

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.3>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ УСТРОЙСТВ ENMU ПО ПРОТОКОЛУ RTPv2 В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Юрий Григорьевич Кононов^{1*}, Павел Александрович Звада², Евгений Геннадьевич Зеленский³, Роман Александрович Звездилин⁴, Дмитрий Алексеевич Турченко⁵

^{1,2,3,4,5} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ iukononov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7069-2212>

² pzvada@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8175-0628>

³ ezelenskii@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0262-9200>

⁴ crookedbstrip@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3560-1850>

⁵ turchenko_20@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-6141-9094>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Одним из направлений цифровой трансформации электроэнергетики является внедрение интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) с функцией синхронизированных измерений. Для высокоточной и надежной синхронизации ИЭУ применяют протокол RTPv2 в сочетании с волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС) и поддерживающими их программируемыми коммутаторами. Имеется опыт такой синхронизации на расстояниях до 2 км в проектах подстанций с высоким уровнем автоматизации. Однако, опыт практического апробации такого решения в распределительных сетях при расстояниях более 2 км на базе устройств ENMU ООО «Энергосервис» отсутствует. **Цель** заключается в исследовании точности синхронизации устройств ENMU по протоколу RTPv2 стандарта IEEE 1588 при помощи сервера времени, телекоммуникационных коммутаторов и медиаконвертеров и волоконно-оптической линии связи длиной 8 км в лабораторных условиях. **Материалы и методы.** Исследование выполнено в лабораторных условиях с использованием блока коррекции времени, промышленного коммутатора и медиаконвертера, бухты с волоконно-оптическим кабелем ОКП-К-8 длиной 8 км, генератора эталонных сигналов и дублирующей измерительной системы на базе измерительных устройств National Instruments, реализующих функционал PMU. **Результаты и обсуждение.** Результаты лабораторных испытаний показали, что точности синхронизации составила от 0,5 до 16 мкс в зависимости от используемой методики подсчета рассинхронизации. **Заключение.** В результате лабораторных испытаний показана возможность синхронизации измерений с высокой точностью при помощи устройств ENMU на основе протокола RTP v2 стандарта IEEE 1588 на расстоянии не менее 8 км. Полученные результаты доказывают перспективы по внедрению подобных устройств не только в центрах питания, но и в пределах целого фидера распределительной сети или отдельных его частей.

Ключевые слова: УСВИ, УСШП, RTPv2, SV-потоки, синхронизация

Для цитирования: Кононов Ю. Г., Звада П. А., Зеленский Е. Г., Звездилин Р. А., Турченко Д. А. Исследование точности синхронизации устройств ENMU по протоколу RTPv2 в лабораторных условиях // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6 (105). С. 27–35. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.3>

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования в рамках программы «Приоритет-2030».

Конфликт интересов: один из авторов – доктор технических наук, профессор Ю. Г. Кононов является членом редакционной коллегии журнала «Вестник Северо-Кавказского федерального университета». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 18.10.2024;

одобрена после рецензирования 26.11.2024;

принята к публикации 29.11.2024.

Research article

THE STUDY OF SYNCHRONIZATION ACCURACY OF ENMU DEVICES ACCORDING TO THE PTPv2 PROTOCOL IN LABORATORY CONDITIONS

Yuri G. Kononov^{1*}, Pavel A. Zvada², Evgenii G. Zelenskii³, Roman A. Zvezdilin⁴,
Dmitry A. Turchenko⁵

^{1,2,3,4,5} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin str., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ iukononov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7069-2212>

² pzvada@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8175-0628>

³ ezelenskii@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0262-9200>

⁴ crookedbstrip@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3560-1850>

⁵ turchenko_20@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-6141-9094>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. One of the directions of digital transformation of the electric power industry is the introduction of intelligent electronic devices (IED) with the function of synchronized measurements. For high-precision and reliable synchronization of the IED, the PTPv2 protocol is used in combination with fiber-optic communication lines (FOCL) and programmable switches supporting them. There is experience of such synchronization at distances up to 2 km in substation projects with a high level of automation. However, there is no experience of practical testing of such a solution in distribution networks at distances of more than 2 km based on ENMU devices of Energoservice LLC. **Goal.** The aim is to study the accuracy of synchronization of ENMU devices using the PTPv2 protocol of the IEEE 1588 standard using a timeserver, telecommunication switches and media converters and an 8 km fiber-optic communication line in laboratory conditions. **Materials and methods.** The study was performed in laboratory conditions using a time correction unit, an industrial switchboard and a media converter, a bay with an 8 km long OKP-K-8 fiber-optic cable, a reference signal generator and a backup measuring system based on National Instruments measuring devices implementing the PMU functionality. **Results and discussion.** The results of laboratory tests showed that the synchronization accuracy ranged from 0.5 to 16 μ s, depending on the method used to calculate the desynchronization. **Conclusion.** Laboratory tests have shown the possibility of synchronizing measurements with high accuracy using ENMU devices based on the IEEE 1588 PTP v2 protocol at a distance of at least 8 km. The results obtained prove the prospects for the introduction of such devices not only in power supply centers, but also within the entire feeder of the distribution network or its individual parts.

Keywords: PMU, ENMU, PTPv2, SV streams, synchronization

For citation: Kononov YuG, Zvada PA, Zelenskii EG, Zvezdilin RA, Turchenko DA. The study of synchronization accuracy of ENMU devices according to the PTPv2 protocol in laboratory conditions. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;6(105):27-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.3>

Funding: the study was carried out with financial support from the Ministry of Science and Education within the framework of the Priority 2030 program.

Conflict of interest: one of the authors, YuG Kononov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, is a member of the editorial board of the journal "Newsletter of the North-Caucasus Federal University". The authors are unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

The article was submitted 18.10.2024;

approved after reviewing 26.11.2024;

accepted for publication 29.11.2024.

Введение / Introduction. Одним из направлений цифровой трансформации электроэнергетики является внедрение интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) с функцией синхронизированных измерений [1]. В настоящее время активно развиваются две технологии синхронизированных измерений: первая основана на вычислении в строго определенные моменты времени так называемых фазоров (векторов) сигналов тока и напряжения для основной гармоники и их передачи на верхний уровень в концентраторы данных (англ. – PDC) в соответствии со стандартом IEEE-37.118.2 для решения задач оперативного мониторинга и управления энергосистемой при помощи системы мониторинга переходных режимов (СМПП, англ. – WAMS). Вторая технология получила большее распространение на подстанциях с высоким уровнем автоматизации (ранее употреблялся термин «цифровая подстанция») и состояла в передаче по локальной сети ПС (обычно по оптическим каналам связи) мгновенных значений сигналов тока и напряжения в виде так называемых SV-потокосов в соответствии с протоколом МЭК-61850-9-2-SV. Данные две технологии имеют как много общего, так и значительные отличия. Общее заключается в исполь-

зовании для синхронизации измерений сигналов точного времени, поступающих от приемников спутниковых навигационных систем или по локальной сети (протокол РТР v2), и применении схожих системотехнических решений для первичного преобразования сигналов при помощи АЦП. Передача SV-потокa из-за большего объема передаваемой информации требует более высокой скорости передачи и надежных каналов связи. В связи с чем, как правило, применяются волоконно-оптические каналы связи. Из-за относительной дороговизны технологии синхронизированных измерений ранее применялись только на крупных электростанциях и подстанциях сверхвысокого напряжения. Из-за стремительного развития средств измерений и телекоммуникаций можно прогнозировать в недалеком будущем использование синхронизированных измерений в распределительных сетях. Однако на настоящий момент отсутствует однозначный ответ на вопрос, какая из этих двух технологий более эффективна для распределительных сетей. Для ответа на поставленный вопрос требуется проведение комплекса теоретических и практических исследований по эффективности применения этих технологий в распределительных сетях.

В рамках настоящей работы с целью построения пилотной площадки для исследования технологий синхронизированных измерений на базе действующего фидера 10 кВ при экспериментальных измерениях в лабораторных условиях анализируется возможность создания системы сбора данных об измеряемых векторах напряжений и токов, а также их мгновенных значениях на основе интеллектуальных преобразователей тока и напряжения ENMU, сервера времени ЭНКС-2Т, телекоммуникационных коммутаторов PLANET и ВОЛС длиной 8 км. Основное внимание уделено проверке точности синхронизации измерений по протоколу IEEE 1588 РТР v2.

Как уже было сказано, для высокоточной и надежной синхронизации ИЭУ применяют протокол РТРv2 в сочетании с волоконно-оптическими каналами связи и поддерживающими его программируемыми коммутаторами [2]. Имеется опыт такой синхронизации на расстояниях до 2 км в проектах подстанций с высоким уровнем автоматизации при помощи многомодального оптоволоконна [3]. Однако опыт практического апробации такого решения в распределительных сетях на расстояниях более 2 км при помощи одномодального оптоволоконна на базе устройств ENMU ООО ИТЦ «Энергосервис» [4] и коммутаторов компании PLANET (Тайвань), поддерживающих протокол РТРv2, до 2024 года отсутствовал. В связи с этим сотрудниками кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского федерального университета в лабораторных условиях были проведены экспериментальные исследования, подтвердившие возможность применения устройств ENMU-5/100-16/10-220-Е3-Е3А2С1-А1 и блока коррекции времени ЭНКС-2Т-220-А2В1Е2 компании ООО ИТЦ в сочетании в коммутатором PLANET IGS-6325-20S4C4X и медиаконвертором PLANET IGT-900-2Т2S для организации сбора SV-потокa на расстоянии до 8 км.

Применение такого способа синхронизации на расстояниях более 2 км открывает огромные перспективы по внедрению подобных устройств не только в центрах питания, но и на понижающих трансформаторных подстанциях целого фидера или отдельных его частей, что позволит обеспечить качественно новый уровень наблюдаемости распределительных электрических сетей.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.

Исследования точности синхронизации выполнялось в лабораторных условиях в феврале 2024 года с применением следующего оборудования:

- преобразователь аналоговых и дискретных сигналов ENMU-5/100-16/10-220-Е3-Е3А2С1-А1 [4];
- блок коррекции времени ЭНКС-2Т-220-А2В1Е2 [5];
- промышленный коммутатор PLANET IGS-6325-20S4C4X [6];
- промышленный медиаконвертер PLANET IGT-900-2Т2S [7];
- SFP модуль SNR-SFP-LX-20-i [8];
- УСВИ PMU NI [9] на базе Real-Time контроллера NI cRIO-9025 [10] с FPGA-шасси NI cRIO-9118 [11] и трехканальный модуль измерения переменного напряжения NI 9225 [12];

- генератор эталонных сигналов OMICRON-CMC356 [13];
- бухта с волоконно-оптическим кабелем ОКП-К-8 длиной 8 км.

Для исследования точности синхронизации измерений в лабораторных условиях предложена методика, основанная на определении фазы сигнала синусоидального напряжения, измеренного ENMU и переданного на сервер в виде SV-потоков, по мгновенному значению в заданный момент времени и использовании в качестве условно-эталонного сигнала информации о фазоре напряжения, измеренного УСВИ PMU NI.

Учитывая, что в SV-потоках содержится информация только о номере измерения внутри 1 секунды, для возможности определения рассинхронизации на величину более одного полупериода в СМС-356 был запрограммирован протулированный синусоидальный сигнал частотой, отличной от 50 Гц: 50,01 Гц, мгновенные значения которых изменялись по следующему закону:

$$\left. \begin{aligned} u_c &= \sqrt{2}u_{RMS}(t) \cos(2\pi F t) \\ u_b &= \sqrt{2}u_{RMS}(t) \cdot \cos(2\pi F \cdot t + 2\pi / 3) \\ u_a &= \sqrt{2}u_{RMS}(t) \cdot \cos(2\pi F \cdot t - 2\pi / 3) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где u_a , u_b и u_c – мгновенные значения напряжений в фазах а, б и с в момент времени t ; $u_{rms}(t)$ – зависимость действующего значения напряжения от времени t (рис. 1).

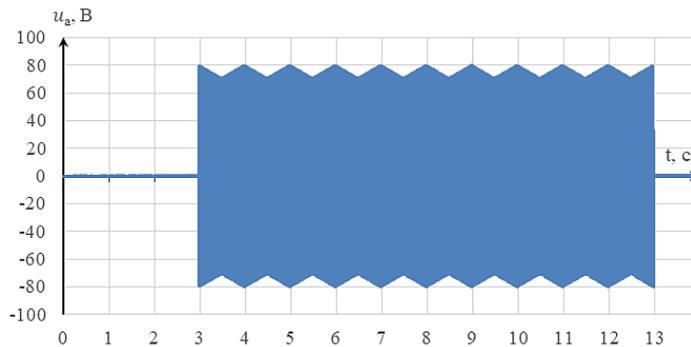


Рис. 1. Осциллограмма напряжения фазы А, генерируемого СМС-356 в течение времени проведения эксперимента / Fig. 1. An oscillogram of the phase A voltage generated by SMS-356 during the time of the experiment

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Схема экспериментальной установки для измерения величины рассинхронизации измерений в ENMU по сравнению с PMU NI приведена на рис. 2.

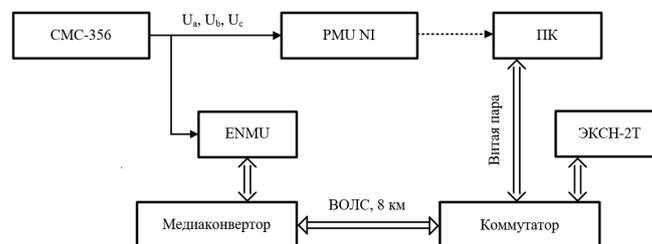


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования точности синхронизации ENMU по протоколу PTPv2 / Fig. 2. Scheme of an experimental setup for studying the accuracy of synchronization of ENMU over the PTPv2 protocol

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Фаза напряжения сигнала напряжения от ENMU по данным мгновенного значения напряжения SV-потока u_i определялась с учетом синусоидальной формы генерируемого сигнала по выражению

$$\phi_{ENMU,i} = \cos^{-1} \frac{u_i}{\sqrt{2}U_{RMS,i}}, \quad (2)$$

где $U_{RMS,i}$ – действующее значение напряжения основной гармоники в i -й момент времени;

Для определения действующего значения напряжения основной гармоники в i -й момент времени использовались следующие способы:

- 1) бралось действующее значение напряжения основной гармоники, измеренное (вычисленное) PMU NI;
- 2) действующее значение напряжения основной гармоники определялось по 128 предыдущим мгновенным значениям из SV-потока от ENMU;
- 3) действующее значение напряжения основной гармоники определялось по 128 последующим мгновенным значениям из SV-потока от ENMU;
- 4) действующее значение напряжения основной гармоники определялось по 256 предыдущим мгновенным значениям из SV-потока от ENMU;
- 5) действующее значение напряжения основной гармоники определялось по 128 предыдущим и 128 последующим мгновенным значениям из SV-потока от ENMU;
- 6) действующее значение напряжения основной гармоники определялось по 64 предыдущим и 64 последующим мгновенным значениям из SV-потока от ENMU.

Расхождение фазовых углов затем пересчитывалось в величину рассинхронизации в мкс в соответствии с выражением:

$$-t_k \frac{\phi_{ENMU,i} - \phi_{PMU,i}}{360} \frac{1000000}{F}, \quad (3)$$

где $\phi_{PMU,i}$ – фазовый угол напряжения, измеренный PMU NI; F – частота сигнала напряжения (в настоящих исследованиях была принята равной 50,01 Гц).

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. На рис. 3 представлена осциллограмма напряжений в момент подачи сигнала от генератора эталонных сигналов на 3-й секунде эксперимента.

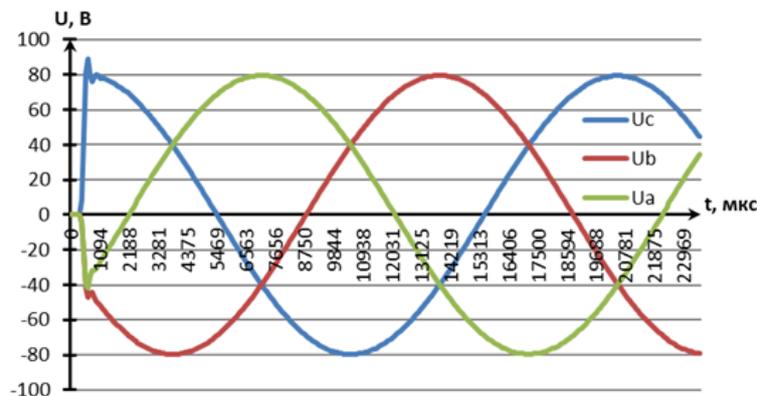


Рис. 3. Осциллограмма напряжений, построенная по результатам обработки SV-потоков от ENMU / Fig. 3. Voltage waveform based on the results of processing SV streams from ENMU

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

В таблице 1 приведены величины рассинхронизации ENMU и PMU NI, рассчитанные в соответствии с предложенной методикой для момента времени 08:00:06.000 02.02.2024.

Таблица 1 / Table 1

Результаты определения величины рассинхронизации измерений и расхождений в действующих значениях измеряемых напряжений / Results of determining the accuracy of measurement synchronization and discrepancies in the effective values of measured voltages

| Способ | Рассинхронизация, мкс для фазы: | | | Расхождение напряжений, В для фазы: | | |
|--------|---------------------------------|--------|------|-------------------------------------|---------|---------|
| | A | B | C | A | B | C |
| 1 | 1,96 | 0,42 | 1,50 | - | - | - |
| 2 | 4,81 | -10,08 | 1,51 | -0,0260 | -0,0971 | -0,0851 |
| 3 | -8,89 | 7,09 | 1,48 | 0,1978 | 0,2137 | 0,2214 |
| 4 | 12,69 | -16,01 | 1,52 | -0,0979 | -0,1515 | -0,1297 |
| 5 | -2,19 | -1,34 | 1,50 | 0,0381 | -0,0163 | 0,0034 |
| 6 | 2,03 | 3,94 | 1,49 | -0,0006 | 0,0328 | 0,0137 |

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

На основе анализа полученных результатов можно сделать выводы.

1. Наименьшую величину рассинхронизации по всем способам имеет место в фазе С, что можно объяснить близким к 0 значением фазы напряжения ($-0,22^\circ$). Величина рассинхронизации для этой фазы изменяется в пределах от 1,48 до 1,52 мкс, что соответствует паспортным данным исследуемых первичных источников точного времени (модуль NI-9467 и модуль ЭНКС-2Т).

2. Наименьшую величину рассинхронизации по фазам А и С дает 5-й способ. Он же обеспечивает наименьшее расхождение в действующих значениях основной гармоники напряжения (не превышает 0,04 В). Можно предположить, что в PMU NI для определения действующего значения гармоники используется именно данный способ, т. е. измерения сигнала на интервале -90 до $+90^\circ$.

3. Предложенная конфигурация и состав оборудования позволяют обеспечить надежную синхронизацию измерений с высокой точностью, не хуже 1 мкс, от модуля точного времени ЭНКС-2Т.

Заключение / Conclusion. Результаты проведенных экспериментов показывают, что протокол PTPv2 может успешно применяться для синхронизации SV-потоков при построении измерительной системы не только в пределах отдельно взятой подстанции, но и в разветвленных распределительных сетях в целом или отдельных их частях. Лабораторные исследования подтверждают, что погрешность синхронизации измерений в УСШП ENMU при помощи модуля точного времени ЭНКС-2Т и коммутаторов PLANET на основе протокола PTPv2 на расстоянии 8 км не превышает двух микросекунд. Применение технологии в пределах распределительной сети в целом переводит наблюдаемость таких сетей на качественно более высокий уровень, позволяя решать ряд прикладных задач, в том числе:

- идентификацию параметров ЛЭП и трансформаторов [14, 15];
- локализацию мест повреждений с высокой точностью;
- локализацию нетехнических потерь электроэнергии [16];
- уточнение топологии сети [17];
- другие прикладные задачи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О единой технической политике в электросетевом комплексе: Положение ПАО «Россети» (новая редакция). 2022. 226 с. URL: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf (дата обращения: 17.10.2024).
2. Ingram D. M. E., Schaub P., Campbell D. A. Use of Precision Time Protocol to Synchronize Sampled-Value Process Buses // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. No. 5(51). P. 1173–1180.

3. Мартихин А. Ю., Вылегжанин А. В., Семин В. В., Беккер С. Э. Положительный опыт внедрения систем на базе технологий МЭК 61850-9-2 // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. № 6 (51). С. 16–21.
4. Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU. Руководство по эксплуатации // *Официальный сайт производителя*. 2024. 46 с. URL: https://enip2.ru/documentation/re_enmu.422100.001.pdf (дата обращения: 17.10.2024).
5. Блок коррекции времени ЭНКС-2Т-220-А2В1Е2. Официальная документация производителя. 2024. 62 с. URL: https://enip2.ru/documentation/re_encs.681730.001.pdf (дата обращения: 17.10.2024)
6. IGS-6325-20S4C4X L3 Промышленный 20-Портов 100/1000X SFP + 4-Порта Gigabit TP/SFP + 4-Порта 10G SFP+ Коммутатор // *Официальный сайт компании в России*. URL: <https://planet.com.ru/en/product/igs-6325-20s4c4x> (дата обращения: 17.10.2024).
7. IGT-900-2T2S Промышленный управляемый медиаконвертер 2-порта 10/100/1000T + 2-слота SFP 100/1000/2500X // *Официальный сайт компании в России*. URL: <https://planet.com.ru/en/product/igt-900-2t2s> (дата обращения: 17.10.2024).
8. SFP модуль SNR-SFP-LX-20-i. Официальная документация. 2024. 12 с. URL: <https://data.nag.wiki/private/SFP/Datasheets/1G/SNR-SFP-LX-20.pdf> (дата обращения: 17.10.2024).
9. Why choose NI for PMUs and Wide Area Monitoring. URL: <https://www.ni.com/en/solutions/energy/smart-grid/why-choose-ni-for-pmus-and-wide-area-monitoring.html> (accessed: 17.10.2024).
10. Контроллер CompactRIO cRIO-9025 // *Официальный сайт компании National Instruments*. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.crio-9025.html> (дата обращения: 17.10.2024).
11. Шасси CompactRIO cRIO-9118 // *Официальный сайт компании National Instruments*. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.crio-9118.html> (дата обращения: 17.10.2024).
12. Измерительный модуль напряжения NI-9225 // *Официальный сайт компании National Instruments*. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.ni-9225.html> (дата обращения: 17.10.2024).
13. OMICRON-CMC356 // *Официальный сайт производителя*. URL: <https://www.omicronenergy.com/ru/products/cmc-356/> (дата обращения: 17.10.2024).
14. Идентификация параметров распределительных сетей по синхронизированным измерениям токов и напряжений / Е. Г. Зеленский, Ю. Г. Кононов, И. И. Левченко // *Электротехника*. 2016. № 7. С. 3–8.
15. Kononov Y, Zelenskii E., Rybasova O., Kostyukov D., Vakaushina E. Estimation of 500 kV power transmission line parameters with PMU // *E3S Web of Conferences*. 2021. 13 p.
16. Зеленский Е. Г., Кононов Ю. Г., Жуков М. В. [и др.]. Опыт и перспективы применения синхронизированных измерений для локализации нетехнических потерь электроэнергии в распределительных сетях // *Энергоэксперт*. 2017. № 5-6. С. 1–11.
17. Zelenskii E. G., Tuchina D. S., Kononov Y. G., Kozhevnikov V. M. Mobile Laboratory for Identification of Radial Distribution Network Topology // *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON 2022*. P. 2110–2115.

REFERENCES

1. Regulation of PJSC Rosseti “On a unified technical policy in the electric grid complex” (new version); 2022. 226 p. Available from: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
2. Use of Precision Time Protocol to Synchronize Sampled-Value Process Buses. David M. E. Ingram, Pascal Schaub, Duncan A. Campbell. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012;5(61):1173-1180.
3. Martykhin AYu, Vylegzhanin AV, Semin VV, Bekker SE. Positive experience of implementing systems based on IEC 61850-9-2 technologies. *Electric power. Transmission and distribution*. 2018;6(51):16-21 (In Russ.).
4. ENMU Process Bus Interface Device. Operation Manual. Official Manufacturer's Website; 2024. 46 p. Available from: https://enip2.ru/documentation/re_enmu.422100.001.pdf [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
5. Time correction unit ENKS-2T-220-A2B1E2. Official documentation of the manufacturer. 2024. 62 p. Available from: https://enip2.ru/documentation/re_encs.681730.001.pdf [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
6. IGS-6325-20S4C4X L3 Industrial 20-Port 100/1000X SFP + 4-Port Gigabit TP/SFP + 4-Port 10G SFP+ Switch. Official website of the company in Russia. Available from: <https://planet.com.ru/en/product/igs-6325-20s4c4x> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
7. IGT-900-2T2S Industrial managed media converter 2-port 10/100/1000T + 2-slot SFP 100/1000/2500X. Official website of the company in Russia. Available from: <https://planet.com.ru/en/product/igt-900-2t2s> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).

8. SFP module SNR-SFP-LX-20-i. Official documentation. 2024. 12 p. Available from: <https://data.nag.wiki/private/SFP/Datasheets/1G/SNR-SFP-LX-20.pdf> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
9. Why choose NI for PMUs and Wide Area Monitoring. Available from: <https://www.ni.com/en/solutions/energy/smart-grid/why-choose-ni-for-pmus-and-wide-area-monitoring.html> [Accessed 17 October 2024]
10. CompactRIO cRIO-9025 Controller. Official website of National Instruments. Available from: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.crio-9025.html> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
11. CompactRIO cRIO-9118 Chassis. Official website of National Instruments. Available from: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.crio-9118.html> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
12. NI-9225 Voltage Measurement Module. Official website of National Instruments. Available from: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.ni-9225.html> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
13. OMICRON-CMC356. Official website of the manufacturer. Available from: <https://www.omicronenergy.com/ru/products/cmc-356/> [Accessed 17 October 2024] (In Russ.).
14. Zelenskii EG, Kononov YG, Levchenko II. Identification of the parameters of distribution networks by synchronized current and voltage measurements. Russian Electrical Engineering. 2016;87(7):363-368.
15. Kononov Y, Zelenskii E, Rybasova O, Kostyukov D, Bakaushina E. Estimation of 500 kV power transmission line parameters with PMU. E3S Web of Conferences; 2021. 13 p.
16. Zelensky EG, Kononov YuG, Zhukov MV, et al. Experience and prospects of using synchronized measurements to localize non-technical losses of electricity in distribution networks. Energoeexpert. 2017;5-6:1-11. (In Russ.).
17. Zelenskii EG, Tuchina DS, Kononov YG, Kozhevnikov VM. Mobile Laboratory for Identification of Radial Distribution Network Topology 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON. 2022:2110-2115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Григорьевич Кононов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 56985782200, Researcher ID: J-3033-2015.

Павел Александрович Звада – старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57015422100, Researcher ID: HNS-7419-2022.

Евгений Геннадьевич Зеленский – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57191173252, Researcher ID: HMD-3032-2023.

Роман Александрович Звездилин – аспирант, ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: LTD-8394-2024.

Дмитрий Алексеевич Турченко – магистр кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: LTD-8375-2024.

ВКЛАД АВТОРОВ

Юрий Григорьевич Кононов. Постановка цели исследования, утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Павел Александрович Звада. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Евгений Геннадьевич Зеленский. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Роман Александрович Звездилин. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, выполнение промежуточных расчетов.

Дмитрий Алексеевич Турченко. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, выполнение промежуточных расчетов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Yuri G. Kononov** – Dr. Sci. (Tech.) Professor, Head of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 56985782200, Researcher ID: J-3033-2015.
- Pavel A. Zvada** – Senior Researcher, Senior Lecturer at the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57015422100, Researcher ID: HHS-7419-2022.
- Evgeny G. Zelenskii** – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57191173252, Researcher ID: HMD-3032-2023.
- Roman A. Zvezdilin** – Postgraduate Student, Assistant at the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: LTD-8394-2024.
- Dmitry A. Turchenko** – Master Student of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: LTD-8375-2024.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

- Yuri G. Kononov.** Setting the research goal, approving the final version – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.
- Pavel A. Zvada.** Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained.
- Evgeny G. Zelenskii.** Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained.
- Roman A. Zvezdilin.** Preparation and editing of the text – drafting the manuscript and forming its final version, performing intermediate calculations.
- Dmitry A. Turchenko.** Preparation and editing of the text – drafting the manuscript and forming its final version, performing intermediate calculations.