



**Центр научно-технической информации и библиотек
– филиал ОАО «РЖД»**

**Дифференцированное
Обеспечение
Руководства**

100/2025

**Разработана модель расчета соотношения емкости аккумуляторов
и мощности водородных топливных элементов в гибридных поездах
для конкретных маршрутов (Италия)**

Разработанная учеными Римского университета Ла Сapiенца динамическая модель подтвердила необходимость оптимизации силовой установки гибридного водородно-аккумуляторного поезда в части соотношения мощности топливных элементов (FC) и емкости аккумуляторов для каждого конкретного маршрута в зависимости от его географии.

Была представлена разработка гибкого инструмента на базе MATLAB для динамического моделирования гибридных силовых агрегатов на топливных элементах и аккумуляторах. Модель объединяет динамику движения, управление энергопотреблением на основе правил, эффективность системы и деградацию компонентов, обеспечивая как экономию энергии, так и анализ затрат на протяжении всего срока службы поезда.

Цель состояла в оценке технико-экономических показателей различных конфигураций силовых агрегатов. Анализ чувствительности проводился путем изменения двух параметров: номинальной мощности топливного элемента (параметр m) и общей емкости аккумулятора (параметр n) на нескольких реальных железнодорожных маршрутах. Результаты показали небольшое снижение затрат на жизненный цикл с увеличением m (5,1 евро/км при m=0,50), в основном за счет снижения износа FC. И наоборот, увеличение емкости аккумулятора (n) снижает затраты за счет снижения нагрузки на аккумулятор и блок питания с 5,3 евро/км (n=0,10) до 4,5 евро/км (n=0,20). Самые низкие значения m и n являлись нежизнеспособными решениями, поскольку аккумулятор полностью

разряжается до конца поездки. Исследование подчеркнуло решающее влияние эксплуатационных характеристик: при фиксированной конфигурации силового агрегата ($m=0,45$, $n=0,20$) удельные затраты резко возрастают с 4,44 евро/км на протяженной равнинной трассе до 15,8 евро/км на холмистой местности и до 76,7 евро/км на пересеченной местности. Результаты показали, что «универсальный» подход к выбору размера поезда некорректен, что подтверждает необходимость оптимизации силового агрегата для конкретного маршрута, чтобы сбалансировать технико-экономические показатели.

С 2018 г., в Германии, Великобритании, Франции и Италии были реализованы пилотные проекты для проверки возможностей использования гибридных поездов на неэлектрифицированных линиях. Сейчас водородные топливные элементы и аккумуляторные батареи являются наиболее широко применяемыми технологиями – они обеспечивают высокую плотность энергии, возможность быстрой дозаправки и эксплуатационные характеристики, сравнимые с тепловозами, что делает их подходящими для неэлектрифицированных маршрутов до 1000 км. Но для заправки требуется специальная инфраструктура, а также периодическая замена элементов питания каждые 3-6 лет, в зависимости от условий эксплуатации. И наоборот, системы с аккумуляторным питанием лучше подходят для более коротких расстояний, обычно до нескольких десятков километров, и для операций, характеризующихся высокой степенью вариабельности профилей нагрузки. Вместе эти системы образуют синергетическую гибридную архитектуру, способную решать эксплуатационные задачи современного железнодорожного транспорта, обеспечивая как эффективность, так и гибкость.

Ниже представлены основные результаты анализа:

1. Коэффициент мощности топливных элементов (m): Увеличение m повышает энергоэффективность, поскольку снижается потребление FC и легче стабилизируется зарядка батареи, но также ускоряет износ компонентов. При $m=0,40$ общая стоимость самая низкая (около 4,0 евро/км) при замене всего пяти FC и шести аккумуляторов. При $m=0,45$ затраты достигают максимума и составляют около 5,1 евро/км из-за восьми замен FC, в то время как при $m=0,50$ количество замен немного увеличивается (семь FC и семь аккумуляторов) при почти неизменной стоимости (около 5,1 евро/км). В целом, $m=0,50$ представляет собой лучший компромисс, чем $m=0,45$.

2. Коэффициент емкости аккумулятора (n): Увеличение n увеличивает вклад аккумулятора в тягу, снижает частоту критических срабатываний

зарядок и снижает циклическую нагрузку на оба компонента. Однако воздействие на топливный элемент является немонотонным: при $n=0,10$ аккумулятор становится слишком маленьким, что приводит к частым включениям/выключаниям FC и приводит к восьми заменам FC и шести аккумуляторов, что приводит к самым высоким затратам на весь срок службы (около 5,3 евро/км). Увеличение до $n=0,15-0,20$ стабилизирует зарядку и сокращает количество замен (пять FC и три батареи), что снижает затраты примерно до 4,5 евро/км. Пример с $n=0,05$ показывает аналогичную стоимость (около 4,5 евро/км), но технически нецелесообразен, поскольку зарядка часто падает ниже допустимого минимума. Результаты подчеркивают, что экономический оптимум достигается не только за счет минимизации энергопотребления, но и за счет снижения деградации, при этом затраты на замену остаются доминирующим фактором.

3. Чувствительность к маршруту: Износ топливных элементов сильно зависит от режима эксплуатации. На маршруте, характеризующемся регулярной загрузкой и непрерывной работой на высокой мощности, FC подвергается всего пяти заменам за 20 лет, а общая стоимость является самой низкой (около 4,44 евро/км). В отличие от этого, на скоростных магистралях частые уклоны и неравномерное распределение остановок приводят за рассматриваемый 20-летний период к резкому увеличению затрат до 15,8 евро/км. Хотя благодаря рекуперативному торможению скоростные маршруты демонстрируют более низкое удельное энергопотребление, это преимущество нивелируется ускоренным износом FC. Количество заменяемых аккумуляторов остается ограниченным (2-3 за 20 лет) и зависит от маршрута лишь в незначительной степени. Для более коротких маршрутов возможным способом сокращения количества замен FC является снижение циклической нагрузки за счет увеличения n (большей емкости аккумулятора) и уменьшения m (меньшей доли FC в номинальной мощности). В такой конфигурации FC работает в более стабильных условиях, в то время как аккумуляторная батарея компенсирует кратковременные колебания, уменьшая деградацию аккумулятора. И наоборот, предварительные результаты оптимизации показывают, что для более длинных маршрутов требуется более высокий уровень m , чтобы гарантировать достаточный запас бортовой энергии.

Несмотря на надежность системы, следует признать некоторые ограничения. Деградация компонентов моделировалась с помощью упрощенных эмпирических правил, в то время как цены на водород и электроэнергию считались постоянными. Эти упрощения могут повлиять на

количественные результаты, хотя относительные тенденции остаются значимыми.

В целом, исследование показывает, что размеры гибридных поездов не могут зависеть от типовых конфигураций: параметры силовой установки должны быть оптимизированы не только для повышения энергоэффективности, но и для долгосрочной экономической устойчивости с четким учетом особенностей конкретного маршрута. Это подчеркивает необходимость перехода от «универсальных» поездов к специализированным и адаптированным к конкретным условиям. Дальнейшие шаги подразумевают детальную оптимизацию для конкретного маршрута, поскольку энергетические характеристики поездов и тенденции их снижения значительно различаются в зависимости от условий эксплуатации.

*Источники: mdpi.com, 16.10.2025 (англ. яз.);
techzd.ru, 28.10.2025*