

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-83:621.311:621.316

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-1-4-72-79

**АНАЛИЗ РАБОТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, УСТАНОВЛЕННОЙ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 КВ**

**БАЛАБИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ**, канд. техн. наук, начальник отдела энергосбережения и повышения энергоэффективности<sup>1</sup>

balabin.aa@mrsk-1.ru

**ВИНОГРАДОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией электроснабжения и теплообеспечения<sup>2,3</sup>

winaleksandr@gmail.com<sup>✉</sup>

**ЛАНСБЕРГ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**, инженер управления технологического развития и цифровизации<sup>1</sup>

LansbergAA@yandex.ru

<sup>1</sup>Филиал ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго»; 302030, Российская Федерация, г. Орел, площадь Мира, 2

<sup>2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

<sup>3</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

**Аннотация.** С целью оптимизации режимов работы энергосистемы, повышения надёжности электроснабжения потребителей и повышения качества поставляемой электроэнергии в сети в роли основного и резервного источников питания используются системы накопления электроэнергии. Актуальным является анализ практического опыта применения накопителя. Авторами выполнен анализ применения в электрической сети 0,4 кВ Орёлэнерго системы накопления электрической энергии в виде накопителя ёмкостью 20 кВт·ч типа MRSK2.0/ESS-50.40, установленного для повышения качества электрической энергии. Произведён обзор режимов работы накопителя, выполнен анализ алгоритмов его управления. Установлено, что в электрической сети с несимметричной нагрузкой применение исследуемого накопителя ухудшило показатели сети. Это объясняется следующими недостатками: отсутствие зависимости интервалов зарядки/разрядки накопителя от графика нагрузки потребителей; отсутствие пофазного управления выдачей мощности и зарядкой; отсутствие алгоритмов отключения при аварийной ситуации в сети. Сделан вывод о том, что для корректировки показателей качества электроэнергии накопитель выбран неверно. Даны рекомендации по совершенствованию систем накопления электроэнергии, выполнение которых позволит избежать выявленных недостатков.

**Ключевые слова:** накопитель электрической энергии, сельские электрические сети, надёжность электроснабжения, качество электроэнергии.

**Формат цитирования:** Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А. Анализ работы и рекомендации по совершенствованию системы накопления электрической энергии, установленной в сельской электрической сети 0,4 кВ // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 1. С. 72-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-72-79>.

© Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А., 2022



## ORIGINAL PAPER

**OPERATION ANALYSIS AND RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING THE ELECTRIC ENERGY STORAGE SYSTEM INSTALLED IN THE RURAL 0.4 KV POWER GRID**

**ALEKSANDR A. BALABIN**, PhD (Eng), Head of the Department of Energy Saving and Energy Efficiency Improvement<sup>1</sup>

balabin.aa@mrsk-1.ru

**ALEKSANDR V. VINOGRADOV**<sup>✉</sup>, PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Laboratory for Electricity and Heat Supply<sup>2,3</sup>

winaleksandr@gmail.com<sup>✉</sup>

**ALEKSANDR A. LANSBERG**, Engineer of the Department of Technological Development and Digitalization<sup>1</sup>

LansbergAA@yandex.ru

<sup>1</sup>Orelenergo – Branch of PJSC “Rosseti Center”; 2, Mira Sq., Orel, 302030, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1<sup>st</sup> Institutsky Proezd Str., 109428, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

**Abstract.** To optimize the modes of operation of the power system, improve the power supply reliability to consumers and improve the quality of power supplied to the grid, power storage systems are used as the main and backup power sources.

The analysis of the practical experience of using the accumulation system is rather topical nowadays. The authors analyze the practical application in the 0.4 kV power grid "Orelenergo" of an electric energy storage system in the form of a 20 kWh storage device of the MRSK2.0/ESS-50.40 type, installed to improve the quality of electric energy. The article gives an overview of the operating modes of the system's storage energy and provides the results of an analysis of its control algorithms. It is established that a power grid with unbalanced load application of the considered storage system has worsened operating parameters. This problem arises due to the following design shortcomings: no dependence of the charging/discharging intervals of the drive on the load schedule of consumers, no phase-by-phase control of power output and charging, no shutdown algorithms in an emergency in the power grid. The article concludes with the statement about the incorrect selection of the accumulator intended for correcting power quality indicators. The authors provide recommendations to improve the energy storage systems designed to enhance the quality of electricity to avoid the identified shortcomings..

**Key words:** electric energy storage, rural power grids, reliability of power supply, quality of electricity.

**For citation:** Balabin A.A., Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Operation analysis and recommendations for improving the electric energy storage system installed in the rural 0.4 kV power grid. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(1): 72-79. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-72-79>.

**Введение.** В электроэнергетике активно применяются системы накопления электроэнергии (СНЭЭ), ведется поиск их рациональных решений и рассматривается их построение на базе механических, электрохимических, электрических, термальных, химических и других способов накопления [1-3].

В промышленности СНЭЭ активно применяются для обеспечения работы железнодорожного транспорта [4]. СНЭЭ в системах тягового электроснабжения устанавливаются в местах, удаленных от источников питания, где снижение напряжения не позволяет обеспечивать требуемую провозную способность железнодорожного состава [5]. СНЭЭ используются в мировой практике на пассажирском городском транспорте (например, при эксплуатации 24-метровых автобусов [6]) или на гибридных легковых автомобилях и локомотивах с литий-ионными батареями и топливными элементами [7].

Интенсивное развитие СНЭЭ в электроэнергетике обусловлено ростом доли электроэнергии, вырабатываемой от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). График выработки электроэнергии от ВИЭ зависит от природных факторов и часто не совпадает с графиком её потребления потребителями. СНЭЭ позволяют обеспечить необходимый баланс [8-10]. Используются СНЭЭ и в проектах электроснабжения удалённых территорий, не связанных с единой энергосистемой: например, такой проект реализован компанией «Тесла» на острове Кауаи в штате Гавайи, США [11]. В России подобное решение выполнено при создании автономной гибридной энергоустановки (АГЭУ), построенной группой компаний «Хевел» в селе Менза Забайкальского края.

СНЭЭ используются в качестве основного и резервного источников питания, для управления графиком потребления, регулирования системных параметров с целью повышения качества электрической энергии [12]. Так, ПАО «Россети» реализует ряд проектов по внедрению СНЭЭ на электроэнергетические объекты с целью оптимизации режимов работы энергосистемы. Согласно текущему статусу реализации проектов по внедрению систем накопления электроэнергии и вопросам эксплуатации объектов, разработанным исполнительным аппаратом «Россети Центр и Приволжье», в настоящее время на территории электросетевой организации реализуются 42 проекта по использованию систем накопления электрической

энергии. При этом 48% проектов направлено на повышение надёжности электроснабжения потребителей, 38% – на повышение качества поставляемой электроэнергии в сети 0,4 кВ, 5% – на повышение качества поставляемой электроэнергии в сети 6-10 кВ, 7% – на управление спросом; 2% представлены автономными СНЭЭ.

Одним из проектов использования СНЭЭ является применение накопителя ёмкостью 20 кВт·ч типа MRSK2.0/ESS-50.40 для повышения качества электрической энергии в электрической сети 0,4 кВ, находящейся на балансе филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», входящего в общую крупную холдинговую электросетевую компанию ПАО «Россети Центр и Приволжье». Актуальным является анализ практического опыта применения накопителя – в частности, режимов его работы, преимуществ и недостатков применения конкретных технических решений, реализованных в накопителе. Данный анализ позволяет сформулировать рекомендации по совершенствованию СНЭЭ, предназначенных для повышения качества электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ.

**Цель исследования:** анализ практического применения и разработка рекомендаций по выбору, применению и совершенствованию СНЭЭ, устанавливаемых в электрической сети 0,4 кВ для повышения качества электрической энергии.

**Материалы и методы.** Исследуемый накопитель электроэнергии установлен в линии электропередачи 0,4 кВ суммарной протяженностью 4,86 км, запитанной от ТП 10/0,4 кВ Пищ-922-1. К линии подключен 121 потребитель. Максимальная нагрузка линии составляет 79,6 кВт по итогам замеров в часы вечернего максимума в зимний период. Линия электропередачи трёхфазная на всём протяжении, однако потребители в большинстве однофазные. Имеется несимметрия нагрузки, что не было учтено специалистами филиала при выборе типа накопителя, так как накопитель MRSK2.0/ESS-50.40 предназначен для равномерной выдачи электроэнергии при разряде во все три фазы сети. Поопорная схема электрической сети 0,4 кВ с накопителем электроэнергии представлена на рисунке 1.

Сведения о протяженности и типах проводников, используемых в электрической сети 0,4 кВ с системой накопления электрической энергии, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Длина и сечения проводников сельской электрической сети 0,4 кВ с системой накопления электрической энергии

Table 1

Lengths and cross-sections of conductors of the 0.4 kV rural power grid with an electric energy storage system

Участки электрической сети Sections of the power grid	Марка и сечение провода Wire brand and cross-section	Длина, км Length, km
Фидер № 2 / Feeder No. 2		
КТП-1; 1/8-31/1; 15/1-15/7; 15/8-17/2; 17/2-17/7; 15/9-18/7; 15/11-15/19; 8-11/3	СИП-23х35+1х54,6	1,34
1-13; 17-26; 6-1/8; 15/9-15/11; 10-27/7; 13-13/8	4А-35	2,04
26-26/1; 1/3-4/1; 1/4-5/1; 1/6-6/1; 1/6-7/1; 27/7-27/8; 27/6-10/1; 27/1-28/1; 13/8-13/9; 15-14/1; 17-20/1; 18-21/1; 19-22/1; 20-23/1; 21-24/1; 21-25/1	2А-16	0,64
1/1-2/1; 1/2-3/1; 11-12/1; 16-19/1; 27/4-30/1	4А-16	0,16
1/8-1/13	1хА35+3хА25	0,2
15-15/1; 15/7-15/9	4А-25	0,12
1/9-9/1; 1/9-8/1	СИП-42х16	0,08
15/3-16/1	2А-25	0,04
27/3-29/1	СИП-44х16	0,06
13/7-32/1	СИП-23х35+1х54,6	0,06
16-17	СИП-23х50+1х54,6	0,06
15-16	АВБбШв 4х50	0,06
Итого:		4,86

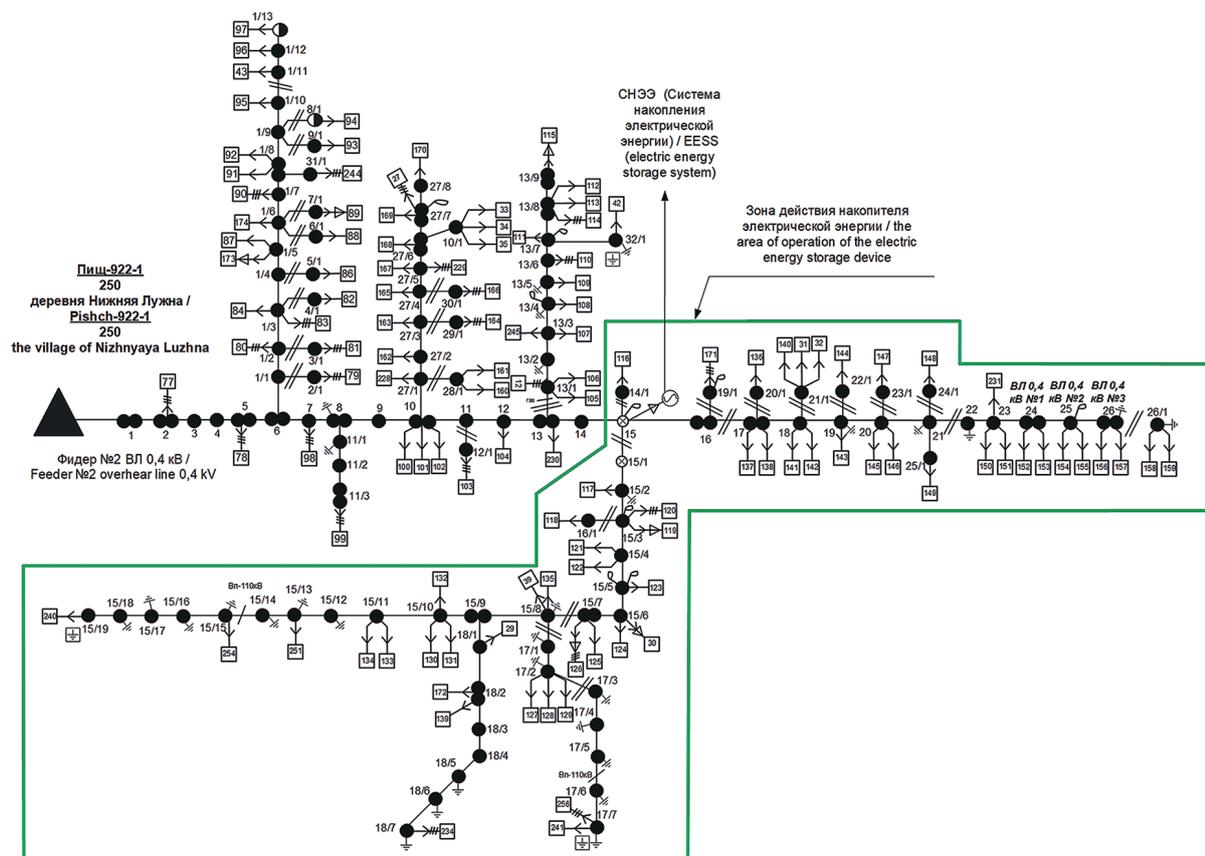


Рис. 1. Поопорная схема электрической сети 0,4 кВ с накопителем электрической энергии

Fig. 1. Supporting scheme of the 0.4 kV power grid with an electric energy storage device

На представленной электрической сети 0,4 кВ с системой накопления электрической энергии 760 м сети из 4,86 км выполнены в однофазном исполнении, а именно:

проводом 2А-16 выполнено 640 м, СИП-42х16-80 м, 2А-25-40 м сети. Однофазными в основном являются отпайки к потребителям.

Для выбора места установки СНЭЭ специалистами филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» были произведены замеры напряжения в разных точках электрической сети 0,4 кВ. Это позволило выявить, что напряжение выходит за пределы допустимого отклонения, установленного ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» уже на опоре № 15. При этом по итогам замеров в конце магистрали электрической сети на опоре № 26 оно снижалось до 189 В. Местом установки накопителя была выбрана опора № 15 с таким расчетом, чтобы он предположительно обеспечивал качество электроэнергии (снижал отклонение напряжения) у потребителей, подключенных к магистрали (опоры № 15-26) и к отпайке (опоры № 15-15/19). В зоне действия накопителя находятся 58 потребителей с максимальной потребляемой нагрузкой 25,5 кВт по итогам замеров вечернего максимума нагрузок. Емкость накопителя электроэнергии, 20 кВт·ч, была выбрана исходя из средней нагрузки потребителей в зоне его действия с учетом КПД преобразователя и естественного старения батарей за срок службы СНЭЭ. Расчет предполагаемого изменения качества электроэнергии при установке СНЭЭ не производился. Специалисты филиала руководствовались следующей логикой выбора накопителя. По замерам на опоре № 15 было выявлено, что нагрузка потребителей, составляющая 8 кВт, вызывает отклонение напряжения более 10% в наиболее удаленных точках сети. При возможности выдачи СНЭЭ 8 кВт·ч в течение утреннего и вечернего максимумов получится избежать выхода напряжения за нижнюю границу допустимого отклонения.

Для обеспечения срока службы СНЭЭ в 20 лет расчетную мощность необходимо разделить на коэффициент 0,7, который позволяет учесть уменьшение емкости при циклах заряда-разряда, то есть  $8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 0,7 = 11,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Также необходимо учесть КПД накопителя, который равен 0,9. Таким образом,  $11,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 0,9 = 12,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Следует также учесть старение батарей накопителя электроэнергии, приводящее к потере емкости. Так, за 10 лет батареи теряют порядка 10% своей емкости. Чтобы через 19-20 лет емкость накопителя составляла не менее 12,7 кВт·ч, необходимо увеличить емкость до значения 15,8 кВт·ч ( $12,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 0,8$ ). Таким образом, расчетная емкость накопителя по электроэнергии составила 15,8 кВт·ч.

Выбран накопитель электроэнергии, предлагаемый заводом-изготовителем, емкость которого составила 20 кВт·ч. В этой логике, безусловно, также имеются недочеты, так как нагрузка сети за 20 лет может существенно измениться как в большую, так и меньшую стороны. Также предположительно может произойти реконструкция сети с её разукрупнением.

Основными конструктивными частями СНЭЭ типа MRSK2.0/ESS-50.40 являются: система литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) с собственной системой контроля и управления, компонентами системы предзаряда и защитно-коммутационными устройствами; инвертор производства немецкой компании REFUstore 50K мощностью 50 кВА; шкаф собственных нужд; блок бесперебойного питания UPS; шкаф телеметрии; роутер и регистратор. Передача данных телесигналов,

телеизмерения и телеуправление осуществляются по протоколу связи МЭК-60870-5-104.

В процессе исследования осуществлялись измерения напряжения в точке установки СНЭЭ, мощность, выдаваемая СНЭЭ в сеть и потребляемая при зарядке, анализировался график работы СНЭЭ, выявлялись недостатки СНЭЭ и разрабатывались рекомендации по их устранению.

**Результаты и обсуждение.** Основными режимами работы накопителя являются: 1) заряд, в процессе которого электрическая энергия из внешней сети переменного тока преобразуется в электроэнергию постоянного тока и поступает в ЛИАБ; 2) разряд, при котором запасенная электроэнергия постоянного тока преобразуется в электроэнергию переменного тока и поступает в сеть; 3) холостой ход.

При местном управлении СНЭЭ можно осуществлять смену режимов в зависимости от текущей ситуации в электрической сети, однако при дистанционном управлении накопитель электроэнергии может работать только по заданному суточному графику, представляющему собой несколько циклов заряда/разряда, время которых задаётся. Накопитель электроэнергии при работе по графику может выдавать мощность в сеть только в то время суток, которое совпадает с циклами разряда, заданными в программе управления СНЭЭ.

Помимо временных уставок заряда/разряда, СНЭЭ имеют уставки по напряжению, исходя из которых, реализуются алгоритмы выдачи электроэнергии в сеть. Выдача запасенной электроэнергии СНЭЭ в сеть реализуется в зависимости от действующего среднего значения напряжения в точке установки СНЭЭ, формируемого инвертором REFUstore50K как среднеарифметическое значение по трем фазам. Так, согласно уставкам первого уровня при понижении напряжения в электрической сети 0,4 кВ в точке установки СНЭЭ до диапазона от 210 до 220 В накопитель электрической энергии реализует отсчет времени, равный 10 с, по истечении которого, в случае нахождения напряжения в диапазоне 210...220 В, выдает в сеть мощность 50% от установленной, то есть 10 кВт независимо от несимметрии нагрузки по фазам. При повышении значения напряжения более 220 В накопитель электроэнергии также начинает 10-секундный отсчет времени, и в случае, если по его истечении напряжение в сети более 220 В, СНЭЭ прекращают выдачу в сеть мощности. Аналогично реализуется алгоритм выдачи в сеть мощности от накопителя по второму уровню уставок напряжения. Только в данном случае пороговым напряжением срабатывания является напряжение ниже 210 В. При этом СНЭЭ выдают 100% мощности.

Уставки суточного графика циклов заряда/разряда предполагают 3 цикла заряда. Изначально специалистами филиала выставлены интервалы без учёта графика нагрузки. Это привело к тому, что накопитель выходил в цикл заряда во время максимумов нагрузки, что приводило к ухудшению ситуации с напряжением в сети. После рекомендаций авторов и замеров графика нагрузки установлены циклы заряда: с 0 до 6; с 10 до 12; с 14 до 18. Интервалы циклов разряда: с 6 до 10; с 12 до 14; с 18 до 0. Таким образом, сделана попытка учесть максимумы нагрузки потребителей.

Опыт эксплуатации накопителя выявил ряд замечаний, вытекающих прежде всего из неверного подбора

типа накопителя. Во-первых, уставки по напряжению в выбранном накопителе выставляются по среднеарифметическому значению напряжения в точках установки накопителя. Это приводит к тому, что при несимметрии напряжений в сети происходит некорректное регулирование напряжения.

Возможны ситуации, когда напряжение в тех фазах, где оно завышено, увеличится ещё больше за счёт выдачи энергии накопителем в сеть, а также ситуации, когда накопитель не будет выдавать мощность, так как не будет достигнуто значение уставки, хотя напряжение на одной или двух фазах будет значительно ниже нормированного, а на третьей – выше. При этом среднеарифметическое значение по трём фазам будет в пределах нормы. Для иллюстрации такой ситуации на рисунке 2 представлен анализ работы СНЭЭ 26.07.2021 г. В этот день встроенная система измерения позволила выявить значительную несимметрию напряжений электрической сети 0,4 кВ (рис. 2а). При этом среднеарифметическое значение напряжения, формируемое инвертором как в циклы разряда, так и в циклы заряда, незначительно и кратковременно понижается ниже первой уставки, заданной в блоке управления СНЭЭ.

Таким образом, выдача мощности накопителем не происходит в необходимых случаях, хотя напряжение на фазах В и С практически всё время выходит за значение уставки (рис. 2а). В то же время распределение нагрузок по фазам не позволяет полностью устранять несимметрию напряжений в связи с разными графиками работы однофазных потребителей и по другим причинам. Также отсутствует контроль напряжения у потребителей, особенно удалённых, и его значение не учитывается в алгоритме управления накопителем. Это касается и всех других типов накопителей, даже имеющих пофазное регулирование.

Второй недостаток – невозможность эффективного управления циклами зарядки/разрядки. Это замечание также относится ко всем типам накопителей. При выходе накопителя в цикл зарядки он не может выдавать мощность в сеть даже при достижении напряжения нижней уставки. Более того, в этом режиме накопитель выступает в роли потребителя электроэнергии, ещё более снижая напряжение в сети. Анализ потребления электроэнергии и степени заряда батареи СНЭЭ за 26.07.2021 г. показывает, что накопитель мог выдавать мощность в сеть на протяжении всего дня исходя из значений напряжений фаз В и С. Однако технические ограничения по циклам заряда/разряда и выдаче мощности на основе среднеарифметического значения напряжения не позволили стабилизировать режим работы сети и повысить качество электроэнергии, то есть выдачи энергии накопителем в сеть не было, наблюдалось только потребление на собственные нужды (рис. 2б). Соответственно уровень заряда накопителя не изменялся (рис. 2в).

Третий недостаток заключается в том, что не проработан вопрос влияния накопителя на аварийные режимы работы сети: например, при возникновении в ней симметричных или несимметричных коротких замыканий, в результате которых на поврежденных фазах напряжение будет равным или близким к нулю и возможна подпитка короткого замыкания (как в случае, например,

наличия в сети электрических машин) [13]. Это связано с тем, что инвертор накопителя формирует среднеарифметическое значение напряжения, которое в аварийном режиме может оказаться ниже значения уставок напряжения, заданных в СНЭЭ. Таким образом, будет выдана мощность в электрическую сеть 0,4 кВ в режиме устойчивого короткого замыкания. Данный режим может возникнуть в связи со значительной протяженностью сельских электрических сетей 0,4 кВ и с малым сечением проводов в них, что в совокупности приводит к малому значению тока однофазного короткого замыкания. Это не позволяет защитному коммутационному аппарату, установленному на трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, своевременно ликвидировать аварийный режим работы электрической сети 0,4 кВ [14].

Заметим, что отсчет времени, реализуемый накопителем электрической энергии перед выдачей мощности в сеть, может превышать время отключения тока однофазного короткого замыкания, в результате чего накопителем может быть также осуществлена подпитка короткого замыкания. Это замечание справедливо как для рассмотренного, так и для других типов накопителей. Решение данной проблемы может заключаться в осуществлении контроля не только значений напряжения, но и тока в точке установки СНЭЭ, что позволит выявить аварийный режим работы электрической сети и реализовать алгоритм отключения накопителя. Альтернативным вариантом решения данной проблемы является установка в электрическую сеть средств сетевого секционирования линий электропередачи, которые позволят своевременно отключать короткие замыкания [15].

Эффективность работы накопителя электрической энергии можно определить по коэффициенту, характеризующему соотношение выданной и запасённой за заданное время электроэнергии. Коэффициент, согласно вложенной в программное обеспечение накопителя методике, определяется как с учетом собственных нужд, так и по выданной в электрическую сеть от него энергии по формулам:

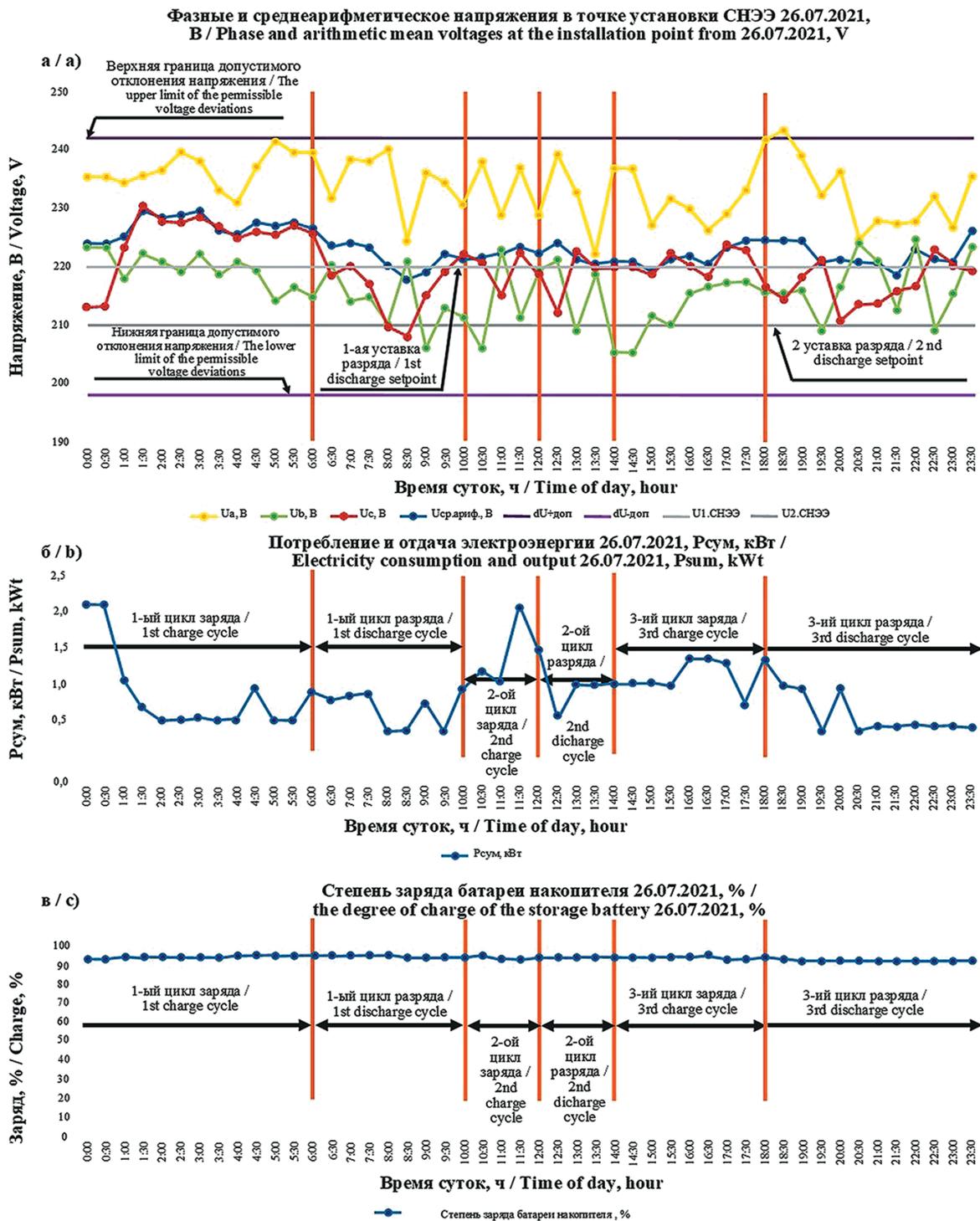
$$k_{\text{НИ}(-)} = W_{\text{отд.}} / W_{\text{потр.}}, \% \quad (1)$$

$$k_{\text{НИ}(+)} = (W_{\text{отд.}} + W_{\text{НИ}}) / W_{\text{потр.}}, \% \quad (2)$$

где  $W_{\text{отд.}}$  – электрическая энергия, отданная накопителем в сеть, кВт·ч;  $W_{\text{потр.}}$  – электрическая энергия, потребленная накопителем из сети, кВт·ч;  $W_{\text{сн}}$  – электрическая энергия, использованная накопителем для собственных нужд, кВт·ч.

С учетом расчетных формул (1) и (2) определены значения КПД накопителя за каждый день его работы. Средние значения коэффициента за июль и август 2021 г. представлены в таблице 2.

Значения коэффициентов  $k_{\text{НИ}(+)}$  и  $k_{\text{НИ}(-)}$  за июль и август показывают, что эффективность использования СНЭЭ является недостаточно высокой. Это связано в первую очередь с особенностями режимов его заряда и разряда, применением уставок по среднеквадратичному значению напряжения. Фактически накопитель не реализовал в полной мере свою функцию по повышению качества электроэнергии, а выступил в роли дополнительного потребителя электроэнергии в сети, где он установлен.



**Рис. 2. Основные параметры работы СНЭЭ 26.07.2021  
Fig. 2. Main parameters of the EESS operation for 26.07.2021**

Таблица 2

Основные показатели работы СНЭЭ в рассматриваемой электрической сети в июле-августе 2021 г.

Table 2

Main indicators of the EESS operation in the considered power grid in July-August 2021

Месяц Month	Показатель Indicator	Потреблено из сети, кВт·ч Consumed from the grid, kWh	Выдано в сеть, кВт·ч Provided to the grid, kWh	Потребление на собственные нужды, кВт·ч Consumption for own needs, kWh	$k_{CH(+)}$ , %	$k_{CH(-)}$ , %
Июль / July	Значение Value	904	393	237	43%	70%
Август / August	Value	604	139	149	23%	48%

На основе анализа применения СНЭЭ в Орелэнерго можно сделать вывод о том, что для корректировки показателей качества электроэнергии накопитель выбран неверно. В целях совершенствования конструкции накопителя и алгоритмов его управления необходимо обеспечить:

- возможность пофазной установки уставок по напряжению на включение и отключение накопителя с учетом напряжения на вводах потребителей;
- пофазное регулирование выдачи и потребления мощности накопителем;
- возможность работы в режиме разряда в любое время суток без ограничений по циклам заряда-разряда. При этом заряд должен осуществляться в то время, когда потребление мощности в сети является минимальным;
- отключение накопителя при возникновении в сети аварийных режимов;
- адаптивную систему регулирования потребляемой мощности, которую должны иметь СНЭЭ в целях предотвращения значительного падения напряжения на линии при зарядке устройства, то есть накопитель электрической энергии должен реализовывать автоматическое регулирование зарядного тока в зависимости от уровня

напряжения в электрической сети 0,4 кВ для ограничения зарядного тока при снижении напряжения в сети.

## Выводы

1. Проведенный анализ работы накопителя электрической энергии емкостью 20 кВт·ч типа MRSK2.0/ESS-50.40, установленного в электрической сети 0,4 кВ, находящейся на балансе филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», позволил сделать вывод о некорректном выборе типа накопителя для достижения повышения качества электрической энергии. Следует выбирать накопители с возможностью пофазной выдачи энергии в сеть или выполнять мероприятия по симметрированию нагрузки.

2. Совершенствование конструкции и алгоритмов управления накопителем электрической энергии, предназначенными для повышения качества электроэнергии, должно заключаться в построении адаптивных систем управления зарядкой/разрядкой накопителей с учётом графика работы потребителей и фазных значений напряжения в разных точках сети, обеспечении отключения накопителя при аварийных ситуациях в сети.

## Библиографический список

1. Al-Shaqsia A.Z., Al-Hinaib K.S.A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*. 2020; 6(7): 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>
2. Amiryar M.E., Pullen K.R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*. 2017; 7(3): 286. <https://doi.org/10.3390/app7030286>
3. Castillo A., Gayme D.F. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. *Energy Conversion and Management*, 2014; 87: 885-894. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.063>
4. Незевак В.Л., Шатохин А.П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. 2018. № 2 (75). С. 84-94.
5. Незевак В.Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (68). С. 159-170.
6. Kiepe Electric liefert ersten 24-Meter-Elektro-Bus nach Linz. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eb-info.eu/aktuell/aus-den-unternehmen/12-10-2017-kiepeelectric-liefert-ersten-24-meter-elektro-bus-nach-linz/559221/> (дата обращения: 17.02.2018).
7. Yap H.T., Schofield N., Bingham C.M. Hybrid energy/power sources for electric vehicle traction systems. *Yap, Power Electronics, Machines and Drives, 2004 (PEMD2004). Second International Conference on (Conf. Publ. № 498. Pp. 61-66)*. <https://doi.org/10.1049/cp:20040260> URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1348892/> (дата обращения: 17.02.2018).
8. Sikandar Abdul Qadir, Hessah Al-Motairi, Furqan Tahir, Luluwah Al-Fagih. Incentives and strategies for financing the renewable energy transition. *Energy Reports*, 2021; 7: 3590-3606. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.041>

## References

1. Al-Shaqsia A.Z., Al-Hinaib K.S.A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*. 2020; 6(7): 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>
2. Amiryar M.E., Pullen K.R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*. 2017; 7(3): 286. <https://doi.org/10.3390/app7030286>
3. Castillo A., Gayme D.F. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. *Energy Conversion and Management*, 2014; 87: 885-894. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.063>
4. Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Kharakteristika tyagovoy nagruzki dlya opredeleniya parametrov nakopiteleya elektricheskoy energii [Features of the traction load for determining the parameters of the electric energy storage device]. *Mir Transporta*, 2018; 2(75): 84-94. (In Rus.)
5. Nezevak V.L. Modelirovanie rezhimov nagruzki na shinakh postov sektionirovaniya pri rabote v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya nakopiteley elektroenergii [Modeling the load modes on the tires of sectioning posts during operation in the traction power supply system of energy storage devices]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2017; 4(68): 159-170. (In Rus.)
6. Kiepe Electric liefert ersten 24-Meter-Elektro-Bus nach Linz. URL: <https://www.eb-info.eu/aktuell/aus-den-unternehmen/12-10-2017-kiepeelectric-liefert-ersten-24-meter-elektro-bus-nach-linz/559221/> (access date: 17.02.2018).
7. Yap H.T., Schofield N., Bingham C.M. Hybrid energy/power sources for electric vehicle traction systems. *Yap, Power Electronics, Machines and Drives, 2004 (PEMD2004). Second International Conference on (Conf. Publ. 498: 61-66)*. <https://doi.org/10.1049/cp:20040260> URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1348892/> (access date: 17.02.2018).
8. Sikandar Abdul Qadir, Hessah Al-Motairi, Furqan Tahir, Luluwah Al-Fagih. Incentives and strategies for financing the renewable energy transition. *Energy Reports*, 2021; 7: 3590-3606. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.041>
9. Al-Shaqsi A.Z., Sopian K., Al-Hinai A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Rep*. 2020; 6 (7): 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>
10. Bersalli G., Menanteau P., El-Methni J. Renewable energy policy effectiveness: A panel data analysis across Europe and Latin

9. Al-Shaqsi A.Z., Sopian K., Al-Hinai A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*, 2020; 6(7): 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>

10. Bersalli G., Menanteau P., El-Methni J. Renewable energy policy effectiveness: A panel data analysis across Europe and Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020; 133: 110351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110351>

11. Сидорович Владимир. Энергетические «острова»: микрогрид для удаленных и изолированных территорий [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/internet-of-energy/https-medium-com-o-p-37a3690e8ff6-37a3690e8ff6> (дата обращения: 26.07.2021).

12. Чудновец С.П., Харитонов С.А. Накопители электрической энергии для систем генерирования электрической энергии (аналитический обзор) // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 1 (50). С. 163-172.

13. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Способ представления асинхронных двигателей при расчете переходных режимов короткого замыкания с целью анализа влияния тока подпитки на динамическую устойчивость // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. № 3 (13). С. 43-45.

14. Сорокин Н.С., Виноградова А.В. Расчет трёхфазных и однофазных коротких замыканий в электрических сетях 0,4 кВ для проверки чувствительности защитных аппаратов // Агротехника и энергообеспечение. 2020. № 4 (29). С. 25-34.

15. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Псарёв А.И., Лансберг А.А., Большев В.Е. Повышение эффективности защиты линий электропередачи 0,4 кВ с отпайками от однофазных коротких замыканий за счёт применения мультиконтактной коммутационной системы МКС-2-3В // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (59). С. 58-63. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-58-63>

#### Критерии авторства

Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.08.2021

Одобрена после рецензирования 22.12.2021

Принята к публикации 22.12.2021

America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020; 133: 110351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110351>

11. Sidorovich V. Energeticheskiye "ostrova": mikrogrid dlya udalennykh i izolirovannykh territoriy [Energy "islands": microgrid for remote and isolated areas]. [Electronic resource] URL: <https://medium.com/internet-of-energy/https-medium-com-o-p-37a3690e8ff6-37a3690e8ff6> (access date: 26.07.2021). (In Rus.)

12. Chudnovets S.P., Kharitonov S.A. Nakopiteli elektricheskoy energii dlya sistem generirovaniya elektricheskoy energii (analiticheskiy obzor) [Electric energy storage devices for electrical energy generation systems (analytical review)]. *Nauchniy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013; 1 (50): 163-172. (In Rus.)

13. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Sposob predstavleniya asinkhronnykh dvigateley pri raschete perekhodnykh rezhimov korotkogo замыкания s tsel'yu analiza vliyaniya toka podpitki na dinamicheskuyu ustoychivost' [A method of representing induction motors when calculating transient short-circuit modes in order to analyze the influence of the feed current on dynamic stability]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya*, 2008; 3 (13): 43-45. (In Rus.)

14. Sorokin N.S., Vinogradova A.V. Raschet trokhfaznykh i odnofaznykh korotkikh замыканий v elektricheskikh setyakh 0,4 kV dlya proverki chuvstvitel'nosti zashchitnykh apparatov [Calculation of three-phase and single-phase short circuits in 0.4 kV electric networks for checking the sensitivity of protective devices]. *Agrrotekhnika i energoobespechenie*, 2020; 4 (29): 25-34. (In Rus.)

15. Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Psarev A.I., Lansberg A.A., Bol'shev V.Ye. Povysheniye effektivnosti zashchity liniy elektroperedachi 0,4 kV s otpaykami ot odnofaznykh korotkikh замыканий za schot primeneniya mul'tikontaktnoy kommutatsionnoy sistemy MKS-2-3V [Increasing the protection efficiency of 0.4 kV power transmission lines with branch lines from single-phase short circuits due to the use of multi-contact switching system MSS-2-3]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2020; 3 (59): 58-63. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-58-63> (In Rus.)

#### Contribution

A.A. Balabin, A.V. Vinogradov, A.A. Lansberg performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. A.A. Balabin, A.V. Vinogradov, A.A. Lansberg have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 10.08.2021

Approved after reviewing 22.12.2021

Accepted for publication 22.12.2021.