

Н. Р. Кюн

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье рассмотрены типы электрического торможения моторвагонного подвижного состава, проведён сравнительный анализ относительно механических систем торможения и рассмотрен пример эффективности рекуперативного торможения МВПС моторвагонного депо Омск.

Ключевые слова: торможение, рекуперация, реостатное торможение, система, генераторный режим, схема.

Для цитирования: Кюн, Н. Р. Анализ эффективности систем электродинамического торможения моторвагонного подвижного состава / Н. Р. Кюн // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 123–129. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_123.

Современные требования к моторвагонному подвижному составу (МВПС) постоянного тока, такие как повышение скоростей движения, интенсивности разгонов и торможений, а также увеличение пассажироместимости, предъявляют высокие требования к тормозным системам. Наряду с традиционным пневматическим торможением, ключевую роль в обеспечении безопасности и экономичности перевозок играет электродинамическое торможение (ЭДТ). Его эффективность напрямую влияет на энергопотребление, плавность хода и снижение износа пневматических тормозов.

Электрическое торможение основано на свойстве обратимости тяговых двигателей в генераторный режим. Тормозная сила электрического торможения имеет ту же природу, что и сила тяги. Электромагнитная сила при торможении равна, как и при тяговом режиме $3,6C\Phi I$, но направлена в сторону, противоположную движению поезда. Различие в абсолютных значениях сил тяги и торможения обусловлено различным влиянием потерь (механических, магнитных и потерь в передаче). При генераторном (тормозном) режиме они увеличивают тормозную силу и способствуют торможению поезда.

$$B_{\text{кд}} = 3,6C\Phi I + \Delta B,$$

где $\Delta B = \Delta F$ – суммарные потери колесно-моторного блока.

Осуществление процесса электродинамического торможения на электропоездах постоянного тока с коллекторным тяговым электродвигателем:

Процесс реостатного торможения при последовательном возбуждении тяговых двигателей может начаться только при наличии остаточного магнитного потока в двигателе. Для реостатного торможения обмотки возбуждения необходимо реверсировать, чтобы сохранить в них такое же направление тока (следовательно, и магнитного потока), как и в режиме тяги (в якоре при генераторном режиме направление тока изменится), т.е. нужно согласовать направление магнитного потока с направлением генераторного тока.

Допустим, при включенных контакторе ЛК и контактах реверсора В1, В2 (рис. 1, а) ток в режиме тяги проходит в направлении, показанном стрелками, тогда после отключения линейного контактора остаточный магнитный поток обмотки возбуждения будет направлен аналогично.

Если теперь замкнуть якорь через контактор на резистор R, оставив реверсор в прежнем положении, то наведенная в якоре небольшая э.д.с. E за счет остаточного магнитного потока поступит на обмотку возбуждения в противоположном направлении. Это размагнитит двигатель, и торможение станет невозможным. Если при этом реверсор развернуть в положение "Назад" и замкнуть H1, H2, то генераторный ток I, пройдет по обмотке, как и в тяге. Он усилит остаточный магнитный поток и обеспечит самовозбуждение машины (рис. 1, б).

Было бы желательно подобный способ распространить на весь цикл торможения. Однако на практике торможение разбивается на несколько этапов. Прежде всего потому, что предпочтение отдается рекуперативному торможению, позволяющему возвращать электроэнергию в контактную сеть, а двигатели с последовательным возбуждением практически нельзя перевести в режим рекуперации, так как не представляется возможным перейти через промежуточный момент холостого хода, необходимый для перевода электрической машины из двигательного в генераторный режим.

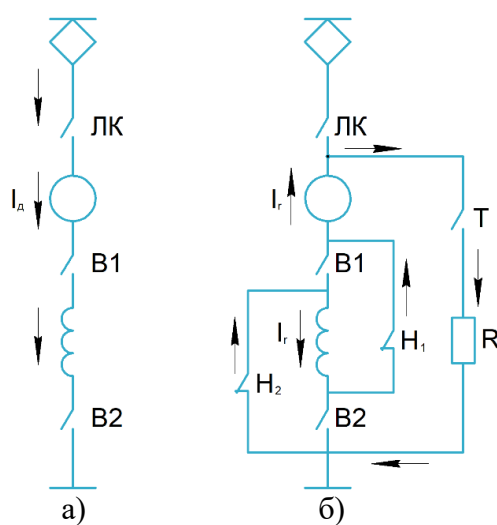


Рис. 1. Режимы работы:

а – режим тяги; б – режим реостатного торможения с самовозбуждением

Кроме того, использовать реостатное торможение с самовозбуждением с максимальной скорости тоже нельзя, поскольку их суммарное напряжение достигло бы очень большого значения, опасного и для электрооборудования, и для контактной сети. Применять реостатное торможение до остановки поезда не представляется возможным, потому что при малом вращении якоря двигателя, работающего в генераторном режиме, резко уменьшается его э.д.с., ток и электромагнитный тормозной момент. Поэтому полной остановки достигают с помощью электропневматического тормоза. Иными словами, описанная схема не обеспечивает сохранение тормозной силы при уменьшении скорости до нуля и непригодна для полной остановки поезда.

Схема начинает действовать с рекуперативного торможения, когда суммарное напряжение двигателей (точнее — суммарная э.д.с. генераторов) превышает напряжение контактной сети. Двигатели с последовательным возбуждением становятся генераторами с независимым возбуждением [1].

Область применения рекуперации имеет ограничения. Например, рекуперативное торможение при постоянном напряжении на тяговых двигателях ограничивается минимальной скоростью (45 - 50 км/ч), которая зависит от мощности синхронного генератора и насыщения тяговых двигателей, после чего приходится переходить на реостатное торможение с самовозбуждением.

Область рекуперации значительно расширяет использование двигателей, рассчитанных на глубокое ослабление возбуждения (до 18 %). Чтобы повысить коммутационную устойчивость двигателей в режиме электрического торможения и обеспечить надежную работу коллекторов и щеток, напряжение на коллекторах ограничивают до 750 В. При напряжении сети 3000 В это определяет постоянное последовательное соединение четырех двигателей.

Система рекуперативно-реостатного торможения предусматривает: автоматический переход с рекуперативного торможения на реостатное с самовозбуждением при минимальной скорости движения; автоматическое замещение рекуперативного торможения реостатным с независимым возбуждением при недостаточном потреблении энергии из контактной сети (при повышении в ней напряжения свыше 4000 В); автоматическое управление процессами торможения [2].

Эффективность рекуперативного торможения зависит не только от режимов работы электропоезда, но и от потребления энергии и сети, и параметров всей системы энергоснабжения.

Если во время рекуперации при недостаточном потреблении энергии из контактной сети напряжение на токоприемнике повысится до 3950 В, то сработает реле максимального напряжения РМН, включающее контактор Т. Произойдет переход на замещающее реостатное торможение. Поскольку в составе электропоезда имеется несколько моторных вагонов, реле РМН, которых срабатывают не одновременно, замещающее реостатное торможение может включиться на одном или нескольких вагонах в то время, когда оборудование на остальных вагонах продолжит работать в режиме рекуперации [3].

Силовая схема, обеспечивающая работу в данных режимах, получается наиболее простой при постоянном последовательном соединении тяговых двигателей, подключенных к общим резисторам. Все двигатели одинаково нагружены даже при расхождении характеристик. Недостаток последовательного соединения - склонность колесных пар к юзу.

На электропоездах ЭС2Г, ЭС2ГП и ЭС104 с асинхронными тяговыми электродвигателями переменного тока система электродинамического торможения представлена также в виде рекуперативно-реостатного торможения с автоматическим выбором режима торможения.

При электродинамическом (рекуперативном) торможении машинист задает необходимое тормозное усилие в процентах. Цифровой сигнал об этом поступает в систему управления электропоезда. Последняя рассчитывает необходимое тормозное усилие и выдает сигнал на блок управления приводом БУП о тормозном усилии.

Инверторы снижают частоту приложенного напряжения, при которой частота вращения магнитного поля статора становится меньше частоты вращения ротора асинхронного ТД. При этом ТД переходят в режим генератора. Вырабатываемая ими энергия через обратные диоды инверторов передается на промежуточный контур тягового преобразователя. Если напряжение промежуточного контура будет больше напряжения контактной сети, то энергия торможения будет возвращаться в контактную сеть. Так происходит рекуперативное торможение.

От промежуточного контура тормозной ток протекает через обмотки сетевого фильтра дросселя, датчик сетевого тока ДТ, быстродействующий выключатель и далее через токоприемник возвращается в контактную сеть. Если напряжение в контактной сети будет больше или равно напряжению промежуточного контура, то рекуперативное торможение становится неэффективным.

Если нагрузки в контактной сети будет недостаточно для реализации необходимого тормозного усилия, то БУП открывает силовые транзисторы тормозных регуляторов. Ток промежуточного контура замыкается на тормозных резисторах, находящихся на крыше вагона. Происходит реостатное торможение электропоезда.

В тех случаях, когда заданного тормозного усилия от рекуперативного или реостатного торможения будет недостаточно, система управления дает сигнал на БУТ для реализации необходимого тормозного усилия электропневматическим тормозом. При этом возможно совместное применение электродинамического и электропневматического торможения [4].

Таблица

Сравнение типов торможения на электропоездах постоянного тока

Тип торможения	Принцип действия	Плюсы	Минусы
Пневматическое	Сжатый воздух (из главных резервуаров) подается в тормозные цилиндры, которые через колодки прижимаются к колесам или дискам. Тормозная энергия превращается в тепло и рассеивается.	- Высокая надежность: простая и отработанная конструкция. - Независимость от контактной сети: работает при отсутствии напряжения. - Эффективность на низких скоростях: основной способ для полной остановки поезда. - Резервная система: всегда является аварийным и стояночным тормозом.	- Износ: прямой механический контакт приводит к износу колодок, дисков и бандажей колес. - Потеря энергии: вся кинетическая энергия рассеивается впустую в виде тепла. - Пыль и грязь: продукты износа загрязняют окружающую среду и оборудование. - Меньшая плавность: по сравнению с электрическими системами.
Электропневматическое	Ускоренный вариант пневматического торможения. Управляющий сигнал – электрический, а исполнительный механизм – пневматический. Электронный блок по проводам мгновенно передает команду на электропневматические вентили для наполнения тормозных цилиндров каждого вагона.	- Быстродействие: тормозная магистраль не используется для передачи управляющего сигнала, поэтому торможение срабатывает почти мгновенно по всему составу. - Синхронность: все тормозные цилиндры срабатывают одновременно, что исключает продольные рывки. - Плавность и точность: позволяет точно дозировать тормозное усилие. - Снижение продольных нагрузок на автосцепки.	- Сложность и стоимость: более сложная система с электронными блоками и датчиками. - Все минусы пневматического торможения: так как конечное тормозное усилие создается колодками/дисками, сохраняются износ и потери энергии. - Требуется резервирование: обычно дублируется классической пневматической системой.
Рекуперативное	Электродвигатели переходят в генераторный режим. Вырабатываемая электроэнергия не рассеивается, а возвращается в контактную сеть для питания других поездов или потребителей.	- Энергоэффективность: экономия электроэнергии (до 25-30% и более). - Отсутствие износа: тормозные колодки и диски не используются, что снижает затраты на обслуживание. - Плавность торможения: легко регулируется силой тока. - Экологичность: снижение выбросов (пыли от износа) и энергопотребления.	- Зависимость от сети: эффективно только при наличии потребителя энергии в сети (других поездов). Если энергию некому принять, система не работает. - Ограниченность на низких скоростях: тормозной эффект резко падает при снижении скорости (~15-20 км/ч и ниже). - Сложность системы управления: требует сложных преобразователей и систем стабилизации напряжения в сети. - Высокая стоимость оборудования.

Продолжение таблицы

Реостатное	Электродвигатели переходят в генераторный режим. Вырабатываемая электроэнергия подается на мощные резисторы (реостаты) на крыше поезда, где преобразуется в тепло и рассеивается в атмосферу.	- Независимость от контактной сети: работает при любых условиях, главное — наличие собственного напряжения. - Стабильность: тормозное усилие постоянно и предсказуемо, не зависит от состояния сети. - Отсутствие износа механических частей (как и у рекуперации). - Проще и дешевле рекуперации, так как не требуется стабилизировать сеть.	- Потеря энергии: вся кинетическая энергия рассеивается впустую. - Нагрев: мощные ТЭНы на крыше значительно нагревают вагон и окружающую среду, особенно в тоннелях. - Ограниченность на низких скоростях: как и у рекуперации, эффективно только на высоких и средних скоростях. - Дополнительная нагрузка на систему вентиляции.
------------	--	--	---

Рассмотрим эффективность рекуперативного торможения на примере расхода и рекуперации электроэнергии электропоездов постоянного тока моторвагонного депо Омск за октябрь 2025 года.

В моторвагонном депо Омск в октябре работало 39 машинистов, общий расход электроэнергии составил 1 250 310 кВт·ч, общий объем рекуперации – 170 757 кВт·ч. Представим распределение удельной электроэнергии рекуперации и процента рекуперации относительно затраченной электроэнергии на тягу (см. рис. 1,2).

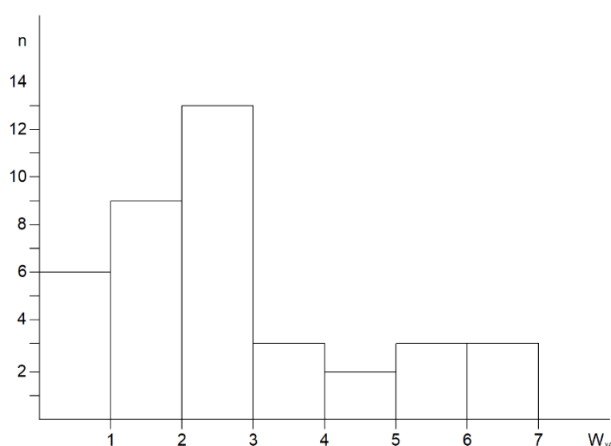


Рис. 2. График распределения удельной энергии рекуперации

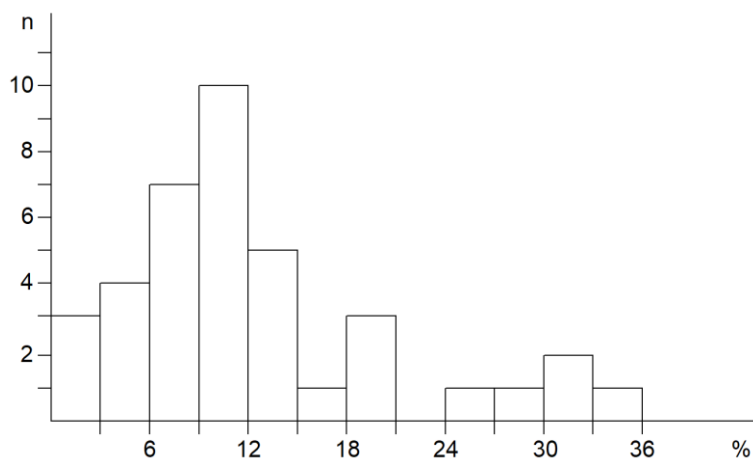


Рис. 3. График распределения процента рекуперации

Общая доля рекуперации за октябрь в моторвагонном депо Омск составила 13,7%. Самый большой процент рекуперации у машиниста – 36,8%, самый маленький – 0%. Доля рекуперации зависит от исправности и модели электропоезда, квалификации машиниста и участка обслуживания.

Но также не стоит забывать, что не вся электроэнергия, полученная в результате рекуперации, идёт на тягу поездов, если на участке нет электроподвижного состава, идущего в тяге, вся электроэнергия уходит на тяговую подстанцию и гасится в балластных резисторах, то есть переходит в тепловую энергию, как при реостатном торможении.

Проведенный анализ позволяет сформулировать вывод об эффективности рекуперативного и реостатного торможения, который демонстрирует зависимость итоговой эффективности систем торможения от совершенства системы управления.

Работа систем электрического торможения требует серьезной защиты от перегрузок и обязательного соблюдения некоторых условий, например, обеспечение равенства потоков возбуждения всех ТЭД, что способствует равномерному распределению нагрузок между двигателями при торможении. Рельсы должны быть сухими. При плохих условиях сцепления (влажность, листопад) возможно возникновение юза колесной пары, что требует интеграции ЭДТ с системой автоматической регулировки силы торможения (противобуксовочная система). Также большую роль играет значение напряжения в контактной сети: при его превышении система автоматически отключает рекуперацию и переходит в реостатный режим. Переход осуществляется при достижении 3950 В, то есть без учета энергии рекуперации в контактной сети должно быть не более 3700 В. Если в контактной сети не будет других поездов в тяге, вся выработанная энергия погасится в балластных резисторах на тяговой подстанции.

Из основных преимуществ электродинамического торможения следует отметить: снижение износа механических тормозных колодок и дисков, плавность торможения, отсутствие резких механических воздействий, что повышает комфорт пассажиров и снижает нагрузку на ходовые части. Недостатком существующей системы электродинамического торможения МВПС является отсутствие эффективной системы управления, что проявляется в виде неустойчивой работы в переходных режимах.

Список литературы

1. **Просвирин, Б. К.** Электропоезда постоянного тока с электрическим торможением / Б. К. Просвирин // ТРАНСИЗДАТ – 2000, С. 328. – ISBN: 5-900345-04-1.
2. Электропоезда постоянного тока ЭД2 Т, ЭТ2 М, ЭД4 М, ЭР2 Т, ЭТ2 / под ред. Д. В. Пегова. – Москва : Центр Коммерческих Разработок, 2008. – 192 с. : табл., ил.
3. Энергосберегающее оборудование электропоездов / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев и др. // Локомотив. – 2007. – № 1. – С. 3.
4. Краткое пособие для обучения локомотивных бригад на электропоезд ЭС2ГП «Премиум». / В.Б. Петров // УЦ ДОСС – 2018, С. 44.

References

1. **Prosvirin, B. K.** Electric trains with direct current and electric braking / B. K. Prosvirin // TRANSIZDAT – 2000, p. 328. – ISBN: 5-900345-04-1.
2. Electric trains with direct current ED2 T, ET2 M, ED4 M, ER2 T, ET2 / edited by D. V. Pegov. – Moscow: Center for Commercial Development, 2008. – 192 p.: tables, ill.
3. Energy-saving equipment of electric trains / A. S. Maznev, A. M. Evstafiev and others // Lokomotiv. – 2007. – No. 1. – P. 3.
4. Brief manual for training locomotive crews on the ES2GP "Premium" electric train. / V.B. Petrov // UC DOSS - 2018, p. 44.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF ELECTRODYNAMIC BRAKING SYSTEMS FOR DC ELECTRIC TRAIN

Abstract. The article discusses the types of electric braking of electric train, provides a comparative analysis of mechanical braking systems, and provides an example of the effectiveness of regenerative braking at the Omsk electric train depot.

Keywords: braking, recovery, rheostatic braking, system, generator mode, circuit.

For citation: Kuhn, N. R. Analysis of the Effectiveness of Electrodynamic Braking Systems for Electric Train / N. R. Kuhn // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2026. – № 1. – P. 123–129. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_123.

Сведения об авторах

Кюн Никита Робертович

Омский государственный университет путей
сообщения,
аспирант,
e-mail: kyun_9@mail.ru

Information about the authors

Kuhn Nikita Robertovich

Omsk State Transport University,
Graduate Student,
e-mail: kyun_9@mail.ru