



## ВЫБОР НАКОПИТЕЛЯ НА БАЗЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

А. А. Рзай, студентка гр. 16-ЭЭ  
e-mail: rzaynastya@gmail.com  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В. Ф. Белей, д-р техн. наук, проф.  
e-mail: vbeley@klgtu.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В работе дан анализ Калининградской энергосистемы в связи с ее переходом в 2025 г. в автономный режим работы. Представлены результаты разработок в области накопителей энергии на основе аккумуляторных батарей и продемонстрированы их функциональные возможности. Показано, что использование в Калининградской энергосистеме накопителя электроэнергии значительно повысит ее надежность, позволит использовать возобновляемые источники энергии. На основе анализа режимов работы энергосистемы Калининградской области рассчитана мощность накопителя; выбрано место его подключения к энергосистеме Калининградской области; разработана схема накопителя и его элементов. Предложена методика расчета мощности и емкости аккумуляторной батареи для накопителя электрической энергии.

***Ключевые слова:** накопитель электроэнергии, станция, мощность, возобновляемые источники энергии, энергосистема*

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из трендов развития мировой энергетики являются накопители энергии на аккумуляторных батареях. К настоящему времени в мире достигнуты серьезные успехи в разработке технологий накопителей на основе литий-ионных аккумуляторов. Их использование в энергосистемах решает проблемы с обеспечением устойчивости и внедрению возобновляемых источников энергии в энергосистему. В связи с переходом в 2025 г. энергосистемы Калининградской области в автономный режим работы выбор и использование накопителя для Калининградской энергосистемы являются актуальной задачей.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Энергосистема Калининградской области и накопители электрической энергии на базе аккумуляторной батареи.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований является выбор накопителя на основе аккумуляторной батареи для Калининградской энергосистемы, обеспечивающего повышение надежности ее функционирования в автономном режиме.

Поставленная цель предусматривает решение следующих задач исследований:

- анализ режимов работы энергосистемы Калининградской области в настоящее время и при ее переходе в автономный режим эксплуатации;

- анализ работ в области разработок накопителей на базе аккумуляторных батарей для использования в энергосистеме;
- разработка методики расчета мощности и емкости аккумуляторной батареи накопителя электрической энергии;
- выбор схемы накопителя и места подключения к энергосистеме Калининградской области.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При выполнении работы по решению поставленных задач применялись методы математической статистики и системного анализа. При проведении исследований использовались программы MathCAD, MS Excel, Visio.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время Калининградская энергетическая система и энергосистемы стран Балтии функционируют в составе энергообъединения IPS/UPS (рис. 1а).

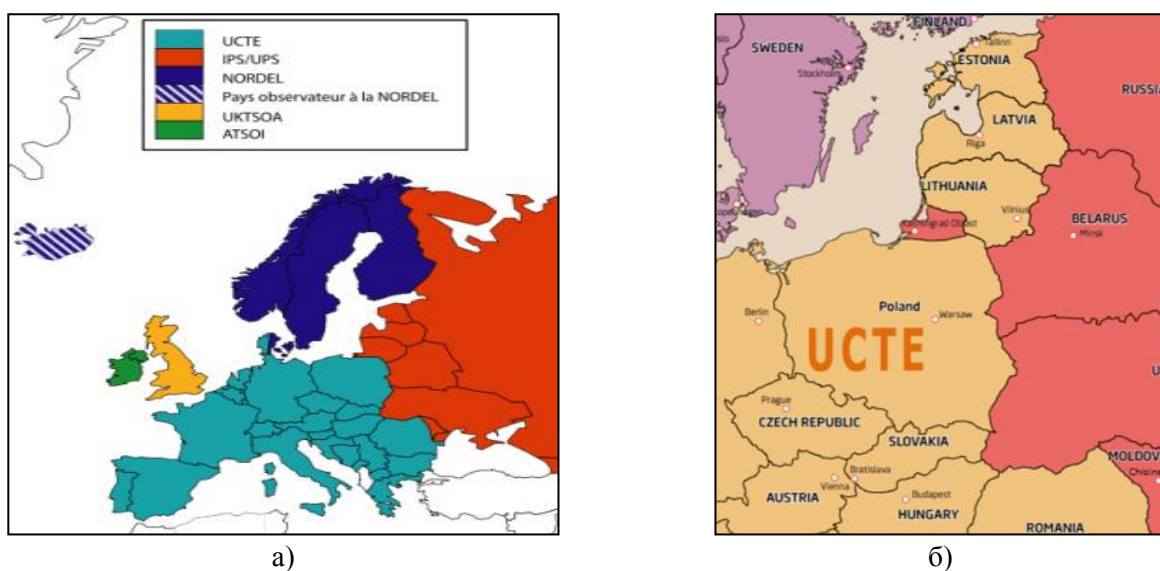


Рисунок 1 – Европейские энергообъединения

В 2025 г. энергосистема стран Балтии отключится от энергообъединения IPS/UPS и перейдет на синхронную работу в составе энергообъединения UCTE. При этом Калининградская энергосистема переходит в автономный режим работы (рис. 1б). С целью обеспечения энергетической безопасности в Калининградской области построены и проверены в эксплуатации три электростанции, строится Приморская ТЭС. При работе в автономном режиме Калининградская ТЭЦ-2 будет эксплуатироваться в режиме полублоков (табл. 1) [1, 2].

Таблица 1 – Объекты ТЭС (ТЭЦ) энергосистемы Калининградской области

Название	Мощность, МВт	Топливо	Тип	КПД, %
Приморская ТЭС	195 (3x65)	уголь	ПСУ	35,6
Прегольская ТЭС	440 (4x110)	газ	ПГУ	52,1
Маяковская ТЭС	160 (2x80)	газ	ГТУ	36,0
Талаховская ТЭС	160 (2x80)	газ	ГТУ	36,0
КТЭЦ-2	450 (2x225)	газ	ПГУ	51,0

*Примечание: ПСУ – паросиловая установка, ПГУ – парогазовая установка, ГТУ – газотурбинная установка.*

В этом варианте энергетическая безопасность региона обеспечена не будет.

1. С учетом резервной мощности, а также требований устойчивости и надежности работы энергосистем мощность наиболее мощного агрегата в энергосистеме, как показывает опыт эксплуатации, не должна превышать 2% от установленной мощности энергосистемы. Мощность же наиболее крупной электростанции по тем же соображениям не должна превышать 8-12% установленной мощности энергосистемы [3]. Таким образом, в Калининградской энергосистеме необходимо иметь **минимум от 8 до 12** близких по мощности **электростанций**.

2. Основной вид топлива для четырех электростанций – газ, поставляемый из РФ по газопроводу через территорию стран Балтии, и от морского терминала. Уголь для Приморской ТЭС будет доставляться, видимо, морским путем.

По поводу экологичности и эффективности новых электростанций можно отметить, что электростанции, предназначенные для работы в конденсационном режиме с низким коэффициентом действия, малоэффективны и экологически опасны (табл. 1).

Один из трендов развития в мировой энергетике - это накопители энергии на аккумуляторных батареях. К настоящему времени в мире достигнуты серьезные успехи в разработке их технологий на основе литий-ионных аккумуляторов. Накопитель в упрощенном виде представляет собой выпрямительно-инверторный блок и аккумуляторную батарею. Практически мгновенно (через доли секунды) он может осуществлять потребление из энергосистемы электроэнергии, ее накопление в батарее и инвертирование накопленной энергии в энергосистему с КПД 95% (рис. 2) [4]. Это позволит обеспечить баланс активной мощности в энергосистеме.

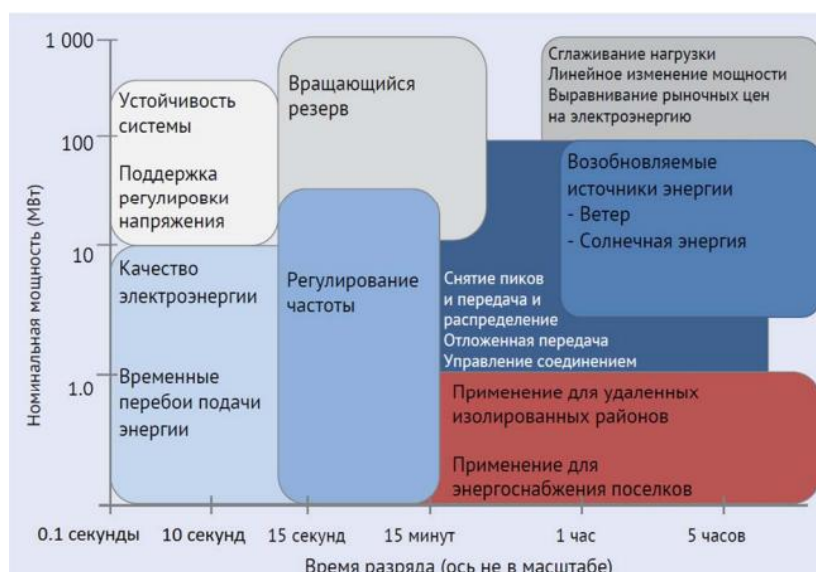


Рисунок 2 – Функциональные возможности систем накопления энергии на базе аккумуляторных батарей

Согласно последним исследованиям цены на накопители энергии к 2030 г. сделают хранение энергии экономически более выгодным, чем строительство электростанций. Некоторые американские энергетические компании уже начали инвестировать в создание мощных накопителей. Калифорнийская компания Pacific Gas & Electric получила разрешение от регулирующих органов на строительство масштабной системы аккумулирования энергии на 567,5 МВт вблизи Сан-Франциско [5].

Согласно мировым тенденциям и энергетической стратегии развития РФ рост региональной энергетики должен основываться в первую очередь на распределенной энергетике с максимальным использованием местных топливно-энергетических ресурсов и возобновляемых источников энергии [6]. Калининградский регион обладает значительными местными возобновляемыми энергетическими ресурсами: торф, биоресурсы и ветровая, водная и гео-

энергия. Как показано в [1], в области можно было построить 10-15 таких электростанций общей установленной мощностью более 400 МВт.

По прогнозам доля возобновляемой энергетики в мире к 2060 г. достигнет 70% [7]. При этом, Дания уже к 2030 г. планирует осуществлять 100%-ную выработку электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [8]. Следует отметить, что интеграция в энергосистемы больших мощностей от ВИЭ является серьезной проблемой с позиций обеспечения надежности функционирования энергетических систем, особенно работающих в автономном режиме. Для решения этих проблем в энергосистеме также необходимы накопители электроэнергии. До недавнего времени для этого использовались гидроаккумулирующие электростанции. Такой тип накопителей обладает рядом недостатков: низкий коэффициент полезного действия (КПД) аккумулирования (70-75%), высокая себестоимость получаемой энергии, значительные затраты на сооружение, нанесение вреда экологии и обширное отчуждение земель.

Для решения проблем по надежности, оптимизации режимов работы энергосистемы, а также возможности использования ВИЭ в энергосистеме Калининградской области необходимо выполнить проектирование и возведение накопителя энергии на базе литий-ионных аккумуляторов. Для реализации этого проекта следует в первую очередь на основе анализа режимов работы энергосистемы рассчитать мощность накопителя. Далее - выбрать место подключения накопителя, параметры выпрямительно-инверторного блока, аккумуляторной батареи и другого электрооборудования. Оценить работу накопителя в составе энергосистемы.

#### **Анализа режимов работы энергосистемы Калининградской области и расчет мощность накопителя**

Расчет мощности и энергии, которую накопитель может запасти и затем выдать в энергосистему, можно оценить на основе анализа зимнего графика нагрузки в энергосистеме Калининградской области (рис. 3). Такой расчет следует выполнить из условий: в период малых нагрузок (ночь) аккумуляторная батарея заряжается, а при режиме больших нагрузок отдает энергию в систему. С учетом КПД накопителя необходимо рассчитать базовую мощность ( $P_6$ ) Калининградской энергосистемы. Эту мощность можно определить из равенства следующих выражений (1) и (2):

$$W_3 = \int_{T_1}^{T_2} (P_6 - P_i) dt / \eta \quad (1)$$

где  $W_3$  – энергия, которую накопитель получает из системы в период времени  $T_1 - T_2$ ;  
 $P_i$  – текущее значение мощности нагрузки.

$$W_p = \int_{T_2}^{T_3} (P_i - P_6) dt \quad (2)$$

где  $W_p$  – энергия, которую накопитель выдает в систему в период времени  $T_2 - T_3$ .

Согласно расчетам для зимнего периода  $P_{БЗ} = 620$  МВт. Отсюда мощность накопителя составит  $P_{нак} = 110$  МВт.

Согласно расчетам для летнего периода  $P_{БЛ} = 410$  МВт.

Энергию накопителя ( $W_n$ ) рассчитываем по выражению 1 для наиболее сложного режима работы энергосистемы, а именно зимнего периода:  $W_n = 460$  МВт·ч.

С учетом технических данных по ТЭС (табл. 1), не принимая во внимание ТЭЦ-2, так как она будет работать в режиме полублоков, максимальная мощность при потере одного блока в аварийном режиме составит 110 МВт.

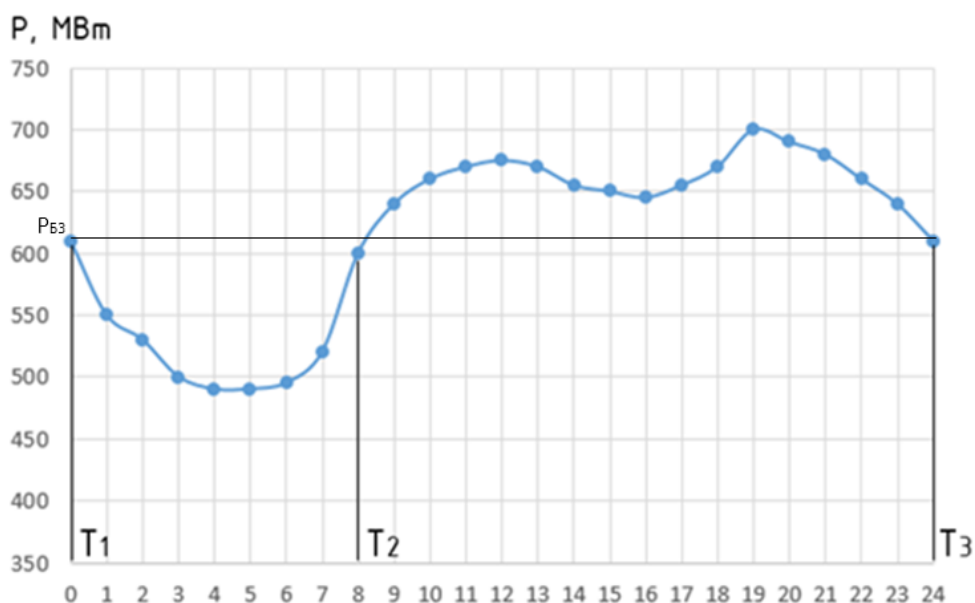


Рисунок 3 – Почасовой график потребления мощности для зимнего и летнего замеров в Калининградской энергосистеме за 2014-2018 гг. [9]

Таким образом, для дальнейших расчетов следовало принять за основу следующие параметры накопителя:  $P_{БЗ} = 110$  МВт и емкость  $C_H = 460$  МВт·ч. При этом решались бы практически все проблемы с надежной и оптимальной работой электростанций Калининградской энергосистемы. Реализация этого проекта на данный момент технически затруднительна. Поэтому принимаем емкость накопителя  $C_H$  равной 260 МВт·ч, что при отключении одного блока Прегольской ТЭС обеспечит его замену на 2,4 ч. Таким образом, в аварийном режиме работы энергосистемы накопитель за счет своего быстродействия способен практически мгновенно восполнить дефицит генерирующей мощности и, следовательно, обеспечить устойчивость энергосистемы [2].

### Выбор схемы накопителя и места подключения к энергосистеме Калининградской области

Анализ электроэнергетической системы Калининградской области показал, что наиболее подходящее место для подключения накопителя – это система шин 110кВ на подстанции 0-1 (рис. 4). Ввиду большой мощности накопителя предлагается использовать два одинаковых накопителя мощностью 55МВт и емкостью 130 МВт·ч каждый (рис. 5).

Силовой трансформатор на напряжение 110/6,3 кВ выбирается с учетом систематической перегрузки, что обеспечит работу накопителя в большинстве режимах при отключении одного из трансформаторов (табл. 2, рис. 3):

$$S_T = K_c \cdot P_{\text{нак}} \quad (3)$$

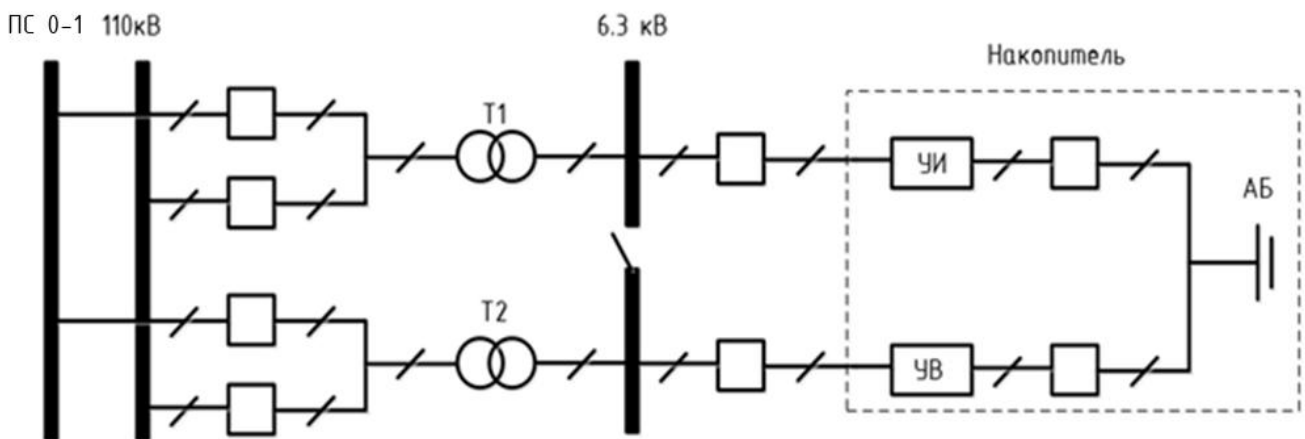
Таблица 2 – Технические данные трансформатора ТРДН-АТЕФ-63 000/110

Тип трансформатора	Ном. мощность, кВА	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения	Потери, кВт		Ток х.х., %	Напр. к.з., %
		НН	ВН		Х.Х.	К.З.		
ТРДН – АТЕФ-63000/110	63 000	6,6-6,3 6,3-10,5 10,5-10,5	115	УшД-Д-11-11	50	245	0,5	20,0-30,5

Далее выбирается схема трехфазного управляемого выпрямителя (рис. 6) [10].



Рисунок 4 – Электроэнергетическая система Калининградской области



УВ – управляемый выпрямитель, УИ – управляемый инвертор

Рисунок 5 – Упрощенная схема подключения накопителя энергии мощностью 55 МВт к шинам 110 кВ подстанции 0-1

Напряжение на выходе выпрямителя ( $U_{d0}$ ) определяется по выражению:

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_2 \quad (4)$$

где  $U_2$  – действующее значение фазного напряжения.

Наличие фильтра (рис. 6а,  $\Phi$ ) позволяет в любых режимах работы выпрямителя обеспечить низкий уровень пульсаций выходного напряжения.

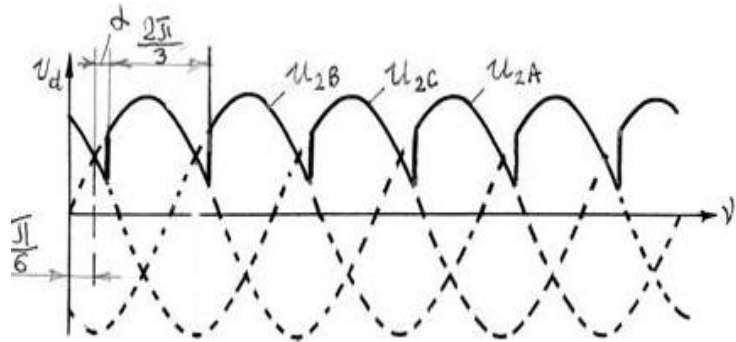
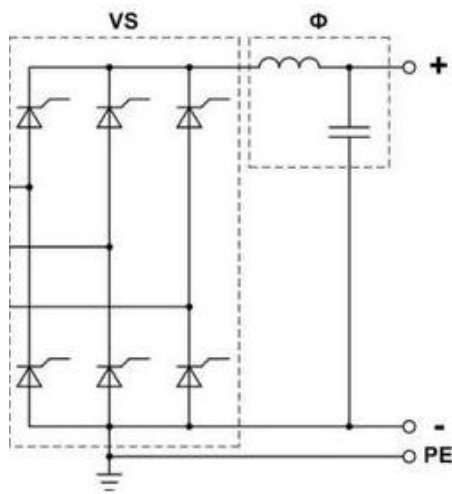
Схемных решений относительно трехфазного управляемого инвертора достаточно много. Это требует дополнительных исследований, что выходит за рамки статьи. При выборе инвертора важно обеспечить на его выходе трехфазное синусоидальное напряжение.

### Выбор аккумуляторной батареи

В настоящее время мировым лидером по производству накопителей на базе литий-ионных батарей является «Tesla Ins», в РФ завод «Леотех» [11]. Среди выпускаемой заводом «Леотех» продукции следует отметить аккумулятор с улучшенными энергетическими характеристиками LT-LFP 300 (табл. 3, рис. 7), который мы берем за основу.

Таблица 3 – Технические данные литий-ионного аккумулятора LT-LFP 300

Емкость, А·ч	Удельная энергия, Вт	$U_{ном}$ , В	$I_{ном}$ , А	Импульсный ток, А	Циклы: заряд-разряд
300	107	3,2	60	600	до 5000



а) схема

б) напряжение на выходе выпрямителя

Рисунок 6 – Трехфазный управляемый выпрямитель

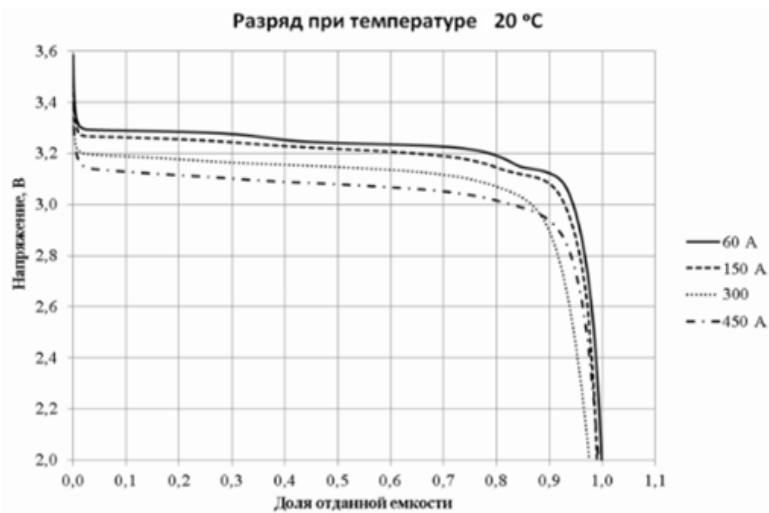


Рисунок 7 – Зависимость напряжения аккумулятора LT-LFP 300 от степени разряда при различных токах разряда

На базе производимых заводом «Лиотех» аккумуляторов разрабатываются батареи с выходным напряжением  $U_B = 12, 24, 36, 48$  В. По напряжению батарея согласовывается с выходными параметрами управляемого выпрямителя и инвертора (рис. 5). Число последовательно соединенных батарей ( $N_{пос}$ ) определится по выражению (5):

$$N_{пос} = \frac{U_{d0} \cdot K_p}{U_B}, \quad (5)$$

где  $K_p$  – коэффициент учитывающий снижение напряжения аккумулятора в период разряда (рис. 7).

При этом мощность и емкость накопителя определяются по выражениям (6) и (7):

$$P_{нак} = U_{d0} \cdot K_p \cdot I_{разряда}, \quad (6)$$

$$C_{\text{нак}} = P_{\text{нак}} \cdot I_{\text{разряда}} \quad (7)$$

Результаты расчетов мощности и емкости аккумуляторной батареи по выражениям (5-7) с учетом рекомендаций о недопустимости разряда батареи ниже  $0,8C_{\text{ном}}$  приводим в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов мощности и емкости аккумуляторной батареи для одного накопителя Калининградской энергосистемы

$U_{\text{б}}, \text{В}$	$N_{\text{пос}}$	$N_{\text{пар}}$	Разрядный ток аккумулятора, А	$P_{\text{нак}}, \text{МВт}$	$C_{\text{нак}}, \text{МВт} \cdot \text{ч}$
48	188	1	100	0,9	2,16
48	188	61	100	54,9	131,8

*Примечание:  $N_{\text{пар}}$  – число параллельных ветвей в аккумуляторной батарее накопителя.*

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что использование накопителя электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов позволит значительно повысить надежность и эффективность эксплуатации энергосистемы Калининградской области.

2. На основе анализа режимов работы энергосистемы Калининградской области рассчитана мощность накопителя, выбрано место его подключения к энергосистеме. Предложена схема накопителя и его элементов.

3. Предложена методика расчета мощности и емкости аккумуляторной батареи для накопителя электрической энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белей, В. Ф. Повышение энергобезопасности Калининградской области // Международный Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – С. 1052-1058.

2. Белей, В. Ф. Повышение устойчивости и безопасности энергосистемы Калининградской области и объектов морской индустрии за счет использования накопителей энергии / В. Ф. Белей, А. П. Шапошников // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4 (42), Т3. – С.44-49.

3. Электрическая часть станций и подстанций: учебник для вузов. – 2-е изд. / ред. А. А. Васильев. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 600 с.

4. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А. А. Макарова, Т. А. Митровой, В. А. Кулагина; ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО. – Москва, 2019. – 209 с.

5. Огромные накопители энергии вместо новых электростанций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/news/base/2019/1098369.htm> (дата обращения: 26.04.2020).

6. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Утв. Распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009. – № 1715.

7. Возобновляемые источники энергии: справочник модуля /под ред. В. Ф.Белея, В. В. Селина, А. О. Задорожного, А. Ю.Никишина, Н. Н. Елагина, А. В. Соловья. – Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2015. – 257 с.

8. К 2030 году Дания планирует получать 100% энергии из возобновляемых источников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://elektrovesti.net/61766\\_k-2030-godudaniya-planiruet-poluchat-100-energii-iz-vozobnovlyaemykh-istochnikov](https://elektrovesti.net/61766_k-2030-godudaniya-planiruet-poluchat-100-energii-iz-vozobnovlyaemykh-istochnikov) (дата обращения: 26.04.2020).

9. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2020-2024 годы.



10. Трехфазный тиристорный выпрямитель напряжения: параметры практического применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zvezda-el.ru/trehfaznyj-tiristornyj-vupryamitel-napryazheniya-primery-praktic> (дата обращения: 27.04.2020).

11. Литий-ионные аккумуляторы производства компании «Лиотех» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studref.com/458894/tehnika/litij\\_ionnye\\_akkumulyatory\\_proizvodstva\\_kompanii\\_lioteh](https://studref.com/458894/tehnika/litij_ionnye_akkumulyatory_proizvodstva_kompanii_lioteh) (дата обращения: 27.04.2020).

## THE CHOICE OF THE STORAGE BATTERY ON THE BASIS OF BATTERIES FOR THE KALININGRAD POWER SYSTEM

A.A. Rzay, student  
e-mail: rzaynastya@gmail.com  
Kaliningrad State Technical University

V.F. Beley, doctor of technical sciences, professor  
e-mail: vbeley@klgtu.ru  
Kaliningrad State Technical University

The paper analyzes the Kaliningrad power system in connection with its transition to Autonomous operation in 2025. The results of developments in the field of energy storage based on batteries are presented and their functionality is shown. It is shown that the use of an electric power storage device in the Kaliningrad power system will significantly increase its reliability and allow the use of renewable energy sources. Based on the analysis of the operation modes of the Kaliningrad region power system: the storage capacity is calculated; the location of its connection to the Kaliningrad region power system is selected; the scheme of the storage device and its elements is developed. A method for calculating the power and capacity of a battery for an electric energy storage device is proposed.

**Key words:** *power storage, power station, capacity, renewable energy sources, power system*