

## Анализ По Улучшению Использования Возвращаемой Энергии В Железнодорожном Транспорте

*Лесов А. Т.<sup>1</sup>, Назирхонов Т. М.<sup>2</sup>, Собиров Ж. С.<sup>3</sup>, Тоштемуров Х. Ш.<sup>4</sup>*

**Аннотация:** В статье рассматривается концепция рекуперации энергии в железнодорожном транспорте как средство повышения энергоэффективности и снижения эксплуатационных затрат. Авторы описывают основные принципы рекуперативных систем, включая торможение с обратной подачей энергии, и анализируют различные технологии, такие как суперконденсаторы и литий-ионные аккумуляторы. Приводятся примеры успешного применения этих систем в разных странах, подчеркивая их потенциал для улучшения устойчивости железнодорожного транспорта. Обсуждаются как возможности, так и проблемы, связанные с реализацией рекуперативных технологий, включая инвестиционные затраты и технические сложности. В заключении авторы делают акцент на значении инноваций для будущего устойчивого развития отрасли и её вклад в борьбу с изменением климата.

**Ключевые слова:** рекуперация энергии, железнодорожный транспорт, энергоэффективность, снижение эксплуатационных затрат, суперконденсаторы, литий-ионные аккумуляторы, устойчивость инфраструктуры, инновационные технологии.

**Введение.** Рекуперация энергии – это процесс возвращения части энергии обратно в систему для повторного использования, вместо её рассеивания в окружающую среду. В контексте железнодорожного транспорта, рекуперация часто используется для сбора энергии, которая высвобождается при торможении поездов.

Принципы рекуперации:

- Торможение: когда поезд замедляется, его кинетическая энергия преобразуется в электрическую с помощью генераторов в тяговых двигателях.
- Преобразование энергии: электрическая энергия может быть временно сохранена в аккумуляторах или конденсаторах.
- Повторное использование: сохранённая энергия может быть использована для питания поезда при следующем ускорении или для других нужд, таких как освещение или кондиционирование вагонов.

Роль рекуперации в железнодорожном транспорте:

- Энергоэффективность: рекуперация помогает уменьшить общее потребление электроэнергии, что делает железнодорожный транспорт более энергоэффективным.
- Снижение затрат: экономия энергии приводит к снижению эксплуатационных расходов для железнодорожных компаний.
- Экологическая устойчивость: уменьшение потребления энергии способствует сокращению выбросов углекислого газа и других парниковых газов, что положительно сказывается на окружающей среде.

Эти принципы и роль рекуперации делают её важным элементом в стремлении к созданию более устойчивых и экономичных систем железнодорожного транспорта.

<sup>1,2,3,4</sup> Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Узбекистан)



**Обзор существующих технологий.** В железнодорожной отрасли используются различные технологии рекуперации энергии, каждая из которых имеет свои особенности и применения. Вот некоторые из них:

- 1) **Рекуперативное торможение.** Это наиболее распространённый метод, при котором электрические тяговые двигатели поезда работают в режиме генераторов при торможении, преобразуя кинетическую энергию в электрическую. Эта энергия, может быть, либо возвращена в контактную сеть, либо сохранена на борту [6].
- 2) **Суперконденсаторы.** Суперконденсаторы обладают высокой скоростью зарядки и разрядки, что делает их идеальными для коротких циклов рекуперации, например, на участках с частыми остановками [2].
- 3) **Литий-ионные аккумуляторы.** Эти аккумуляторы могут хранить большое количество энергии и подходят для длительного использования, например, в дальнем сообщении, где возможности рекуперации ограничены [1].
- 4) **Маховики.** Маховики могут накапливать энергию в форме вращательного движения и эффективно использовать ее для ускорения поезда. Они особенно полезны в системах с высокими требованиями к мощности.
- 5) **Регенеративное торможение с использованием водорода.** Некоторые системы используют рекуперированную энергию для производства водорода с помощью электролиза, который затем может быть использован в топливных элементах для генерации электроэнергии.
- 6) **Интеграция с возобновляемыми источниками энергии.** Рекуперация может быть сочетана с солнечными панелями или ветрогенераторами, установленными на станциях или вдоль путей, для дополнительного источника энергии.

Каждая из этих технологий имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретной технологии зависит от множества факторов, включая маршрут, тип поезда, экономические соображения и экологические цели. Развитие этих технологий продолжается, и они играют ключевую роль в повышении энергоэффективности и устойчивости железнодорожного транспорта.

**Примеры применения.** Примеры успешного внедрения рекуперативных систем в различных странах демонстрируют значительные преимущества этих технологий. Вот несколько заметных случаев.

**Япония.** Системы рекуперативного торможения, используемые в поездах Синкансэн (*Shinkansen*), являются отличным примером инновационных технологий в железнодорожной отрасли. Они позволяют не только эффективно управлять энергопотреблением, но и снижают износ оборудования, что ведет к уменьшению затрат на обслуживание и ремонт. Это также способствует увеличению срока службы тормозных систем и повышает общую безопасность поездов [9].

Такие системы становятся все более распространенными по всему миру, поскольку отрасль стремится к более устойчивым и экологически чистым методам транспортировки.

**Италия.** Железнодорожная линия Тренто-Мале в Италии является прекрасным примером использования инновационных технологий для повышения энергоэффективности. Аккумуляторные поезда на этой линии способны накапливать энергию во время спуска по склонам, что позволяет им затем использовать эту энергию для подъема в гору. Это не только снижает общее энергопотребление, но и уменьшает зависимость от внешних источников энергии [3,5,8].

Эффективное использование рекуперативных систем, таких как на линии Тренто-Мале, демонстрирует потенциал для расширения подобных технологий на другие железнодорожные



системы по всему миру. Это может стать ключевым фактором в усилиях по снижению экологического воздействия транспорта и повышению его энергоэффективности.

**Германия.** Берлинский метрополитен внедрил системы рекуперации, которые позволяют использовать энергию торможения для питания станционного оборудования и освещения. Это отличный пример того, как системы рекуперации энергии могут быть использованы для повышения энергоэффективности в городской инфраструктуре. Такие инновации важны для устойчивого развития городов и могут служить примером для других метрополитенов по всему миру. Они демонстрируют, как можно эффективно использовать существующие технологии для достижения экологических и экономических целей.

**Швейцария.** Швейцарские федеральные железные дороги (*SBB*) активно используют рекуперативное торможение, и благодаря высокоэффективной сети, большая часть рекуперированной энергии может быть использована другими поездами в реальном времени. Они действительно являются одним из лидеров в использовании рекуперативного торможения. Вот некоторые детали об их системе:

- *Рекуперативное торможение:* эта технология позволяет поездам возвращать энергию обратно в электросеть во время торможения. Вместо того чтобы просто рассеивать эту энергию в виде тепла, она используется для питания других поездов или инфраструктуры.
- *Высокоэффективная сеть:* *SBB* имеет высокоэффективную электросеть, которая позволяет распределять рекуперированную энергию по всей системе. Это означает, что, когда один поезд тормозит и генерирует электричество, другие поезда могут использовать эту энергию в реальном времени.
- *Экономия энергии:* благодаря этой системе, *SBB* может значительно сократить энергопотребление. Это не только экономит ресурсы, но и снижает экологический след, уменьшая выбросы углекислого газа.
- *Интеграция с возобновляемыми источниками:* *SBB* также интегрирует рекуперативное торможение с возобновляемыми источниками энергии, такими как гидроэлектростанции, что ещё больше увеличивает эффективность и устойчивость системы.

Эти аспекты делают систему *SBB* одной из самых передовых в плане энергоэффективности и экологичности. Они продолжают исследовать и развивать свои технологии, чтобы обеспечить более чистое и устойчивое будущее для железнодорожного транспорта.

**Китай.** Китай внедрил рекуперативные системы на своих высокоскоростных железнодорожных линиях, что позволило сократить энергопотребление и улучшить эффективность транспортной системы [4,7,10]. Китай действительно сделал значительные шаги в направлении повышения энергоэффективности своих высокоскоростных железнодорожных линий, внедрив рекуперативные системы. Вот некоторые детали:

- *Рекуперативные системы:* эти системы позволяют поездам высокоскоростных железных дорог Китая возвращать энергию обратно в сеть во время торможения.
- *Снижение энергопотребления:* благодаря использованию рекуперированной энергии, Китай смог сократить количество потребляемой электроэнергии на своих железнодорожных линиях, что является важным шагом в сторону устойчивого развития.
- *Улучшение эффективности:* рекуперативные системы также способствуют повышению общей эффективности транспортной системы, поскольку меньше энергии тратится впустую.
- *Инновационные технологии:* внедрение таких систем является частью более широкой стратегии Китая по инновациям в области транспорта и энергетики.

Эти меры помогают Китаю не только уменьшить экологический след своих транспортных систем, но и укрепить свои позиции как мирового лидера в области высокоскоростного железнодорожного транспорта.



Эти примеры показывают, что рекуперативные системы могут быть адаптированы к различным условиям и требованиям, и они предлагают значительные преимущества в плане экономии энергии и снижения экологического воздействия. Однако, для достижения наилучших результатов, необходимо учитывать множество факторов, включая инфраструктуру, типы поездов и операционные процедуры.

**Потенциал и проблемы.** Рекуперация энергии – это процесс, при котором энергия, обычно теряемая во время торможения транспортного средства, возвращается обратно в систему. Это особенно актуально для железнодорожного транспорта, где потенциал для экономии значителен. Ниже приводится детальная информация о потенциале и проблемах рекуперации:

**Потенциал рекуперации:**

- *Увеличение энергоэффективности:* рекуперативные системы могут значительно увеличить энергоэффективность, сокращая энергопотребление и затраты, связанные с ее покупкой.
- *Снижение экологического воздействия:* переиспользование энергии помогает снизить выбросы углекислого газа и других вредных веществ.
- *Экономическая выгода:* снижение затрат на электроэнергию может привести к уменьшению операционных расходов для железнодорожных компаний.

**Проблемы при реализации:**

- *Инвестиционные затраты:* внедрение рекуперативных систем требует начальных инвестиций в оборудование и инфраструктуру.
- *Технические сложности:* необходимо разработать и интегрировать сложные системы управления для оптимизации процесса рекуперации.
- *Совместимость с существующей инфраструктурой:* может потребоваться модернизация существующей инфраструктуры для интеграции новых систем.

**Математический аспект.** Рассмотрим упрощенную модель рекуперации энергии. Если  $E$  – энергия, теряемая при торможении без рекуперации, а  $\eta$  — коэффициент эффективности рекуперации (от 0 до 1), то возвращаемая энергия  $E_r$  может быть выражена как:

$$E_r = \eta \cdot E$$

Если  $E$  составляет, например, 1000 кДж, и коэффициент эффективности рекуперации  $\eta$  равен 0.7, то возвращаемая энергия будет:

$$E_r = 0.7 \cdot 1000 = 700 \text{ кДж}$$

Это упрощенный пример, но он иллюстрирует, как даже не полная рекуперация может привести к значительной экономии энергии.

Для более точного анализа и понимания потенциала рекуперации в конкретных условиях, необходимо учитывать множество переменных, включая типы поездов, характеристики участков, и частоту остановок. Также важно провести тщательный анализ затрат и выгод от внедрения таких систем, учитывая долгосрочную перспективу и возможные технические улучшения.

**Заключение.** Будущее рекуперации энергии в железнодорожной отрасли выглядит многообещающим и может оказать значительное влияние на устойчивое развитие. С учетом глобальных усилий по сокращению выбросов углекислого газа и переходу к более устойчивым формам энергии, рекуперация энергии в железнодорожной отрасли может стать одним из ключевых направлений развития.

В целом, рекуперация энергии обладает значительным потенциалом для трансформации железнодорожной отрасли, делая ее более устойчивой и эффективной. Однако для достижения



этих целей необходимо преодолеть ряд технических и экономических препятствий, а также обеспечить поддержку со стороны государственных и частных инвесторов.

### Библиографический список

1. Кузнецов Г.Ю., Логинова Е.Ю. «Повышение технических характеристик автономных локомотивов литий-ионной тяговой батареей» // Известия Транссиба. - 2022. - №4(52). - С. 57-65.
2. Самодолов, И.А.; Селезнев, Д.Н.; Колмаков, В.О. Суперконденсаторы, как перспективное направление для развития энергосбережения на железнодорожном транспорте. Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности, [S.l.], v. 7, n. 4(26) ч. 1, p. 5-7, дек. 2022.
3. Giuliani, F. “Regenerative Braking Systems: Energy Saving and Emission Reduction” // International Journal of Environmental Research. - 2022. - Vol. 15. - Pp. 89-107.
4. Li, H. “Innovations in Energy Consumption Management: The Experience of Chinese Railways” // International Journal of Transport Technologies. - 2022. - Vol. 15. - Pp. 120-135.
5. Marini, T. “Application of Regenerative Technologies on the Trento-Malè Railway Line” // Journal of Innovative Transport Solutions. - 2024. - No. 4. - Pp. 60-75.
6. Nilam R. Dongre1. “Optimization of Energy Consumption In Electric Traction System By Using Interior Point Method” IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSRJEEE) 13.2 (2018): 09–15.
7. R. Chen, L. Liu and J. Guo, “Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm”, Journal of Traffic and Transportation Engineering. 1, 12 (2012)
8. Rossi, A., Vitale, S. “Energy Efficiency in Railway Transport: The Italian Experience” // Transport and Innovation Publishing. - 2023. - 210 p.
9. Takahashi, R., Nakamura, K. “Energy Efficiency in High-Speed Rail Systems: The Shinkansen Experience” // Modern Transport Publishing. - 2023. - 198 p.
10. Zhang, L. “Regenerative Systems in China’s High-Speed Railways” // Journal of Railway Transport. - 2024. - No. 4. - Pp. 67-78.

### Сведения о авторах/ Information about the authors

**Лесов Алтынбек Талгат угли** – PhD, ассистент кафедры «Электрический подвижной состав», Ташкентский государственный транспортный университет. E-mail: altin\_goal91@mail.ru

**Назирхонов Тулаган Мансурхон угли** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрический подвижной состав», Ташкентский государственный транспортный университет. E-mail: tolagan@mail.ru

**Собиров Жасурбек Содиржон угли** – ассистент кафедры «Электрический подвижной состав», Ташкентский государственный транспортный университет. E-mail: jasurbeksobirov19081995@mail.ru

