

Научная статья

УДК 621.31; 621.876.1

DOI 10.46418/3033-7852_2026_1_1_124-140

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В ЛИФТОВЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Владимир Олегович Дронов

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна; ООО «ЦЭПиКС»; Санкт-Петербург, Россия

© Дронов В. О., 2026

e-mail: vvvvdr@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено оценке технико-экономической целесообразности внедрения суперконденсаторных накопителей энергии (НЭ) в монтажную схему лифта в многоквартирных домах для повышения энергоэффективности. Актуальность работы обусловлена высокой пиковой нагрузкой от лифтов на электросети зданий и низкой эффективностью существующих систем рекуперации, возвращающих энергию в сеть без её аккумулирования. Цель статьи — комплексный анализ концепции размещения накопителя в шахте для локализации энергопотоков. На основе инженерных расчётов и моделирования построен «энергопортрет» типового безредукторного лифта (грузоподъёмность 1000 кг, 17 этажей). Проведён сравнительный анализ технологий накопления, обоснован выбор суперконденсаторов как оптимальных для частых циклов заряда-разряда. Рассчитан потенциал рекуперации, выполнено технико-экономическое обоснование с оценкой капитальных затрат, годовой экономии и срока окупаемости. В результате выкладки показано, что интеграция суперконденсаторного блока (на примере отечественных модулей НК-58-125М) в цепь постоянного тока привода позволяет аккумулировать 50 % рекуперированной энергии. Это снижает пиковую нагрузку от лифта на сеть здания на 40–60 % и обеспечивает экономию чистой электроэнергии до 29 % (около 1232 кВт·ч в год на один лифт). Основной экономический эффект достигается за счёт снижения платы за пиковую мощность. Однако срок окупаемости капитальных вложений (~500 тыс. руб.) составляет около 16 лет, что сдерживает массовое внедрение в жилом фонде при текущих тарифах. В целом концепция доказала техническую реализуемость; её потенциал для трансформации лифта из проблемного потребителя в стабилизирующий элемент электросети здания очевиден. Для широкого распространения необходимы снижение стоимости накопителей, расширение спроса на энергоэффективные системы и интеграция решения в проекты энергоэффективных «умных» зданий.

Ключевые слова: повышение энергоэффективности, накопители энергии, энергия торможения, суперконденсаторы, рекуперация кинетической энергии, пиковая нагрузка

Для цитирования: Дронов В. О. Концепция применения суперконденсаторов в лифтовых установках для повышения энергоэффективности // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 124–140. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_124-140

THE CONCEPT OF UTILIZING SUPERCAPACITORS IN ELEVATOR SYSTEMS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY

Vladimir Olegovich Dronov

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design; LLC "TsEPiKS";
St. Petersburg, Russia

e-mail: vvvvdr@mail.ru



ABSTRACT

This study evaluates the techno-economic viability of deploying supercapacitor energy storage in elevator shafts of apartment buildings to improve energy efficiency. The significance of this research stems from the substantial peak load elevators place on a building's power supply and the inefficiency of current regeneration systems that reinject energy directly into the grid, bypassing storage. The aim of this article is a comprehensive analysis of the concept of placing an energy storage system inside the elevator shaft to localize energy flows. Based on engineering calculations and simulation, an "energy portrait" of a typical gearless elevator (1000 kg load capacity, 17 floors) has been developed. A comparative analysis of energy storage technologies was conducted, justifying the selection of supercapacitors as optimal for frequent charge-discharge cycles. The study involved calculating the regeneration potential and performing a techno-economic analysis, with evaluation of capital costs, annual savings, and the payback period. The presented calculations demonstrate that integrating a supercapacitor bank (using domestic NK-58-125M modules as an example) into the drive's DC link enables the accumulation of up to 100 % of the recoverable energy. This reduces the peak load imposed by the elevator on the building's electrical grid by 40–60 % and yields net electricity savings of up to 29 % (approximately 1,232 kWh per year per elevator). The primary economic benefit is achieved by reducing the charge for peak power demand. However, the payback period for the capital investment (~500 thousand RUB) is approximately 16 years, which hinders its widespread adoption in residential buildings at current tariff rates. Overall, the concept has proven to be technically feasible; its potential to transform an elevator from a problematic consumer into a stabilizing element of the building's electrical grid is evident. To achieve broad deployment, three key requirements must be met: lowering the cost of storage systems, establishing a supportive regulatory environment, and incorporating the solution into smart, energy-efficient building designs.

Keywords: energy efficiency improvement, energy storage, braking energy, supercapacitors, kinetic energy recovery, peak load

For citation: Dronov V. O. (2026) The concept of utilizing supercapacitors in elevator systems to improve energy efficiency, *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 124–140. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_124-140

ВВЕДЕНИЕ

Рост энергопотребления и обновление экологических стандартов делают повышение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) ключевой задачей для устойчивого развития городов. Значительную долю в энергобалансе многоквартирных домов составляют инженерные системы, среди которых лифтовое оборудование является одним из наиболее энергоемких потребителей.

Энергетические сети многоэтажных домов периодически испытывают пиковую нагрузку от лифтов, которая резко увеличивает ток, вызывая просадки напряжения у других потребителей дома, перегрев и ускоренный износ кабелей, трансформаторов и коммутационной аппаратуры, что повышает риск аварийных отключений и ведет к финансовым потерям из-за переплат по тарифу за максимальную мощность.

Внедрение современных безредукторных лифтов с рекуперативными приводами лишь частично решает проблему: рекуперлируемая энергия, сгенерированная лифтом в режиме торможения, возвращается в общедомовую сеть, однако эффективность её использования критически зависит от наличия мгновенного спроса внутри здания. Однако если в момент торможения потребление дома низкое (например, ночью), то эта энергия не усваивается, а рассеивается в виде тепла или возвращается в сеть,

создавая проблемы для её качества. Таким образом, низкая эффективность использования рекуперированной энергии существующими системами является основным технологическим ограничением. В то время как рекуперация выработанной электроэнергии способна уменьшить энергозатраты во время работы лифта до 35 % [1].

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью поиска решений для полной утилизации рекуперлируемой энергии и снижения пикового давления на электросети.

Предположим, что установка накопителей энергии (НЭ) в шахте лифта может стать оптимальным решением для локализации энергопотоков. Накопитель позволит аккумулировать избытки рекуперированной энергии и использовать их в моменты пикового потребления лифта или других общедомовых нужд, трансформируя лифтовую установку из проблемы для сети в стабилизирующий элемент.

Целью данной статьи является комплексная оценка технико-экономических перспектив и барьеров внедрения накопителей энергии в лифтовых шахтах многоквартирных жилых домов в России.

Для достижения цели поставлены задачи: проанализировать «энергопортрет» лифта, рассчитать

потенциал рекуперации на примере типового объекта, провести сравнительный анализ технологий накопления (технология выбора: суперконденсаторы или аккумуляторы?), оценить капитальные

затраты и потенциальную экономию, а также выявить нормативные и технические препятствия для реализации таких проектов в условиях петербургского ЖКХ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование НЭ непосредственно в лифтовой шахте — решение не новое, в мире уже производят такое оборудование, только в России оно еще не освоено. В этой статье рассмотрены перспективы его использования в жилых домах (например, в Санкт-Петербурге, где второй год идет масштабная кампания по замене устаревших лифтов). Исследование основано на классических инженерных расчётах баланса энергий в системе лифт-противовес. Применялось моделирование рабочего цикла с учётом переменной нагрузки, КПД преобразователей и параметров накопителей. Расчёт рекуперированной энергии и подбор компонентов выполнен по стандартным формулам электротехники и механики, с последующей оценкой экономических показателей (срок окупаемости, снижение пиковой мощности). Все выводы базируются на оценочных параметрах, характерных для типовой эксплуатации в жилом фонде.

Также произведен анализ современного состояния вопроса (литературный обзор). Рассмотрены методы рекуперации энергии, которые используются при проектировании лифтовых систем в жилых зданиях; основные виды НЭ; обоснование выбора накопителя, который наиболее рационально использовать для обозначенных целей. При расчетах технико-экономического обоснования заданы как начальные (из паспорта оборудования) следующие исходные данные для типового лифта в 17-этажном доме:

- Грузоподъёмность, Q — 1000 кг.
- Масса кабины, m_k — 1200 кг.
- Масса противовеса, $m_n = m_k + 0,5Q = 1700$ кг.
- Высота подъёма, H — 45 м.
- Номинальная скорость, v — 1,6 м/с.
- Средняя эксплуатационная нагрузка при движении вниз, L_{cp} — 650 кг.
- Суточное количество рабочих циклов (подъём-спуск), N — 280.
- КПД привода в двигательном режиме, $\eta_{ав}$ — 0,85.

ТЕХНОЛОГИИ НАКОПЛЕНИЯ

Существующие в настоящее время технологии рекуперации и накопления энергии можно разделить на два основных типа: регенеративные приводы с возвратом энергии в сеть и гибридные системы со встроенными накопителями энергии (НЭ). Рассмотрим оба.

1. Лифты с рекуперацией энергии в сеть — это стандарт для большинства премиальных моделей. Преобразователь инвертирует постоянный ток, полученный от двигателя в генераторном режиме, в переменный и отдаёт его обратно в сеть здания. Однако эффективность такой системы падает, если в момент рекуперации в здании нет достаточного текущего потребления. Компании-производители, которые активно продвигают эту технологию: Otis (США): заявлено, что система Otis Gen360 с регенеративным приводом ReGen Drive даёт до 75% экономии энергии по сравнению с традиционными системами; Schindler (Швейцария): приводы Schindler PORT и Schindler 7000 также оснащены системой рекуперации EcoFeed, возвращающей энергию в сеть здания. В Финляндии передовая фирма KONE продолжает внедрять технологию KONE EcoDisc MRL в сочетании с регенеративным приводом [2, 3].

2. Гибридные системы со встроенными накопителями энергии (НЭ) — это следующее поколение решений, где рекуперированная энергия не сбрасывается в сеть, а аккумулируется для последующего использования самим лифтом или общедомовыми системами [4]. Это решает проблему несбалансированности генерации и потребления.

Выделяют два основных типа НЭ: литий-ионные батареи и суперконденсаторы. Сравним их применительно к использованию в качестве НЭ для лифтов.

Литий-ионные аккумуляторные батареи (Li-ion) обеспечивают высокую плотность хранения энергии и применяются для резервного питания и сглаживания нагрузок (как и классический автомобильный аккумулятор). Такие батареи использует компания Thyssenkrupp Elevator (Германия) в своей системе ACCEL для горизонтального перемещения, а также в концепциях умных лифтов для оптимизации энергопотоков.

Суперконденсаторы (ионисторы) обладают более высокой мощностью, чем Li-ion, мгновенной отдачей энергии и огромным числом циклов заряда-разряда (сотни тысяч), что идеально соответствует частым и коротким циклам работы лифта. Именно они считаются наиболее перспективными для установки непосредственно в шахте [5].

Компания Mitsubishi Electric (Япония) разработала и успешно продает систему ESMO (Energy Saving



Motor), которая представляет собой гибрид регенеративного привода и суперконденсаторного накопителя, установленного в шахте. Эта система запасает до 100% рекуперированной энергии для повторного использования [6]. Другой пример — Sigma Elevator (ОАЭ) внедряет Sigma Pareto MRL в России с опциональной гибридной системой накопления на основе суперконденсаторов, что позволяет снизить пиковую нагрузку на сеть до 20% [7].

Так, ведущие мировые производители переходят от простой рекуперации в сеть к созданию интегрированных энергетических решений. В то время как регенеративные приводы стали де-факто стандартом для новых зданий, пионером в области коммерческого использования именно шахтных накопителей выступает Mitsubishi Electric. Другие компании — лидеры отрасли (Otis, KONE, TK) активно тестируют и предлагают гибридные решения, часто в рамках пилотных проектов «умных» зданий, где лифт становится активным элементом микросети. Для 17-этажных жилых домов оптимальным с технической точки зрения выглядит связка: безредукторный MRL-привод (Machine-Room-Less drive, англ. «привод без машинного помещения») + суперконденсаторный накопитель, обеспечивающая максимальную эффективность использования рекуперированной энергии непосредственно на месте ее возникновения.

В России в городском электротранспорте уже давно принята на вооружение технология рекуперации и накопления энергии (НЭ): кинетическая энергия торможения двигателя собирается различными накопителями. Традиционный бортовой накопитель состоит из блока суперконденсаторов с системой контроля параметров и преобразователя энергии. При правильном подборе емкости используемых суперконденсаторов рекуперированная энергия возвращается в сеть и опосредованно хранится на собственные нужды, а избыточная энергия отсутствует в сети. Стационарные накопители с тиристорно-импульсной системой управления принимают энергию рекуперативного торможения, а полезная рекуперация остается в сети. Испытания бортового накопителя на борту трамвая показали способность производить межпоездный обмен полезной энергией рекуперации при наличии нагрузки в контактной сети и запасать только избыточную энергию рекуперативного торможения; пилотные рейсы проходили в Санкт-Петербурге [8, с. 17]. Группа компаний «Силовые машины» (ныне в составе «Ростеха») разрабатывала и производила суперконденсаторные модули «Квазар» для трамваев и спецтехники. Технически такая платформа потенциально применима и для лифтов, что указывает на наличие в России компетенций в области

создания накопителей. В 2025 г. АО «Мослифт» позиционировалось как единственный среди лифтостроительных заводов в РФ, который разрабатывает и производит рекуператоры электроэнергии на суперконденсаторах (экономия энергии 30%). Серпуховский лифтостроительный завод 10.12.2025 объявил, что с января 2026 г. начнет выпуск лифтов с гибридной системой рекуперации на суперконденсаторах¹, обещанная экономия энергии — 35%, данных об использовании шахтных накопителей в лифтовом движении другими российскими компаниями-производителями найти не удалось.

ЭНЕРГОПОРТРЕТ ЛИФТА: ГРАФИКИ НАГРУЗКИ, ПИКОВАЯ МОЩНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛ РЕКУПЕРАЦИИ

Известно, что мировой современный рынок предлагает для многоэтажных жилых домов (высота подъема ~ 50 метров) преимущественно безредукторные лифты с машинным помещением или без него (MRL). Доминирующим решением стали MRL-лифты с синхронными безредукторными приводами на постоянных магнитах (PMSM), которые отличаются высоким КПД, компактностью и пониженным уровнем шума. Грузоподъемность таких лифтов обычно составляет 630–1000 кг при скорости 1,6–2,5 м/с. Ключевой технологией, определяющей энергоэффективность, является частотно-регулируемый привод с функцией рекуперации.

В Санкт-Петербурге после открытия в 2019 году в г. Колпино совместного российско-белорусского сборочного производства лифтов ООО «МЛМ Невский лифт» современные безредукторные лифты серии «МЛТ» массово устанавливаются в многоэтажных жилых комплексах Санкт-Петербурга (например, ЖК «Новая Охта», «Витебский парк» и др.).

Необходимо указать, что энергопотребление современного безредукторного лифта носит циклический импульсный характер, кардинально отличаясь от стабильной нагрузки. Это видение является альтернативой западным брендам и представляет собой ту самую технологическую базу (безредукторный привод + рекуперация), на которую в перспективе могут быть установлены системы накопления энергии.

Анализ паспортных данных моделей лифтов, массово устанавливаемых в Санкт-петербургских новостройках выше 16 этажей (например, «МЛТ-9» от «Могиливлift-маш»), позволяет построить типовой «энергопортрет». Для этого вначале определим основные параметры необходимой модели лифта.

¹ 10.12.2025, <https://www.metalinfo.ru/ru/news/179471>



В терминах усредненного показателя интенсивности 5-минутного пассажиропотока в жилых домах массовой застройки, $I=3-6\%$. Поток имеет двусторонний характер. Величина расчетного 5-минутного пассажиропотока при неравномерной заселенности этажей рассчитывается по формуле:

$$A_5 = \sum_2^n a_i \cdot \frac{I}{100}, \text{ чел/5 мин} \quad (1)$$

где I — расчетная интенсивность пятиминутного пассажиропотока, %;

n — число этажей, обслуживаемых лифтом (первый этаж не учитывается);

a_i — заселенность i -го этажа здания.

Предположим, что в 17-этажном здании на каждом этаже расположено по 4 квартиры, а средняя заселенность одной квартиры составляет 2 человека. Общее количество обслуживаемых лифтом квартир: $4 \cdot 16 = 64$ шт. Тогда общая заселенность: $a_{16} = 64 \cdot 2 = 128$ человек.

Подставляем известные значения в формулу (1):

$$A_5 = \sum_2^{16} 128 \cdot \frac{5}{100} = 6,4 \text{ чел/5 мин.}$$

Расчетный пассажиропоток определяется по формуле:

$$A_p = 12 \cdot K \cdot A_5, \text{ чел/час}, \quad (2)$$

где K — коэффициент, учитывающий нерегулярность пассажиропотока, связанную с заболеванием людей и отпусками (принимается 0,8–0,9).

Подставляем известные значения в формулу (2):

$$A_p = 12 \cdot 0,9 \cdot 6,4 = 69,12 \text{ чел/час.}$$

Определим расчетную скорость кабины лифта в зависимости от высоты подъема по формуле:

$$V = \frac{H}{20 \div 30}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где H — средняя высота подъема лифта в 17-этажном здании при высоте этажа в 3 метра, $H = 50$ м.

$$V = \frac{50}{30} = 1,6 \text{ м/с.}$$

Вместимость кабины лифта находится по его грузоподъемности:

$$E = \frac{Q}{Q_n}, \quad (4)$$

где Q — масса расчетного груза кабины, из имеющихся расчетов примем грузоподъемность кабины 1000 кг;

Q_n — расчетная масса пассажира, $Q_n = 80$ кг.

$$E = \frac{1000}{80} = 12,5.$$

Значит, кабина лифта в данном доме должна вмещать 13 пассажиров.

Время кругового рейса кабины определяется по формуле:

$$T = \frac{2 \cdot H_b + h \cdot (N_n + N_c + 1)}{V} + K_t \cdot [t_0 \cdot (N_n + N_c + 1) + t_n], \quad (5)$$

где H_b — вероятная высота подъема кабины лифта, $H_b = (0,7 \div 0,9) \cdot H = 0,8 \cdot 50 = 40$ м;

h — путь движения кабины с неустановившейся скоростью при разгоне и замедлении, $h = 3 \div 3,5$ м;

N_n, N_c — число вероятных остановок кабины при подъеме и спуске;

V — расчетная скорость установившегося движения кабины, $V = 1,6$ м/с;

K_t — коэффициент дополнительных затрат времени $K_t = 1,05 \div 1,10$;

t_0 — затраты времени на ускорение, замедление и пуск лифта, на открытие и закрывание дверей кабины, $t_0 = 12 \div 14$ с;

t_n — затраты времени на вход и выход пассажиров, $t_n = 35,75$ с².

Число вероятных остановок³ при подъеме и спуске кабины $N_n = 3,7, N_c = 3$.

Подставляем найденные и принятые значения в формулу (5):

$$T = \frac{2 \cdot 40 + 3 \cdot (3,7 + 3 + 1)}{1,6} + 1,05 \cdot [13 \cdot (3,7 + 3 + 1) + 35,75] = 64,4375 + 142,6 = 207 \text{ с.}$$

Производительность лифта при двустороннем пассажиропотоке:

$$P = \frac{3600 \cdot (\gamma_n + \gamma_c)}{T} = \frac{3600 \cdot (0,7 + 0,4)}{207} = 19 \text{ пас/час.} \quad (6)$$

Коэффициент использования производительности лифтом найдем:

$$K_p = \frac{A_p}{P \cdot n} = 69,12 / 19 = 3,6. \quad (7)$$

Для 17-этажного жилого дома типичные диапазоны λ (согласно ГОСТ Р 56420.2–2015):

– низкая нагрузка ($\lambda = 2,0-3,0$): характерна для домов с малой заселенностью (например, на этапе

2 Расчет опубликован частично, взято из <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=893878>

3 Там же.



заселения) или с высокой долей пожилых жителей. Лифт работает с большими паузами, а рекуперация происходит редко и нерегулярно. Пиковые нагрузки редки;

– средняя (нормативная) нагрузка ($\lambda = 3,5-4,5$): оптимальный режим для полностью заселенного дома. Значение $\lambda = 3,6$, указанное в расчетах, попадает в этот диапазон и говорит о сбалансированном пассажиропотоке с пиками в утренние и вечерние часы. Именно при таком коэффициенте система рекуперации работает наиболее стабильно, а пиковая нагрузка на сеть становится регулярной и предсказуемой;

– высокая нагрузка ($\lambda = 5,0-6,0+$): возникает в домах с очень высокой плотностью заселения (малогабаритные квартиры), наличием офисов на первых этажах или в общежитиях. Лифт работает практически непрерывно, пики потребления часты и длительны, интервалы между рекуперативными циклами минимальны. Это создает максимальную нагрузку на электросеть, но и предоставляет наибольший потенциал для накопления энергии.

Таким образом, $\lambda = 3,6$ указывает на типовой, полностью заселенный жилой дом, для которого расчеты энергопотребления и эффективности накопителя будут наиболее репрезентативными.

Полученный коэффициент говорит о том, что в данном жилом доме в часы пик может наблюдаться перегрузка лифтового оборудования. Однако при помощи расчетного метода мы получили самую популярную конфигурацию показателей, что в большинстве случаев устанавливается для лифтов 17-этажных жилых зданий.

Для 17-этажного дома проверенным решением считается лифт грузоподъемностью 1000 кг (13 пассажиров) и номинальной скоростью 1,6 м/с.

Далее для наглядности расчета возьмем высокотехнологичный лифт Autors elevator (Suzhou), паспорт которого любезно предоставил по запросу автора статьи производитель — международная компания Autors (см. рис. 1 и табл. 1). Для 17-этажного дома проверенным решением считается лифт грузоподъемностью 1000 кг (13 пассажиров) и номинальной скоростью 1,6 м/с.

График нагрузки и пиковая мощность

Потребление резко варьируется в течение цикла «разгон — установившийся ход — торможение — стоянка». Наиболее энергоемкая фаза пуска: при полной загрузке пиковая мощность достигает 18–22 кВт в течение 5–7 секунд, что в 3–4 раза выше мощности установившегося движения (–5–6 кВт). В двигателе лифта Autors мощность 6,7 кВт.



Рисунок 1. Обложка паспорта лифта с рассчитанными нами показателями

Figure 1. The cover of the elevator passport with the indicators we calculated

Таблица 1. Техническое описание лифта

Table 1. Technical description of the elevator

Предприятие-изготовитель (поставщик)	Autors Elevator (Suzhou) CO., Ltd.
Назначение лифта	Пассажирский
Модель (индекс) лифта	ATPS20, 1000/1.6–17/17/17
Заводской номер	25PT05251
Месяц и год изготовления	Февраль 2025 г.
Допустимая температура (минимальная и максимальная), °C: – в машинном помещении – в шахте	Min: +5 °C Max: +40 °C
Окружающая среда, в которой может эксплуатироваться лифт (климатические, сейсмические условия, относительная влажность, насыщенность пылью, агрессивная, взрывоопасная, пожароопасная)	Влажность воздуха макс. 80% при 25 °C
Нормативные документы, в соответствии с которыми изготовлен лифт (ГОСТ, ТУ и т. п.)	ТР ТС011/2011 ГОСТ 33984.1–2016
Назначенный срок службы	25 лет
Номинальная грузоподъемность, кг	1000
Число пассажиров (не более)	13
Номинальная скорость движения кабины, м/с	1,6
Скорость движения кабины в режиме «Ревизия», м/с	Не более 0,3

При включении двигатель подключается к полной мощности сети и механизм получает пусковой ток, который в 5–8 раз больше обычного ($I_n = 5 \div 8 \cdot I_n$). Номинальный ток нашего двигателя по паспорту лифта $I_n = 15$ А, для расчета примем $I_n = 100$ А.



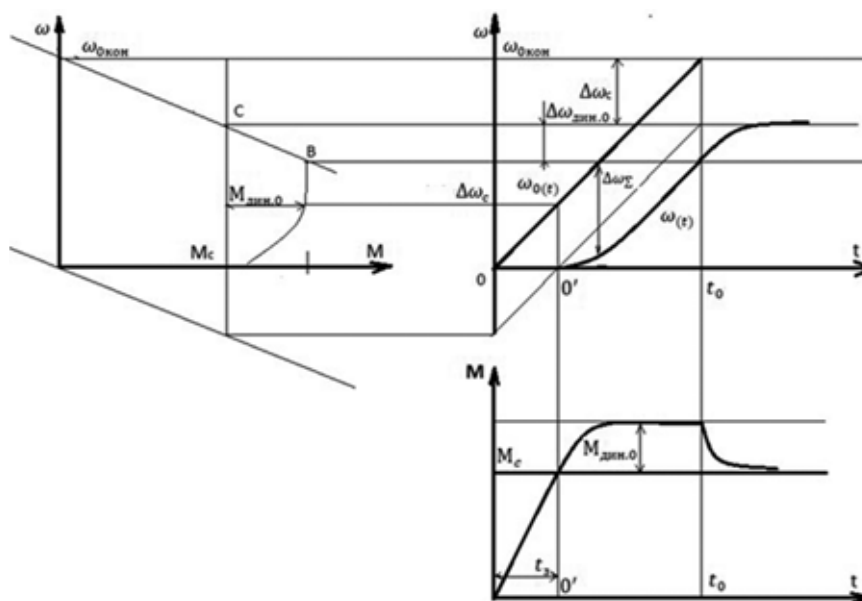


Рисунок 2. Разгон электропривода при постоянном статическом моменте ($M_c = \text{const}$): $\omega_{0\text{кон}}$ — конечное значение угловой скорости идеального холостого хода; $\Delta\omega_c$ — статическое падение скорости, рад/с; $\Delta\omega_{\text{дин.0}}$ — падение скорости, обусловленное заданным динамическим моментом ($\Delta\omega_{\text{дин.0}} > 0$ при $\varepsilon_0 > 0$ и $\Delta\omega_{\text{дин.0}} < 0$ при $\varepsilon_0 < 0$), рад/с; $M_{\text{дин.0}}$ — задаваемый динамический момент, Н·м

Figure 2. Acceleration of an electric drive under constant static torque ($M_c = \text{const}$): $\omega_{0\text{кон}}$ — final value of the ideal no-load angular velocity; $\Delta\omega_c$ — static speed drop, rad/s; $\Delta\omega_{\text{дин.0}}$ — speed drop due to a given dynamic torque ($\Delta\omega_{\text{дин.0}} > 0$ with $\varepsilon_0 > 0$ and $\Delta\omega_{\text{дин.0}} < 0$ with $\varepsilon_0 < 0$), rad/s; $M_{\text{дин.0}}$ — specified dynamic torque, N·m

На рисунке 2 изображены графики переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии на разгоне лифта без пассажиров. Графики построены вместе с разбором статей Б. И. Фираго.

Координатные оси следует читать $\omega(t)$ и $M(t)$. Управление электроприводом осуществляется за счет линейного задания скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$. Воздействие на $\omega_0(t)$ происходит изменением частоты питающего напряжения (ПЧ). При переходных процессах существует время задержки движения t_3 , которое зависит от рабочих характеристик электродвигателя. Выход на динамических характеристики происходит после времени задержки. Второй этап — пересечение линейных характеристик в точке В. Отсюда время становится математически условным: оно рассматривается из условия $0 \leq t' \leq t'_0$, где $t' = t - t_3$; $t'_0 = t_0 - t_3$ (в условие времени включается время задержки движения). Третий этап позволяет сравнивать условность заданного времени с периодом в четыре электрохимические постоянные времени электропривода: $0 \leq t'' \leq 4T_M$, где $t'' = t - t_0$. То есть, дельта от величины скорости рассматривается в двух приближениях, при значениях времени в определенном соотношении к начальному (t_0) и заданному (t). Это позволяет построить графики переходных процессов электропривода, управляемого частотой.

Анализировать изображенные переходные процессы довольно просто. Считанные секунды отделяют момент коммутации от установившегося режима. Следует обратить внимание на прямоугольные формы, которые получаются при совмещении координатных плоскостей на каждом рисунке. После сбоя в электросети основные её показатели (токи и напряжения) приходят в норму не скачком, а постепенно затухающими «качелями», что на схемах хорошо заметно. Характер статической нагрузки двигателя симметричен при разных направлениях его движения. Поэтому в конструкции лифтов используют симметричные схемы электроприводов (сбалансированные и одинаковые по мощности элементы для управления движением вверх и вниз) и двухконцевые подъемные лебедки. Для уменьшения необходимой мощности приводного электродвигателя используют уравновешивающие канаты и цепи. Схема углубляется, становится заметна разница (дельта), которую должен пройти асинхронный электродвигатель при включении в работу.

На рисунке 3 изображен график переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии на момент торможения лифта без пассажиров.

На рисунке 4 изображен график переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном

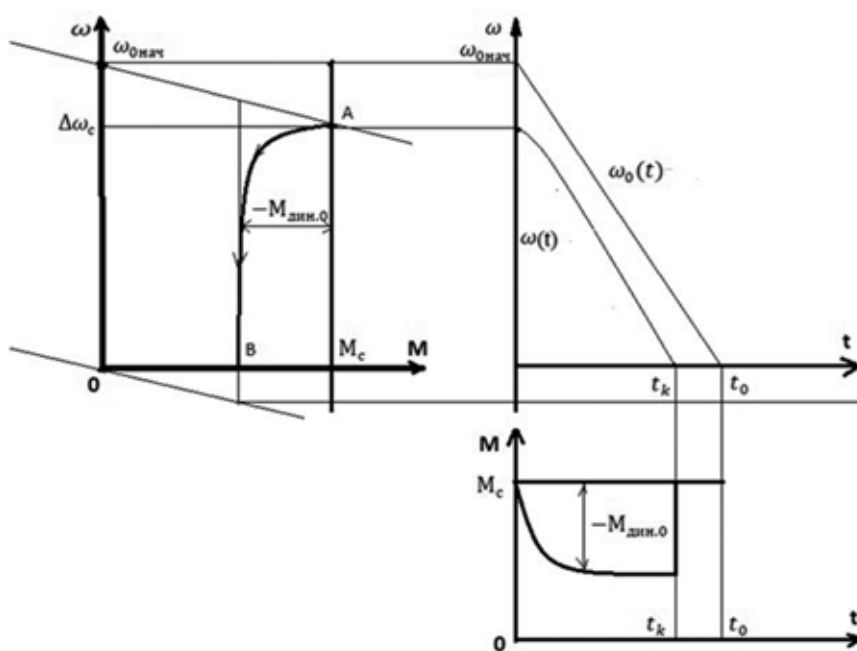


Рисунок 3. Торможение электропривода при $M_c = \text{const}$ и $M_{\text{дин.0}} < 0$; $\omega_{0\text{нач}}$ — начальное значение угловой скорости идеального холостого хода (следует из тахограммы работы двигателя); $t_{\text{кон}}$ — время, когда скорость двигателя достигнет нулевого значения

Figure 3. Braking of an electric drive with $M_c = \text{const}$ and $M_{\text{дин.0}} < 0$; $\omega_{0\text{нач}}$ — initial value of the ideal no-load angular velocity (derived from the motor's tachogram); $t_{\text{кон}}$ — time when the motor speed reaches zero

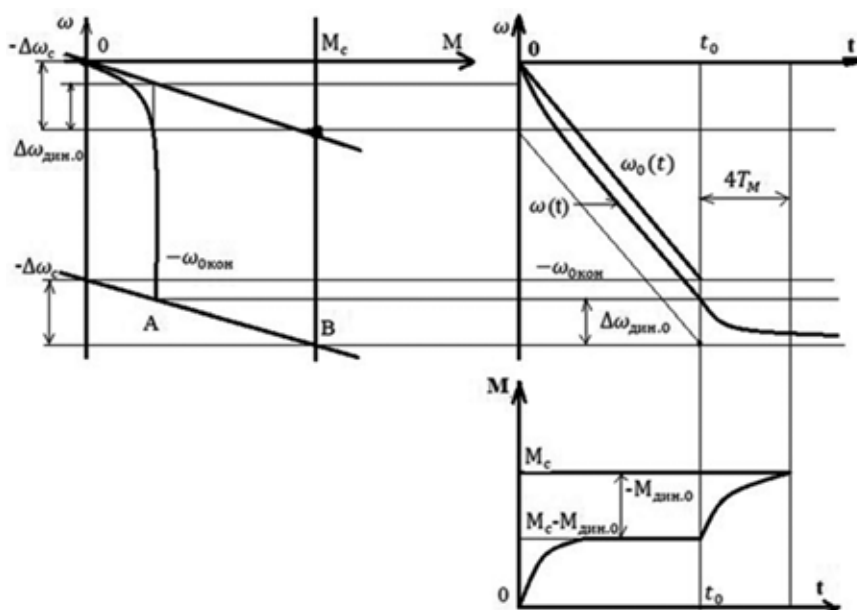


Рисунок 4. Разгон электропривода при опускании груза

Figure 4. Drive acceleration in the load lowering mode

управляющем воздействии на разгоне лифта вниз с пассажирами. При опускании груза электропривод переводится в режим противовключения поэтому на рисунке приведены графики двух параллельных линейных характеристик. В момент $t = t_0$ достигается заданное значение скорости идеального холостого хода $\omega_0(t) = -\omega_{0\text{кон}}$,

после которого переходный процесс подобен линейной механической характеристике АВ.

На рисунке 5 изображен график переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии при торможении лифта с пассажирами.

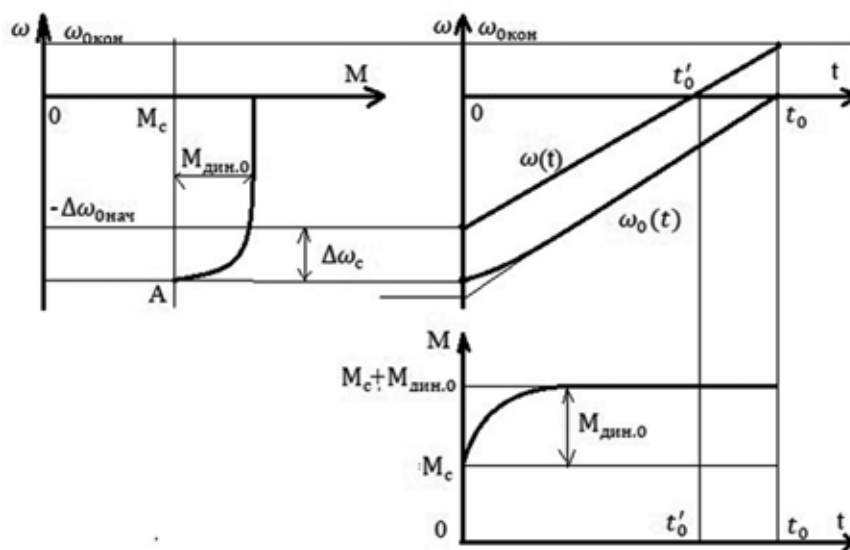


Рисунок 5. Торможение электропривода при опускании груза
Figure 5. Braking of an electric drive during load lowering

При анализе графиков становится очевидным расход потерь мощности в переходных процессах. Для определения потерь мощности строится энергетическая диаграмма цикла работы механизма, которая может быть также использована при проверке двигателя по нагреву.

В режиме стоянки с работающим приводом потребление падает до $-0,3-0,5$ кВт (эти энергопотери не зависят от этажности и являются минимальным энергопотреблением системы в состоянии ожидания вызова). Таким образом, суточный график представляет собой серию коротких, но высоких пиков, совпадающих с часами общедомовой максимальной нагрузки (утро, вечер), что создает значительную нагрузку на вводно-распределительное устройство здания.

Потенциал рекуперации. Безредукторный привод обеспечивает гораздо более эффективную, полную и технически реализуемую рекуперацию на всём диапазоне скоростей — от высоких до очень низких. Это связано с его физическим принципом действия (постоянные магниты, прямой привод) и высокоточным управлением, что и делает его современным стандартом для энергоэффективных лифтов. Способность к рекуперации у него значительно более эффективная и экономически оправданная. При движении груженной кабины вниз или порожней вверх система рекуперации активируется. Согласно техническим характеристикам, такой лифт может возвращать в сеть здания до 30–40% потребляемой за цикл энергии. Однако эффективность утилизации этой энергии без накопителя крайне низка — она может быть полезно потреблена только при наличии одновременного спроса других электроприемников

в здании, что происходит реже чем в 15–20% случаев. Остальная энергия рассеивается или ухудшает качество сети, демонстрируя необходимость ее локального аккумулирования [9]. Расчет для конкретной модели показывает, что за один полный цикл «подъем-спуск» может рекуперироваться 0,15–0,25 кВт·ч, что при интенсивности использования 150–200 циклов/сутки формирует технический потенциал экономии 25–40 кВт·ч/сутки на один лифт.

Для примера возьмем электродвигатель для лифта грузоподъемностью 1000 кг: мощность $P=9$ кВт, скорость вращения $n=980$ об/мин, номинальный ток $I=15$ А. В качестве резервного источника питания используем аккумуляторную батарею номинальным напряжением $U=10$ В. Из имеющихся данных можно оценить время, необходимое для обеспечения функционирования лифта от этой батареи [10].

Найдем пусковой ток аккумуляторной батареи по формуле:

$$I_{a.б.пуск} = P/U. \quad (8)$$

Получим $I_{a.б.пуск} = 9000/10 = 900$ А.

Емкость аккумуляторной батареи можно определить по формуле:

$$C = t_{a.б.} \cdot I_{a.б.пуск}, \quad (9)$$

где $t_{a.б.}$ — продолжительность работы, которую сопоставим с временем кругового рейса кабины для данного жилого дома $T=207$ с, тогда $t_{a.б.}=4$ мин. Вспомним, заданный цикл является минимальным, а в расчетах мы

записали число возможных остановок кабины на этажных площадках $N=4$, тогда максимальное время завершения полного цикла примем равным 16 минутам.

Чтобы воспользоваться таблицей «Время аварийной работы электропривода лифта типа ZIRCON грузоподъемностью 630 кг при разных емкостях батареи» [10, с. 6–7], уменьшим время продолжительности работы в 2 раза в связи с разной грузоподъемностью приведенных механизмов. В этом случае нам подойдет емкостная аккумуляторная батарея Bosch S5 013, емкость которой $C=100$ А·час, или другой аналогичный аккумулятор.

Полученные данные позволяют составить представление о необходимой емкости батареи аккумулятора для обеспечения выполнения полного цикла работы лифта в жилом доме. В паспорте нашего Autors указано, что потребляемое напряжение может быть снижено на 10% при соответствии режимов работы выбранной модели. С системой рекуперации от батареи энергопотребление работающего лифта будет снижаться и далее.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «ЛИФТ + НАКОПИТЕЛЬ»

Принцип работы гибридной системы основан на интеграции накопителя энергии (НЭ) в цепь постоянного тока (DC-link) частотного преобразователя лифтового привода. В классической схеме с рекуперацией избыточная энергия, вырабатываемая двигателем в генераторном режиме, либо возвращается в сеть через инвертор, либо рассеивается на тормозном резисторе (R). Схема однофазного автономного мостового инвертора напряжения приведена на рисунке 6.

В предлагаемой модели этот резистор заменяется или дополняется управляемым накопительным блоком, подключенным к DC-link через двунаправленный преобразователь. На рисунке 7 представлена базовая схема электротехнического комплекса с гибридным накопительным блоком.

Работа НЭ циклична. В *цикле запасаения энергии* контроллер системы перенаправляет поток электроэнергии на заряд накопителя в режиме торможения, когда привод переходит в генерацию. Для этого используется встроенный DC/DC-преобразователь, стабилизирующий напряжение и ток заряда в соответствии с характеристиками НЭ. В случае применения суперконденсаторов заряд происходит почти мгновенно, что идеально соответствует короткому интервалу торможения (3–5 секунд).

При последующем запуске и разгоне лифта система управления в приоритетном порядке использует

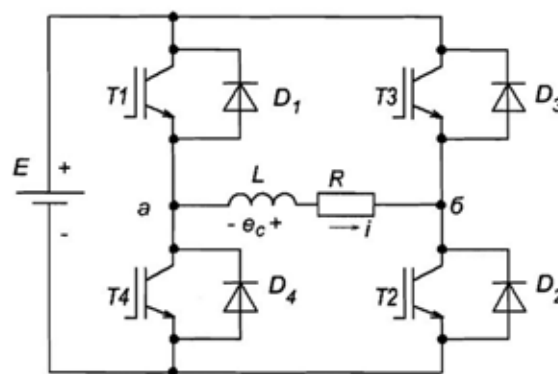


Рисунок 6. Схема однофазного автономного мостового инвертора (АИН)

Figure 6. Single-phase full-bridge voltage source inverter (VSI) circuit

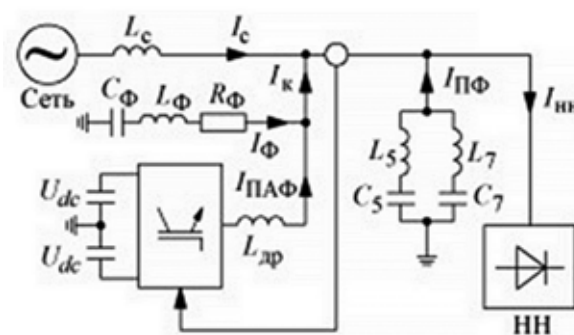


Рисунок 7. Базовая схема гибридного решения с фильтром [11, с. 125]

Figure 7. Basic hybrid topology with integrated filtering [11, p. 125]

запасенную в НЭ энергию, частично или полностью компенсируя пиковый ток от сетевого ввода, — НЭ переходит в *цикл отдачи энергии*. Преобразователь в обратном режиме обеспечивает передачу энергии из накопителя в DC-цепь привода, откуда она поступает на двигатель. Это позволяет «срезать» пиковую нагрузку и снизить максимальную потребляемую из сети мощность на 40–60%. Именно такой показатель возврата заявлен в технологии Weg фирмы ОТИС. Таким образом, социальный лифт с меньшим энергопотреблением становится выгодно использовать. А установка системы рекуперации надежно обеспечивает работоспособность лифта в аварийном режиме.

Примерно такой же процент выделенной без аккумуляции энергии может давать перегрузку сети лифтом в часы пик. Поэтому при реализации современной модели использования должна осуществляться ее *интеграция с нуждами здания*. В периоды низкой активности лифтов (например, ночью) накопленная энергия может быть направлена через отдельный инвертор на питание



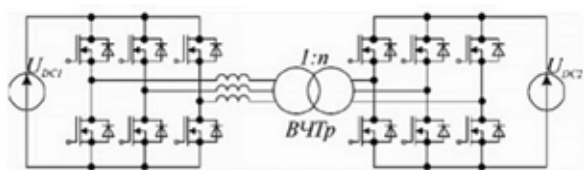


Рисунок 8. Упрощенная схема DC/DC-преобразователя [12, с. 815]

Figure 8. Simplified schematic representation of a DC-to-DC power converter [12, p. 815]

общедомовых систем постоянного потребления: аварийного освещения, систем вентиляции, серверного оборудования. Таким образом, система функционирует как *дополнительный источник энергии для всего здания*, повышая общий коэффициент использования энергии и обеспечивая резерв.

Лифт Autors обладает подходящим энергетическим портретом для установки системы рекуперации. Его интеграция в систему «Умный дом» Санкт-Петербурга позволит точнее проанализировать данные с работающего накопителя. Концептуальная модель делает лифтовую установку автономным энергетическим узлом, минимизирующим не только собственное, но и общедомовое воздействие на распределительную сеть.

ВАРИАНТЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ К ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Интеграция накопителя энергии (НЭ) осуществляется в промежуточное звено постоянного тока (DC-link) частотно-регулируемого электропривода, расположенное между сетевым выпрямителем и силовым инвертором, управляющим двигателем. Существует два основных варианта подключения, определяющих функциональность и стоимость системы.

Прямое параллельное подключение к DC-звну. В этой схеме накопитель (чаще всего суперконденсаторный модуль) через контактор и систему балансировки ячеек подключается непосредственно к шинам постоянного напряжения (обычно 540–600 В). При рекуперации энергия поступает на шины и заряжает накопитель. При разгоне он отдает энергию, поддерживая напряжение в звене. Схема проста и обеспечивает минимальные потери, но требует точного согласования напряжений и не позволяет гибко управлять мощностью заряда/разряда.

Подключение через двунаправленный DC/DC-преобразователь. Это более совершенный вариант преобразователя, способный выполнять импульсное преобразование постоянного напряжения (DC) одной величины в другую. Накопительный элемент (НЭ), состоящий из суперконденсатора или литий-ионной батареи с более низким напряжением, подключается к DC-звну через управляемый преобразователь. Он обеспечивает стабилизацию напряжения, оптимальный профиль заряда/разряда и полное управление потоками мощности независимо от текущего напряжения в DC-звене. Это позволяет использовать широкий спектр накопителей и реализовать сложные алгоритмы, в том числе отдачу энергии на сторонние нагрузки. На рисунке 8 изображена упрощенная электрическая схема двунаправленного мостового преобразователя. ВЧТр — трехфазный высокочастотный трансформатор.

В целом, обе схемы имеют свои преимущества. Выбор схемы зависит от типа накопителя, требуемой функциональности и экономических ограничений. В статье [13] представлены критерии выбора систем хранения энергии, призванные помочь лицам, принимающим решения, в выборе наиболее подходящего устройства хранения энергии для их задач. В таблице 2 приведены полезные сведения для ориентации по параметрам между суперконденсатором и несколькими видами накопительных батарей.

Таблица 2. Характеристики суперконденсатора и батареи [14, с. 3]

Table 2. Supercapacitor and battery characteristics [14, p. 3]

Параметр	Ед. изм.	Суперконденсатор	Батарея, основанная на:			
			Свинец	Никель	Натрий	Литий
Напряжение ячейки	В	2,7	2	1,2	2–2,5	3,5
Удельная энергия	Вт·ч/кг	4,3	30–35	50–80	90–130	80–200
Удельная мощность	Вт/кг	4300	70–130	175–700	100–160	140–1000
Энергетическая эффективность	%	92	70–85	60–85	80–90	85–95
Жизненный цикл		500 000	600–1000	1500–2000	600–1000	>1000
Стоимость	€/кВт·ч	6000–12 000	100–150	300–500	150–400	100–200
	€/кВт	9–17	12–15	52–54	248–281	44–52
Рабочая температура	°C	– 40...+65	0...+45	0...+50	+300...+350	– 40...+60



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внедрение накопителя энергии в шахте лифта приводит к трем ключевым положительным эффектам, кардинально меняющим его взаимодействие с электросетью здания: сглаживанию пиков нагрузки, снижению мощности ввода, повышению КПД системы. Рассмотрим их подробнее.

Накопитель, выступая в роли буфера, мгновенно компенсирует самый энергоемкий этап работы — пуск двигателя. Вместо потребления 18–22 кВт от сети система использует запасенную энергию, «срезая» пик. На графике нагрузки здания это преобразует характерные высокие импульсы лифта в плавную кривую с амплитудой, не превышающей 6–8 кВт, что снижает динамическую нагрузку на кабели и оборудование.

Способность накопителя покрывать пиковую мощность позволяет уменьшить максимальную нагрузку от лифтовой установки на вводно-распределительное устройство (ВРУ) здания. Это даст возможность снизить договорную мощность с энергосбытовой компанией на 15–25% без ущерба для комфорта, что приводит к прямой и постоянной экономии на основной составляющей тарифа.

В предложенной схеме подключения к электрической сети накопителей реализуется метод использования рекуперированной энергии. Эффективность утилизации тормозной энергии возрастает с 15–20% (при простой рекуперации в сеть) до 60–70%. Накопленная энергия не пропадает, а совершает полезную работу, сокращая чистое потребление из сети на 25–35% по сравнению с лифтом, имеющим только регенеративный привод. Таким образом, система перестает быть проблемным потребителем, становясь элементом энергосбережения.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ
ОБОСНОВАНИЕ

Расчёт потенциала энергосбережения за счёт рекуперации с суперконденсаторным накопителем, размещённым в шахте. Для оценки экономического эффекта внедрения системы рекуперативного торможения с суперконденсаторным накопителем, интегрированным в шахту лифта, проведён сравнительный анализ энергопотребления стандартной и модернизированной систем.

Для моделирования энергопаспорта лифта в 17-этажном доме примем за исходные следующие данные (взяты из технического паспорта лифта Autors):

- Грузоподъёмность, Q : 1000 кг.
- Масса кабины, m_k : 1200 кг.
- Масса противовеса, $m_n = m_k + 0,5Q = 1700$ кг.
- Высота подъёма, H : 50 м.
- Номинальная скорость, v : 1,6 м/с.

- Средняя эксплуатационная нагрузка при движении вниз, L_{cp} : 650 кг.
- Суточное количество рабочих циклов (подъём-спуск), N : 280.
- КПД привода в двигательном режиме, $\eta_{дв}$: 0,85.
- КПД привода с суперконденсаторным буфером в рекуперативном режиме, $\eta_{рек}$: 0,78.

Произведем на основе этих данных **расчёт энергопотребления за цикл стандартной системой** (без рекуперации). Энергия, затрачиваемая на подъём кабины со средней нагрузкой L_{cp} :

$$A_{под} = \frac{(m_k + L_{cp} - m_n) \cdot g \cdot H}{\eta_{дв}} \quad (10)$$

$$A_{под} = \frac{(1200 + 650 - 1700) \cdot 9,81 \cdot 50}{0,85} = 86,5 \text{ кДж} = 0,024 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Энергия, рассеиваемая в тормозных резисторах при спуске:

$$A_{сnc} = (m_k + L_{cp} - m_n) \cdot g \cdot H \cdot \eta_{дв} \quad (11)$$

$$A_{сnc} = (1200 + 650 - 1700) \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,85 = 62,5 \text{ кДж} = 0,017 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарное энергопотребление стандартного цикла:

$$A_{цикл ст} = A_{под} + A_{сnc} = 0,024 + 0,017 = 0,0412 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следующим шагом будет **расчёт энергопотребления за цикл системой с рекуперацией в суперконденсатор**. При подъёме часть энергии (до 40% от $A_{под}$) берётся из заряженного накопителя, что снижает потребление из сети. При спуске энергия рекуперирована. Тогда энергия из сети на подъём с использованием буфера:

$$A_{под рек} = A_{под} \cdot 0,6 = 0,024 \cdot 0,6 = 0,0144 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

А рекуперация при спуске (с учётом потерь в накопителе):

$$A_{рек нак} = (m_k + L_{cp} - m_n) \cdot g \cdot H \cdot \eta_{дв} \quad (12)$$

$$A_{рек нак} = (1200 + 650 - 1700) \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,78 = 57,4 \text{ кДж} = 0,0158 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Данная энергия аккумулируется и используется в следующем цикле.

В продолжение рассуждений рассчитаем эффективное энергопотребление из сети за цикл:

$$A_{цикл ст} = A_{под рек} = 0,0144 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Проведем сравнительный анализ и попробуем вычислить **потенциал экономии**. Так, экономия энергии за один цикл:

$$\Delta A_{цикл} = A_{цикл ст} - A_{цикл рек} = 0,0412 - 0,0144 = 0,0268 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Относительная экономия за цикл:



$$\varepsilon_{\text{цикл}} = \left(\frac{\Delta A_{\text{цикл}}}{A_{\text{цикл ст}}} \right) \cdot 100\% . \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\text{цикл}} = \left(\frac{0,0268}{0,0412} \right) \cdot 100\% = 65\% .$$

В наших допущениях сделаем поправки с учётом реального профиля нагрузок и потерь. В реальной эксплуатации не все циклы являются рекуперативными (движение вниз с нагрузкой менее 500 кг требует энергии). С учётом статистики пассажиропотока и КПД всей цепи эффективная суточная экономия снижается. Принимаем поправочный коэффициент $k=0,45$, учитывающий долю рекуперативных циклов, саморазряд накопителя и неидеальность управления.

Рассчитаем также суточную и годовую экономию. Суточная экономия при $N=280$ циклах:

$$\Delta E_{\text{сут}} = \Delta A_{\text{цикл}} \cdot N \cdot k. \quad (14)$$

$$\Delta E_{\text{сут}} = 0,0268 \cdot 280 \cdot 0,45 = 3,377 = 3,377 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Годовая экономия (365 дней):

$$\Delta E_{\text{год}} = 3,377 \cdot 365 = 1232,532 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Среднесуточное потребление стандартной системы:

$$E_{\text{сут ст}} = A_{\text{цикл ст}} \cdot N. \quad (15)$$

$$E_{\text{сут ст}} = 0,0412 \cdot 280 = 11,536 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Получается, что итоговая относительная экономия энергии

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta E_{\text{сут}}}{E_{\text{сут ст}}} \right) \cdot 100\% . \quad (16)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{3,377}{11,536} \right) \cdot 100\% = 29\% .$$

Ключевыми факторами, влияющими на достижение этого показателя, являются оптимизация алгоритмов управления для максимизации доли рекуперативных циклов и использование накопителей с высоким КПД и скоростью заряда/разряда.

На основании проведённых расчётов определим **ключевые требования** к накопителю энергии, размещаемому в лифтовой шахте. Получается, что требуемая запасаемая энергия за цикл: $E_{\text{цикл}} \approx 0,0158 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ($\approx 54 \text{ кДж}$); пиковая электрическая мощность рекуперации: $P_{\text{пик}} \approx 3,3 \text{ кВт}$; рабочее напряжение DC-шины преобразователя: $U_{\text{ном}} \approx 400 \text{ В}$ (стандарт для частотных приводов средней мощности).

Произведем **расчёт минимальной необходимой ёмкости** НЭ. Для диапазона рабочих напряжений от $U_{\text{max}}=400 \text{ В}$ до $U_{\text{min}}=200 \text{ В}$ минимальная ёмкость определяется по формуле:

$$C_{\text{min}} = \frac{2 \cdot E_{\text{цикл}}}{U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2} . \quad (17)$$

$$C_{\text{min}} = \frac{2 \cdot 54000}{400^2 - 200^2} = 0,9 \text{ Ф} .$$

С учётом запаса (20–30 %) для сохранения характеристик и компенсации деградации $C_{\text{треб}} = 1,1 \text{ Ф}$ при 400 В.

Как пример может быть рассмотрен отечественный модуль НК-58-125М (производитель — группа компаний «ТЭЭМП»). Параметры одного модуля НК-58-125М:

- Номинальное напряжение: 125 В.
- Номинальная ёмкость: 58 Ф (допуск $\pm 20\%$).
- Максимальный ток (импульсный): 600 А.
- Сопротивление постоянному току (ESR): $\leq 14 \text{ мОм}$.
- Габариты (Д $\times$ Ш $\times$ В): $\sim 410 \times 135 \times 180 \text{ мм}$, масса $\sim 12,5 \text{ кг}$.

С учетом приведенных значений, требуемые параметры накопителя (ёмкость $\sim 1,1 \text{ Ф}$ при 400 В) могут быть обеспечены сборкой из двух последовательно соединённых отечественных модулей типа НК-58-125М. Такое решение обеспечивает многократный запас по энергии и мощности, гарантируя долговечность системы:

- эквивалентное номинальное напряжение: 250 В;
- эквивалентная ёмкость $C_{\text{экв}} = 58 \text{ Ф} / 2 = 29 \text{ Ф}$;
- запасаемая энергия в диапазоне 250–125 В: $E = 0,5 \times 29 \times (250^2 - 125^2) \approx 683 \text{ 000 Дж} \approx 0,19 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Данный объём энергии более чем в 13 раз превышает потребность одного цикла, что создаёт значительный буфер;
- доступная мощность ограничивается током бортового инвертора (обычно 80–100 А), что при напряжении 250 В даёт мощность до 25 кВт, которая с избытком покрывает пиковую потребность в 3,3 кВт.

Использование модулей производства СНГ также может дать преимущества в логистике, сервисном обслуживании и адаптации под конкретные требования проектов в регионе. Размещение подобной сборки в шахте или машинном помещении технически выполнимо.

Произведем **ориентировочный расчёт стоимости и окупаемости** системы рекуперации. Начнем с учета капитальных затрат (CapEx).

Примерная стоимость 2 модулей НК-58-125М — 250 000 руб. (с учётом рынка СНГ). Ориентировочная стоимость DC/DC-преобразователя — 150 000 руб. Монтаж, пусконаладка, интеграция в сумме будут стоить еще порядка 100 000 руб.

Итого, ориентировочные капитальные вложения $K \approx 500 \text{ 000 руб.}$



Годовая экономия (OpEx) складывается из двух частей: а) снижение платы за пиковую мощность, б) снижение потребляемой энергии. Проведем приблизительный расчет.

а) Система с буфером снижает пиковую нагрузку на сеть от лифта минимум на 3–4 кВт. При месячной ставке на пиковую мощность в 400–600 руб./кВт (актуально для коммерческих тарифов), годовая экономия составит:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{пик}} &= \Delta P_{\text{пик}} \times \text{ТАРИФНЫЙ}_{\text{пик}} \times 12 \text{ месяцев.} \\ \mathcal{E}_{\text{пик}} &= 4 \text{ кВт} \cdot 500 \text{ руб./кВт} \cdot 12 = 24000 \text{ руб./год.}\end{aligned}$$

б) По предыдущим расчётам, годовая экономия электроэнергии составляет ~1232,532 кВт·ч. При среднем тарифе 6 руб./кВт·ч:

$$\mathcal{E}\mathcal{E} = 1232,532 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 6 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч} \approx 7395,192 \text{ руб./год}$$

Значит, суммарная годовая экономия:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 7395,192 + 24000 = 31395,192 \text{ руб.}$$

Рассчитаем срок окупаемости предложенного решения по формуле:

$$T = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{год}}}. \quad (18)$$

$$T = 500000 \text{ руб.} / 31395,192 \text{ руб./год} = 15,9 \text{ года.}$$

Приведённый расчёт показывает, что основной экономический эффект обеспечивается за счёт снижения платы за пиковую мощность (около 78% от общей экономии). Однако даже с её учётом срок окупаемости капиталоемкого решения на суперконденсаторах остаётся большим (>15 лет). Это делает проект экономически целесообразным при соблюдении следующих условий:

- высокие штрафные тарифы за пиковую мощность;
- система рекуперации включена в общую концепцию здания (в новых энергоэффективных зданиях);
- применение более дешёвых накопительных технологий — или серийное внедрение, которое снизит удельную стоимость.

Для массового жилого фонда окупаемость подобной системы без существенных дотаций сомнительна, однако для высотных коммерческих помещений будет значительной. Преимуществом нашего Autors является возможность подключить его к городской системе «Умный дом», в этом случае можно будет тестировать систему рекуперации в рамках обновления концепции энергоэффективности нашего города.

АНАЛИЗ БАРЬЕРОВ И РИСКОВ ВНЕДРЕНИЯ

В секторе лифтостроения говорят о существующих рисках модернизации. Более 50% введенного в эксплуатацию лифтового оборудования служит дольше своего

предельного срока эксплуатации (25 лет). «Ежегодно необходимо ремонтировать не одну сотню лифтов, реально конструируется значительно меньше. Нарастающая изношенность лифтового парка не может не вызывать озабоченность и тревогу» [15, с. 3]. Параллельно набирает силу процесс интеграции систем диспетчерского контроля с глобальными проектами «Умный дом» и «Умный город» (ГОСТ IEC 60950-1-2014 «Оборудование информационных технологий. Требования безопасности. Часть 1. Общие требования») инженерами-системотехниками. Модернизация систем диспетчерского контроля должна производиться при надежной работе эксплуатируемого оборудования. В противном случае следует внедрять системы безопасности [ПЭССБ (PESSRAL)], создавать экспертные группы по ГОСТ Р 53387-2009: «Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры. Методология анализа и снижения риска».

Одно интернет-издание прямо ставит вопрос, следует ли модернизировать лифтовые установки или менять их [16]. При таком понимании проблемы говорить об экономической эффективности от мероприятий на данном этапе нужно с оговорками. Пока в перспективе высокие капитальные затраты на раннем этапе, неопределенность тарифной политики.

Вызывает настороженность нормативное поле — отсутствие прямых стандартов для таких гибридных систем в лифтовых нормах (ТР ТС 011/2011, ГОСТ Р 53780-2010) и правилах устройства электроустановок (ПУЭ).

Технически размещение в шахте дополнительного оборудования предполагает повышенные меры его безопасной эксплуатации. К негативным факторам, становящимся причиной выхода из строя технических объектов, можно отнести резко меняющуюся температуру, вибрации и др. Поэтому необходимость большей надежности дополнительного оборудования является важным условием его внедрения и использования в урбанистической среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день технологии генерации, хранения энергии с низкими генерирующими затратами являются востребованными и ожидаемыми в отрасли лифтостроения. Освоение рекуперативных способностей работы привода с возвратом в сеть технически осуществимо и дает прямой энергетический эффект, как показали и приведенные в данной статье исследования. Подтверждением стал составленный энергопаспорт для лифта Autors, позволяющий экономить электроэнергию на 29% в среднем за цикл работы. Была также предложена концептуальная модель работы сети лифта с накопителем энергии. Экономический расчет показал



постепенную окупаемость похожих моделей, которая будет идти параллельно развитию накопителей энергии.

Главный барьер: компании не всегда согласны модернизировать старый фонд лифтового оборудования. Высокая стоимость замены готовой кабины, с одной стороны, и ненадежность старых проложенных энергосетей для внедрения сложных технических решений, с другой, при текущих ценах на электроэнергию отдалают перспективу развития накопительной среды для механизмов подъема в жилых домах. Хотя мировые лидеры в этой области ведут разработки подобного оборудования для массового внедрения, и у российской промышленности тоже есть хороший потенциал. Распространению рекуперативных технологий может способствовать снижение цены на суперконденсаторы.

Пилотные проекты пока затрагивают лишь отдельные аутворки в премиальном сегменте. Плановое включение технологии в новое строительство подтолкнет нормативную базу к разработке новейших отечественных стандартов.

Рекомендации. Современные технологии в области рекуперативного использования энергии предлагают ряд высокотехнологических решений. Накопление выделенной в сети электропривода энергии производится в суперконденсаторах. Распределение энергии между различными источниками обеспечивает энергоаутер, построенный по технологии Smart Grid-ready. Нововведение обеспечивает распределение в генерации, компенсацию пиковых нагрузок и бесперебойное рабочее питание автоматизированного электропривода. Это способствует покрытию дефицита мощности в электросетях и балансирует нагрузки. Сегодня подключение к технологии «Умный дом» доступно для новых зданий с цифровым управлением Smart Grid-ready. Рассчитанный в данной статье энергопаспорт лифта может быть рассмотрен в качестве аргумента для подключения современных лифтов (и нашего лифта Autors) к прогрессивным автоматизированным платформам города.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Одним из прямых факторов роста доли накопителей электроэнергии на внутреннем рынке станет рост спроса на пиковую мощность. Также есть потребность в увеличении скорости заряда накопителя, быстрый цикл заряда-разряда достигнут в технологии «литий-титан» (LTO) [18].

В современных условиях цифровизации и децентрализации энергетики накопители в лифтовых шахтах перестают быть лишь средством оптимизации отдельного электроприемника. Они становятся ключевыми

элементами распределенной энергетики, а лифтовые системы — активными участниками локальных микросетей (Microgrid) здания или группы зданий.

Технология рекуперации будет активно развиваться. Предпосылкой к этому является высокая потребность энергосберегающих технологий в промышленных производствах.

Список литературы

1. Подмосковные лифты с рекуперацией снизят энергозатраты примерно до 35% // Сайт Правительства Московской области. 09.12.25. URL: <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/news-submoscow/podmoskovnye-lifty-s-rekuperaciei-snizyat-energozatraty-primerno-do>.
2. Marsong S., Plangklang B. Implementation analysis of an elevator energy regenerative unit (EERU) for energy saving in a building. In Proceedings of the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 28 June — 1 July 2016. DOI: 10.1109/ECTICon.2016.7561421.
3. Лысенко Т. В., Курацов А. Ж. Энергоэффективные технологии в лифтостроении / Шаг в науку: механика и машиностроение. 2016. № 1. С. 154–157.
4. Kermani M., Shirdare E., Abbasi S., Parise G., Martirano L. Elevator regenerative energy application with ultracapacitor and battery energy storage systems in complex buildings. In Proceedings of the 2021, 14 (11) Department Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Gothenburg, Sweden, Department of Astronautical, Electrical and Energy Engineering (DIAEE), Sapienza University of Rome. Energies, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113259>.
5. Аверин А. И. Суперконденсаторы и их применение в блоках рекуперации энергии в производстве современных лифтов // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 6. Ч. 2. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/06/54602>.
6. Meyer G. Hybrid and Electric Vehicles. The Electric Drive Automates // Meyer G., Dokic J., Jurgens H., Buhler L. International Energy Agency HEV TCP. Sep. 2018. p. 414.
7. Декларация соответствия от ASIA SIGMA ELEVATOR COMPANY LTD: <https://xn--7sbajahheyaepn1ca0aveqcb0fkl.xn--p1acf/kompaniya/asia-sigma-elevator-company-ltd-cn>.
8. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 43. С. 5–28. DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01.
9. Виниченко В. Н. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности / Виниченко В. Н., Гашио Е. Г., Гусева Т. В., Дмитриев Е. А., Панкина Г. В. Федеральное агентство



- по техническому регулированию и метрологии. 2009. 489 с. URL: https://www.petroileumengineers.ru/sites/default/files/energo_1303_1.pdf.
10. Квашина Г. В., Чащин Е. А., Борзов С. Р., Ефремов В. Г. Резервирование электропитания лифтового оборудования // Вестник евразийской науки. 2015. № 5 (30). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/216TVN515.pdf>.
 11. Сычев Ю. А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий / СПГУ. СПб., 2021. 365 с.
 12. Воробьев К. А. Система двунаправленных преобразователей электрической энергии в сетях ограниченной мощности / Воробьев К. А., Поляков Н. А., Стжелецки Р.: Вестник ГУМРФ. Т. 12, № 4, 2020. С. 812–822. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-dvunapravlennyh-preobrazovateley-elektricheskoy-energii-v-setyah-ogranichennoy-moschnosti/viewer>.
 13. Elalfy D. A., Gouda E., Kotb M. F., Bureš V., Sedhom B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Ecology Daily News*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
 14. Van Mulders F., Timmermans J.-M., McCaffrey Z., Van Mierlo J., Van den Bossche P. «Supercapacitor Enhanced Battery Traction Systems — Concept Evaluation». *The World Electric Vehicle Journal*, 2008, 2 (2), 120–133; <https://doi.org/10.3390/wevj2020120>. (Также в пер. с англ., URL: <https://titanps.ru/upload/iblock/e92/6xpuqm0vvt9evrcxf73attidmoo01tb.pdf> (дата обращения 11.11.2025)).
 15. Бадагуев Б. Т. Лифты и другие подъемные механизмы: практическое пособие / Б. Т. Бадагуев. 3-е изд., перераб. и доп. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 404 с.
 16. Чем модернизация отличается от капитального ремонта? // ООО «Афонская Лифтовая Компания»: официальный сайт. URL: <https://www.afonska.ru/staty/modernizatsiya-ili-zamena-lifta>.
 17. Рекуперация энергии в промышленных приводах // «INNER»: Производство и поставка промышленных комплектов: официальный сайт. URL: <https://inner.ru/articles/rekuperatsiya-energii-v-promyshlennykh-privodakh>.
 18. Экспертно-аналитический отчет «Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры» / Под ред. Д. В. Холкина. Москва: Инфраструктурный центр EnergyNet, 2019. 158 с.
 - the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand. DOI: 10.1109/ECTICon.2016.7561421.
 3. Lysenko T. V., & Kuraisov A. Z. (2016). Energy-efficient technologies in elevator engineering. *Step into Science: Mechanics and Mechanical Engineering*, (1), 154–157.
 4. Kermani M., Shirdare E., Abbasi S., Parise G., & Martirano L. (2021). Elevator regenerative energy application with ultracapacitor and battery energy storage systems in complex buildings. *Energies*, 14 (11), 3259. <https://doi.org/10.3390/en14113259>.
 5. Averin A. I. (2015). Supercapacitors and their application in energy recovery units in the production of modern elevators. *Modern Scientific Research and Innovation*, (6, Part 2). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/06/54602>.
 6. Meyer G., Dokic J., Jurgens H. & Buhler L. (2018, September). Hybrid and electric vehicles. The electric drive automates. In *International Energy Agency HEV TCP* (p. 414).
 7. Declaration of Conformity from ASIA SIGMA ELEVATOR COMPANY LTD. URL: <https://xn----7sbajahheyacpn1ca0aveqcb0fxl.xn--p1ac/kompaniya/asia-sigma-elevator-company-ltd-cn>.
 8. Katsay A. V. & Shevlyugin M. V. (2022). Conversion of regenerative energy in urban electric transport. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems*, (43), 5–28. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.01.
 9. Vinichenko V. N., Gasho E. G., Guseva T. V., Dmitriev E. A., & Pankina G. V. (2009). *Reference document on the best available techniques for ensuring energy efficiency*. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. URL: https://www.petroileumengineers.ru/sites/default/files/energo_1303_1.pdf.
 10. Kvashnina G. V., Chashchin E. A., Borzov S. R. & Efremov V. G. (2015). Backup power supply for elevator equipment. *Bulletin of Eurasian Science*, (5 (30)). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/216TVN515.pdf>.
 11. Sychev Yu. A. (2021). *Filter compensating devices with active converters for improving power quality in electrical complexes of oil and gas enterprises*. Saint Petersburg Mining University.
 12. Vorobyov K. A., Polyakov N. A. & Strzelecki R. (2020). System of bidirectional electric energy converters in limited power networks. *Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet*, 12 (4), 812–822. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-dvunapravlennyh-preobrazovateley-elektricheskoy-energii-v-setyah-ogranichennoy-moschnosti/viewer>.
 13. Elalfy D. A., Gouda E., Kotb M. F., Bureš V., Sedhom B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
 14. Van Mulders F., Timmermans J.-M., McCaffrey Z., Van Mierlo J. & Van den Bossche P. (2008). Supercapacitor enhanced battery traction systems — Concept evaluation. *The World Electric Vehicle Journal*, 2 (2), 120–133. <https://doi.org/10.3390/wevj2020120>.

References

1. Moscow region lifts with regeneration to reduce energy consumption by up to 35%. *Website of the Moscow Region Government*. December 9, 2025. URL: <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/news-submoscow/podmoskovnye-lifty-s-rekuperaciei-snizyat-energozatraty-primerno-do>.
2. Marson S., & Planklang B. (2016, June 28 — July 1). Implementation analysis of an elevator energy regenerative unit (EERU) for energy saving in a building. In *Proceedings of*



doi.org/10.3390/wevj2020120 (Also available in Russian translation: URL: <https://titanps.ru/upload/iblock/e92/6xpuqm0vvt9evrcxf733attidmoo01tb.pdf> (Accessed: November 11, 2025)).

15. Badagiev B. T. (2023). *Elevators and other lifting mechanisms: A practical guide* (3rd ed., revised and expanded). Infra-Engineering.
16. What is the difference between modernization and major repairs? *Afonskaya Liftovaya Kompaniya LLC: Official Website.*

URL: <https://www.afonska.ru/staty/modernizatsiya-ili-zame-na-lifta>.

17. Energy recovery in industrial drives. *INNER: Production and Supply of Industrial Components: Official Website.* URL: <https://inner.su/articles/rekuperatsiya-energii-v-promyshlennykh-privodakh>.
18. Kholkin D. V. (Ed.). (2019). *Expert analytical report: Application of energy storage systems in Russia: Opportunities and barriers.* EnergyNet Infrastructure Center.

■ Информация об авторе

Дронов Владимир Олегович, студент, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4;

а также инженер в ООО «ЦЭПуКС», Санкт-Петербург, Поэтический бульвар, д. 2; ORCID: 0009-0002-4177-3651, e-mail: vvvdr@mail.ru.

■ Information about the author

Vladimir Olegovich Dronov, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street,

St. Petersburg, 198095, Russia, and engineer at LLC «CEPCA», St. Petersburg, Poeticheskyy Boulevard, 2; ORCID: 0009-0002-4177-3651, e-mail: vvvdr@mail.ru.