговыми входами (от измерительных трансформаторов тока и напряжения);



Рис. 3. Многофункциональное интеллектуальное устройство ESM

- с аналоговыми низкоуровневыми входами (от первичных преобразователей LPCT или датчиков тока на базе катушки Роговского, от емкостных или резистивных датчиков напряжения);
- с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2LE.

Третья модификация ESM выгодно отличается от первых двух следующими особенностями: измерения параметров режима энергосистемы в полном диапазоне токов и напряжений, выполнение функции устройства синхронизированных векторных измерений. Данная модификация содержит два порта Ethernet для подключения к шине процесса.

Все модификации ESM содержат до 4 портов Ethernet для подключения к шине подстанции согласно МЭК 61850-8-1. Благодаря наличию в ESM встроенного сетевого коммутатора часть портов может быть использована для подключения к шине подстанции других ИЭУ.

Для индикации показаний ESM разрабатывается специальный модуль индикации ЭНМИ-6 с цветным сенсорным дисплеем. Возможна как раздельная установка ESM и ЭНМИ-6, так и их совмещение в единый конструктив с установкой на место щитового прибора.

Реализация в ESM функций различных измерительных устройств позволяет дополнительно эффективно решать задачи по мониторингу состояния электрооборудования (мониторинг перегрузочной способности трансформаторов, линий электропередачи и т.д.), вести коммерческий учет электроэнергии с учетом отклонения показателей качества электроэнергии от нормативных значений.

### Цифровая ячейка

В распределительных устройствах 6–20 кВ основные компоненты цифровой подстанции находятся внутри высоковольтных ячеек, что позволяет упростить реализацию резервирования промышленных сетей, требований по обеспечению ЭМС, вводу/выводу аналоговой и дискретной информации [6–8]. Распределительные устройства на базе цифровых ячеек обеспечивают более высокий уровень надежности, обладают возможностью тестирования ячеек сразу после

их сборки, обеспечивают мониторинг и диагностику отдельных компонентов ячеек, ячейки и распределительного устройства в целом.

Целесообразность перехода на технологии цифровой подстанции для распределительных устройств 6–20 кВ вызвана прежде всего большим количеством медных проводов внутри ячейки и между ячейками вследствие многократного дублирования аналоговых и дискретных сигналов для нужд релейной защиты, телемеханики, оперативных блокировок и т.д. При этом отсутствует возможность диагностики указанных цепей, что приводит к снижению надежности функционирования высоковольтных ячеек [6].

Исключение дублирования ввода аналоговых и дискретных сигналов может быть достигнуто с помощью реализации шины процесса согласно МЭК 61850, в которой предусматривается переход на передачу значений токов, напряжений, а также информации о состоянии оборудования в цифровом виде непосредственно от источников информации (первичные преобразователи тока и напряжения, коммутационные аппараты).

В высоковольтных ячейках 6–20 кВ отечественных производителей в качестве первичных измерительных преобразователей используются традиционные электромагнитные измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые в свое время разрабатывались под электромеханические устройства защиты и электроизмерительные приборы таким образом, чтобы обеспечивать последних не только информацией, но и энергией.

Для микропроцессорных устройств первичные преобразователи необходимы только как источник информации и при применении традиционных электромагнитных измерительных трансформаторов приходится использовать специальные промежуточные входные преобразователи ток-напряжение и напряжение-напряжение, которые существенно влияют на габариты интеллектуальных устройств и стоимость.

За рубежом для микропроцессорных устройств релейной защиты в последние годы все активнее применяются специально разработанные трансформаторы тока малой мощности со встроенным шунтом и с низкоуровневыми выходными напряжениями (Low Power Current Transformer, LPCT), датчики тока на основе катушки Роговского, емкостные или резистивные датчики напряжения [9]. Выходные напряжения указанных первичных преобразователей подбираются исходя из параметров аналоговых микросхем. Такое решение позволяет значительно снизить габаритные размеры и стоимость первичных преобразователей и устройств защиты и измерений.

Следующий шаг – использовать первичные измерительные преобразователи с цифровым выходом. На рис. 4 приведена схема цифровой ячейки, включающая комбинированный датчик тока и напряжения (КДТН) с цифровыми выходами согласно МЭК 61850-9-2LE, контроллер выключателя (КВ), измерительное интеллектуальное устройство (ИЭУ1), многофункциональное устройство защиты и автоматики (ИЭУ2).

Контроллер выключателя обеспечивает выполнение функций блока управления вакуумным выключателем (БУВВ) и дискретного устройства сопряжения с шиной процесса и располагается в отсеке вакуумного выключателя. В этом случае обеспечивается переход от цифрового

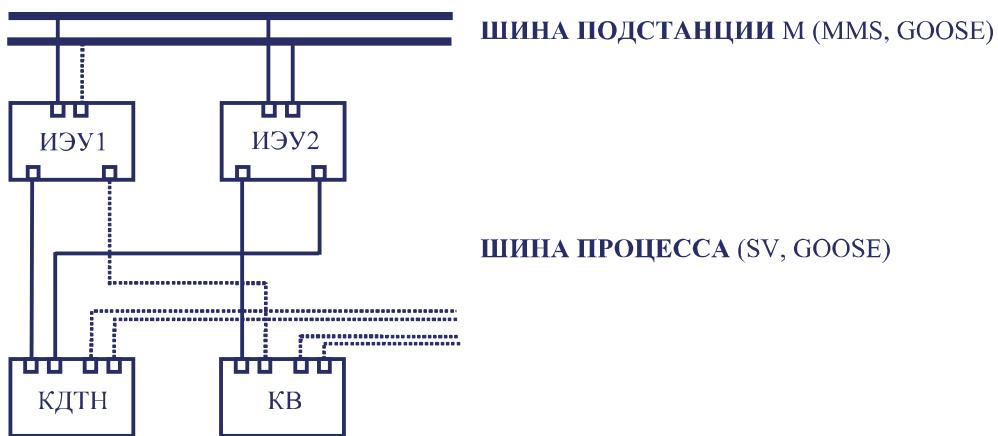


Рис. 4. Цифровая ячейка

взаимодействия между БУВВ и устройством сопряжения вместо традиционного взаимодействия с помощью релейно-контактных схем. В серийных БУВВ российских производителей чаще всего имеется один или даже несколько микропроцессоров, поэтому используемое в настоящее время взаимодействие БУВВ с устройствами релейной защиты и автоматики нельзя считать рациональным.

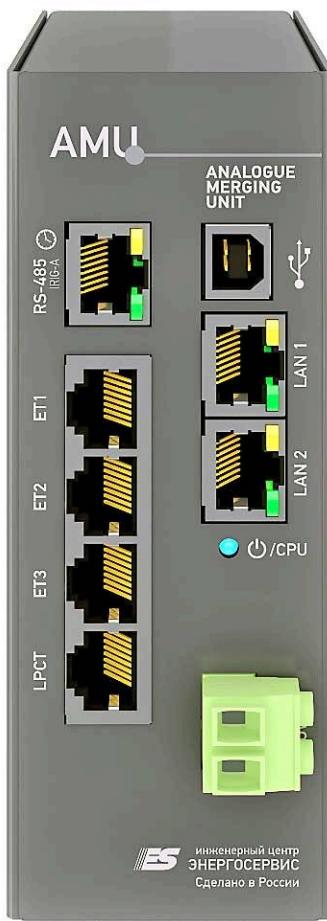
На рис. 4 приведены два интеллектуальных электронных устройства, но в случае отсутствия необходимости коммерческого учета достаточно использование только одного многофункционального ИЭУ.

Так как БУВВ выпускаются производителями вакуумных выключателей, то на первом этапе вынужденной мерой является использование раздельных устройств – устройств сопряжения с шиной процесса и блока управления вакуумным выключателем.

Аналогичная проблема наблюдается с комбинированным датчиком тока и напряжения. На сегодняшний день на рынке отсутствуют КДТН с цифровым интерфейсом. Указанные устройства имеют только низкоуровневые аналоговые выходы и поэтому на первом этапе целесообразна реализация отдельного аналогового устройства сопряжения.

Для цифровых ячеек 6–20 кВ специалистами ЗАО Инженерный центр “Энергосервис” разработана специальная модификация устройства сопряжения с шиной процесса ENMU-A (Analog Merging Unit), предназначенная для подключения к комбинированным преобразователям тока и напряжения с низкоуровневыми выходными сигналами (рис. 5). Это позволяет резко уменьшить габариты и устройства сопряжения ENMU-A (54×136×121 мм) по сравнению с модификацией данного устройства для традиционных трансформаторов тока и напряжения. Устройство сопряжения ENMU-A устанавливается непосредственно в месте установки трех комбинированных датчиков, образуя с ними трехфазный цифровой первичный измерительный преобразователь тока и напряжения. В перспективе планируется разработка встраиваемого в комбинированные датчики устройства сопряжения.

Устройство сопряжения ENMU-A содержит 2 или 4 порта Ethernet (витая пара 2×100BASE-TX) и обеспечивает передачу выборок тока и напряжения (sampled values) в соответствии с МЭК



**Рис. 5.** Устройство сопряжения ENMU-A

61850-9-2LE. Дополнительно устройство реализует функции устройства синхронизированных векторных измерений PCMU (Phasor Control and Measurement Unit).

Возможны следующие режимы работы ENMU-A: формирование раздельных или совмещенного потоков выборочных значений от релейной и измерительной обмоток трансформатора тока и от трансформатора напряжения (sv256, sv80m, sv80r), передача значений векторных измерений тока и напряжения IEEE C37.118.2. В ENMU-A реализован протокол резервирования PRP, синхронизация часов реального времени может производиться разными способами: PPS, IRIG-A или в перспективе при использовании протокола PTP (IEEE 1588 v.2).

В высоковольтных ячейках 6–20 кВ применяется множественное дублирование ввода/вывода дискретных сигналов, при этом используется большое количество медных проводов, что приводит к снижению надежности, а также увеличивает стоимость электроустановок. Дискретный ввод/вывод с использованием концевых выключателей, блок-контактов выключателей и т.д. используется в устройствах РЗА, телемеханики, устройствах индикации состояния ячейки, для организации оперативных блокировок. Для исключения множественного дублирования ввода/вывода дискретных сигналов и повышения надежности цифровой ячейки разработано дискретное устройство сопряжения с шиной процесса ENMU-D. Это устройство предусматривает использование бесконтактных датчиков (вместо концевых выключателей

и блок-контактов) и переход на взаимодействие с блоком управления вакуумным выключателем с электромагнитной защелкой по цифровым интерфейсам [6, 7].

Применение специализированных устройств сопряжения с шиной процесса позволит повысить надежность, существенно сократить количество медных проводов в высоковольтных ячейках, существенно упростить реализацию ИЭУ различного функционального назначения, уменьшить их габариты и вес, существенно снизить их стоимость.

Для упрощения и удешевления решений для цифровой ячейки планируется объединить в одном устройстве многофункциональное ИЭУ и ЕНМУ. При этом сохраняется возможность передачи выборочных значений токов и напряжений по протоколу МЭК 61850-9-2LE или в качестве альтернативы синхрофазоров тока и напряжения для других устройств, в том числе для централизованных и распределенных устройств защиты и автоматики.

В настоящее время в электрических сетях уже востребованы эффективные и доступные решения по автоматизации необслуживаемых подстанций при использовании многофункциональных ИЭУ с поддержкой шины подстанции согласно МЭК 61850-8-1. И в самой ближайшей перспективе следует ожидать внедрение цифровых ячеек 6–20 кВ на базе разработок отечественных производителей.

### Список литературы

1. Положение ОАО “Россети” о единой технической политике в электросетевом комплексе. М.: Россети, 2013.
2. Бовыкин В.Н., Мокеев А.В. Доступные решения для цифровой подстанции // А&ИТ. 2013. № 3. С. 2–6.
3. Ванин В.К., Мокеев А.В., Попов М.Г. Аналоговые и цифровые фильтры в измерительных устройствах и устройствах автоматики энергосистем: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.
4. Digital Filters and Signal Processing / A.V. Mokeev and etc. Ed. F.P.G. Márquezand N. Zaman. Rijeka, InTech, 2012.
5. Mokeev A.V. Optimal filter synthesis // Proc. IEEE Intern. Siberian Conf. on Control and Communications, SIBCON-2013. Krasnoyarsk, 2013.
6. Цифровая ячейка / А.В. Мокеев, И.В. Подболотов, А.Б. Рафиков, Д.Н. Ульянов // ИСУП. 2014. № 1. С. 25–29.
7. Мокеев А.В. Интеллектуальные электронные устройства с поддержкой протоколов шины процесса и шины подстанции // Новое в российской энергетике. 2014. № 6. С. 13–28.
8. Мокеев А.В. Цифровые распределительные устройства 6–20 кВ // Энергоэксперт. 2014. № 5. С. 54–56.
9. Minkner R., Schweitzer E.O. Low power voltage and current transducers for protecting and measuring medium and high voltage systems // 26th Western Protective Relay Conf. Washington, 1999.