
2.4. ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.2)

УДК 620.98

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-11-19

Оценка параметров накопителей электроэнергии для тяговых подстанций

Д.А. Котин, А.Г. Русина, Е.А. Домахин, Н.С. Попов, Н.Г. Кирьянова, П.В. Матренин

Обоснована актуальность применения накопителя электрической энергии в системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта для выравнивания графика нагрузки тяговой подстанции на примере Западно-Сибирской железной дороги. Проанализирован график нагрузки тяговой подстанции с интервалом измерения значения потребляемой мощности в 30 мин. Проведена оценка величины энергопотребления тяговой подстанции вероятностным методом. На основе проведенного анализа выбраны установленная мощность накопителя электрической энергии для выполнения часового регулирования нагрузки, величина средней потребляемой мощности тяговой подстанции, относительно которой будет выполняться выравнивание графика нагрузки. В прикладных пакетах программ для статистической обработки данных осуществлена проверка гипотезы о нормальном распределении величины нагрузки тяговой подстанции. Установлен типовой закон распределения случайной величины, с наибольшей достоверностью отражающий характер распределения экспериментальных данных. На основе установленных мощности накопителя энергии и средней мощности потребления тяговой подстанции проведена вероятностная оценка обменной энергоемкости накопителя энергии. Предложена методика выбора оценочной величины обменной энергоемкости накопителя.

Ключевые слова: накопитель энергии, тяговые системы электроснабжения, вероятностные методы анализа, анализ и регулирование графика нагрузки, выбор энергоемкости накопителя.

Для цитирования: Котин Д.А., Русина А.Г., Домахин Е.А., Попов Н.С., Кирьянова Н.Г., Матренин П.В. Оценка параметров накопителей электроэнергии для тяговых подстанций // Вестник МЭИ. 2022. № 5. С. 11—19. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-11-19.

Estimating the Parameters of Electric Energy Storages for Traction Substations

D.A. Kotin, A.G. Rusina, E.A. Domakhin, N.S. Popov, N.G. Kiryanova, P.V. Matrenin

The article substantiates the relevance of using an electric energy storage in railway transport traction power supply systems for smoothing the traction substation load schedule taking the West Siberian railway as an example. The traction substation load schedule is analyzed with the consumed power values 30-min measurement intervals. The traction substation power consumption is estimated by a probabilistic method. The obtained analysis results were used to select the installed capacity of an electric energy storage for performing hourly load regulation and determine the traction substation average consumed power relative to which the load schedule will be smoothed. The hypothesis of the normal distribution of the traction substation load value is tested using application software packages for statistical

data processing. The random variable typical distribution law most confidently reflecting the experimental data distribution pattern is determined. The energy storage's selected power capacity and the traction substation average power consumption are used to perform a probabilistic assessment of the storage device exchange energy capacity. A procedure for selecting the storage device tentative exchange energy capacity is proposed.

Key words: energy storage, traction power supply systems, probabilistic analysis methods, load schedule analysis, load schedule regulation, energy storage capacity selection.

For citation: Kotin D.A., Rusina A.G., Domakhin E.A., Popov N.S., Kir'yanova N.G., Matrenin P.V. Estimating the Parameters of Electric Energy Storages for Traction Substations. Bulletin of MPEI. 2022;5:11—19. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-11-19.

Введение

Развитие инфраструктуры крупных городов ведет к появлению новых потребителей энергии, что увеличивает нагрузку на систему энергоснабжения. Повышение удельного веса железнодорожного электропотребления в значительной мере повышает неравномерность суточных графиков нагрузок энергосистемы, поэтому встает вопрос актуальности выравнивания графиков нагрузок [1, 2]. Электрическая энергия — самый потребляемый из всех видов энергии, следовательно, все большую значимость приобретают вопросы энергоэффективности и энергосбережения.

Потребителей электроэнергии, в зависимости от объемов, квалифицируют на [3]:

- потребителей с максимальной мощностью более 670 кВт (потребители ≥ 670 кВт);
- потребителей с максимальной мощностью менее 670 кВт (потребители < 670 кВт).

Режим электропотребления характеризуется графиками нагрузки энергосистемы, описываемыми рядом показателей:

- коэффициентом нагрузки (заполнения суточного графика), определяемым как отношение среднесуточной нагрузки к максимальной (пиковой);
- годовым (суточным, месячным) числом часов использования максимума нагрузки (максимальной мощности) потребителя (отношение величины электропотребления за определенный период к максимальной нагрузке за этот же период);
- коэффициентом одновременности нагрузки (коэффициентом спроса), равным отношению совмещенной максимальной нагрузки предприятия к сумме нагрузок его отдельных электроприемников.

Графики нагрузки в большинстве случаев представляют собой неравномерную линию, состоящую из множества отрезков, с пиками в утренние (8...11) и вечерние (18...22) часы [4].

Одним из крупнейших потребителей в Новосибирской области считается ОАО «Российские железные дороги», которому необходимо порядка пятнадцати процентов от всей энергии, производимой в регионе [5]. Стоит отметить, что график энергопотребления за сутки очень изменчив, что обусловлено расписанием движения поездов с различной степенью загрузки [6]. Скорректировать подобный характер суточного энергопотребления можно за счет применения накопителей энергии (НЭ) [7, 8]. Интеграция накопителей в энерго-

систему ведет к снижению потерь, а также позволяет эксплуатировать элементы системы в более благоприятных условиях [9 — 11].

В качестве объекта исследования выбран участок тяговой сети 3 кВ постоянного тока с преобладающим движением грузовых поездов.

Настоящая работа ставит перед собой задачу проведения оценок мощности, а также обменной емкости накопителя электрической энергии, устанавливаемого на тяговую подстанцию. Оценка данных параметров выполнена на основе анализа графика суточного энергопотребления РЖД вероятностно-статистическими методами [5]. Параметры накопителя электрической энергии взяты, исходя из условия обеспечения выравнивания графика нагрузки тяговой подстанции при осуществлении часового регулирования [12, 13].

Оценка параметров накопителя энергии

Выбор мощности накопителя.

В электропотреблении железнодорожного транспорта всегда присутствует случайная составляющая, обусловленная отклонением скорости движения поездов, их загрузкой, уклоном участка дороги и множеством других факторов. Все это влияет как на мгновенное значение потребляемой нагрузки, так и на ее продолжительность. Точный учет данных обстоятельств невозможен в силу их случайного характера, поэтому закон изменения потребляемой мощности следует рассматривать как случайную во времени функцию [14, 15].

Представленное предположение является предпосылкой применения понятий, методов и вариантов теорий вероятностей и случайных процессов к анализу колебаний нагрузки [16]. Основное преимущество вероятностных методов анализа заключается в том, что они позволяют рассматривать процесс колебаний нагрузки в отдельности от дополнительной информации, не являющейся специфической для энергетики. Также процессу изменения нагрузки присущ не только вероятностный, но и детерминированный характер, обусловленный суточной, недельной или сезонной цикличностью режима энергопотребления, связанными с календарным планированием графика движения поездов, естественным приростом нагрузки в зимнее время года и другими причинами [17]. Таким образом, корреляционная теория случайных процессов, одним из основных предположений которой является ста-

онарность, а также применяемые к ней приемы статистической обработки данных, ограниченно пригодны для анализа колебаний нагрузки железнодорожного транспорта.

Ряд авторов рассматривает вопросы выбора мощности и обменной энергоемкости накопителей электрической энергии для железнодорожного транспорта [12, 13, 18], но при этом не затрагивает вопросы случайного характера распределения нагрузки во времени и влияния характера данного распределения на величину обменной энергоемкости и мощности накопителя.

Представлен анализ графика нагрузки статистическими методами. В качестве исследуемого взят график нагрузки тяговой подстанции на участке железной дороги. Данные потребляемой активной мощности приведены за 23 календарных дня с дискретностью в 0,5 ч. Таким образом, выполнено 1104 измерения.

Приведем вычисленные значения выборочных характеристик графика нагрузки.

Значения выборочных характеристик графика нагрузки

Число наблюдений в выборке	1104
Среднее значение, кВт	2515
Медиана, кВт	2513
Минимальное значение, кВт	406
Максимальное значение, кВт	4836
Размах, кВт	4430
Дисперсия, кВт ²	515306
Среднеквадратическое отклонение, кВт	718
Коэффициент вариации, %	28,5

Анализ показал, что среднее значение мощности нагрузки тяговой подстанции за интервал наблюдений

составило 2515 кВт, среднеквадратичное отклонение — 718 кВт (28,5% среднего значения).

Для дальнейшего исследования необходима проверка гипотезы о нормальном законе распределения графика нагрузки тяговой подстанции.

Для построения кривой накопленных частот и гистограммы частот распределения графика нагрузки следует разделить исходные данные на классы с помощью формулы Старджеса.

Число классов определяется следующим образом:

$$k = 1 + 3,32 \lg(n),$$

где n — число наблюдений в выборке.

Ширина класса составляет

$$b = (x_{\max} - x_{\min})/k,$$

где x_{\max} , x_{\min} — максимальное и минимальное значения выборки.

На рисунках 1, 2 даны гистограмма частот распределения и кривая накопленных частот, построенные с применением рассчитанных числа и ширины классов в программном комплексе STATISTICA.

Проведем проверку гипотезы о нормальном распределении случайной величины в выборке.

Анализируя гистограмму частот распределения нагрузки тяговой подстанции (см. рис. 1) и кривую накопленных частот исследуемого распределения (см. рис. 2), предварительно можно заключить, что распределение мощностей на графике нагрузки имеет вид нормального распределения. Для проверки гипотезы о нормальном распределении случайной величины воспользуемся критерием Колмогорова–Смирнова [19]:

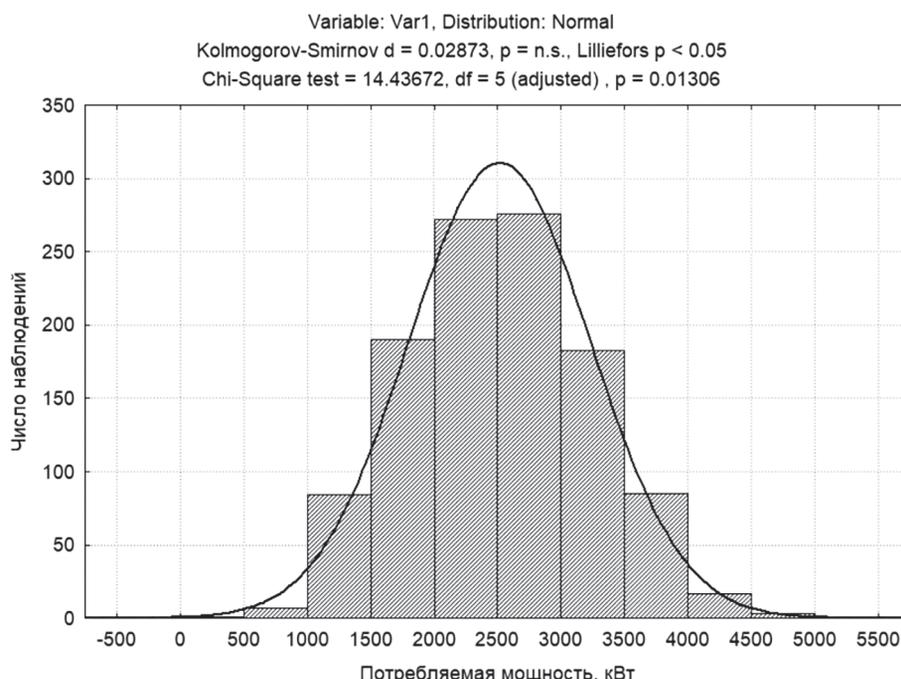


Рис. 1. Гистограмма частот распределения нагрузки тяговой подстанции

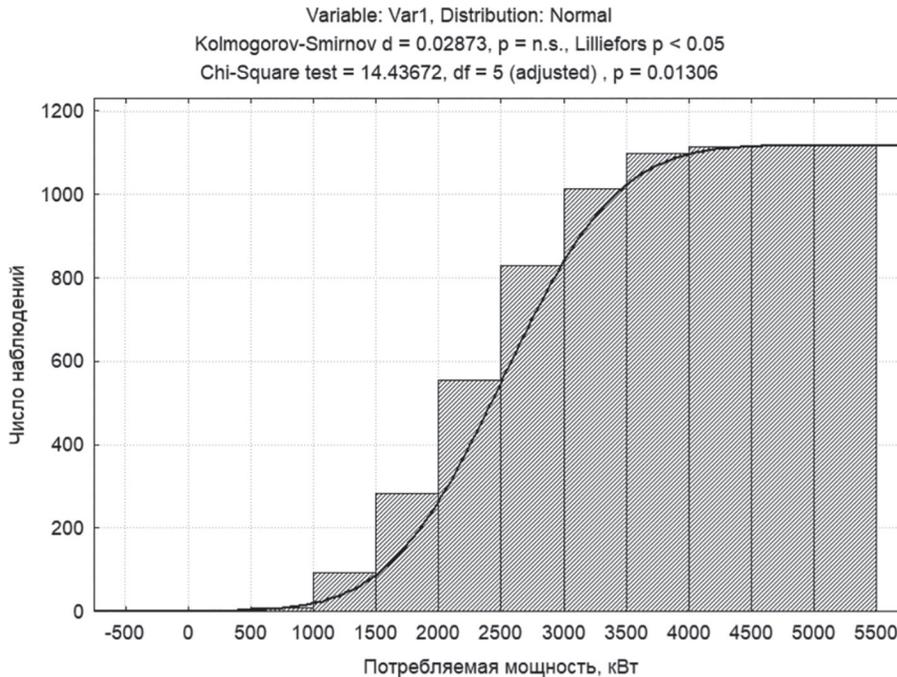


Рис. 2. Кривая накопленных частот исследуемого распределения

Гипотеза H_0 : случайная величина имеет нормальное распределение.

Гипотеза H_1 : случайная величина имеет распределение, отличное от нормального.

Сравнение расчетного значения величины числа Колмогорова–Смирнова, приведенного на рис. 1 и равного $D_{\text{выборки}} = 0,02873$, с теоретическим критическим значением выглядит следующим образом:

$$D_{\text{теор}} = \frac{1,3581}{\sqrt{n}} = \frac{1,3581}{\sqrt{1104}} = 0,041.$$

При сравнении получим:

$$D_{\text{выборки}} < D_{\text{теор}},$$

следовательно, гипотеза о нормальном распределении исследуемой величины не отвергается.

Представленные теоретические выкладки позволяют изучать распределение величины мощности потребления тяговой подстанции, как нормальное распределение. Следовательно, математическое ожидание, а также величина стандартного отклонения, могут выступать в качестве оценочных величин при выборе мощности НЭ а также величины средней потребляемой мощности тяговой подстанции, относительно которой будет проходить выравнивание графика нагрузки. Таким образом, средняя мощность, потребляемая тяговой подстанцией в рассматриваемом примере, принимается равной среднему значению: $P_{\text{сред}} = 2515$ кВт.

Мощность НЭ, исходя из требования «сглаживания» графика нагрузки [20], кратна трем стандартным отклонениям потребляемой мощности, полученным при ана-

лизе графика нагрузки: $P_{\text{НЭ}} = 3\sigma = 3 \cdot 717 = 2151$ кВт, что позволят сгладить 99,73% всех отклонений мощности, полученных в ходе статистического анализа графика нагрузки. Для сглаживания 95% всех отклонений мощности установленная мощность НЭ может быть снижена и выбрана на уровне, кратной двум стандартным отклонениям.

Выбор обменной энергоёмкости накопителя.

Изучим необходимую обменную энергоёмкость НЭ при выполнении часового регулирования в течение суток. Анализ выполнен для каждого из дней графика нагрузки по отдельности. График обменной энергоёмкости получен как численный интеграл от разности мощностей графика нагрузки и вычисленной средней мощности $P_{\text{сред}}$. Возрастают значения обменной энергоёмкости соответствует цикл разряда накопителя электрической энергии, а убыванию — цикл заряда. Величина обменной энергоёмкости определена как максимальный размах графика изменения обменной энергии НЭ для каждого суток [20]. Один из типовых графиков изменения энергии НЭ при работе в цикле «заряд–разряд» изображен на рис. 3.

Результаты анализа для каждого из 23-х дней представлены в табл. 1.

Приведем значения выборочных характеристик полученной обменной энергоёмкости НЭ.

Значения выборочных характеристик обменной энергоёмкости НЭ

Число наблюдений в выборке	23
Среднее значение, кВт·ч	4784
Медиана, кВт·ч	4283

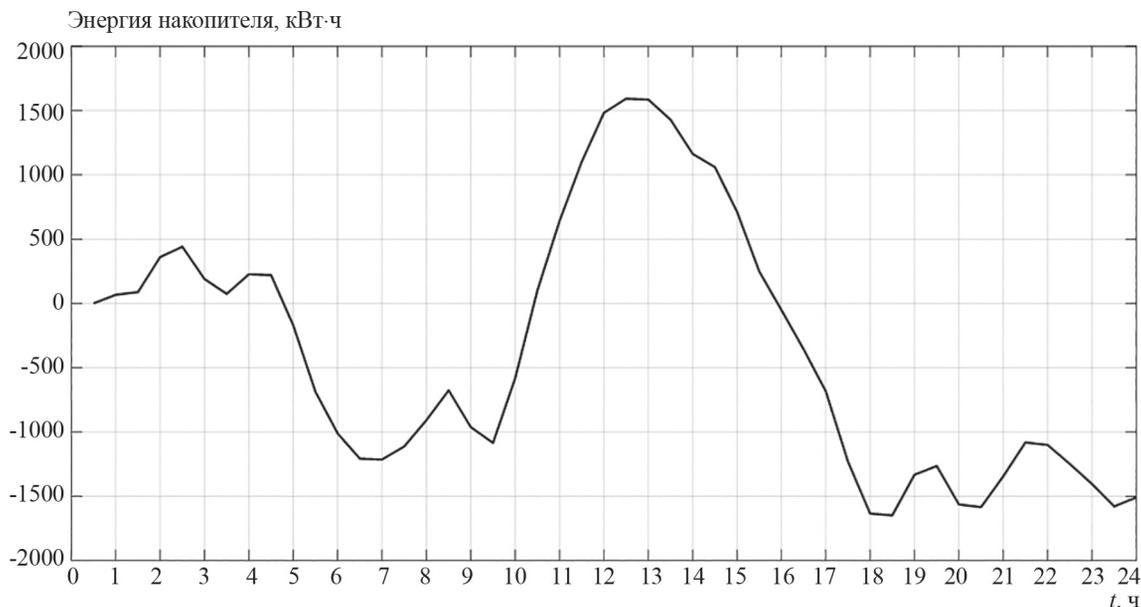


Рис. 3. Диаграмма изменения энергии НЭ за 2-й день в процессе выравнивания графика нагрузки

Таблица 1

Оценочная величина обменной энергоёмкости НЭ

День	Обменная энергоёмкость, кВт·ч
1	3692, 00
2	3240, 50
3	4645, 50
4	4859, 00
5	3925, 00
6	4379, 50
7	3965, 50
8	4282, 50
9	7802, 50
10	10448, 00
11	5552, 50
12	5002, 50
13	3280, 50
14	9452, 50
15	2568, 50
16	3703, 00
17	2500, 00
18	4478, 00
19	5211, 00
20	4185, 50
21	5566, 00
22	3372, 50
23	3908, 50

Минимальное значение, кВт·ч.....	2500
Максимальное значение, кВт·ч.....	10448
Размах, кВт·ч	7948
Дисперсия, (кВт·ч) ²	3936400
Среднеквадратическое отклонение, кВт·ч.....	1984
Коэффициент вариации, %.....	41,5
Число классов.....	5
Ширина класса, кВт·ч.....	1590

Проведем анализ с целью определения теоретического распределения, с наибольшей точностью совпадающего с эмпирическим распределением. Результаты анализа и проверка на соответствие определенному теоретическому распределению критерием Колмогорова–Смирнова с приведением величины *p*-статистики даны в табл. 2. Соответствующие теоретические распределения совместно с эмпирическими диаграммами построены на рис. 4, 5.

Таблица 2

Проверка распределения обменной энергоёмкости НЭ критерием Колмогорова–Смирнова

Тип распределения	Статистика <i>p</i>
Гамбела	0,0387
Экспоненциальное	5,9·10 ⁻⁴
Гамма-распределение	0,54
Логнормальное	0,74
Нормальное	0,21
Релея	0,12
Равномерное	1,7·10 ⁻⁵
Вейбула	0,24

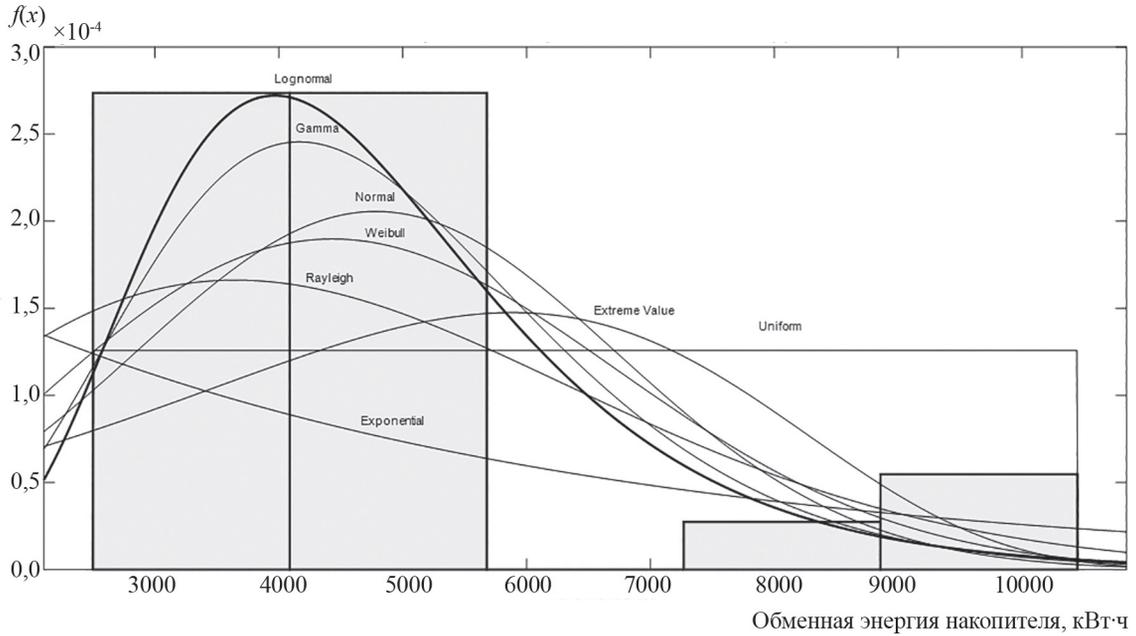


Рис. 4. Эмпирическое и теоретические распределения плотности вероятности величины обменной энергоемкости накопителя

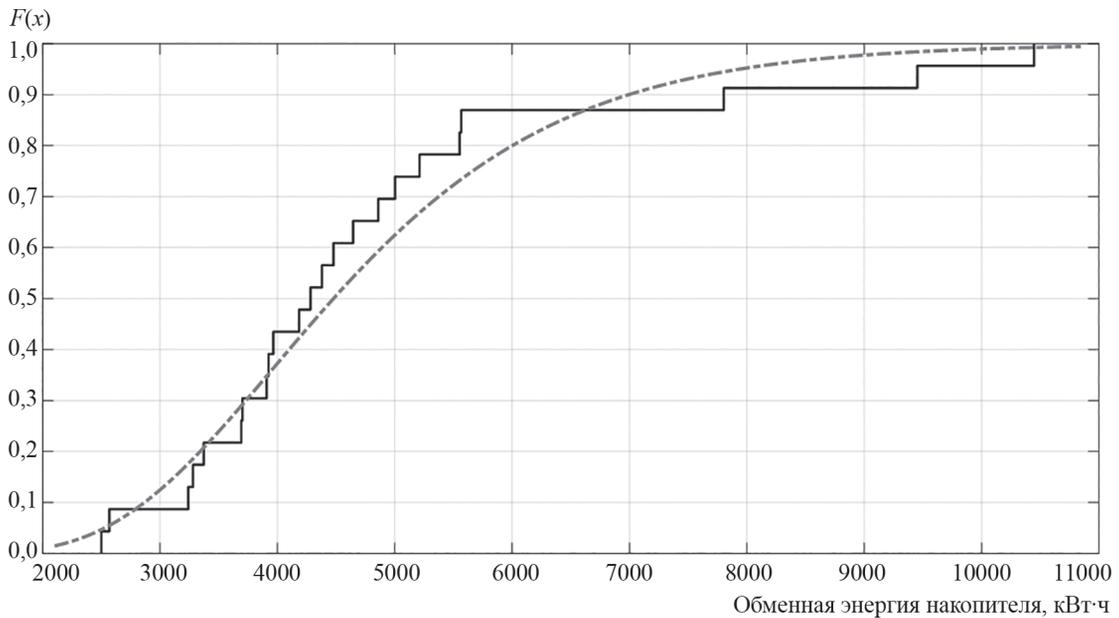


Рис. 5. Кумулятивная функция распределения обменной энергоемкости накопителя

Результаты проверки распределения обменной энергоемкости НЭ критерием Колмогорова–Смирнова продемонстрировали наибольшее соответствие эмпирического распределения логнормальному распределению. Следовательно, указанное распределение можно использовать при оценке обменной энергоемкости НЭ.

Анализ полученной зависимости показал, что по аналогии с выбором мощности НЭ выбор величины обменной энергоемкости НЭ на уровне среднего значения полученной выборки $W_{НЭ}^{\text{средн}} = 4784$ кВт·ч обеспечивает более 60% всех вариаций в течение интервала наблюдения, а выбор обменной энергоемкости НЭ на

уровне $W_{НЭ} = W_{НЭ}^{\text{средн}} + \sigma = 4784 + 1984 = 6768$ кВт·ч — более 85% всех вариаций и т. д.

Следует отметить, что полная величина энергоемкости накопителя может быть установлена только после выбора конкретного типа накопителя и его устройства, поскольку выбранная технология НЭ находит допустимые уровни разряда/заряда при поддержании требуемого уровня мощности [21].

Заключение

Выполнены оценки мощности, а также обменной энергоемкости накопителя электрической энергии,

устанавливаемого на тяговую подстанцию. Проведен вероятностный анализ графика нагрузки тяговой подстанции Западно-Сибирской железной дороги и подтверждена гипотеза случайного распределения величины нагрузки. На основе анализа суточного энергопотребления (вероятностного расчета) установлена требуемая мощность накопителя. С помощью вероятностно-статистических методов изучено суточное

энергопотребление системы с установленным накопителем. На основе полученных результатов сделан выбор обменной энергоемкости накопителя для выравнивания графика нагрузки тяговой подстанции в режиме часового регулирования. Предложены подходы к выбору величины мощности и обменной энергоемкости накопителя в зависимости от требуемого уровня сглаживания графика нагрузки.

Литература

References

1. **Сопов В.И., Щуров Н.И.** Электрические нагрузки систем тягового электроснабжения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017.

1. **Sopov V.I., Shchurov N.I.** Elektricheskie Nagruzki Sistem Tyagovogo Elektrosnabzheniya. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017. (in Russian).

2. **Закарюкин В.П., Крюков А.В.** Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та путей сообщения, 2011.

2. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.** Metody Sovmestnogo Modelirovaniya Sistem Tyagovogo i Vneshnego Elektrosnabzheniya Zheleznykh Dorog Peremennogo Toka. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya, 2011. (in Russian).

3. **Постановление** Правительства РФ № 442 от 04.05.2012 г. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии.

3. **Postanovlenie** Pravitel'stva RF № 442 ot 04.05.2012 g. O Funktsionirovanii Roznichnykh Rynkov Elektricheskoy Energii, Polnom i (ili) Chastichnom Ogranichenii Rezhima Potrebleniya Elektricheskoy Energii. (in Russian).

4. **Макоклюев Б.И.** Особенности и тенденции потребления электроэнергии в энергосистемах России // Энергия единой сети. 2017. № 5(34). С. 64—76.

4. **Makoklyuev B.I.** Osobennosti i tendentsii Potrebleniya Elektroenergii v Energosistemakh Rossii. Energiya Edinoy Seti. 2017;5(34):64—76. (in Russian).

5. **Конакбаев Р.А.** Вероятностный анализ электропотребления на примере железнодорожного транспорта // Интеллектуальные энергосистемы: Труды IV Междунар. молодежного форума. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2016. С. 361—364.

5. **Konakbaev R.A.** Veroyatnostnyy Analiz Elektropotrebleniya na Primere Zheleznodorozhnogo Transporta. Intellektual'nye Energosistemy: Trudy IV Mezhdunar. Molodezhnogo Forum. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekh. Un-ta, 2016:361—364. (in Russian).

6. **Энергетическая** стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. М.: ОАО «РЖД», 2011.

6. **Energeticheskaya** Strategiya Kholdinga «Rossiyskie Zheleznye Dorogi» na Period do 2015 Goda i na Perspektivu do 2030 Goda. M.: OAO «RZHD», 2011. (in Russian).

7. **Xuan Liu, Kang Li.** Energy Storage Devices in Electrified Railway Systems: a Review // Transportation Safety and Environment. 2020. V. 2. Iss. 3. Pp. 183—201.

7. **Xuan Liu, Kang Li.** Energy Storage Devices in Electrified Railway Systems: a Review. Transportation Safety and Environment. 2020;2;3:183—201.

8. **Ghaviha N. e. a.** Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation // Energy Proc. 2017. V. 105. Pp. 4561—4568.

8. **Ghaviha N. e. a.** Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. Energy Proc. 2017;105:4561—4568.

9. **Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P.** Recent Developments and Applications of Energy Storage Devices in Electrified Railways // IET Electrical Systems in Transportation. 2014. V. 4. Iss. 1. Pp. 9—20.

9. **Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P.** Recent Developments and Applications of Energy Storage Devices in Electrified Railways. IET Electrical Systems in Transportation. 2014;4;1:9—20.

10. **Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В.** Использование накопителей энергии в системах электроснабжения железных дорог // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 8. С. 20—25.

10. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V.** Ispol'zovanie Nakopiteley Energii v Sistemakh Elektrosnabzheniya Zheleznykh Dorog. Elektrooborudovanie: Ekspluatatsiya i Remont. 2016;8:20—25. (in Russian).

11. **Шевлюгин М.В.** Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии. М.: Изд-во Московского гос. ун-та путей сообщения, 2007.

11. **Shevlyugin M.V.** Snizhenie Raskhoda Energii i Rabochey Moshchnosti Osnovnogo Silovogo Oboruvaniya Tyagovykh Podstantsiy Elektricheskikh Zheleznykh Dorog s Pomoshch'yu Nakopiteley Energii. M.: Izd-vo Moskovskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya, 2007. (in Russian).

12. **Москалев Ю.В., Карabanov М.А.** Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока железных дорог с примени-

12. **Moskalev Yu.V., Karabanov M.A.** Povyshenie Energoeffektivnosti Sistem Tyagovogo Elektrosnabzheniya Postoyannogo Toka Zheleznykh Dorog s Primeneni-

ем накопителей энергии // Известия Транссиба. 2013. № 2(14). С. 51—58.

13. **Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П.** Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии // Известия Томского политехн. ун-та. Серия «Инжиниринг георесурсов». 2015. Т. 326. № 10. С. 54—64.

14. **Закарюкин В.П., Крюков А.В., Раевский Н.В., Яковлев Д.А.** Моделирование и прогнозирование процессов электропотребления на железнодорожном транспорте. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та путей сообщения, 2007.

15. **Дронова Ю.В., Коростелев С.В., Тупкина А.А.** Прогнозирование электропотребления железнодорожного транспорта на примере Новосибирского участка Западно-Сибирской железной дороги // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 2. С. 293—297.

16. **Москалев Ю.В., Карabanов М.А.** Определение места размещения и энергоемкости накопителя энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока двухпутного участка // Наука и техника транспорта. 2015. № 2. С. 21—28.

17. **Филиппова Т.А., Русина А.Г., Дронова Ю.В.** Модели и методы прогнозирования электроэнергии и мощности при управлении режимами электроэнергетических систем. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2009.

18. **Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В.** Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 356—361.

19. **Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В.** Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2011.

20. **Балуев Д.Ю., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А.** Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. 2018. Т. 22. № 5(136). С. 105—114.

21. **Носков В.Н., Пустоветов М.Ю., Чирков В.К.** Об энергоемкости накопителей энергии для стационарного размещения на тяговых подстанциях // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2008. № 1(29). С. 120—127.

Сведения об авторах:

Котин Денис Алексеевич — кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета, e-mail: d.kotin@corp.nstu.ru

Русина Анастасия Георгиевна — доктор технических наук, декан факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета, e-mail: rusina@corp.nstu.ru

em Nakopiteley Energii. Izvestiya Transsiba. 2013;2(14): 51—58. (in Russian).

13. **Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P.** Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti Sistemy Tyagovogo Elektrosnabzheniya v Usloviyakh Raboty Postov Sektsionirovaniya s Nakopitelyami Elektricheskoy Energii. Izvestiya Tomskogo Politekhn. Un-ta. Seriya «Inzhiniring Georesursov». 2015;326;10:54—64. (in Russian).

14. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Raevskiy N.V., Yakovlev D.A.** Modelirovanie i Prognozirovanie Protsessov Elektropotrebleniya na Zheleznodorozhnom Transporte. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya, 2007. (in Russian).

15. **Dronova Yu.V., Korostelev S.V., Tupikina A.A.** Prognozirovanie Elektropotrebleniya Zheleznodorozhnogo Transporta na primere Novosibirskogo Uchastka Zapadno-Sibirskoy Zheleznoy Dorogi. Nauchnye Problemy Transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2012;2:293—297. (in Russian).

16. **Moskalev Yu.V., Karabanov M.A.** Opredelenie Mesta Razmeshcheniya i Energoemkosti Nakopitelya Energii v Sisteme Tyagovogo Elektrosnabzheniya Postoyannogo Toka Dvukhputnogo Uchastka. Nauka i Tekhnika Transporta. 2015;2:21—28. (in Russian).

17. **Filippova T.A., Rusina A.G., Dronova Yu.V.** Modeli i Metody Prognozirovaniya Elektroenergii i Moshchnosti pri Upravlenii Rezhimami Elektroenergeticheskikh Sistem. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo Gos. Tekhn. Un-ta, 2009. (in Russian).

18. **Rybalko A.Ya., Dybrin S.V.** Vybór Emkosti Nakopitelya Energii dlya Obespecheniya Snizheniya Maksimuma Potreblyаемoy Moshchnosti. Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'. 2008;8:356—361. (in Russian).

19. **Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Postovalov S.N., Chimitova E.V.** Statisticheskii Analiz Danykh, Modelirovanie i Issledovanie Veroyatnostnykh Zakonomernostey. Komp'yuternyy Podkhod. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo Gos. Tekhn. Un-ta, 2011. (in Russian).

20. **Baluev D.Yu., Zyryanov V.M., Kir'yanova N.G., Prankevich G.A.** Metodika Rascheta Osnovnykh Parametrov Nakopitelya Energii po Eksperimental'nym Nagruzochnym Diagrammam. Vestnik Irkutskogo Gos. Tekhn. Un-ta. 2018;22;5(136):105—114. (in Russian).

21. **Noskov V.N., Pustovetov M.Yu., Chirkov V.K.** Ob Energoemkosti Nakopiteley Energii dlya Statsionarnogo Razmeshcheniya na Tyagovykh Podstantsiyakh. Vestnik Rostovskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya. 2008;1(29): 120—127. (in Russian).

Домахин Евгений Александрович — ассистент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета, e-mail: domaxin.2012@stud.nstu.ru

Попов Никита Сергеевич — заместитель декана факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета, e-mail: n.popov@corp.nstu.ru

Кирьянова Наталья Геннадьевна — кандидат технических наук, ведущий инженер отдела научных исследований, ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета, научно-технический университет «Сириус», Сочи, e-mail: kiryanova@adm.nstu.ru

Матренин Павел Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета, научно-технический университет «Сириус», Сочи, e-mail: matrenin.2012@corp.nstu.ru

Information about authors:

Kotin Denis A. — Ph.D. (Techn.), Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Dept, Mechatronics and Automation Faculty, Novosibirsk State Technical University, e-mail: d.kotin@corp.nstu.ru

Rusina Anastasiya G. — Dr.Sci. (Techn.), Dean of the Power Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University, e-mail: rusina@corp.nstu.ru

Domakhin Evgeniy A. — Assistant of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Dept, Mechatronics and Automation Faculty, Novosibirsk State Technical University, e-mail: domaxin.2012@stud.nstu.ru

Popov Nikita S. — Deputy Dean of Mechatronics and Automation Faculty, Novosibirsk State Technical University, e-mail: n.popov@corp.nstu.ru

Kiryanova Nataliya G. — Ph.D. (Techn.), Leading Engineer of the Research Dept., Assistant of the Automated Electric Power Systems Dept., Power Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University, Sirius Scientific and Technical University, Sochi, e-mail: kiryanova@adm.nstu.ru

Matrenin Pavel V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Power Supply Systems of Enterprises Dept., Power Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University, Sirius Scientific and Technical University, Sochi, e-mail: matrenin.2012@corp.nstu.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» (проект № 20-38-51007)

The work is executed at support: RFBR; Sirius University of Science and Technology; JSC Russian Railways and Educational Fund “Talent and Success” (Project Number 20-38-51007)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 24.07.2021

The article received to the editor: 24.07.2021