

УДК 621.311.4-52
Шифр специальности ВАК 2.4.5.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ ПС НА БАЗЕ ПРОТОКОЛА МЭК 61850 R-GOOSE

Использование современных сетей связи для передачи технологической информации внутри электроэнергетических систем (ЭЭС) является важным шагом на пути к цифровизации электроэнергетической отрасли. В статье приводится опыт реализации НИОКР «Разработка типовых решений и опытно-промышленная эксплуатация систем пакетной передачи данных РЗА между ПС на базе протокола МЭК 61850 (MMS, R-GOOSE)» (далее – НИОКР) сотрудниками АО «Россети Научно-технический центр». В рамках НИОКР выполнены работы по исследованию применимости протокола передачи информации R-GOOSE для организации связи между высокоавтоматизированными подстанциями. На данный момент технические решения НИОКР находятся на стадии опытной эксплуатации, настоящая статья содержит промежуточные результаты работы.

АВТОРЫ:
Е.Л. Кокорин, к. т. н.,
Kokorin_EL@ntc-power.ru,
ORCID 0000-0002-6317-5911,
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия
Н.В. Федоров,
ORCID 0009-0006-5122-4356,
Svistunov_NV@ntc-power.ru,
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия
А.С. Шеметов,
Shemetov-AS@rosseti.ru,
ПАО «Россети», Москва, Россия
А.С. Иванов,
ORCID 0009-0008-5224-5794,
Ivanov_AS@ntc-power.ru,
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия
В.С. Чайкин,
ORCID 0009-0004-2364-6397,
Chaikin_vs@ntc-power.ru,
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#R-GOOSE; #IEC 61850; #пакетная передача данных; #НИОКР;
#электроэнергетические системы

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Кокорин Е.Л., Федоров Н.В., Шеметов А.С., Иванов А.С., Чайкин В.С. Опытнo-промышленная эксплуатация систем пакетной передачи данных между ПС на базе протокола МЭК 61850 R-GOOSE // Энергия единой сети. 2026. №2 (81). С. 38–43.

©©



Устройство УПАСК-М для приема и передачи R-GOOSE, разработанное в ходе НИОКР

ВВЕДЕНИЕ

Системы передачи данных являются важным элементом в обеспечении надежной и эффективной работы электроэнергетических систем. Однако область применения цифровых протоколов с поддержкой объектной модели, таких как, например, GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event), ограничена отдельным энергообъектом [1]. Задача обмена информацией между подстанциями должна решаться путем модификации существующих подходов. Одним из возможных путей является применение маршрутизируемых GOOSE – R-GOOSE.

При анализе источников выявлено, что до начала описываемой разработки опыт по внедрению R-GOOSE для передачи данных между ПС имелся только у зарубежных компаний, например шлюз R-GOOSE «SISCO» [2]. Разработанное в рамках НИОКР решение позволяет реализовать передачу данных между объектами ЭЭС с применением отечественных решений.

В настоящее время для передачи команд противоаварийной автоматики (ПА) в ЭЭС в основном используются следующие технологии передачи команд [3]:

- по ВЧ каналу ЛЭП с обработкой и переприемом их на транзитных ПС. Основным недостатком решения является необходимость установки большого числа оборудования, организации кабельных связей;
- по мультиплексированным каналам связи с переприемом команд на мультиплексорах транзитных ПС. Основным недостатком решения является необходимость статической настройки всех каналов связи на каждом объекте, как следствие – сложность настройки.

В НИОКР предложена технология передачи команд с использованием существующей сети передачи данных ПАО «Россети». В качестве устройства для приема и передачи R-GOOSE используется разработанное в ходе НИОКР специалистами НИЦ «Прософт-Системы» устройство УПАСК-М.

ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ

Анализ существующих требований к каналам связи ПА показал, что нормативно-технические документы (НТД) разрабатывались применительно к существовавшим ранее методам передачи и не могут в полной мере определять требования к новому решению. Ключевым показателем, характеризующим каналы связи, является

допустимая задержка передачи данных. В таблице 1 приведены основные требования существующих НТД.

Из таблицы 1 видно, что согласно [6], величина допустимой задержки для одного канала в тракте из нескольких последовательных каналов передачи с использованием мультиплексирования составляет 10 мс. При выполнении этого требования, с учетом всех переприемов, общая задержка всей передачи может составлять сотню миллисекунд и более. Учитывая, что в прорабатываемом решении задержка не складывается последовательно из участков общего канала, используется иная логика. Полное время передачи команды противоаварийной автоматики является наиболее наглядной характеристикой канала связи нового типа и определяется по разнице между моментами выдачи сообщения на ПС – источнике команды ПА и моментом его получения на ПС – приемнике команды. Далее особенности расчета характеристик каналов связи рассматриваются более подробно.

ПРОТОКОЛ

Для реализации передачи данных по системам передачи данных (СПД) выбран протокол R-GOOSE (стандарт МЭК 61850–90–5 [1]).

Кадр R-GOOSE помимо данных включает в себя качество передаваемых сигналов и метки времени, характеризующие моменты изменения атрибутов данных. Размер сообщения составляет 340 байт, однако размер R-GOOSE изменяется в зависимости от количества передаваемых объектов данных. Ширина полосы пропускания, необходимой для передачи рассматриваемого сообщения по каналам связи, определяется интервалами между сообщениями и варьируется в зависимости от наличия или отсутствия изменений в наборе данных в диапазоне от тысячных долей Мб/с до целых значений Мб/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания предложенных технических решений проводились в две стадии:

- на испытательном полигоне АО «Россети Научно-технический центр»;
- на трех ПС ПАО «Россети», относящихся к опытной зоне.

Далее рассматриваются результаты, полученные на объектах опытной зоны, как представляющие наибольший интерес. На рисунке 1 показана упрощенная схема коммуникаций, организованная между объектами при опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ). Схема (рис. 1) упрощена: так, например, не отображены решения по резервированию каналов связи. Расстояния между объектами составили около 500 км.

Следует отметить, что тестовая схема (рис. 1) не используется для передачи реальных команд ПА (от устройств ПА, введенных в промышленную эксплуатацию). Устройства, используемые в схеме ОПЭ и установленные на объектах А, В, С, предназначены для генерации GOOSE-сообщений, соответствующих цикли-

Таблица 1. Требования НТД к производительности каналов связи

	Приказ МЭ [4]	СТО [5]	МЭК 61850 [6]
Допустимая задержка передачи данных по каналу связи, мс	25	15	10
Скорость передачи данных, кбит/с	128	64	–

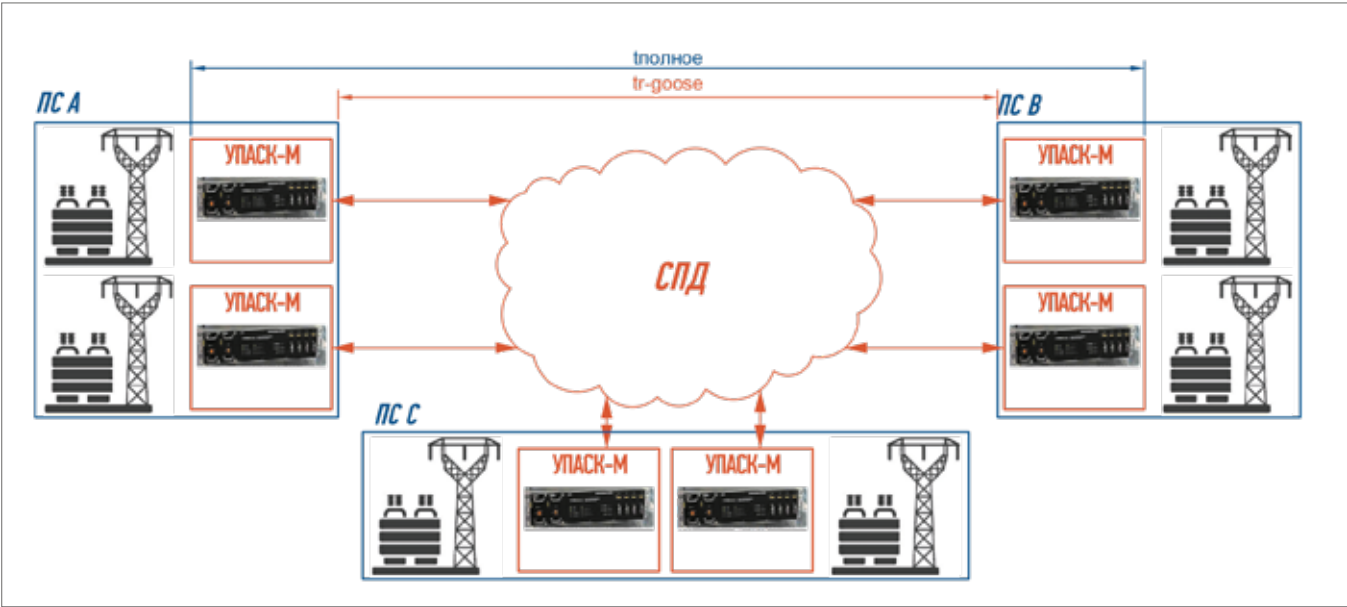


Рис. 1. Схема коммуникаций при опытно-промышленной эксплуатации

чески изменяющимся значениям параметров сигналов. Постоянное изменение параметров сигналов позволяет эксплуатировать систему (рис. 1) в режиме, близком к аварийному, и генерировать большой объем трафика данных.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ

Основными исследуемыми характеристиками являлись:

- время передачи R-GOOSE сообщений ($t_{r-goose}$);
- полное время передачи команды ПА ($t_{полное}$).

Различие между двумя указанными метриками показано на рисунке 1.

СПОСОБЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ R-GOOSE

Время $t_{r-goose}$ определяется между источником и приемником R-GOOSE сообщений в сети передачи данных.

Разработанное в ходе НИОКР устройство УПАК-М позволяет осуществлять запись *.рсар файлов, дальнейшие расчеты выполнялись с использованием указанных файлов.

Протоколом R-GOOSE предусмотрено применение тега SPDU number, который показывает номер конкретного пакета в последовательности передаваемых пакетов. Для расчета времени $t_{r-goose}$ использовались *.рсар файлы, записанные на двух концах канала связи, в дампах осуществлялся поиск пакета с одинаковым SPDU number. Расчет времени между пакетами с одинаковыми значениями SPDU number в двух дампах трафика осу-

ществляется с использованием оценки времени получения пакетов на интерфейсе, причем указанное время зависит от внутреннего времени функционирования УПАК-М. Таким образом, расчет с использованием указанной метрики может считаться корректным только при работе в режиме синхронизации времени. На объектах ОПЭ устройства УПАК-М были синхронизированы с применением протокола РТР, что позволяет добиться точности расчета задержки ± 1 мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ R-GOOSE

В таблице 2 приведены данные, включающие усредненные численные характеристики каналов по времени $t_{r-goose}$:

- по пропускной способности каналов связи (определены по минимальной пропускной способности устройств в составе статически маршрутизируемой части канала связи);
- по используемой пропускной способности канала (для передачи R-GOOSE-сообщений), вычисленные на основании дампа сетевого трафика продолжительностью 2 минуты;
- по результатам измерения времени $t_{r-goose}$, полученным за время записи дампа трафика аналогичной продолжительности.

Указанные метрики определялись автоматизированным методом с использованием *.рсар файлов, записанных устройствами ПС на концах передачи. Время передачи измерено и усреднено на интервале в 2 минуты, на дальнейшем этапе планируется расчет на более длительном интервале времени.

Таблица 2. Результаты измерения времени $t_{r-goose}$

Канал	Потенциальная пропускная способность, Мбит/с	Пропускная способность используемая, Мбит/с	$t_{r-goose}$, мс
A-B1	13,89	0,707	10,543
A-B2	6,39	0,883	10,892
B-C1	6,84	0,697	6,972
B-C2	3,84	0,927	15,824
A-C1	6,84	0,521	7,765
A-C2	3,84	0,642	7,498

Анализ таблицы 2 показывает, что значения времени $t_{r-goose}$ находятся в диапазоне от 6,972 мс до 15,824 мс, т. е. могут выходить за определенные НТД значения 10 мс. Таким образом, при недостаточной загруженности канала время передачи не зависит от общей его пропускной способности, а в большей мере определяется числом устройств в тракте передачи.

Испытания технических решений в настоящее время продолжатся. В дальнейшем планируются испытания с искусственным ограничением пропускной способности каналов передачи данных до значения 1 Мбит/с и менее.

СПОСОБЫ РАСЧЕТА ПОЛНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ

Время $t_{полное}$ определяется между моментами выдачи команды устройством ПА (РЗА) и моментом получения команды устройством, реализующим ее на противоположном конце канала.

При вычислении полного времени передачи необходимо учитывать независимость изменений интервалов выдачи сообщений GOOSE, R-GOOSE по маршруту передачи. Предположим, что через один канал необходимо передать сигналы от РЗА1 и РЗА2 к устройствам РЗА3, РЗА4 на противоположной стороне канала соответственно. Поясняющая схема приведена на рисунке 2.

В нормальном режиме (т. е. в режиме, в котором не происходит срабатываний и передаются только нулевые значения) интервалы выдачи сообщений GOOSE и R-GOOSE никак не связаны, и при различных значениях maxtime в устройствах (рис. 2) выдача сообщений в тракте может быть не одновременной.

На рисунке 3 показано, что пакет GOOSE с номером 1 (GOOSE1) может быть по времени приближен к пакету 2 (GOOSE2). В сообщении R-GOOSE, очевидно, попадает только информация, полученная на момент его формирования, т. е. в пакет 2 R-GOOSE попадает информация из 2-го пакета GOOSE1 и 2-го GOOSE2, хотя между ними значительный временной интервал. Далее следует отметить, что в момент формирования 2-го пакета GOOSE1 произошло изменение сигнала, потому выдача сообщения R-GOOSE после получения этой информации будет происходить учащенно.

Временные интервалы $t_{полное1}$ и $t_{полное2}$ на рисунке 3 обозначают интервалы между сформированным GOOSE сообщением и сформированным на его основе R-GOOSE. Рисунок 3 показывает, что интервалы $t_{полное1}$ и $t_{полное2}$ могут значительно отличаться друг от друга.

Интервал $t_{полное1}$ составляет полное время передачи сообщения GOOSE1 посредством R-GOOSE, его приема и преобразования в GOOSE3 на приемной стороне без дополнительных задержек. Интервал $t_{полное2}$ не может использоваться для характеристики полного времени передачи GOOSE2, так как содержит дополнительные временные задержки, потому на рисунке 3 он помечен «*» как недостоверный.

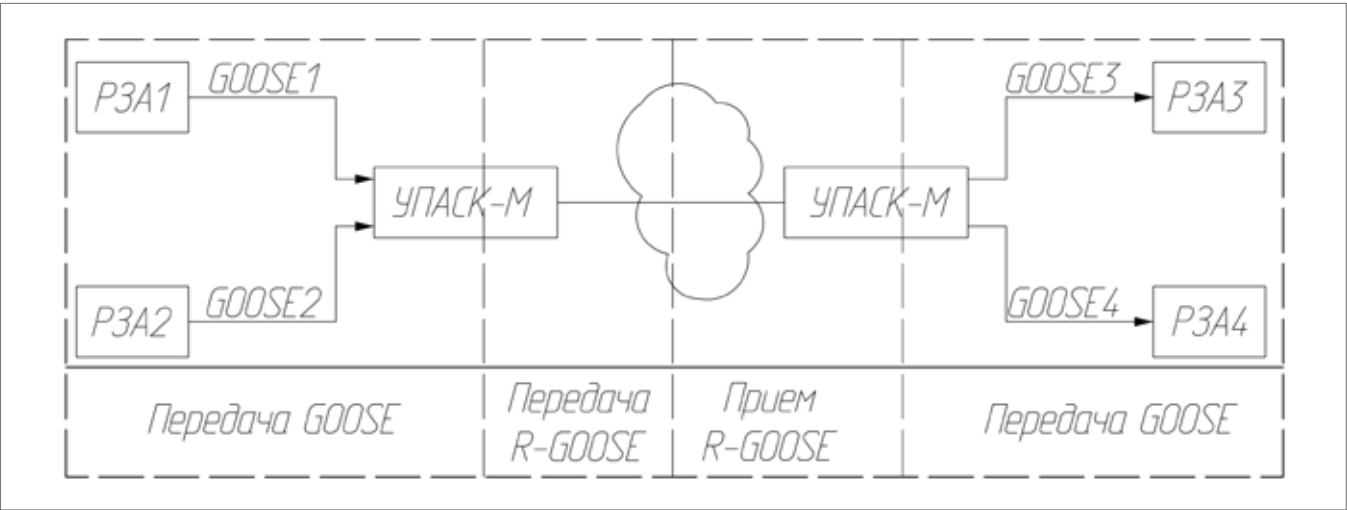


Рис. 2. Поясняющая схема канала передачи данных

Таблица 3. Результаты измерения полного времени $t_{\text{полное}}$

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Среднее $t_{\text{полное}}$
$t_{\text{полное}}$	14,99	13	15	13,99	13,99	14,99	13,99	13,99	9,99	14,99	15	11	15	13,63

Таким образом, полное время передачи может быть достоверно определено только для первого GOOSE пакета с измененным значением.

Существует два варианта формирования меток времени в составе GOOSE, которые могут использоваться для определения полного времени передачи:

- по времени приема пакета на интерфейс;
- по времени метки времени в пакете GOOSE.

Рассмотрим пример передачи GOOSE1 от РЗА1 к УПАК-М (рис. 2). При изменении значения в составе набора данных GOOSE1 устройство РЗА1 записывает свою метку времени; далее пакет проходит по ЛВС ПС и попадает на интерфейс УПАК-М. Устройство УПАК-М обрабатывает пакет и фиксирует время его получения на интерфейсе с учетом внутреннего времени УПАК-М. На приемном конце процесс присвоения меток времени аналогичен.

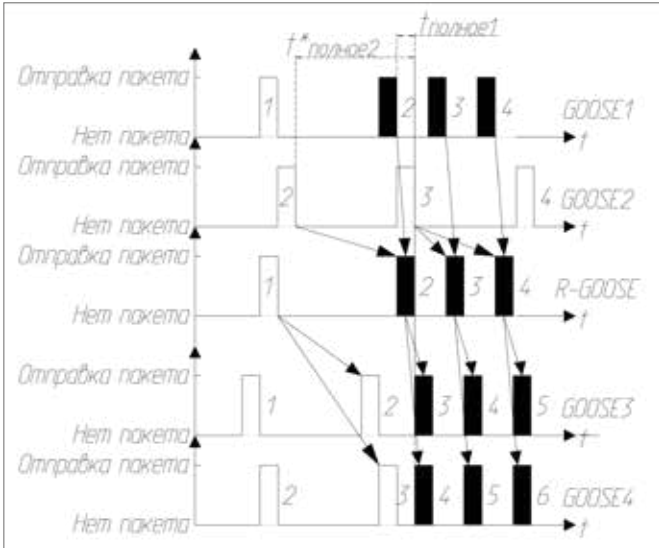


Рис. 3. Особенности расчета полного времени передачи $t_{\text{полное}}$

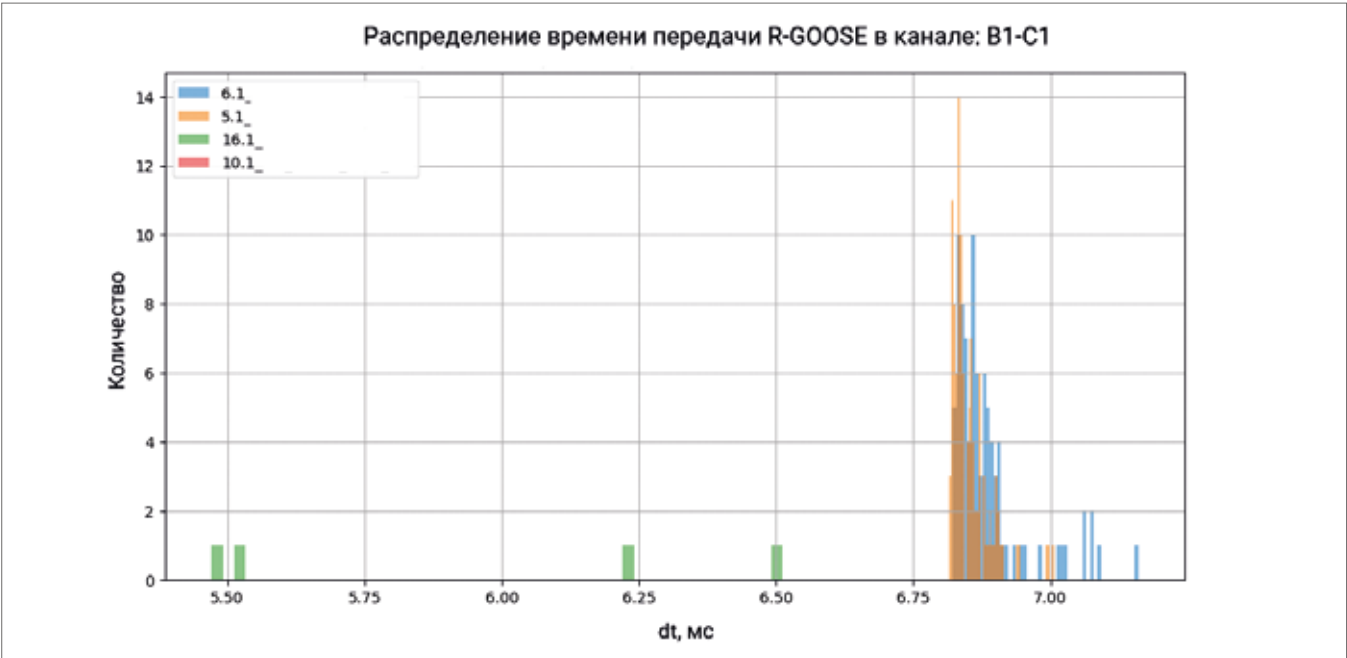


Рис. 4. Гистограмма $t_{r\text{-goose}}$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОЛНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ

Результаты измерения $t_{\text{полное}}$ на примере передачи В1 – С1 (рис. 1) приведены в таблице 3. В таблице присвоены номера пакетов GOOSE в последовательности для обоих объектов и отмечено полученное значение $t_{\text{полное}}$ для каждого из пакетов. Следует отметить, что для выполнения замера был симитирован штормовой режим с постоянным изменением значений сигнала.

Анализ таблицы 3 показывает, что среднее арифметическое значение $t_{\text{полное}}$ составляет 13,63 мс, что несколько больше, чем 6,972 мс, полученных в таблице 2. Разница в указанных значениях времени обусловлена преобразованиями типов сообщений GOOSE в R-GOOSE и обратно, а также временем передачи пакетов по локальной вычислительной сети (ЛВС) ПС.

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА

В ходе исследования характеристик каналов связи были построены различные временные и частотные характеристики. Так, на рисунке 4 приведена гистограмма распределения времени $t_{r\text{-goose}}$.

По графической зависимости (рис. 4) видно, что для анализируемого интервала $t_{r\text{-goose}}$ свойственно время передачи большинства команд в диапазоне от 6,8 до 7,0 мс. Выбросы гистограммы (рис. 4) в меньшую сторону связаны с малым размером R-GOOSE сообщений, которые имеют место на ПС. Выбросы в большую сторону обусловлены наложением аварийных режимов различных устройств на ПС, при которых осуществляется учащенная выдача R-GOOSE сообщений.

ВЫВОДЫ

1. В статье приведены основные результаты разработки технических решений по пакетной передаче данных между ПС на базе протокола МЭК 61850. Технология не требует установки дополнительного оборудования (используются мощности существующей сети передачи данных), не требует сложных настроек существующего оборудования в промежуточных узлах, обладает гибкостью, позволяет перестраивать маршрут передачи команд управления в случае неисправности каналов связи в составе сети передачи данных.
2. Приведены параметры замеров основных временных метрик каналов передачи данных – такие как время передачи R-GOOSE сообщений и полное время передачи команд управления. Показано, что диапазон времен передачи между объектами опытной зоны составил от 6,972 до 15,824 мс. Полное время передачи данных отличается от времени передачи R-GOOSE сообщений в большую сторону приблизительно на 5 мс.
3. Время передачи R-GOOSE сообщений по некоторым каналам составило менее 10 мс, что соответствует требованиям НТД. С одной стороны, это говорит о потенциальной возможности соблюдения существующих требований ко времени передачи данных,

а с другой – о потенциальной необходимости пересмотра требований ПАО «Россети» к передаче команд управления.

4. Выводы ОПЭ являются предварительными, итоговые результаты будут опубликованы по окончании НИОКР на основании исследования большего числа технических решений с применением большого количества устройств УПАК.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. IEC 61850-90-5. Communication networks and systems for power utility automation — Part 90-5: Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118.

2. Официальный сайт компании SISCO. R-GOOSE Gateway. URL: <https://sisconet.com/our-products/r-goose-gateway> (Дата обращения 11.06.2024).

3. СТО 56947007-25.040.30.309-2020. Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС».

4. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. N 97 «Об утверждении требований к каналам связи для функционирования релейной защиты и автоматики».

5. СТО 34.01-9.2-004-2019. Каналы связи для РЗА. Технические решения для сетей 35–220 кВ. ПАО «Россети». 2019.

6. IEC 61850-5. Communication networks and systems for power utility automation — Part 5: Communication requirements for functions and device models. Edition 2.0. 2013.