

ЭЛЕКТРОЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМОЙ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Е. Ю. Абрамов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: mbv5@mail.ru

Аннотация: рассматривается совместная работа электрозарядной станции для карьерных электросамосвалов с аккумуляторной системой накопления энергии для компенсации пиков нагрузок и провалов потребления, что позволяет улучшить стабильность работы энергосистемы, повысить коэффициент использования электрооборудования и снизить затраты на модернизацию оборудования энергосистемы. Чтобы в полной мере раскрыть эффект компенсации пиковой нагрузки аккумуляторной системы хранения энергии, предлагается стратегия прямого управления зарядом и разрядом аккумуляторного накопителя энергии. С учётом ограниченной емкости аккумулятора и ограниченной мощности сети создана модель для расчета емкости заряда и разряда системы хранения энергии, которая динамически центрируется между самой низкой и самой высокой точками графика мощности нагрузки в течение времени, чтобы реализовать динамическую настройку граничного значения нагрузки для оптимизации распределения электроэнергии в энергосистеме. В соответствии с различными начальными условиями, такими как емкость и мощность системы хранения энергии аккумуляторной системы накопления энергии для зарядной станции карьерных электросамосвалов, осуществляется управление её зарядом и разрядом. Предложенный метод управления зарядной станцией позволяет динамически регулировать границы нагрузки при зарядке и разрядке накопительной аккумуляторной батареи. При этом используются динамические итеративные алгоритмы для различных конфигураций накопителей энергии, тем самым обеспечивается прямое регулирование зарядки и разрядки накопителей энергии.

Ключевые слова: карьерный транспорт, электрозарядная станция, аккумуляторный накопитель энергии, прямое управление мощностью, алгоритм управления зарядом батареи, динамические настройки границ нагрузки, емкость батареи, пиковая нагрузка.

Для цитирования: Абрамов Е. Ю. Электрозарядная станция с аккумуляторной системой накопления энергии для зарядки карьерных самосвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 222–238. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_222.

Electric charging station with accumulator energy storage system for charging dump trucks

E. Yu. Abramov¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,
e-mail: mbv5@mail.ru

Abstract: This paper considers the joint operation of the electric charging station for mining dump trucks with the battery energy storage system to compensate the peak loads and consumption dips, which helps to improve the stability of power system operation, helps to improve the utilization rate of electrical equipment, and reduces the modernization costs of power system equipment. In order to fully realize the peak load compensation effect of the battery energy storage system, a strategy to directly control the charge and discharge of the battery energy storage system is proposed. Considering the limited battery capacity and limited grid power, a model is established to calculate the charge and discharge capacity of the energy storage system, which is dynamically centered between the lowest and highest points of the load power graph over time to realize the dynamic adjustment of the load boundary value to optimize the power distribution in the power system. According to different initial conditions, such as the capacity and power of an energy storage system of a battery energy storage system for a charging station of a quarry electric dump truck, its charging and discharging control is realized. The proposed charging station control method allows dynamic adjustment of load limits during charging and discharging of the energy storage battery system. It utilizes dynamic iterative algorithms for different energy storage configurations, thereby providing direct control of charging and discharging of the energy storage battery. At the same time, the number of charging and discharging of the battery can be effectively limited, which is useful for extending the lifetime of the hybrid charging station. It is contemplated to directly control the charging and discharging power of the hybrid charging station, which is aimed at maximizing the utilization of the energy storage capacity of the battery, and achieving peak load reduction.

Key words: quarry transportation, battery energy storage system, direct power control, dynamic load boundary adjustment, charging and discharging.

For citation: Abramov E. Yu. Electric charging station with accumulator energy storage system for charging dump trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):222–238. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_222.

1. Введение

В условиях быстрого роста количества аккумуляторного электротранспорта для добычи полезных ископаемых в открытых разрезах спрос на электроэнергию для его заряда постепенно увеличивается, а привычное потребление электроэнергии приобретает разнообразные характеристики, что постепенно увеличивает разницу пиковых нагрузок электросети и создает новые проблемы для стабильной работы энергосистемы [1–3]. Для обеспечения бесперебойной работы карьерного электроснабжения зарядных станций электросамосвалов необходимо внедрение эффективных схем снижения пиковых нагрузок [4, 5].

Традиционные меры по снижению пиковых нагрузок в основном бази-

руются на стратегии регулирования со стороны генерации электроэнергии путем изменения мощности системы выработки электроэнергии с учетом изменений суточного потребления электроэнергии [6, 7]. Эти методы в основном включают в себя компенсацию пиков тепловой мощности, снятие пиков турбогенераторных установок и снятие пиков гидроэнергетики [8]. Все это требует более высокой мощности энергетического оборудования, длительных сроков строительства и чрезвычайно высоких затрат, а также сопровождается такими проблемами, как низкий коэффициент использования топливных ресурсов и высокое потребление энергии [9, 10]. Аккумуляторная система накопления энергии в составе зарядной станции

(АСНЭ) может помочь энергосистеме достичь компенсации пиков нагрузок путем её разрядки во время потребления и зарядки накопителя при низком потреблении электроэнергии. Кроме того, внедрение АСНЭ при питании карьерных самосвалов может помочь отсрочить модернизацию мощностей и дополнительно улучшить коэффициент использования оборудования энергосистемы, что имеет важное экономическое значение [11–13].

Целью статьи являются исследования питающих электросетей, участвующих в питании электрозарядных станций карьерного транспорта, связанные с возможностью использования АСНЭ для компенсации пиков нагрузок и провалов потребления.

Чтобы в полной мере использовать эффекты компенсации пиков нагрузок и провалов потребления АСНЭ, предлагается стратегия прямого управления зарядом и разрядом АСНЭ с использованием динамической настройки границ нагрузки в зависимости от емкости АСНЭ.

Предложенный метод принимает ограничения по емкости и мощности аккумулятора в качестве основных условий и создает динамическую итерационную модель расчета емкости зарядки и разрядки, сосредоточенную вокруг моментов времени, соответствующих самой низкой и самой высокой точкам мощности нагрузки, с учетом границ максимального и минимального диапазона изменения ёмкости и мощности аккумулятора, рассчитанных в предыдущей итерации. Этот метод основан на понятии скользящего среднего, которое используется с данными временных рядов для сглаживания моментов колебаний мощности, ёмкости аккумуляторов и выделения основных тенденций или циклов [14]. Это свойство позволяет динамически

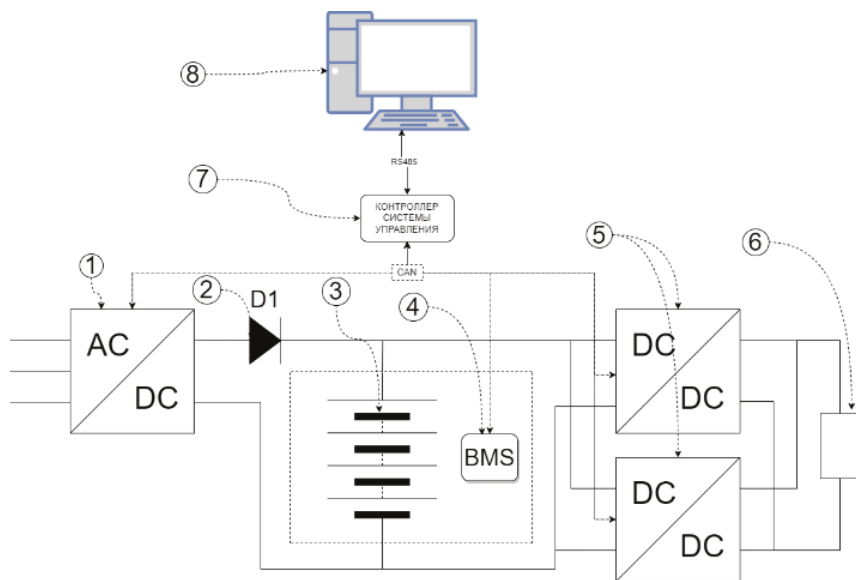
устанавливать граничное значение нагрузки, осуществлять прямой контроль мощности заряда и разряда аккумулятора и оптимально планировать мощность электросети с учетом суточных изменений потребления. Предложенный метод даёт большую точность регулирования интервалов времени для зарядки аккумуляторов в сравнении со среднемесячным усреднением и возможность включать аккумуляторы в наименее загруженный период времени [15, 16].

С учетом начальных условий, таких как емкость и мощность АСНЭ, был проведен теоретический анализ управления режимами заряда и разряда карьерных электросамосвалов, а осуществимость предложенного метода была проверена посредством эксперимента.

2. Методы

Для проведения экспериментов по регулированию мощности между накопителем энергии и зарядной станцией была разработана электрозарядная станция с аккумуляторной системой накопления энергии для зарядки карьерных самосвалов. Структурная схема электрозарядной станции (ЭСЗ) с АСНЭ представлена на рис. 1 и включает в себя следующие основные блоки и элементы:

- 1) AC/DC-преобразователь для подзаряда накопителя энергии;
- 2) защитный диод для защиты AC/DC-преобразователя от обратного тока из батарей;
- 3) модуль батарей;
- 4) BMS для управления модулем батарей;
- 5) DC/DC-преобразователи для заряда батареи карьерного самосвала;
- 6) активная нагрузка для имитации батареи карьерного самосвала;
- 7) система управления зарядной станцией с накопителем энергии



a



б

Рис. 1. Структурная схема ЭСЗ с АСНЭ (а) и действующий макет панели оператора HMI (б)
 Fig. 1. Structural diagram of the ESS with ACNE (a) and working mock-up of the HMI operator panel (b)

(управление производится по каналу связи CAN);

8) персональный компьютер для мониторинга, сбора данных и управления зарядной станцией.

Опытный образец ЭСЗ с АСНЭ и блоком аккумуляторного накопителя энергии представлен на рис. 2.

Показатели оценки способности АСНЭ компенсировать пики нагрузок и провалы потребления. Чтобы эффективно охарактеризовать смягчающее влияние аккумуляторной батареи на локальные и глобальные колебания нагрузки [17], выбраны четыре оценочных показателя, основанные на степени колебаний пиковой нагрузки:

1) отклонение (дисперсия) колебаний нагрузки;

2) абсолютная разница пиковых минимумов;

3) коэффициент разницы пиковых минимумов и пиковой разницы;

4) коэффициент соотношения пика и провала мощности (Peak valley coefficient).

Дисперсия колебаний нагрузки может отражать степень дисперсии нагрузки, и чем меньше ее значение, тем лучше эффективность стратегии управления по компенсации пиков нагрузок и провалов потребления.

Отклонение колебаний нагрузки

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (P_{load}(t) - P_{bat}(t) - P_{load,avg})^2}{T}}, \quad (1)$$

где $P_{load}(t)$ — мощность сети от времени, $P_{bat}(t)$ — мощность батарей от времени, $P_{load,avg}$ — усреднённая мощность сети после внедрения АСНЭ, T — расчётный период времени.

$$P_{load,avg} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{load}(t) - P_{bat}(t))}{T}. \quad (2)$$

Абсолютная разница между пиками и провалами

$$\Delta P_{load} = P_{load,max} - P_{load,min}, \quad (3)$$

где $P_{load,max}$ — максимальные значения нагрузки, а $P_{load,min}$ — минимальные значения нагрузки.

Коэффициент соотношения пика и провала мощности

$$\alpha = \frac{\Delta P_{load,avg}}{P_{load,max}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Величина разницы пиковых провалов может отражать величину раз-



Рис. 2. Внешний вид ЭСЗ с АСНЭ: 1 — блок аккумуляторных батарей (накопитель), 2 — электростанция для карьерных самосвалов в сборе

Fig. 2. External view of the ESS with ASNE: 1 — battery pack (storage), 2 — electric charging station for mining dump trucks assembled

ницы провалов пиковой нагрузки. Чем больше значение α , тем больше разница между пиками и провалами:

$$\beta = \frac{P_{load,min}}{P_{load,max}}. \quad (5)$$

АСНЭ, участвующая в компенсации пиков нагрузок и провалов потребления в энергосистеме, должна учитывать собственные ограничения по мощности [18].

Существуют предельное значение мощности заряда/разряда аккумулятора, которое в каждый момент времени не может превышать предельное значение [19]. При практическом использовании, если аккумуля-

мулятор всегда находится в режиме максимального заряда/разряда, срок его службы будет снижаться относительно быстро, поэтому необходимо ограничивать мощность заряда/разряда аккумулятора.

$$k_c \cdot P_{bat-c,max} \leq P_{bat} \leq k_d \cdot P_{bat-d,max}, \quad (6)$$

где $P_{bat-c,max}$ — максимальная зарядная мощность аккумулятора, которая при заряде аккумулятора принимает отрицательное значение; $P_{bat-d,max}$ — максимальная мощность разряда аккумулятора, которая принимает положительное значение при разряженном аккумуляторе; k_c — коэффициент заряда, k_d — коэффициент разряда.

Ограничение мощности аккумулятора. Учитывая ограниченный срок службы батареи накопителя карьерного самосвала, необходимо избегать работы в полностью разряженном состоянии, а также не допускать его перезаряда [20]. Поэтому необходимо учитывать ограничение емкости батареи при зарядке и разрядке [21]. Таким образом, состояние заряда накопителя батареи (SOC) должен удовлетворять соотношению

$$SoC_{min} \leq SoC_t \leq SoC_{max}, \quad (7)$$

где SoC_{max} — нижнее предельное значение; SoC_{min} — верхнее предельное значение; SoC_t — состояние заряда батареи в момент времени t .

3. Прямой контроль мощности заряда/разряда АСНЭ с помощью динамического регулирования границы нагрузки

Чтобы в полной мере использовать эффекты компенсации пиков нагрузок и провалов потребления аккумуляторных систем хранения энергии, предложена стратегия прямого управления мощностью заряда/разряда

АСНЭ с использованием динамической настройки границ нагрузки. Стратегия начальной настройки параметров заключается в следующем.

Как представлено на рис. 3, на основе прогнозируемой характеристической кривой нагрузки P_{load} можно определить максимальную нагрузку P_{max} и минимальную нагрузку P_{min} , а начальную верхнюю границу нагрузки P_{H-init} и начальную нижнюю границу нагрузки P_{L-init} можно определить как

$$\begin{cases} P_{H-init} = P_{max} - P_d \\ P_{L-init} = P_{min} + P_c \end{cases}, \quad (8)$$

где, P_d и P_c — номинальная мощность разряда и заряда аккумулятора, соответственно.

Кроме того, площадь ниже P_{L-init} , ограниченная P_{load} , определяется как начальная зарядная емкость E_{c-init} , а область выше P_{H-init} , ограниченная P_{load} , определяется как начальная разрядная емкость E_{d-init} ; E_{c-init} и E_{d-init} могут быть выражены как

$$\begin{cases} E_{c-init} = \int (P_{L-init} - P_{load}(t)) dt \\ E_{d-init} = \int (P_{load}(t) - P_{H-init}) dt \end{cases}. \quad (9)$$

С помощью описанного выше итерационного процесса можно определить время и мощность заряда и разряда. Когда мощность АСНЭ мала, участки пиков и провалов могут быть компенсированы. При большой мощности АСНЭ, используя максимальную мощность и мощность зарядки и разрядки АСНЭ, можно улучшить эффективность компенсации пиков нагрузок и провалов потребления.

Типичный режим работы АСНЭ по компенсации мощности потребления нагрузкой представлен на рис. 4, когда $E_c > E_{c,max}$ и $E_d > E_{d,max}$. Чтобы определить верхнюю границу нагрузки

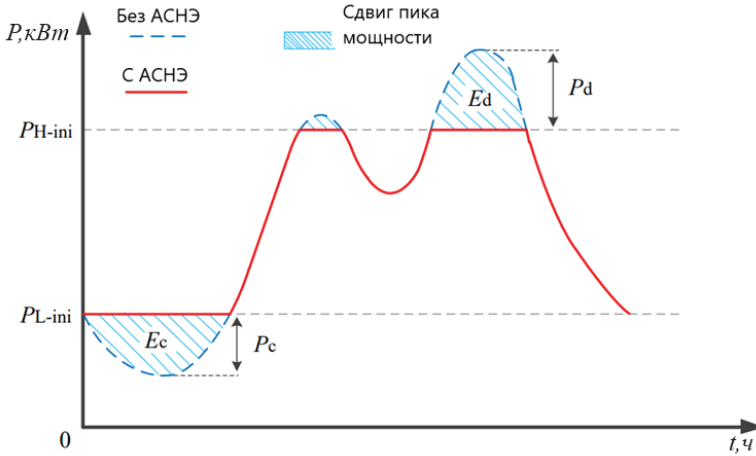


Рис. 3. Исходная временная диаграмма мощности нагрузки
 Fig. 3. Initial load power time diagram

P_H , необходимо выполнить итерацию вверх, для определения нижней границы нагрузки P_L необходимо выполнить итерацию вниз. Этот рабочий режим подходит для сценариев с небольшой мощностью АСНЭ, где кривая нагрузки ста $E_c > E_{c\max}$ бильна в точках пика и спада.

Стратегия управления зарядом состоит в следующем. Когда первоначальная зарядная емкость E_{c-ini} превышает максимальную перезаряжаемую емкость $E_{c\max}$ батареи, то ограничение емкости не может быть соблюдено; при E_{c-ini} меньше, чем $E_{c\max}$, емкость аккумулятора не может быть использована полностью.

$E_{c\max}$ может быть выражено как

$$E_{c\max} = E_{\max} - E_0, \quad (10)$$

где E_{\max} — максимальная емкость аккумулятора, а E_0 — начальная емкость аккумулятора.

Для $E_{c-ini} > E_{c\max}$, чтобы уменьшить зарядную емкость E_c , нижнее граничное значение нагрузки P_L уменьшается. Итерационный процесс выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} P_L = P_{L-init} - k\delta P \\ k = k + 1 \end{cases}, \quad (11)$$

где δP представляет размер шага каждой итерации. Используя рис. 4, определим обновленное значение E_c согласно уравнениям (9) и (11) и сравним его с $E_{c\max}$. Если $E_c > E_{c\max}$ на данный момент, продолжаем итерацию до тех пор, пока не будет выполняться условие $E_c < E_{c\max}$. Определим количество итераций при $k = k_n$, для того чтобы определить динамически регулируемое нижнее граничное значение нагрузки P_L . Частичный заряд батареи при $P_{load}(t) < P_L$ будет

$$P_{bat}(t) = P_{load}(t) - P_L. \quad (12)$$

При $E_{c-ini} < E_{c\max}$ для облегчения расчета перезаряжаемой емкости аккумулятора используется кривая нагрузки. $P_{load}(t)$ смещается вверх на амплитуду P_c и вспомогательная кривая $P_{net-c}(t)$ строится, как показано на рис. 5. А именно:

$$P_{net-c}(t) = P_{load}(t) + P_c \quad (13)$$

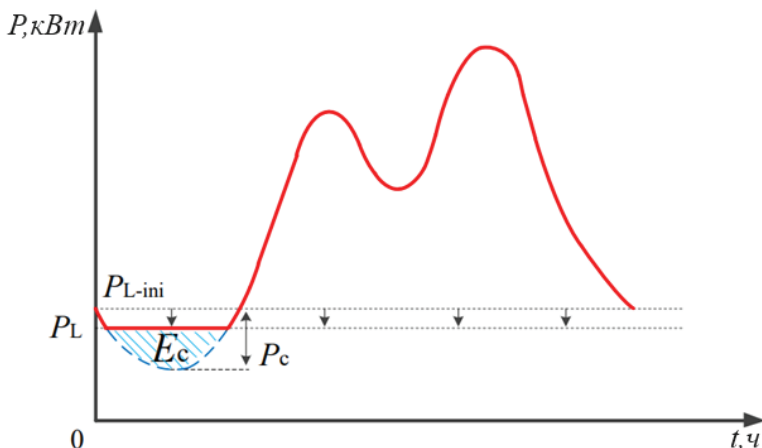


Рис. 4. Итерационная диаграмма при $E_{c-init} > E_{c-max}$
 Fig. 4. Iteration diagram at $E_{c-init} > E_{c-max}$

При этом P_{min} определяется как $P_{load}(k_1)$, что означает, что время выборки, соответствующее P_{min} , есть k_1 . Определим начальное время разделения мощности как $k_{c1} - k_{c2} = k_1$. Тогда k_{c1} и k_{c2} будут участвовать в итерациях слева и справа соответственно в зависимости от размера зарядной емкости, тем самым разделяя область зарядки на три области, как показано на рис. 5, а именно:

– область I: Когда $t \in [0, k_{c1}]$, одновременно удовлетворяя

$$P_{load}(t) < P_{net-c}(k_{c1})$$

$$\text{и } P_{net-c}(t) > P_{net-c}(k_{c1});$$

– область II: Когда $t \in (k_{c1}, k_{c2})$

$$\text{и } P_{net-c}(t) \leq P_{net-c}(k_{c2});$$

– область III: $t \in [k_{c2}, T]$, удовлетворяя $P_{load}(t) < P_{net-c}(k_{c2})$

$$\text{и } P_{net-c}(t) > P_{net-c}(k_{c2}).$$

Зарядные мощности в трех вышеуказанных областях составляют E_{c1} ,

E_{c2} и E_{c3} соответственно, и их можно рассчитать как

$$\begin{cases} E_{c1} = \int_0^{k_{c1}} (P_{load}(k_{c1}) - P_{load}(t)) dt \\ E_{c2} = \int_{k_{c1}}^{k_{c2}} P_c dt \\ E_{c3} = \int_{k_{c2}}^T (P_{load}(k_{c2}) - P_{load}(t)) dt \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом, общая зарядная емкость будет равна

$$E_c = E_{c1} + E_{c2} + E_{c3}. \quad (15)$$

Увеличивая E_c , можно полностью использовать максимальную загрузку мощности, при этом необходимо итерировать точки разделения мощности k_{c1} и k_{c2} влево и вправо соответственно. Итерационный процесс выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} k_{c1} = k_1 - k \\ k = k + 1 \\ P_{load}(k_{c2}) = P_{load}(k_{c1}) \end{cases} \quad (16)$$

Когда $E_c < E_{c-max}$, продолжаем повторять итерации, при $E_c > E_{c-max}$

Построим вспомогательную кривую зарядки $P_{net-d}(t)$, как показано на рис. 5. P_{net-d} может быть выражено как

$$P_{net-d}(t) = P_{load}(t) - P_d \quad (22)$$

При этом P_{max} определяется как $P_{load}(k_2)$, что означает, что время выборки, соответствующее P_{max} , является k_2 . Определим начальное время разделения мощности как $k_{d1} = k_{d2} = k_2$. Среди них k_{d1} и k_{d2} будут выполнять итерацию влево и вправо в зависимости от размера зарядной емкости, тем самым разделяя область зарядки на три области, как показано на рис. 7, а именно:

– область IV: когда $t \in [0, k_{d1}]$ и удовлетворяет $P_{load}(t) > P_{net-d}(k_{d1})$ и $P_{net-d}(t) < P_{net-d}(k_{d1})$;

– область V: когда $P_{net-d}(t) \geq P_{net-d}(k_{e2})$;

– область VI: когда $t \in [k_{d2}, T]$ и удовлетворяет обоим условиям: $P_{load}(t) > P_{net-d}(k_{d2})$ и $P_{net-d}(t) < P_{net-d}(k_{d2})$.

Разрядная способность батареи в трех вышеуказанных областях состав-

ляет E_{d1} , E_{d2} и E_{d3} соответственно,

которые можно рассчитать как

$$\begin{cases} E_{d1} = \int_0^{k_{d1}} (P_{load}(t) - P_{load}(k_{d1})) dt \\ E_{d2} = \int_{k_{d1}}^{k_{d2}} P_d dt \\ E_{d3} = \int_{k_{d2}}^T (P_{load}(t) - P_{load}(k_{d2})) dt \end{cases} \quad (23)$$

Полная энергия разряда

$$E_d = E_{d1} + E_{d2} + E_{d3} \quad (24)$$

При увеличении E_d , чтобы полностью использовать максимальную загрузку мощности, необходимо итерировать точки разделения мощности k_{d1} и k_{d2} влево и вправо соответственно,

чтобы динамически регулировать верхнее граничное значение нагрузки P_H . Итерационный процесс:

$$\begin{cases} k_{d1} = k_2 - k \\ k = k + 1 \\ P_{load}(k_{d2}) = P_{load}(k_{d1}) \end{cases} \quad (25)$$

Если $E_d < E_{dmax}$ на данный момент все еще выполняется, продолжаем итерацию до тех пор, пока $E_d > E_{dmax}$ останавливается. Путем определения точек разделения мощности k_{d1} и k_{d2} в это время динамически регулируемое верхнее граничное значение нагрузки P_H можно получить как

$$P_H = \begin{cases} P_{load}(k_{d1}) - P_d \\ P_{load}(t) - P_d \end{cases} \quad (26)$$

Таким образом, мощность зарядки может быть выражена следующим образом:

$$P_{bat}(t) = P_{load}(t) - P_H \quad (27)$$

4. Результаты

С помощью описанного выше итерационного процесса можно определить время и мощность зарядки и разрядки. Когда мощность АСНЭ мала, пиковые и впадинные части могут быть «заполнены». Когда мощность АСНЭ велика, пики и впадины преобразуются в «круговое кольцо», в (k_{e1}, k_{e2}) и (k_{d1}, k_{d2}) интервалы и «заполнены» в остальных частях. Полностью используя максимальную мощность и мощность зарядки и разрядки АСНЭ, можно улучшить эффективность сглаживания пиков и заполнения впадин.

Для программирования автоматической системы управления АСНЭ был синтезирован алгоритм, представленный на рис. 8. В приведенном алгоритме существует два итерационных

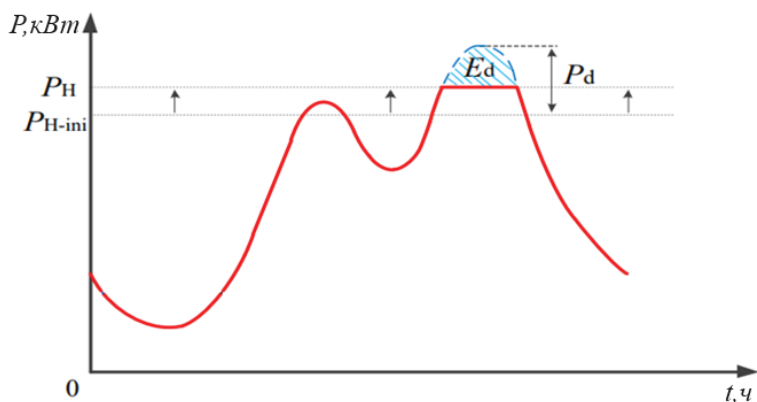


Рис. 6. Итерационная диаграмма при $E_{d-ini} > E_{d-max}$
 Fig. 6. Iteration diagram at $E_{d-ini} > E_{d-max}$

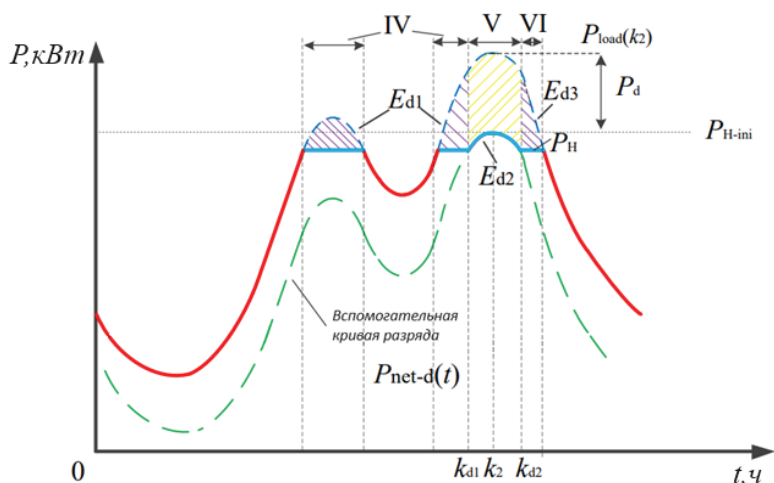


Рис. 7. Итерационная диаграмма выбора зарядной емкости аккумуляторной батареи
 Fig. 7. Iterative diagram for selecting the charging capacity of a battery pack

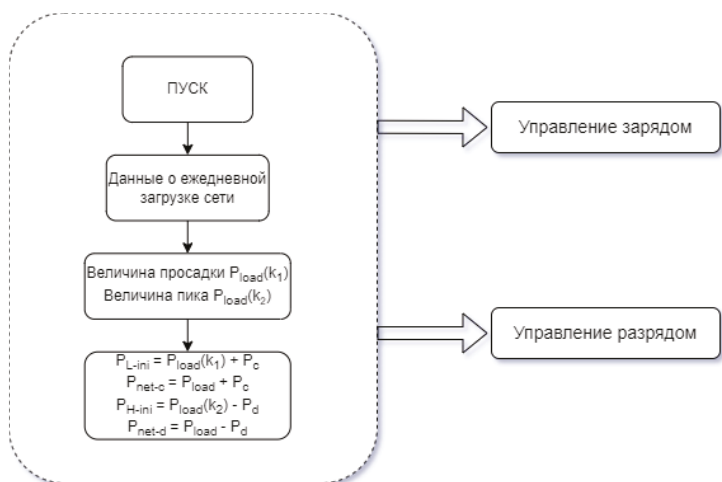
метода динамической регулировки граничного значения нагрузки зарядки и разрядки на этапе зарядки и разрядки, основанных на соотношении между начальным значением нагрузки и разрядки и максимальной емкости зарядки и разрядки батареи.

5. Обсуждение результатов

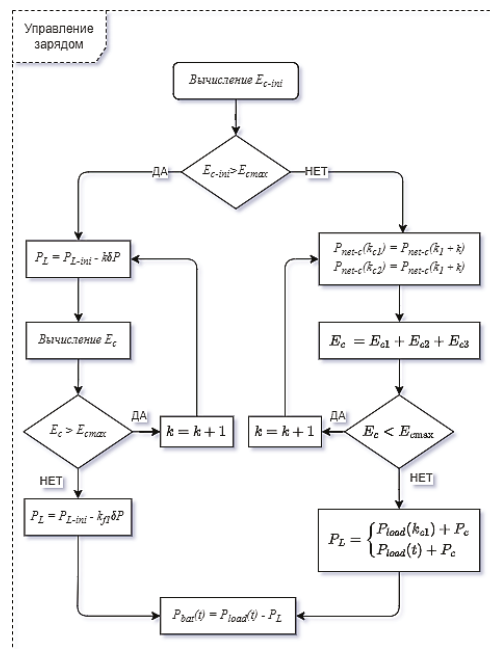
Экспериментальное исследование и сравнение с моделью управления АСНЭ. Сравнительный анализ полученной модели и экспериментальных

исследований проведен на примере суточной кривой нагрузки потребления зарядной станцией НГТУ для заряда электромобиля для суточного интервала времени (рис. 9). При этом максимальное, минимальное и среднее значения нагрузки составляют 52,14 кВт, 41,58 кВт и 46,86 кВт соответственно.

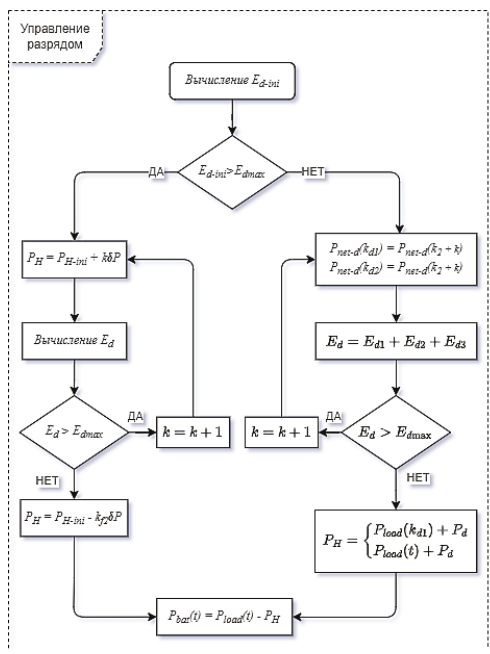
На рис. 10 представлена форма сигнала моделирования режимов управления зарядкой и разрядкой аккумулятора. Обе динамически регулируемые граничные линии нагрузки — верхняя



а



б



в

Рис. 8. Алгоритм заряда-разряда для программирования автоматической системы управления АСНЭ: а – общий алгоритм, б – алгоритм управления зарядом, в – алгоритм управления разрядом
 Fig. 8. Charge-discharge algorithm for programming the ASNE automatic control system: а – common algorithm, б – charge control algorithm, в – discharge control algorithm

и нижняя — являются горизонтальными линиями. Основная форма сигнала, показанная на рис. 9, соответствует рис.

10. В таблице представлены характеристики показателей оценки компенсации пиков нагрузок и провалов потребе-

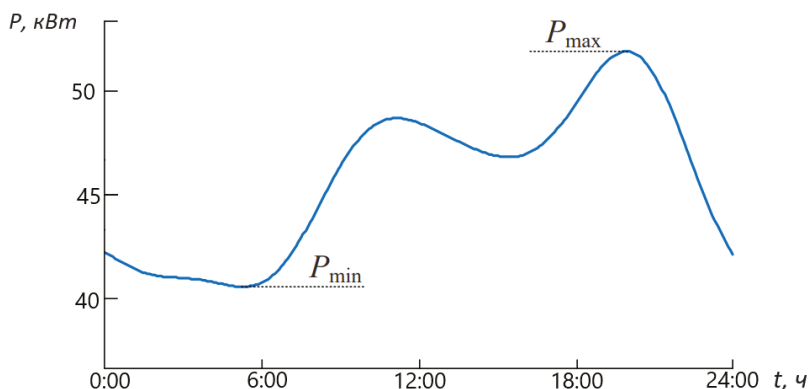


Рис. 9. Экспериментальный график потребления мощности зарядной станцией
 Fig. 9. Experimental graph of power consumption by the charging station

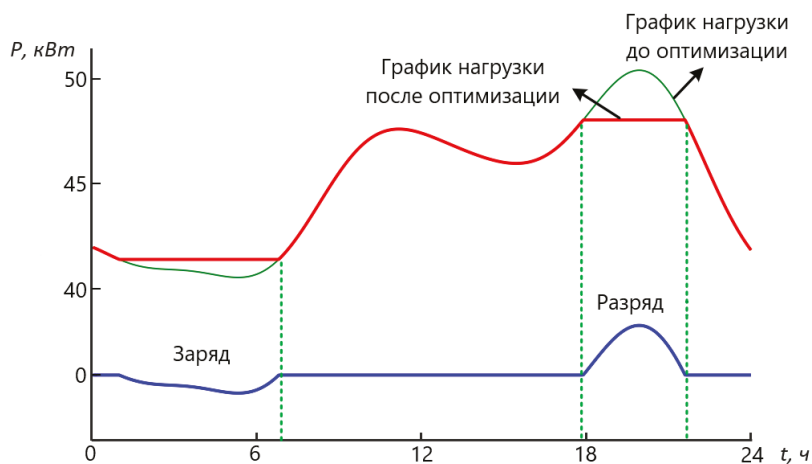


Рис. 10. Результаты моделирования режимов зарядки/разрядки
 Fig. 10. Simulation results of charging/discharging modes

ния в сравнении с традиционным методом постоянной мощности. Оба метода имеют определенные функции для компенсации пиков нагрузок и провалов потребления. Однако по сравнению с четырьмя индикаторами отклонения, разностью пиковых впадин, коэффициентом разности пиковых впадин и коэффициентом пиковой впадины в режиме заряда и разряда предлагаемая стратегия прямого управления превосходит традиционный метод постоянной мощности, обладая, таким образом, лучшими пиковыми показателями возможности ком-

пенсации пиков нагрузок и провалов потребления.

6. Заключение

В работе предложена стратегия прямого управления зарядкой и разрядкой зарядной станции с АСНЭ с использованием динамической настройки границ нагрузки для сглаживания пиков и заполнения впадин нагрузок электросети. Результаты теоретического и численного анализа показывают, что данный метод имеет следующие характеристики:

Сравнение оценочных показателей до и после оптимизации
Comparison of estimated indicators before and after optimization

Оценочные показатели	До оптимизации	Контроль мощности (счетчик электроэнергии)	Предлагаемый метод
D	50.7866	43.5259	42.8439
ΔP_{load}	159.1481	140.2782	107.1481
α	0.6798	0.6376	0.5467
β	0.3202	0.3624	0.4533

Предложенный метод управления зарядной станцией позволяет динамически регулировать границы нагрузки при зарядке и разрядке накопительной аккумуляторной батареи. При этом используются динамические итеративные алгоритмы для различных конфигураций накопителей энергии, тем самым обеспечивая прямое регулирование зарядки и разрядки накопителей энергии. В то

же время можно эффективно ограничивать количество зарядок и разрядок аккумулятора, что полезно для продления срока службы гибридной зарядной станции. Предполагается прямой контроль мощности зарядки и разрядки гибридной зарядной станции, что направлено на максимальное использование емкости хранения энергии батареей, а также снижение пиковой нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindgren L., Grauers A., Ranggård J., Mäki R. Drive-Cycle Simulations of Battery Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads // *Energies*. 2022, vol. 15, no. 4871, pp. 1–19. DOI: 10.3390/en15134871.
2. Lingyu M., Guofa W., Khay W. Large-Scale Li-Ion Battery Research and Application in Mining Industry // *Energies*. 2022, vol. 15(11), pp. 1–31. DOI: 10.3390/en15113884.
3. Schatz R. S., Nieto A., Lvov S. N. Long-term economic sensitivity analysis of light duty underground mining vehicles by power source // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, iss. 3, pp. 567–571. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.03.016.
4. Szurlej T., Ostapów L., Mendyka P. Functional structure of battery drive for selfpropelled mining rig used in room-pillar ore exploitation system // *New Trends in Production Engineering*. 2019, vol. 2, iss. 1, pp. 112–120. DOI: 10.2478/ntpe-2019-0012.
5. Välisalo T. Firefighting in case of Li-Ion battery fire in underground conditions: Literature study // VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-00066-19.
6. Shishkin P. V., Efremkov E. A., Qi M. Development of a Mathematical Model of Operation Reliability of Mine Hoisting Plants // *Mathematics*. 2024, vol. 12, 1843. DOI: 10.3390/math12121843.
7. Tu A. N., Copp D. A., Byrne R. H., Chalamala B. R. Market Evaluation of Energy Storage Systems Incorporating Technology Specific Nonlinear Models // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019, vol. 34(5).
8. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.
9. Filina O., Yashagina A., Salnikova O. Determination of the characteristic points of approximation for traction electric machines of electric rolling stock // *Proceedings 2021*

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021, pp. 791–796.

10. Mohamed A. R., Best R. J., Liu X. A Comprehensive Robust Techno-Economic Analysis and Sizing Tool for the Small-Scale PV and АСНЭ[J] // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2022, vol. 37(1), pp. 560–572.

11. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption // Energies. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

12. Sigrist L., Lobato E., Rouco L. Energy storage systems providing primary reserve and peak shaving in small isolated power systems: An economic & Energy Systems, assessment // International Journal of Electrical Power. 2013, vol. 53(1), pp. 675–683.

13. Zhang S., Mishra Y., Ledwich G. The operating schedule for battery energy storage companies in electricity market // Journal of Modern Power Systems & Clean Energy. 2013, vol. 1(3), pp. 275–284.

14. Cao B., Zhang Y., Shi Y., Ren R., Wu H., Zhang W., Wang D., Zhang T., Xiong J. Extracellular organic matter (EOM) distribution characteristic in algae electro-dewatering process // Journal of Environmental Management. 2020, vol. 265, p. 9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110541.

15. Герике П. Б., Герике Б. Л. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 2. — С. 17–22. DOI: 10.26730/1816–4528–2021217–22.

16. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haultrucks // Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. 2013, pp. 1–5.

17. Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Designing the Optimal Configuration of a Small Power System for Autonomous Power Supply of Weather Station Equipment // Energies. 2023, vol. 16, 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

18. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification // Hitachi Review. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99–106.

19. Konyukhov V. Y., Oparina T. A., Zagorodnii N. A., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses // Mathematics. 2023, vol. 11, 3260. DOI: 10.3390/math11153260.

20. Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport // Mathematics. 2023, vol. 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

21. Sorokova S. N., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles // Mathematics. 2023, vol. 11, 536. DOI: 10.3390/math11030536. **PLoS**

REFERENCES

1. Lindgren L., Grauers A., Ranggård J., Mäki R. Drive-Cycle Simulations of Battery Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 4871, pp. 1–19. DOI: 10.3390/en15134871.

2. Lingyu M., Guofa W., Khay W. Large-Scale Li-Ion Battery Research and Application in Mining Industry. *Energies*. 2022, vol. 15(11), pp. 1–31. DOI: 10.3390/en15113884.

3. Schatz R. S., Nieto A., Lvov S. N. Long-term economic sensitivity analysis of light duty underground mining vehicles by power source. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, iss. 3, pp. 567–571. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.03.016.

4. Szurlej T., Ostapów L., Mendyka P. Functional structure of battery drive for selfpropelled mining rig used in room-pillar ore exploitation system. *New Trends in Production Engineering*. 2019, vol. 2, iss. 1, pp. 112–120. DOI: 10.2478/ntpe-2019-0012.

5. Väiläsalo T. Firefighting in case of Li-Ion battery fire in underground conditions: Literature study. *VTT Technical Research Centre of Finland*. VTT Research Report No. VTT-R-00066-19.

6. Shishkin P. V., Efremkov E. A., Qi M. Development of a Mathematical Model of Operation Reliability of Mine Hoisting Plants. *Mathematics*. 2024, vol. 12, 1843. DOI: 10.3390/math12121843.

7. Tu A. N., Copp D. A., Byrne R. H., Chalamala B. R. Market Evaluation of Energy Storage Systems Incorporating Technology Specific Nonlinear Models. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019, vol. 34(5).

8. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

9. Filina O., Yashagina A., Salnikova O. Determination of the characteristic points of approximation for traction electric machines of electric rolling. *Proceedings 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*. 2021, pp. 791–796.

10. Mohamed A. R., Best R. J., Liu X. A Comprehensive Robust Techno-Economic Analysis and Sizing Tool for the Small-Scale PV and ACH₂[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022, vol. 37(1), pp. 560–572.

11. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

12. Sigrist L., Lobato E., Rouco L. Energy storage systems providing primary reserve and peak shaving in small isolated power systems: An economic & Energy Systems, assessment. *International Journal of Electrical Power*. 2013, vol. 53(1), pp. 675–683.

13. Zhang S., Mishra Y., Ledwich G. The operating schedule for battery energy storage companies in electricity market. *Journal of Modern Power Systems & Clean Energy*. 2013, vol. 1(3), pp. 275–284.

14. Cao B., Zhang Y., Shi Y., Ren R., Wu H., Zhang W., Wang D., Zhang T., Xiong J. Extracellular organic matter (EOM) distribution characteristic in algae electro-dewatering process. *Journal of Environmental Management*. 2020, vol. 265, p. 9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110541.

15. Gericke P. B., Gericke B. L. Formation of a single diagnostic criterion for evaluation of the technical condition of mining equipment. *Mining equipment and electromechanics*. 2021, no. 2, pp. 17–22. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-217-22.

16. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haultrucks. *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE*. 2013, pp. 1–5.

17. Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Designing the Optimal Configuration of a Small Power System for Autonomous Power Supply of Weather Station Equipment. *Energies*. 2023, vol. 16, 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

18. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification. *Hitachi Review*. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99–106.

19. Konyukhov V. Y., Oparina T. A., Zagorodnii N. A., Efremkov E. A., Qi M. Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses. *Mathematics*. 2023, vol. 11, 3260. DOI: 10.3390/math11153260.

20. Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics*. 2023, vol. 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

21. Sorokova S. N., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, 536. DOI: 10.3390/math11030536.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Абрамов Евгений Юрьевич — ассистент, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5013-3288.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Abramov E. Yu., assistant, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20. e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5013-3288.

Получена редакцией 01.07.2024; получена после рецензии 04.09.2024; принята к печати 10.10.2024.
Received by the editors 01.07.2024; received after the review 04.09.2024; accepted for printing 10.10.2024.

