

ВЫБОР НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ, АВТОНОМНО РАБОТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА¹

© 2023 г. А. Б. Тарасенко^а *, О. С. Попель^а, С. В. Мониин^б

^аОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

^бНаучно-производственное объединение “Лианозовский электромеханический завод”,
Дмитровское шоссе, д. 110, Москва, 127411 Россия

*e-mail: tarasenkoab@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

На примере микрогазотурбинной установки (МГТУ) типа С30 Capstone выполнен анализ различных вариантов применения современных накопителей электрической энергии в составе буферной батареи и проведено их сопоставление. Газовые микротурбины единичной мощностью от нескольких десятков до сотен киловатт появились на рынке в 70-х годах прошлого столетия и стали все более широко применяться в системах автономной и распределенной генерации. Их конкурентоспособность по сравнению с дизельными и газопоршневыми энергоустановками обеспечивается прежде всего достижением сопоставимых с конкурентами значений КПД в результате использования регенеративного термодинамического цикла с высокоэффективными рекуперативными теплообменниками и высокооборотного турбогенераторного оборудования с воздушными подшипниками вместо масляных. Это значительно снижает эксплуатационные требования к периодичности (частоте) обслуживания энергоустановок, а также расширяет возможности применения различных видов жидких и газообразных топлив (политопливность), доступных в районе эксплуатации. Важная особенность микрогазотурбинных энергоустановок – звено постоянного тока и буферный накопитель электрической энергии в схеме выдачи мощности, которые позволяют эффективно управлять параметрами тока (регулировать их) без изменения частоты вращения двигателя. В традиционных вариантах таких энергоустановок в качестве буферного накопителя энергии, как правило, используются свинцово-кислотные аккумуляторы. Авторами рассмотрены варианты их замены на суперконденсаторы и аккумуляторы различных видов с учетом таких эксплуатационных факторов, как преобладание в течение большей части года низких температур окружающей среды (арктические условия), трудности в логистике, условия обслуживания энергоустановок этих аккумуляторов и их немалая стоимость. Выполнены оценки массогабаритных характеристик накопителей на основе разных типов элементов с акцентом на изделия российских производителей. Сделан вывод, что при эксплуатации МГТУ в суровых климатических условиях в их буферном накопителе целесообразно использовать суперконденсаторные батареи, несмотря на их малую удельную энергоемкость и высокую стоимость.

Ключевые слова: Арктическая зона России, микрогазотурбинная установка, аккумулятор, суперконденсатор, буферный накопитель, распределенная генерация

DOI: 10.56304/S0040363623120123

Микрогазотурбинные установки становятся все более популярными среди потребителей, имеющих доступ к различным видам жидких и газообразных углеводородов [1]. Использование местных видов топлива (биогаза, генераторного газа и др.) и сжиженного природного газа вместо дизельного топлива – один из трендов современной автоном-

ной и распределенной энергетики [2]. Это позволяет повысить надежность энергоснабжения и снизить его стоимость, особенно для потребителей, не подключенных к централизованным сетям [3]. Принципиальным отличием высокооборотных (до 100 тыс. мин⁻¹) микрогазотурбинных энергоустановок от других тепловых двигателей является применение в них воздушных подшипников, допускающих длительную работу агрегата без замены смазочного масла, которую необходи-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ОИВТ РАН на 2023 г. (госзадание № 075-01129-23-00 от 29.12.2022).

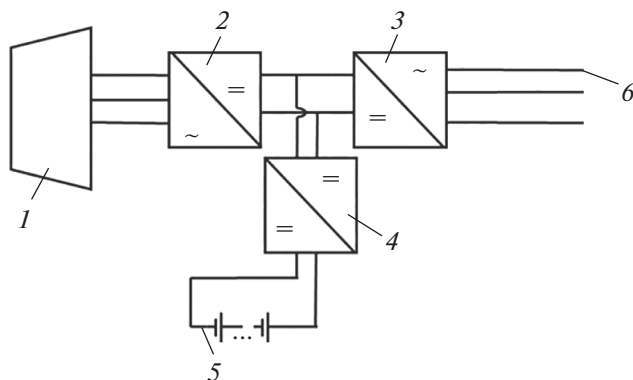


Рис. 1. Схема выдачи электрической мощности для энергоустановки на основе МГТУ [5].
1 – генератор МГТУ; 2 – выпрямитель; 3 – инвертор; 4 – согласующий преобразователь буферного накопителя электрической энергии; 5 – буферный накопитель электрической энергии; 6 – потребитель электроэнергии

мо систематически проводить для дизель-генераторов и газопоршневых машин [4]. Из-за высоких оборотов вала двигателя МГТУ невозможна установка редуктора для поддержания частоты вращения генератора через обороты двигателя, как в большинстве других тепловых машин. Вместо этого используется звено постоянного тока, включающее в себя выпрямитель и инвертор (рис. 1). Важное достоинство такого решения в сравнении с большинством дизель-генераторов – более равномерный удельный расход топлива в широком диапазоне изменения мощности. В составе агрегата присутствует буферный накопитель электрической энергии, который встраивается в звено постоянного тока через двунаправленный согласующий преобразователь.

Следует отметить, что применение воздушных подшипников ограничивает число пусков и остановов энергоустановки за время ее эксплуатации, что еще более повышает значение буферного накопителя. Именно он компенсирует переходные процессы при запуске и останове двигателя, принимает нагрузку при включении, а также способствует минимизации зависимости удельного расхода топлива от мощности. Для силовых установок современных морских судов рассматривается возможность комбинировать газовую микротурбинную установку на дизельном топливе с компенсирующим переходные процессы магнетическим накопителем [6]. Необходимо отметить, что наличие звена постоянного тока существенно облегчает интеграцию газовых микротурбин в различные гибридные энергоустановки, содержащие накопители энергии и фотоэлектрические преобразователи [7].

Традиционно в стационарных энергетических установках с МГТУ применяются свинцово-кис-

лотные аккумуляторные батареи. В состав большинства предлагаемых на рынке установок типа С30 Capstone входит свинцово-кислотная батарея суммарным напряжением аккумуляторов 220 В и емкостью 10–20 А · ч. Такие батареи используются в энергетике довольно широко: они недороги и хорошо сопрягаются с распространенной силовой электронной преобразовательной аппаратурой. К их недостаткам относятся относительно небольшой ресурс (как по циклам заряда-разряда, так и по срокам хранения), низкие массогабаритные характеристики (большая масса и значительные размеры) и высокий уровень саморазряда [8]. Проблемы с надежностью при использовании свинцово-кислотных батарей возрастают при эксплуатации энергоустановок в условиях низких температур и глубоких разрядов накопителя. Глубокие разряды могут быть вызваны как длительными транспортировкой и пусконаладочными работами на агрегате, так и ошибками эксплуатационного персонала.

Нахождение глубоко разряженной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи при температурах окружающей среды от -40 до -60°C является вполне реалистичным сценарием применения микротурбинных энергоустановок в суровых климатических условиях, ведущим к ее полному выходу из строя. Поиск альтернативных вариантов комплектации буферного накопителя, обеспечивающей надежное функционирование установки в условиях постоянного воздействия низких температур при длительных интервалах между операциями сервисного обслуживания и не требующей высокой квалификации эксплуатационного персонала, с учетом указанных обстоятельств весьма актуален. При этом в данной работе акцент делается на использовании оборудования, присутствующего на российском рынке.

КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В настоящее время на рынке кроме свинцово-кислотных аккумуляторов, которые были первыми промышленно освоенными элементами батарей, имеется большое количество систем аккумулирования электрической энергии. Некоторые из них, например проточные редокс-батареи, литий-серные и литий-воздушные аккумуляторы, еще не вышедшие из стадии пилотного производства, в рамках данной работы не рассматриваются.

Россия – одна из немногих стран, сохранивших производство щелочных аккумуляторов. Основными их производителями являются Велюкский аккумуляторный завод “Импульс” [9] и саратовский Завод автономных источников тока (ЗАИТ) [10]. Первый никель-кадмиевый элемент со щелочным электролитом был создан шведским химиком В. Юнгнером в 1899 г. [11]. В зависимости

от конструкции, режима работы (длительные или короткие разряды) и чистоты применяемых материалов их срок службы составляет от 100 до 9000 циклов заряда-разряда, а удельная энергоемкость равна 45–65 Вт · ч/кг. Современные (ламельные) промышленные никель-кадмиевые батареи могут служить 20–25 лет. Никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd) — единственный вид аккумуляторов, которые могут храниться разряженными. Для аккумуляторов данного типа характерны также устойчивая работа при пониженных (до -20°C) температурах и малый нагрев при заряде и разряде высокими токами при применении щелочного электролита.

Основной недостаток этих аккумуляторов — так называемый эффект памяти: когда зарядке подвергается не полностью разряженный аккумулятор, его рабочее напряжение снижается из-за формирования дополнительного двойного электрического слоя на электродах, как бы “запирающего” остаточную емкость. Многократное повторение этого процесса приводит к выходу аккумулятора из строя, поэтому аккумуляторы данного типа целесообразно применять в системах, для которых характерен глубокий разряд. Контроллер заряда для таких аккумуляторов должен периодически осуществлять циклы полного заряда-разряда для сохранения его характеристик. Следует отметить, что эффект памяти проявляется на ламельных, а не на прессованных электродах [12].

Аккумуляторы данного типа нашли широкое применение в бортовых источниках питания различных транспортных средств: от электромобилей и радиоуправляемых моделей до летательных аппаратов [13] — главным образом благодаря повышенным, относительно свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, удельным характеристикам, устойчивости к низким температурам и высоким допустимым токам заряда и разряда. В России основным потребителем подобных аккумуляторов является железнодорожный транспорт: как магистральный, так и цеховой, включая шахтный.

Нобелевская премия по химии в 2019 г. была присуждена Джону Гуденафу (США), Стэнли Уиттингему (Великобритания) и Акире Йосино (Япония) за разработку литий-ионных аккумуляторов [14]. Каждый из трех исследователей не только внес существенный вклад в фундаментальные основы химии твердого тела, но и поспособствовал разработке и внедрению литий-ионных аккумуляторов, нашедших широкое применение в XXI в. Такие аккумуляторы имеют принципиальные отличия от других электрохимических накопителей энергии: в щелочных, свинцово-кислотных аккумуляторах и проточных редокс-накопителях происходят химические изменения веществ в жид-

ких или твердых фазах, меняется степень окисления химических элементов. В них обычно обратимый переход происходит между чистым элементом и его оксидом или гидроксидом либо солями. В литий-ионных аккумуляторах классических химических превращений не происходит — изменения претерпевает кристаллическая решетка электродного материала. При этом ионы электролита, частично пропитывающего электроды, встраиваются в эту решетку [15].

К коммерциализации аккумуляторов на основе литированного графита и LiCoO_2 в качестве катодного материала первой приступила компания Sony. В это время как раз получило активное развитие производство ноутбуков и сотовых телефонов, которые и стали главными потребителями технологической новинки. Однако проблемы безопасности дали знать о себе практически сразу же: пожары и взрывы гаджетов на заре освоения технологии случались довольно часто. В то же время альтернативы катодному материалу LiCoO_2 долгое время не было. Новое решение предложил снова Джон Гуденаф. На этот раз в качестве катодного материала выступил литированный фосфат железа (LiFePO_4 — LFP) [16]. Долгое время на него не обращали внимания — его бесперспективность объяснялась высоким электрическим сопротивлением. Однако покрытие частиц LFP тонким слоем углерода, осуществляемое обычно химическим разложением органических прекурсоров при синтезе материала (например, гидротермальное окисление глюкозы), обеспечило хороший транспорт электронов и позволило создать эффективный катодный материал, на первых порах более дешевый и безопасный, чем кобальтат лития. В самом деле, при синтезе LFP используются вполне доступные фосфаты (входя в состав сельскохозяйственных удобрений), глюкоза или подобные ей органические вещества. Применение солей никеля и кобальта, имеющих более высокую стоимость, не требуется. По сравнению с двумерным кобальтатом лития и приходящими ему на смену смешанными оксидами LiNMC|NCA ($\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$), перенос ионов в LFP с кристаллической структурой шпинели происходит только в одном направлении, что ограничивает энергоемкость материала. При этом из-за меньших, чем у слоистых оксидов, структурных изменений в процессе интеркаляции и деинтеркаляции ионов материал более стабилен, долговечен и допускает работу при высоких токах заряда и разряда. Отсутствие выделения кислорода при разрушении структуры и эффекта теплового разгона делает материал существенно более безопасным, чем материалы на основе кобальта [17]. Вместе с тем, значительное снижение удельной энергоемкости (около 150 Вт · ч/кг против 250 Вт · ч/кг у лучших образ-

цов никель-кобальтовых материалов) быстро привело к его постепенному вытеснению последними, так как в настоящее время электро-мобили являются основными потребителями подобных аккумуляторов.

Аккумуляторы системы $\text{LiC}_6\|\text{LiNMC}$ вобрали в себя все самое лучшее, что могли дать комбинации на основе оксидов. На сегодняшний день данная система доминирует среди материалов литий-ионных аккумуляторов, поскольку обеспечивает наивысшую удельную энергоёмкость аккумулятора в расчёте на единицу как массы, так и объёма. Тенденция развития этой системы заключается в периодическом повышении доли никеля — основного материала, обеспечивающего интеркаляцию ионов лития. Кобальт и марганец в этом случае играют роль стабилизаторов структуры и улучшают транспорт ионов, одновременно не допуская формирования крупных кластеров никеля, что привело бы к ещё большему росту пожаро- и взрывоопасности системы. Начало работ соответствовало долям 1 : 3/1 : 3/1 : 3 в отношении никеля, кобальта и марганца в составе материала. Далее появились системы состава 6 : 2 : 2, теперь главной целью является достижение соотношения 8 : 1 : 1 [18].

В целом, использование электрохимической системы $\text{LiC}_6\|\text{LiNCA/NMC}$ вызывает много вопросов с точки зрения как ресурса, так и безопасности. Отдельно следует упомянуть высокую пожаро- и взрывоопасность $\text{LiC}_6\|\text{LiNCA/NMC}$, в которых все компоненты: анод, катод и электролит — являются горючими веществами, сопоставимыми по этому показателю с исходным LiCoO_2 . Из-за опасных инцидентов (29 пожаров в 2016 г. на подстанциях в Южной Корее, буферные аккумуляторные батареи которых были оснащены аккумуляторами компаний Samsung SDI и Kokam [19]) темпы внедрения таких аккумуляторов на электротранспорте и в стационарных областях снизились.

В начале 2000-х годов на рынке появились коммерческие аккумуляторы американской фирмы Altair Nano [8] с альтернативными углеродными анодными электродами на основе наноструктурированного титаната лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ — LTO). Позже их разработку и производство начали китайская компания Microvast, создавшая производство и в США, и японская Toshiba. В отличие от графита, материал не обладает каталитической активностью по отношению к электролиту, а также способен интеркалировать ионы лития при низких температурах, в то время как на графитовых электродах такой режим работы приводит к росту дендритов на анодном электроде с последующим коротким замыканием элемента [20].

Малая доля атомов лития в структуре такого анода снижает напряжения в материале при ин-

теркаляции и деинтеркаляции лития. Это обеспечивает как высокие ресурсные характеристики аккумулятора (различными производителями заявлено от 10 до 20 тыс. циклов заряда и разряда), так и возможность работы при отрицательных температурах. Расплатой за эти параметры является снижение удельных характеристик (прежде всего массовых) до уровня 70–90 Вт · ч/кг, что незначительно превосходит никель-кадмиевые аккумуляторы. Не последнюю роль играют и вопросы безопасности: в плане устойчивости к самовозгоранию и взрыву ЛТО существенно превосходит конкурентов [21].

Суперконденсаторы, которые также называют ультраконденсаторами, ионисторами или молекулярными накопителями, представляют собой источники мощности. Хотя они и относятся к химическим источникам тока, в данных устройствах протекают преимущественно физические процессы заряда и разряда двойного электрического слоя, сформированного ионами электролита, с одной стороны, и электронами твердофазного электрода — с другой. Теоретически, при нормальной эксплуатации в устройстве не происходит химических реакций. Отличие такого устройства от обычного электролитического конденсатора связано с его большой электрической ёмкостью, обусловленной использованием высокопористых твердофазных электродов и жидкого электролита, проникающего в поры. Эффекты, связанные с двойным электрическим слоем, исследовались и описывались довольно давно. Модели такого слоя построены Гельмгольцем, Перреном, Гуи, Штерном и другими учеными физиками и химиками XIX–XX вв. [22].

В связи с малой энергоёмкостью суперконденсатор не может сравниться с аккумуляторами по запасаемой энергии. Однако это же свойство позволяет ему иметь весьма высокий циклический ресурс (практически все производители заявляют об 1 млн циклов заряда-разряда), глубина разряда определяется только входным напряжением применяемых согласующих преобразователей, а диапазон рабочих температур, в котором свойства изделия практически не изменяются, достаточно широк (не происходит замедления реакций при снижении температуры, зарядно-разрядные характеристики определяются в основном свойствами электролита). Например, изделия южнокорейских фирм LS-Mtron и NEC при температуре -40°C теряют только несколько процентов ёмкости в сравнении с комнатной температурой безотносительно к рабочим токам, в то время как для литий-титанатных аккумуляторов такие температуры существенно ограничивают разрядный ток, и в этом случае их доступная энергоёмкость снижается до 40–60% номинальной [23].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКОВ АККУМУЛЯТОРОВ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ОБЩЕГРАЖДАНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ В РОССИИ

Среди никель-кадмиевых аккумуляторов наиболее адекватными для решения поставленных в данной статье задач представляются изделия ЗАИТ. Серия аккумуляторов KGL предназначена для применения именно в стационарной энергетике и, по информации завода-производителя, не обладает эффектом памяти. Ресурс таких аккумуляторов может достигать 4000 циклов, а срок хранения составляет 10 лет [24]. При оценке стоимости единичного аккумулятора этого типа ориентиром являются данные компании “Курс” — одного из дистрибьюторов ЗАИТ [25]. Великолукский завод “Импульс” выпускает никель-кадмиевые аккумуляторы емкостью от 55 до 375 А · ч и никель-железные — емкостью от 150 до 500 А · ч. Однако аккумуляторы серии КР имеют открытую конструкцию, предполагающую свободное удаление продуктов электролиза воды, что требует ее периодического долива и специальной вентиляции. Ламельная технология электродов не позволяет нивелировать эффект памяти. Оба эти обстоятельства не допускают эксплуатацию таких аккумуляторов в составе автономных малообслуживаемых энергоустановок.

Компания “Энергия” (г. Елец) предоставляет широкий ассортимент продукции, включая литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы с водным электролитом. Рынок сбыта последних весьма мал и сводится к единичным заказам от РЖД. Они используются также на складских погрузчиках вместо свинцово-кислотных тяговых батарей [26]. Возможность более быстрого заряда литий-ионных аккумуляторов и их ресурс более 3000 циклов позволяют им успешно конкурировать со свинцово-кислотной системой. В данный момент на рынке предлагаются аккумуляторы типоразмера 18650 ($\text{LiC}_6\parallel\text{LiNMC}$) емкостью от 0.75 до 3.0 А · ч. Они допускают токи до 2С, заряд при температуре от 0 до 45°C и разряд при температуре от –20 до 60°C. Также представлены аккумуляторы той же системы типоразмера 21700, емкостью 4.5 А · ч с рабочим зарядным током 1С и разрядным 3С. В обоих случаях гарантийная заявленная наработка соответствует 500 циклам. Стоимость аккумуляторов типоразмера 21700 у дистрибьюторов может достигать 800 руб. Литий-железофосфатные аккумуляторы призматического форм-фактора выпускаются в двух вариантах — емкостью 72 и 100 А · ч. Нарботка на отказ составляет более 3000 циклов, заряд аккумулятора может происходить при температуре от 0 до 55°C, а разряд — при температуре от –20 до 55°C. Цена аккумулятора емкостью 72 А · ч — около 5000 руб.

Компания НЭТЕР (г. Казань) поставляет на рынок широкий ассортимент литий-ионных аккумуляторов, ориентированных на общегражданское применение. Доступны все варианты катодных и анодных систем, производство организовано в Китае, включая морозостойкие аккумуляторы с LiNMC -катодом, в том числе типоразмера 18650. Существует возможность изготовления аккумуляторов и батарей по техническому заданию заказчика. Каталог этой компании весьма обширен и включает аккумуляторы с током перегрузки до 30С и емкостью от 0.75 до 400.00 А · ч [27]. У компании НЭТЕР ранее закупались аккумуляторы системы $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}\parallel\text{LiNMC}$ (оригинальная марка SchenQuan) и $\text{LiC}_6\parallel\text{LiNMC}$. Цена с учетом доставки составляет около 600 руб/(Вт · ч) для первого типа и около 900 руб/(Вт · ч) для второго. При температуре –40°C и десятичасовом разряде отдаваемая энергоемкость равна 77 и 81% номинальных значений соответственно для каждого типа аккумулятора.

Без учета систем с водным электролитом, выпускаемых компанией “Энергия” и заведомо проигрывающих по удельным показателям неводным системам, в России работают четыре предприятия, осуществляющих сборку и продажу единичных элементов и суперконденсаторных модулей.

Компания “Титан Пауэр Солюшн” (Москва) активно взаимодействует с ведущими зарубежными производителями суперконденсаторных элементов и предлагает элементы от брендов Maxwell, Sech, SPSCap электрической емкостью от 3 до 3000 Ф, выполненные в цилиндрической форме. Напряжение на таких элементах может составлять от 2.70 до 2.85 В (электролит на основе ацетонитрила). Предприятие также предлагает большой спектр модулей на основе суперконденсаторов. Присутствуют модули с рабочим напряжением 105, 160 и 360 В (электроемкость равна 8.0, 4.5 и 2.4 Ф соответственно) [28].

Компания “Ультраконденсаторы Феникс” (Москва) взаимодействует с южнокорейской фирмой LS-supercapacitors, которая по материаловедческим аспектам, связанным с внедрением новых электролитов, добилась больших успехов, нежели Maxwell. Представлены цилиндрические элементы электроемкостью от нескольких десятков до 3000 Ф, напряжение единичного изделия составляет от 2.8 до 3.0 В. Элементы малой емкости адаптированы к монтажу на печатную плату. Цена элемента напряжением 3 В и электроемкостью 3000 Ф около 6000 руб. [29].

Компания ТЭЭМП (Товарищество энергетических и электромобильных проектов, Московская обл.) организационно включает в себя компании ТЭЭМП (исследования и разработки) и “ТЭЭМП-Производство” (собственно завод по

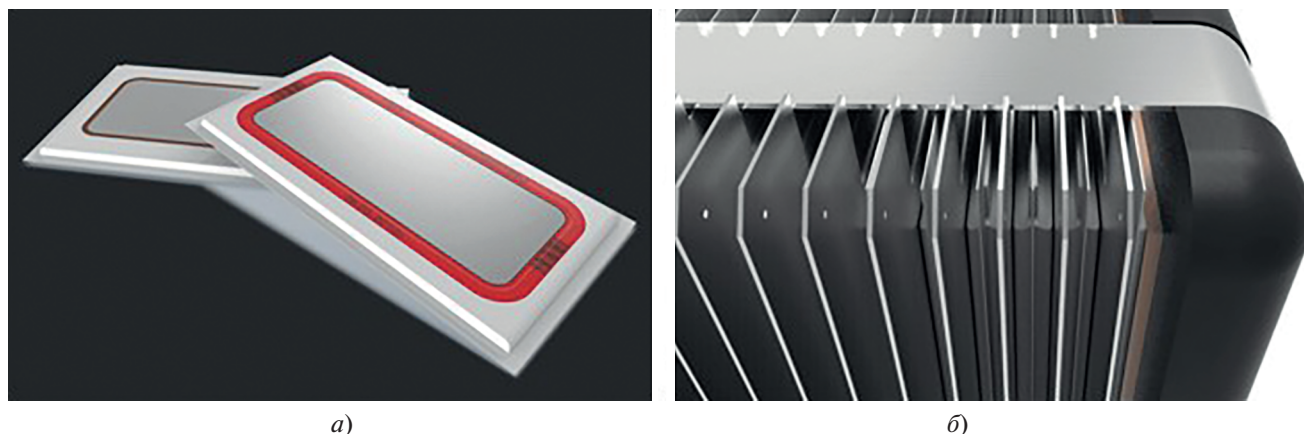


Рис. 2. Ячейки суперконденсаторов компании ТЭЭМП (а) и суперконденсаторный модуль в сборе (б) [31]

сборке изделий в г. Химки) [30]. Основной элементов и суперконденсаторных модулей служит своеобразная призматическая конструкция (рис. 2). Вместо 40–50 точек приварки фольги к внешнему борну, традиционно используемых в цилиндрической конструкции, здесь внешний алюминиевый токосъемник механически обжимает все выступающие за пределы катушки участки плюсовой или минусовой фольги электрода, не затрагивая саму электродную структуру. Внешними токосъемниками элемента в итоге являются два окна в широких торцах призмы, свободные от ламината. Электрическая емкость элементов составляет 1500–5000 Ф.

Проблема токосъема с элемента на высоких мощностях решена, однако сложности вызывает коммутация данных элементов в батарею, так как необходимо механически плотно совместить одну с другой две плоские поверхности. Для улучшения токосъема используются промежуточные

алюминиевые пластины. Они же выступают в качестве радиатора охлаждения батареи и основы для крепежа плат поэлементного контроля напряжений. Такие сложности приводят к тому, что ТЭЭМП на рынке предлагает только комплектные модули.

Стоимость изделий компании ТЭЭМП с учетом малых объемов выпуска может достигать 30–40 дол/(Вт · ч). Компания также имеет рецептуры низкотемпературных электролитов, подтвердивших свою работоспособность при температуре -60°C [32].

Компания “Элеконд” (г. Сарепул) специализируется на производстве электролитических конденсаторов. Новым направлением, активно развиваемым ею в последние годы, стало производство суперконденсаторов [33]. По электродам и электролитам организовано взаимодействие с южнокорейскими и китайскими компаниями. В линейке присутствуют цилиндрические суперконденсаторы электроемкостью до 4700 Ф и рабочим напряжением 2.7 В. Компанией “Элеконд” предложены и призматические варианты электроемкостью 3300 и 4700 Ф, похожие по конструкции на суперконденсаторы ТЭЭМП, однако в них более удачно решена проблема межэлементной коммутации – к токосъемникам обоих электродов приварены внешние металлические пластины, выведенные на противоположные торцы призмы. То есть при сборке батареи коммутация осуществляется посредством последовательной или параллельной ультразвуковой сварки этих пластин (рис. 3).

Для перечисленных суперконденсаторов всех четырех поставщиков нижний предел диапазона рабочих температур достигает -50°C .



Рис. 3. Призматический суперконденсатор “Элеконд”

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

По данным компании “БПЦ-Инжиниринг”, длительное время являвшейся основным российским дистрибьютором микротурбин Capstone, установки С30 снабжены батареей из свинцово-кислотных аккумуляторов, используемой для запуска установки и быстрого включения нагрузки. Во время набора мощности газовой микротурбиной с темпом около 1 кВт/с питание потребителя осуществляется от этой аккумуляторной батареи.

В рамках расчета, выполненного в настоящей работе, предполагалось, что накопители обеспечивают прием нагрузки во время запуска турбины С30 согласно графику, представленному на рис. 4. Исходя из данных о минимальном напряжении на батарее 170–180 В, приведенных в руководстве пользователя С30, принималось, что штатное напряжение звена постоянного тока, широко используемое в стационарных энергосистемах, составляет 220 В. Реальная зависимость близка к показанной на графике, но ее характер будет экспоненциальным, поскольку напряжение на батарее не будет равным 220 В в течение всего процесса запуска.

Интегрирование мощности по времени дает значение энергии всего 0.13 кВт·ч, однако в переходных режимах ключевым критерием для выбора накопителя является не столько отдаваемая энергия, сколько требуемый ток нагрузки.

Параметры рассмотренных конкретных аккумуляторов и суперконденсаторов представлены в табл. 1 и 2. При этом для суперконденсаторов емкость выбиралась максимальной, так как для этих устройств в принципе характерны малые энергоемкости и только максимизация емкости единич-

ного элемента способна привести к снижению их общего числа. По этой же причине выбирались суперконденсаторные элементы с наибольшим рабочим напряжением, для аккумуляторов – емкостью близкой к 10–20 А·ч (там, где это было возможно при удовлетворении требований по максимально допустимому току разряда). Готовые батареи не рассматривались, чтобы обеспечить большую свободу при оптимизации емкости и сопряжении встроенной системы контроля с системой управления установкой.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ВЫБОРА
НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Предполагается, что пусковой режим является самым тяжелым для накопителя из-за выдаваемых тока и мощности, так как в этом режиме и установка, и потребитель запитаны только от буферного накопителя. По мере раскрутки микротурбины она принимает на себя часть мощности.

Для работы в составе буферной батареи накопитель должен удовлетворять двум требованиям. Первое заключается в обеспечении энергопитания собственных нужд микротурбинной установки и потребителя до ее выхода на номинальный режим, при этом требуемая энергия равна

$$W_n = \int_0^T [P_{max} - P(t)] dt, \tag{1}$$

где T – период выхода турбины на режим, с; P_{max} – ее максимальная мощность (30 кВт для агрегата С30), кВт; $P(t)$ – изменяющаяся мощность турбины во время выхода на режим, кВт, при скорости набора мощности 1 кВт/с для С30.

С учетом не только подхвата нагрузки потребителя, но и питания собственных нужд установки требуемая энергия увеличена вдвое [4]. Итоговое значение требуемой энергоемкости накопителя для С30 Capstone составляет 0.26 кВт·ч.

Второе требование состоит в обеспечении выдачи тока, максимальное значение которого I_{max} в первый момент времени равно отношению P_{max} к напряжению в звене постоянного тока (220 В). Для С30 Capstone это значение составляет 136 А. С учетом этого число параллельно соединенных элементов не может быть меньше целого значения:

$$N_1 = I_{max} / I_{el}, \tag{2}$$

где I_{el} – предельный ток единичного элемента (аккумулятора или суперконденсатора), А.

Количество последовательно соединенных элементов равно отношению рабочего напряжения в звене постоянного тока накопителя к рабочему напряжению элемента (N_2). Если $N_2 N_1 W_1 < W_n$, то количество параллельно соединенных элементов

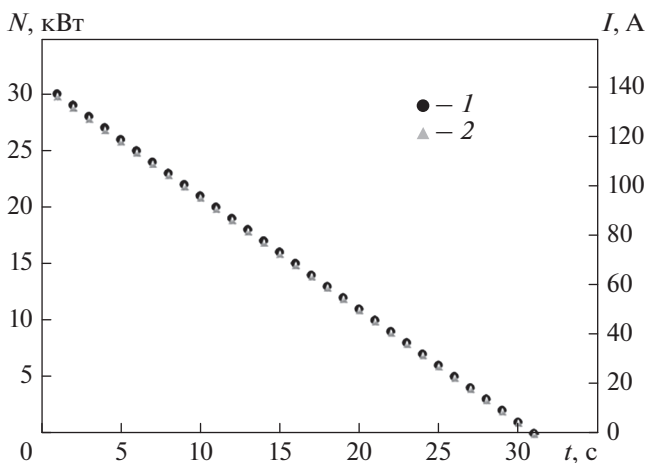


Рис. 4. Расчетная зависимость от времени t отдаваемых буферным накопителем мощности N и тока I для запуска микротурбины С30 Capstone. 1 – мощность; 2 – ток

Таблица 1. Параметры аккумуляторных элементов, используемых в расчетах

Параметр	KGL 160P, ЗАИТ (г. Саратов)	21700 NMC, “Энергия” (г. Елец)	LFP 72 А · ч, “Энергия” (г. Елец)	Schen Quan 10Ah ЛТО, НЭТЕР (г. Казань)	18650-3300 (Т40) NMC, НЭТЕР (г. Казань)
Напряжение, В:					
заряда	1.45	4.20	3.65	2.70	4.20
разряда	1.0	2.8	2.5	1.7	2.8
рабочее	1.2	3.6	3.2	2.3	3.6
Емкость, А · ч	160.0	4.5	72.0	10.0	2.7
Ток, А:					
номинальный	144.0	0.9	16.0	20.0	3.0
максимальный	160.0	4.5	160.0	30.0	6.0
Емкость на максимальном токе, А · ч	Нет данных	2.80	2.50	Нет данных	1.68
Масса, кг	8.500	0.090	1.900	0.285	0.045
Объем, см ³	5062	25	953	117	17
Ресурс, циклов	4000	500	3000	10000	200
Температура минимальная, °С	-27	-20	-20	-40	-40
Цена, руб.	10000	600	5000	7000	1600
Допустимая глубина разряда, %	100	70	80	90	80

Таблица 2. Параметры суперконденсаторных элементов, использованных в расчетах

Параметр	Суперконденсаторные элементы	
	“Феникс”, 3 В, 3000 Ф (Москва)	“Элеконд к58-31” (г. Сарепул)
Напряжение, В:		
заряда	3.20	2.85
разряда	1.1	1.0
рабочее	3.0	2.7
Электрическая емкость, Ф	3000	4700
Ток, А:		
номинальный	2600	500
максимальный	2600	500
Энергоемкость, Вт · ч	3.8	4.7
Масса, кг	0.525	0.8
Объем, см ³	390	656
Ресурс, циклов	100000	100000
Температура минимальная, °С	50	-60
Цена, руб.	5500	10000*

* Оценочная цена (опытные образцы доступны только по запросу).

должно быть равно не N_1 , а $N_3 = W_n / (N_2 W_1)$. Здесь W_1 – энергоемкость единичного элемента суперконденсатора, определяемая как

$$W_1 = \frac{1}{2} C (U_2^2 - U_1^2), \quad (3)$$

где C – электрическая емкость суперконденсаторной батареи, Ф; U_1, U_2 – нижняя и верхняя границы рабочего диапазона напряжений, В.

Выбор этих границ может происходить по двум критериям. Первый обусловлен максимально допустимым напряжением на единичном суперконденсаторном элементе, тогда верхняя граница диапазона совпадает с этим значением, а нижняя равняется его половине. Другой подход следует использовать, когда необходимо сопрягать суперконденсаторную батарею с существующей преобразовательной техникой, адаптированной, как правило, под свинцово-кислотные аккумуляторы. В этом случае U_2 снова представляет собой максимально допустимое напряжение на единичном элементе, а U_1 равняется отношению нижней границы рабочего диапазона напряжений преобразователя к количеству последовательно соединенных элементов в батарее. При этом значение запасаемой энергии обычно оказывается меньше паспортного, однако учитывается тот факт, что преобразователь не может полностью разрядить суперконденсаторную батарею.

Для аккумуляторных батарей W_1 определяется следующим образом:

$$W_1 = \frac{dod}{100} U_{op} Q_{max}, \quad (4)$$

где dod – допустимая по ресурсным показателям глубина разряда аккумулятора, %; U_{op} – рабочее напряжение, В; Q_{max} – номинальная емкость аккумулятора, А · ч.

Общее число единичных элементов в составе накопителя вычисляется по формуле

$$N = N_1 \max(N_2, N_3). \quad (5)$$

Стоимость накопителя (капитальные затраты) равна

$$B = NB_1, \quad (6)$$

где B_1 – стоимость единичного элемента, руб.

В расчетах не учитывается стоимость согласующего преобразователя, но так как конечной целью расчета является сравнение различных накопительных технологий, то можно предположить, что эта стоимость одинакова для всех технологий, поскольку она определяется, в основном, мощностью потребителя, которая в процессе расчета не меняется.

Существенный недостаток свинцово-кислотных аккумуляторов – малый срок службы как в ре-

жиме ожидания, так и в режиме циклирования относительно новых систем аккумулирования. Чтобы учесть данный фактор, расчет ведется с горизонтом в 20 лет. Грубая оценка вклада ресурса элементов в стоимостные параметры накопителя (связана с затратами на замены вышедших из строя элементов батареи) может быть выполнена так:

$$C_{lf} = (20 / N_{cyc}) c_{el} / k_c, \quad (7)$$

где N_{cyc} – назначенный производителем ресурс одного элемента при заданных токе и глубине разряда, лет; c_{el} – стоимость элемента, руб.; k_c – коэффициент стоимостного совершенства батареи.

Иными словами, учитываются замены именно элементов, однако во внимание не принимается возможность циклирования этих элементов при переменной глубине разряда, а также влияние резких колебаний температуры окружающей среды. В случае источников бесперебойного, резервного и аварийного питания значения горизонта расчета в циклах и циклического ресурса элемента могут быть заменены на горизонт расчета и ресурс элемента в годах (часах).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов, представленные в табл. 3, продемонстрировали один из недостатков никель-кадмиевой системы – требуется огромное количество последовательно соединенных элементов в батарее из-за низкого напряжения на единичном элементе. Впоследствии данный фактор наряду с относительно низкими допустимыми токами определил огромные массогабаритные характеристики батареи, максимальные среди всех участников сравнения. Стоимость такого решения тоже достаточно велика. Наиболее компактными являются решения на основе литий-ионных аккумуляторов – прежде всего LiC₆||LiNMC, далее следуют LFP и LTO. По стоимости наиболее привлекательными представляются решения на основе отечественных литий-ионных аккумуляторов, однако они не обеспечивают устойчивой работы при очень низких температурах без внешнего обогрева. Следует также отметить, что ограничения по предельным токам заряда и разряда приводят к тому, что все аккумуляторные системы демонстрируют значительный запас емкости батареи, так как некоторая часть этой емкости набирается только для того, чтобы уложиться в допустимые диапазоны рабочего тока аккумуляторов.

В этой связи нужно обратить внимание на то, что для суперконденсаторов, в силу гораздо больших рабочих токов, такой запас минимален, что позволяет уменьшить массогабаритные параметры системы и превзойти все аккумуляторные ва-

Таблица 3. Результаты оценки параметров буферного накопителя электрической энергии для газовой микротурбинной установки мощностью 30 кВт

Параметр	21700 NMC, “Энергия” (г. Елец)	LFP 72 А · ч, “Энергия” (г. Елец)	Schen Quan 10 Ah LTO, НЭТЕР (г. Казань)	18650-3300 (T40) NMC, НЭТЕР (г. Казань)	KGL 160P, ЗАИТ (г. Саратов)	“Феникс”, 3 В, 3000 Ф (Москва)	“Элеконд к58-31” (г. Саранск)
Количество элементов, расположенных:							
последовательно	63	71	98	63	188	71	79
параллельно (энергоемкость)	1	1	1	1	1	3	2
последовательно (ток)	32	1	5	24	1	1	1
Всего	2016	71	490	1512	188	213	158
Масса, кг	272	202	209	102	2397	168	190
Объем, м ³	0.10	0.14	0.12	0.05	2.00	0.17	0.22
Стоимость, тыс. руб.	2800	820	7900	5600	4300	2700	3600
Энергоемкость фактическая, кВт · ч	20.3	16.4	11.3	9.1	27.1	0.8	0.7
Приведенная масса, кг/(кВт · ч)	13	12	19	11	89	208	255
Приведенный объем, м ³ /(кВт · ч)	0.005	0.009	0.011	0.006	0.074	0.216	0.292
Приведенная стоимость, тыс. руб/(кВт · ч)	140	50	700	1150	160	3300	5000
Количество замен элементов	0	0	0	2	0	0	0
Стоимость замен, тыс. руб.	0	0	0	4800	0	0	0

рианты, кроме специализированных аккумуляторов LiC₆||LiNMC T40, уступающих практически всем конкурентам по ресурсным характеристикам. Высокая приведенная стоимость энергии в данном случае компенсируется довольно низкой абсолютной стоимостью батареи с заданными параметрами (из-за отсутствия запаса емкости, вызванного низкими рабочими токами).

К дополнительным эксплуатационным достоинствам суперконденсаторов можно также отнести отсутствие чувствительности к глубокому разряду (допускаются хранение и транспортировка полностью разряженной и потому безопасной батареи) и слабую зависимость характеристик от

температуры батареи (на месте при проведении пусконаладочных работ на установке заряд батареи можно начинать от внешнего источника, не дожидаясь ее прогрева, в то время как для аккумуляторных систем прогрев может занять несколько суток). Поэтому система контроля и управления батареей для суперконденсаторов может быть построена исключительно на принципе пассивного выравнивания напряжения (ограничения) единичных элементов во избежание их перезаряда. Использование же активных систем балансировки напряжений для литий-ионных аккумуляторов в условиях удаленных населенных пунктов Арктической зоны России затруднено ввиду раз-

ряда батареи на собственные нужды такой системы или выхода из строя ее компонентов. При этом транспортировка батареи в полностью разряженном состоянии недопустима (что вызывает ограничения на перевозку авиационным транспортом). Ремонтпригодность изделия в таком случае определяется возможностью доставки на установку самих аккумуляторов, компонентов системы контроля и управления, а главное — специалистов требуемой квалификации.

Таким образом, использование суперконденсаторных батарей представляется оптимальным решением для буферных накопителей газовых микротурбинных установок, предназначенных для применения в Арктической зоне России и других удаленных районах.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены различные варианты комплектации буферного накопителя электрической энергии для микрогазотурбинных энергоустановок типа C30 Capstone, используемых в распределенной энергетике, в том числе с учетом возможного их применения для энергоснабжения потребителей, расположенных в Арктической зоне России. Для этого уточнены требования к подобным накопителям и проанализированы имеющиеся на рынке России современные аккумуляторы и суперконденсаторы.

2. Анализ проведен с учетом того, что ключевыми требованиями, предъявляемые к компонентам накопителей, используемых в малообслуживаемых газовых микротурбинных установках, являются надежность, устойчивая работа, возможность длительного хранения в условиях пониженных температур, простота логистики и обслуживания. Продемонстрировано, что для выбора компонентов накопителя принципиальное значение имеет не столько энергоемкость накопителя, сколько его способность отдавать и принимать высокие токи, характерные для режима запуска энергоустановки, в том числе при отрицательных температурах окружающей среды, например в Арктической зоне России.

3. Показано, что по критериям минимальной стоимости и наилучших массогабаритных характеристик оптимально использование литий-ионных аккумуляторов при условии обеспечения ими возможности осуществлять разряд при температурах до -40°C . При этом отмечено, что у всех рассмотренных аккумуляторов при низких температурах и повышенных значениях силы тока происходит существенная потеря емкости. Кроме того, для литий-ионных аккумуляторов необходимы более сложные системы контроля и управления и, как следствие, более квалифицированное обслуживание, при хранении и транс-

портировке они не должны разряжаться полностью, что требует повышенных мер безопасности и практически исключает их перевозку авиационным транспортом.

4. Учитывая отмеченные недостатки литий-ионных аккумуляторов, наиболее полно проявляющиеся при их эксплуатации в суровых климатических условиях Арктики, с целью минимизировать риски потери работоспособности микрогазотурбинных энергоустановок, комплектуемых буферными накопителями энергии, можно применять суперконденсаторы отечественных производителей. Их рабочие характеристики практически не изменяются в диапазоне температур до -50°C , подзарядку суперконденсаторной батареи можно проводить на месте пусконаладочных работ на установке непосредственно перед ее запуском в эксплуатацию, что значительно упрощает требования по транспортировке оборудования и его длительному хранению. При этом существенными недостатками такого технического решения являются малая, в сравнении с литий-ионными аккумуляторами, удельная энергоемкость и более высокая стоимость накопителя энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ayaz S.K., Altuntas O., Caliskan H.** Enhanced life cycle modelling of a micro gas turbine fuelled with various fuels for sustainable electricity production // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2021. V. 149. P. 111323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111323>
2. **A year-long study on PM_{2.5} and its carbonaceous components over eastern Himalaya in India: Contributions of local and transported fossil fuel and biomass burning during premonsoon / S. Mukherjee, M. Dutta, A. Ghosh, A. Chatterjee // *Environ. Res.* 2022. V. 212. Part D. P. 113546. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113546>**
3. **A multi-criteria decision-making framework for distributed generation projects investment considering the risk of electricity market trading / Z. Ji, X. Yu, W. Li, D. Niu // *J. Cleaner Prod.* 2023. V. 416. P. 137837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137837>**
4. **Micro gas turbine engine: A review / M.A.R. do Nascimento, L. de O. Rodrigues, E.C. dos Santos, E.E.B. Gomes, F.L.G. Dias, E.I.G. Velásques, R.A.M. Carrillo // <https://doi.org/10.5772/54444>**
5. **Косой А.С., Монин С.В., Синкевич М.В.** Современные подходы к исследовательским работам при создании микротурбинных энергетических комплексов // *Вестник Концерна ВКО “Алмаз — Антей”*. 2018. № 1. С. 72–79. <http://journal.almaz-antey.ru/jour/article/view/48/48>
6. **Mitigation effect of flywheel energy storage on the performance of marine gas turbine DC microgrid under high-power load mutation / Y. Li, Z. Ding, Y. Yu, Y. Liu // *Energy Reports.* 2023. V. 9. P. 1380–1396. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.052>**

7. **Ismail M.S., Moghavvemi M., Mahlia T.M.I.** Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of Palestine // *Energy Convers. Manage.* 2013. V. 75. Is. 6. P. 271–281.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.019>
8. **Попель О.С., Тарасенко А.Б.** Современные виды накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике // *Теплоэнергетика.* 2011. № 11. С. 2–11.
9. **Щелочные** и свинцово-кислотные аккумуляторы Великолукского аккумуляторного завода “Импупльс”. [Электрон. ресурс.] <https://akbluki.ru>
10. **Щелочные** аккумуляторы типа KGL, KL, KN, KH [Электрон. ресурс.] <http://zait.ru>
11. **Eguero T.** Ni-cadmium batteries // *Encyclopedia of applied electrochemistry* / Ed. by G. Kreysa, K.-I. Ota, R.F. Savinell. N.Y.: Springer, 2014. P. 1358–1363.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_147
12. **ГОСТ 15596-82.** Источники тока химические. Термины и определения. Описание заряда NiCd-аккумуляторов.
<https://files.stroyinf.ru/Data/217/21710.pdf>
13. **David G.V.** The Avionics Handbook. Ch. 10. Boca Raton (USA): CRC Press LLC, 2001. <https://avocado82.files.wordpress.com/2011/06/avionics-handbook.pdf>
14. **Scientific** Background on the Nobel Prize in Chemistry 2019 – Lithium-ion batteries. [Электрон. ресурс.] <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-chemistryprize2019-2.pdf>
15. **Goodenough J.** Rechargeable batteries: challenges old and new // *J. Solid State Electrochem.* 2012. V. 16. P. 2019–2029.
<https://doi.org/10.1007/s10008-012-1751-2>
16. **Tarascon J.M.** Key challenges in future Li-battery research // *Philos. Trans. Royal Soc. A Math., Phys. Eng. Sci.* 2010. V. 368. Is. 1923. P. 3227–3241.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0112>
17. **Huang Y.-H., Goodenough J.B.** High-rate LiFePO₄ lithium rechargeable battery promoted by electrochemically active polymers // *Chem. Mater.* 2008. V. 20. Is. 23. P. 7237–7241.
<https://doi.org/10.1021/cm8012304>
18. **Stabilizing** NMC 811 Li-Ion battery cathode through a rapid coprecipitation process / A.L. Lipson, B.J. Ross, J.L. Durham, D. Liu, M. Le Resche, T.T. Fister, L. Liu, K. Kim // *ACS Appl. Energy Mater.* 2021. V. 4. Is. 2. P. 1972–1977.
<https://doi.org/10.1021/acsaem.0c03112>
19. **Self-heating** ignition of open-circuit cylindrical Li-ion battery pile: Towards fire-safe storage and transport / Y. Liu, P. Sun, S. Lin, H. Niu, X. Huang // *J. Energy Storage.* 2020. V. 32. P. 101842.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101842>
20. **Development,** retainment, and assessment of the graphite-electrolyte interphase in Li-ion batteries regarding the functionality of SEI-forming additives / S.H. Beheshti, M. Javanbakht, H. Omidvar, M.S. Hosen, A. Hubin, J.V. Mierlo, M. Berecibar // *Science.* 2022. V. 25. P. 1–23.
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103862>
21. **Preparation** of lithium titanate nanoparticles assisted by an ion-exchange process and their electrochemical performance as anode materials for Li-ion batteries / H.-J. Hong, S.-Y. Lee, S. Kwon, B.-S. Kim, S. Yoon, I.-S. Park // *J. Alloys Compounds.* 2021. V. 886. P. 161296.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161296>
22. **The structure** of the electric double layer: Atomistic versus continuum approaches / S. Sakong, J. Huang, M. Eikerling, A. Groß // *Current Opinion in Electrochem.* 2022. V. 33. P. 100953.
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.100953>
23. **Limitations** for lithium-ion batteries application in engine cold cranking A.A. Fedotov, O.S. Popel, S.V. Kiseleva, A.B. Tarasenko // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 1787. P. 012065.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1787/1/012065>
24. **Аккумуляторы** серии KGL. [Электрон. ресурс.] http://www.zait.ru/akkumuljatory/akkumuljatory_serii_kgl
25. **Щелочной** никель-кадмиевый аккумулятор для электростанций KGL375P – ООО “Курс”. [Электрон. ресурс.] <https://zaokurs.ru/katalog/akkumulyatornyie-batarei/staczionarnyie-akkumulyatoryi/shhelochnoj-nikel-kadmievuyij-akkumulyator-dlya-elektrostantszij-kgl375p>
26. **Батареи** для складской клининговой и другой техники. <https://www.jsc-energiya.com/?ysclid=1k7ytz0ip0704660496>
27. **ООО “НЭТЕР”** – российский производитель литиевых аккумуляторов. [Электрон. ресурс.] <https://neter.pro>
28. **Решения** на базе суперконденсаторов и Li-ion батарей. [Электрон. ресурс.] <https://titanps.ru/?ysclid=1k7ухоб03v640141765>
29. **Суперконденсаторы** компании “Ультраконденсаторы Феникс” [Электрон. ресурс.] <https://www.ultracapacitor.ru/catalog/superkondensatory-feniks/superkondensatory>
30. **Продукция** компании ТЭЭМП. [Электрон. ресурс.] <https://teemp.ru/?ysclid=1k7yz73yrc111049302>
31. **Технология** и устройство суперконденсаторов компании ТЭЭМП. [Электрон. ресурс.] <https://teemp.ru/tehnologiya>
32. **Electrolyte** mixture based on acetonitrile and ethyl acetate for a wide temperature range performance of the supercapacitors / R.R. Galimzyanov, S.V. Stakhanova, I.S. Krechetov, A.T. Kalashnik, M.V. Astakhov, A.V. Lisitsin, A. Yu. Rychagov, T.R. Galimzyanov, F.S. Tabarov // *J. Power Sources.* 2021. V. 495. P. 229442.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229442>
33. **Суперконденсаторы** АО “Элеконд”. [Электрон. ресурс.] <https://elecond.ru/production/super>

The Selection of Energy Storage for a Micro–Gas-Turbine Plant Operating Autonomously in the Conditions of the North

A. B. Tarasenko^{a, *}, O. S. Popel^a, and S. V. Monin^b

^a *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*

^b *Research and Production Association Lianozovsky Electromechanical Plant, Moscow, 127411 Russia*

**e-mail: tarasenkoab@inbox.ru*

Abstract—On the example of a micro–gas-turbine plant (MGTU) of the C30 Capstone type, an analysis of various options for the use of modern electric energy storage devices as part of a buffer battery was carried out and compared. Gas microturbines with a unit capacity of several tens to hundreds of kilowatts appeared on the market in the 1970s and have become increasingly widely used in autonomous and distributed generation systems. Their competitiveness in comparison with diesel and gas reciprocating power plants is ensured primarily by achieving comparable efficiency values with competitors as a result of the use of a regenerative thermodynamic cycle with highly efficient recuperative heat exchangers and high-speed turbogenerator equipment with air bearings instead of oil bearings. This significantly reduces the operational requirements for the frequency of maintenance of power plants, and also expands the possibilities of using various types of liquid and gaseous fuels (polyfuel) available in the operation area. An important feature of micro–gas-turbine power plants is the DC link and the buffer storage of electrical energy in the power output circuit, which allow one to effectively control the current parameters (regulate them) without changing the engine speed. In traditional versions of such power plants, as a rule, lead-acid batteries are used as a buffer energy storage. The authors considered options for replacing them with supercapacitors and batteries of various types, taking into account such operational factors as the predominance of low ambient temperatures during most of the year (arctic conditions), difficulties in logistics, maintenance conditions for power plants of these batteries, and their considerable cost. The weight and size characteristics of drives are estimated based on different types of elements with an emphasis on products of Russian manufacturers. It is concluded that when operating an MGTU in harsh climatic conditions, it is advisable to use supercapacitor batteries in their buffer storage, despite their low specific energy consumption and high cost.

Keywords: Arctic zone of Russia, micro–gas-turbine plant, battery, supercapacitor, buffer storage, distributed generation