

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИВОДА АВТОПОЕЗДА

К.Ф.-М.Н. Зуев С.М.¹, К.Т.Н. Малеев Р.А.¹, Шматков Ю.М.¹, Широков П.С.¹, К.Т.Н. Яхутль Д.Р.²

¹ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

²ФГУП НИИАЭ, Москва, Россия

eore@mospolytech.ru

В данной статье описывается назначение, области применения, основные параметры большегрузных автопоездов для перевозки грузов специального и общехозяйственного назначения. Рассмотрены большегрузные автопоезда с ведущими колесами прицепных звеньев. Показаны преимущества применения большегрузных автопоездов по сравнению с одиночными грузовыми автомобилями.

Рассмотрены дополнительные источники энергии к штатному двигателю (дизельный или газотурбинный двигатель для привода трехфазного генератора), предназначенные для преодоления крутых подъемов и труднопроходимых участков дороги. Проведен анализ поворота автопоезда. Показаны преимущества кольцевой схемы и параллельной с индивидуальным управлением. Произведен анализ сил тяги по колесам и разброс потерь при повороте автопоезда в многодвигательном приводе. Представлены тяго-динамические свойства автопоездов, которые характеризуют предельные силовые и кинематические возможности автопоездов в различных режимах движения. Выполнен поиск рационального распределения токов в зависимости от сил, действующих на колесах и потерь в шинах.

Проведено исследование поворота транспортного средства, вычислены значения токов, величина разброса токов и их влияние на КПД. Определены экономические характеристики автопоездов.

Разработана методика и алгоритмы расчета потерь и КПД. Представлен алгоритм расчета при равенстве токов. Проведены расчеты КПД на различных скоростях и радиусах поворота при движении автопоезда. Произведен анализ КПД при равенстве токов и мощностей при изменении скорости движения.

Предложены различные конструкторско-технологические мероприятия для повышения технических характеристик автопоезда.

Ключевые слова: автопоезд, теплоэлектрический привод, крупногабаритный тяжеловесный объект, модульный транспортер, грузовая платформа, система управления, маневренность, управляемость, контроллер, угол поворота опоры, рулевая программа, задающее воздействие, согласование.

Для цитирования: Зуев С.М., Малеев Р.А., Шматков Ю.М., Широков П.С., Яхутль Д.Р. Исследование комбинированного привода автопоезда // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 2 (48). С. 26–35. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-26-35.

Введение

В последнее десятилетие сохраняется тенденция увеличения перевозок большегрузными автопоездами (БА) длинномерных тяжеловесных грузов специального и общехозяйственного назначения, таких как трубы большого диаметра, химические колонны, фрагменты или корпуса речных судов и др. [1, 2].

Производство автопоездов-тяжеловозов, многоопорных платформ и сочлененных транспортных средств быстро развивается во многих странах, их мировой выпуск из года в год продолжает расти [3].

Из всего многообразия специальных транспортных средств (СТС) перспективны много-

осные большегрузные автопоезда и самоходные сочлененные платформы, обладающие большой грузоподъемностью и силой тяги, а также повышенной проходимостью [4].

Применение автопоездов – важнейшее мероприятие повышения грузоперевозок и эффективного использования. Предпочтительность применения автопоездов обусловлена существенным улучшением экономических показателей перевозки грузов. Так, производительность автопоездов примерно на 60 % выше, чем одиночных грузовых автомобилей.

Тягово-динамические свойства автопоездов характеризуют предельные силовые и кинематические возможности их установивше-

гося и неустановившегося движения. К ним относятся: динамический фактор, удельная мощность, максимальная и средняя скорости, а также параметры неустановившегося движения – выбег с установленной скорости, время и путь разгона до определенной скорости [5].

Экономические характеристики автопоездов определяются двумя показателями: дорожной экономической характеристикой и расходом горючего в литрах на 100 км пройденного пути.

Значительное развитие получают так называемые активные автопоезда с ведущими колесами прицепных звеньев. Совершенствование активных поездов расширит сферы их применения на севере, в Сибири и других районах страны с ограниченной дорожной сетью.

Система дополнительной энергетики активизации автопоезда является одной из ключевых составляющих теплоэлектрического привода современного автопоезда. При прямолинейном и особенно криволинейном движении активного автопоезда с заблокированным приводом неровности дороги, различные радиусы ведущих колес, различные пути, проходимые ими, вызывают буксование и проскальзывание колес, обусловленное кинематическим рассогласованием привода. Кинематическое рассогласование наиболее сильно проявляется при криволинейном движении, и величина энергетических потерь при этом позволяет установить требования к конструкции привода, а также выявить целесообразность применения заблокированного привода. Для сравнительной оценки эффекта от включения привода колес полуприцепа удобно использовать величину избыточной силы тяги в точке сцепки автопоезда. При повороте активного автопоезда с неуправляемыми колесами полуприцепа,

кроме неизбежных потерь на колесобразование, будут возникать дополнительные потери, обусловленные кинематическим рассогласованием между колесами тягача и полуприцепа. Они вызовут увеличение коэффициента сопротивления движению автопоезда и могут привести к снижению эффекта от включения активного привода колес полуприцепа [6].

Основная часть

На автопоездах дополнительно к штатному двигателю применяются дизельные или газотурбинные двигатели, которые включаются постоянно для питания системы дополнительной энергетики активизации (СДЭА) прицепных звеньев при преодолении крутых подъемов и труднопроходимых участков дороги.

Дизельный двигатель предназначен для привода трехфазного генератора, который обеспечивает электроснабжение мотор-колеса. Схема автопоезда представлена на рис. 1.

В многодвигательном электроприводе возможны последовательные, параллельные и параллельно-последовательные схемы соединения тяговых электродвигателей (ТЭД). При этом существует несколько способов управления ТЭД. В частности, индивидуальное и групповое, обладающие своими достоинствами и недостатками. Достоинством группового управления является простота реализации. Достоинством индивидуального – наилучшая приспособляемость к дорожным условиям. Наилучшим сочетанием простоты и надежности обладает электропривод с кольцевой схемой соединения электродвигателей [7].

В схеме обеспечено равенство токов якорей электродвигателей. Для осуществления движения вперед крайние контакты КР замкнуты. Трогание происходит на полном поле. Далее

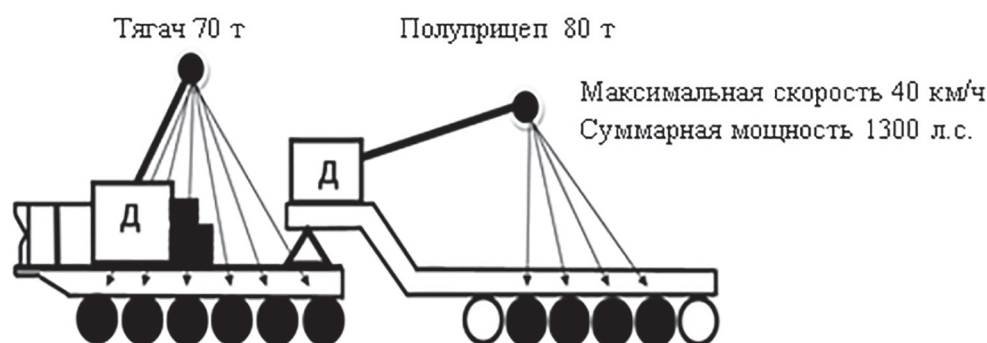


Рис. 1. Схема автопоезда с СДЭА

Fig. 1. Road train scheme with a system of additional energy and activation

по мере разгона происходит ослабление поля контактами K1 и K2 соответственно. Переход автоматический – по скорости.

Реверсирование ТЭД достигается переключением контактов реверсора КР.

Кольцевая схема обеспечивает групповое управление, равенство токов и моментов, а также уменьшает суммарные потери мощности в электроприводе и износ шин. Поэтому выберем кольцевую схему, показанную на рис. 2.

Проанализируем параметры тягового электропривода с кольцевой схемой при криволинейном движении. При движении автопоездов специального назначения, да и вообще автопоездов в целом целесообразно иметь на колесах одинаковые силы тяги, крутящие моменты, а также равенство распределения нагрузки. Однако, как показывает практика, не всегда мы имеем такую закономерность. В условиях постоянно изменяющейся дорожной обстановки (укатанный щебень, гололеда, укатанный снег) может происходить ухудшение проходимости. Первая проблема заключается в том, что эти факторы провоцируют срыв сцепления, который необходимо ликвидировать. Вторая проблема: как отличить буксование от поворота. Ведь поворот не является частным случаем буксования. Существует несколько вариантов решения поставленной задачи, некоторые из них будут рассмотрены ниже.

Одним из основных параметров является маневренность автопоезда. Применительно к объекту исследования маневренность – это способность автопоезда быстро реагировать на повороты рулевого колеса, выполнять поворот на минимальной площади.

При увеличении количества звеньев автопоезда ухудшается его маневренность, поэтому при проектировании автопоездов необходимо определять границу их использования по маневренности. Эта задача не может быть решена без анализа условий эксплуатации и выявления требуемого уровня маневренности конкретного автопоезда в конкретных условиях эксплуатации.

Хорошая маневренность автопоезда выражается в возможности его вписывания во все встречающиеся на маршрутах движения повороты и маневрировать (совершать повороты и в случае необходимости двигаться задним ходом) в пунктах погрузки и разгрузки.

Эксплуатационные свойства включают девять показателей маневренности, шесть из которых являются кинематическими, а три – динамическими. Среди них нормированным является только минимальный радиус поворота автопоезда [8].

Таким образом, для определения степени приспособленности конкретного трехзвеного автопоезда к конкретным условиям экс-

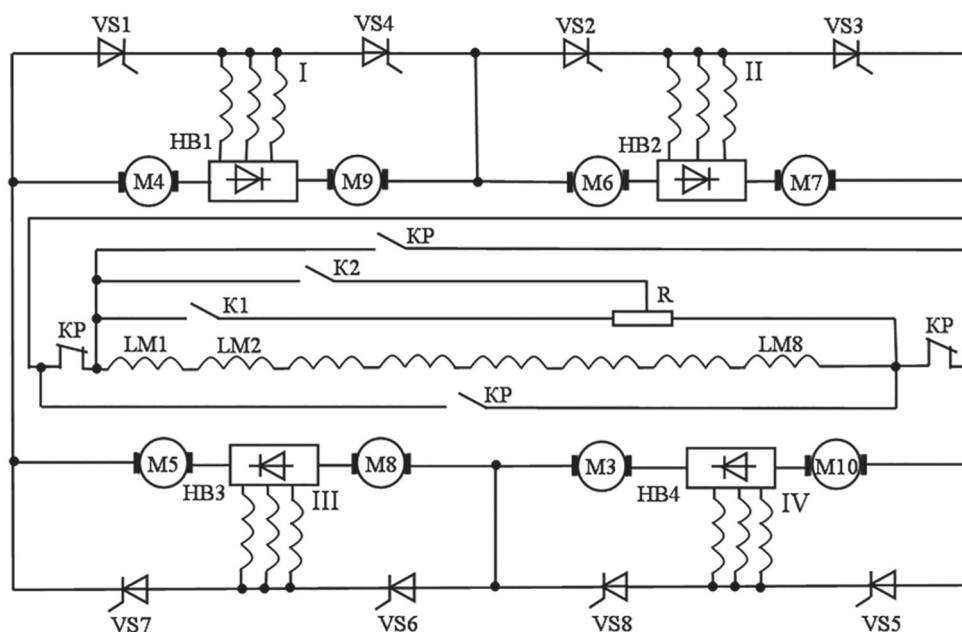


Рис. 2. Схема силовой цепи электропривода

Fig. 2. Electric drive power circuit diagram

плуатации по маневренности необходимо изучить предполагаемые маршруты движения, рассчитать или экспериментально определить значения показателей маневренности и путем сопоставления с требуемыми значениями, установленными из анализа реальных маршрутов, судить о соответствии достигнутого уровня маневренности требуемому.

В случае несоответствия этих уровней должны быть разработаны мероприятия или рекомендации, при реализации которых это несоответствие устраняется. При проектировании новых трехзвенных автопоездов эти рекомендации и мероприятия должны учитываться заранее.

Вполне очевидно, что возможными условиями эксплуатации, которые могут считаться наиболее тяжелыми по маневренности для автопоездов, являются городские условия эксплуатации.

Динамическое взаимодействие звеньев автопоезда является одним из основных параметров для исследования. Связь между звеньями автопоезда осуществляется с помощью сцепных устройств, к которым приложены силы взаимодействия, обусловленные относительными продольными и поперечными перемещениями звеньев, главным образом в горизонтальной плоскости. Поперечные горизонтальные относительные перемещения звеньев чаще всего являются нестесненными и практически не оказывают влияния на износ и деформацию деталей сцепных устройств. Прочность последних регламентируется преимущественно продольными горизонтальными относительными перемещениями.

Динамическое взаимодействие проявляется наиболее отчетливо на неустановившихся режимах движения автопоездов, на дорогах с ровным покрытием. На этих режимах целесообразно в первую очередь учитывать только свободные продольные колебания звеньев; влияние же нерегулярного профиля пути оценивается дополнительно при анализе вынужденных колебаний, который требует привлечения экспериментальных данных, обобщенных методами математической статистики.

Наиболее неблагоприятными с точки зрения нагрузок на детали сцепного устройства являются режимы движения автопоездов с резким приложением к их движителям тяговых или тормозных сил. На таких режимах движения возникают значительные нагрузки,

вызванные свободными продольными колебаниями звеньев, способные привести к опасным последствиям.

Неустановившиеся режимы представляют собой, таким образом, первоочередной интерес для прочностного расчета сцепных устройств.

Наиболее характерным с точки зрения динамического взаимодействия является режим торможения. Для режима трогания автопоезда будут справедливы те же зависимости, что и для торможения, если знаки у тормозных сил заменить на обратные.

Кинематика прямолинейного движения автопоезда может дать важную информацию о динамике возникновения и характере протекания рассматриваемых явлений. В связи с этим, введем понятие габаритной полосы движения автопоезда (ГПД), понимая под этим площадь опорной поверхности (дороги, местности, проезда), ограниченную проекциями на нее траекторий крайних выступающих габаритных точек звеньев автопоезда. Зная форму габаритной полосы движения и ее основные размеры, можно достаточно точно характеризовать, оценивать, сопоставлять и рассчитывать маневренные свойства различных типов автопоездов.

Существует множество траекторий для оценки движения автопоезда. Однако из всех траекторий автопоезда одна является основной, определяющей характер его движения и целиком зависящей от воли водителя, управляющего автопоездом, соотносясь с обстановкой на дороге.

Основной траекторией автопоезда называем траекторию середины ведущего моста двухосного тягача нормальной компоновки. Точка касания основной траектории к продольной оси трехосного тягача находится посередине между ведущими мостами задней тележки, а у двухосного тягача со всеми управляемыми колесам – посередине базы.

Основная траектория состоит из отрезков кривых и прямых линий, сочетание которых зависит от типа поворота. Следует различать три таких типичных поворота:

– поворот на угол 90° (прямоугольный поворот) и близкие к нему повороты на углы $80-85^\circ$ и $95-100^\circ$;

– разворот на угол 180° (движение в обратном направлении) и близкие к нему развороты примерно на углы $160-200^\circ$;

– переставка или смена полосы движения, совершающаяся также при объезде, обгоне,

отъезде от стенки здания или погрузочной платформы. Первые два типа поворота относятся к односторонним, а третий к двухсторонним поворотам.

Угол поворота любой колесной опоры, закрепленной на каждом из элементарных модулей рассчитывается с помощью модульного контроллера по формуле вида [3]:

$$\varphi_{ij}^k = \arctg\left(\frac{L_n}{R \pm B_{ij}^k}\right), \quad (1)$$

где L_n – координата полюса поворота, R – радиус поворота, – координаты его поворотных опор по ширине, k – наименование (номер) элементарного модуля; i – номер опоры левого ряда элементарного модуля; j – номер опоры правого ряда элементарного модуля.

Величина задает положение точки Q на продольной оси транспортера. Относительно этой точки оператор задает радиус поворота транспортера R путем поворота опор на углы φ_{ij}^k , которые являются управляемыми параметрами.

Рассчитанный по формуле (1) на модульном контроллере φ_{ij}^k подается на каждый контроллер [9] опоры в качестве задающего воздействия.

При прямолинейном движении автопоезда предполагается допущение о том, что оно устойчиво, т.е. нет виляний прицепа, а также что траектории всех его точек параллельны. В то же время траектории однородных точек, лежащих на одной продольной оси (например, середины всех ходовых осей), полностью совпадают, т.е. накладываются друг на друга.

При этом форма габаритной полосы движения весьма проста – прямолинейная полоса по-

стоянной ширины. Схема автопоезда представлена на рис. 3.

Автопоезд должен иметь возможность существенно изменять направление движения на ограниченном участке пути. Это необходимо при маневрировании в местах погрузки и разгрузки на небольшой площади, на городских маршрутах, характеризующихся большим количеством поворотов на 90° [10].

Криволинейное движение автопоезда возникает при повороте управляемых колес его ведущего элемента. Траектория движения автомобиля (седельного тягача) начинает искривляться под влиянием боковых реакций дороги на повернутые передние управляемые колеса.

С точки зрения проезда криволинейных участков дороги, автопоезда могут быть разделены на два основных типа. Первый – автопоезд в составе седельного тягача и полуприцепа с неуправляемой тележкой. В отличие от серийно выпускаемых автомобильной промышленностью полуприцепов, база которых не превышает 1,5 длины базы седельного тягача, специализированные полуприцепы, работающие в строительных организациях, имеют базу, которая превышает длину базы седельного тягача в 2–2,5 раза. Второй – автопоезд в составе седельного тягача и полуприцепа с управляемой тележкой, где угол поворота колес тележки относительно продольной оси полуприцепа в процессе прохождения криволинейных участков пути меняется пропорционально углу между продольными осями седельного тягача и полуприцепа.

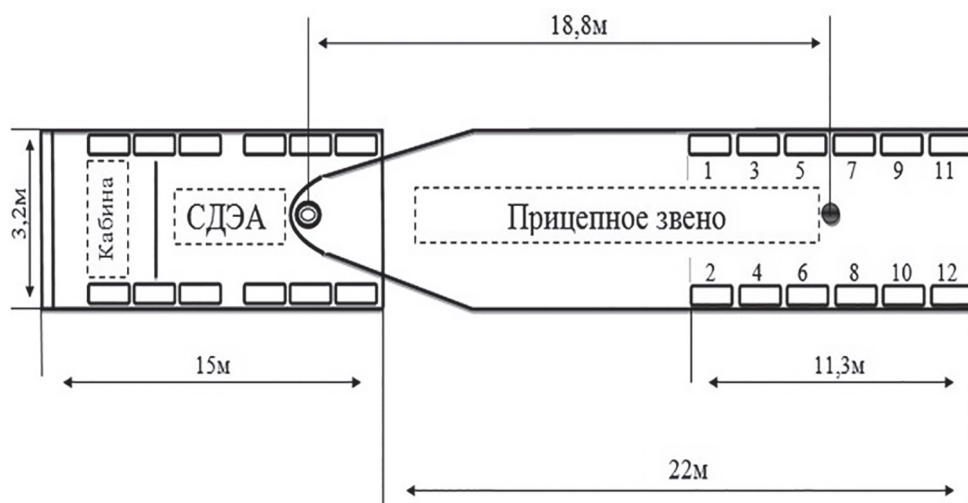


Рис. 3. Схема автопоезда

Fig. 3. Road train scheme

По такой схеме осуществляется поворот тележки полуприцепов с тросовой и гидрообъемными системами управления поворотом. Характер прямолинейного движения, а следовательно, и форма полосы движения этих типов автопоездов совершенно различны. Поэтому принципиально отличаются и приемы их вождения на криволинейных участках пути.

Основная сложность криволинейного движения автопоездов первого типа заключается в смещении траектории движения тележки в сторону поворота автопоездов, вследствие чего происходит уширение полосы его движения. В образовании этой полосы в общем случае могут участвовать оба звена автопоезда, а также перевозимый груз. Пока автопоезд идет прямолинейно, ширина полосы определяется его габаритными размерами (для простоты мы не рассматриваем динамический коридор автопоезда). При прохождении криволинейных участков пути наружную составляющую его полосы движения описывает крыло внешнего колеса тягача, а внутреннюю – крайние габаритные точки тележки или рамы полуприцепа. Ее ширина и форма зависят от ряда факторов: от длины базы тягача и полуприцепа, величины смещения опорно-цепного устройства относительно заднего моста тягача, радиуса поворота, угла между начальным и конечным направлениями угловой скорости поворота управляемых колес тягача и скорости автопоезда на повороте.

Из числа названных факторов решающее влияние на образование полосы движения ав-

топоезда на закруглениях оказывают длина базы полуприцепа, радиус поворота и угол между начальными и конечными направлениями движения. Полоса на закруглении уширяется с увеличением длины базы полуприцепа и угла между начальными и конечными направлениями пути и уменьшается с увеличением радиуса поворота.

Основная закономерность криволинейного движения автопоездов второго типа – это смещение траектории движения тележки полуприцепа во внешнюю относительно траектории движения седельного тягача сторону на входе в поворот и смещение ее на внутреннюю сторону на выходе из поворота.

Величина внутреннего и наружного смещения зависит от тех же параметров, что и в предыдущем случае и, кроме того, от передаточного отношения привода управления. Однако решающее значение имеют длина базы полуприцепа и радиус поворота. Как наружное, так и внутреннее смещение увеличивается с увеличением радиуса поворота. Наибольшая ширина полосы движения такого типа автопоезда в общем случае может быть либо в середине закругления, либо в тех его местах, где величина наружного и внутреннего смещения достигает максимального значения. Схема кругового движения автопоезда показана на рис. 4.

Исследование параметров тягового электропривода

Основной задачей является исследование путей повышения эффективности электро-

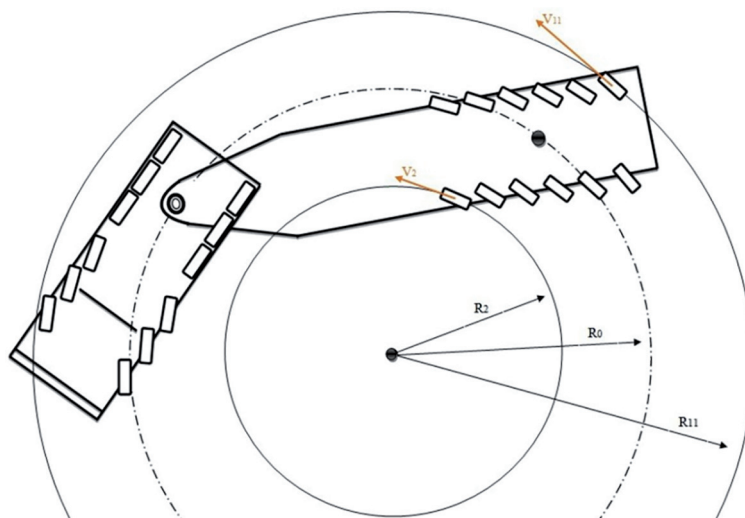


Рис. 4. Схема кругового движения автопоезда

Fig. 4. Circular road train scheme

привода на повороте автопоезда. Необходимо произвести выбор схемы подключения ТЭП. Что бы остановиться на конкретной схеме нужно рассмотреть с каких с каких позиции эту оптимизацию проводить. На повороте в многодвигательном приводе встречается разброс токов, это вызывает разброс сил тяги по колесам, разброс потерь.

Этот разброс может быть разным, он приводит к тому, что на внутреннем борту растет сила тяги и эта сила тяги препятствует повороту автопоезда, что влечет за собой износ шин. Совершенно ясно, что отклонение токов вызывает изменение потерь в электродвигателях.

Целью данной работы является поиск, во-первых, рационального распределения токов, делать это с позиции трех факторов по потерям, по силам, которые действуют по колесам (внешний внутренний борт) и потерям в шинах. Если мы имеем равное распределение токов, износ будет меньше и это будет более выгодный вариант. Для правильной оценки и выбора схемы необходимо произвести исследование поворота ТС, какие получаются токи, насколько велик разброс токов и как это сказывается на КПД.

Рассматривался поворот ТС. При условии, что выполняется всасываемость. Каждое колесо вращается со своей скоростью. Варианты распределения нагрузок. Для этих вариантов разработана методика и алгоритмы расчета потерь и КПД. Для примера на рис. 5 представлен алгоритм расчета при равенстве токов.

В соответствии с этой методикой были проведены расчеты при различных скоростях на радиусах поворота до 25 м. КПД значительно возрастает при увеличении скорости при равенстве токов и мощностей (рис. 6).

В таблице 1 представлены результаты расчетов КПД как при равенстве токов, так и при равенстве мощностей ТЭД.

Заключение

Проведен анализ областей применения, а также основных параметров большегрузных автопоездов. Выбрана схема силовой цепи электропривода. Проведено исследование параметров тягового электропривода.

Определены перспективы и области применения многозвенных автопоездов.

Для повышения топливной экономичности и технико-экономических показателей целесообразны следующие мероприятия:

- применение турбонаддува с промежуточным охлаждением воздуха;
- повышение давления впрыска топлива;
- оптимизация рабочего процесса двигателя путем применения четырехклапанных головок и электронных систем регулирования;
- применение шин с малыми гистерезисными потерями без ухудшения других свойств (тормозных, сцепных, устойчивости курсового движения);

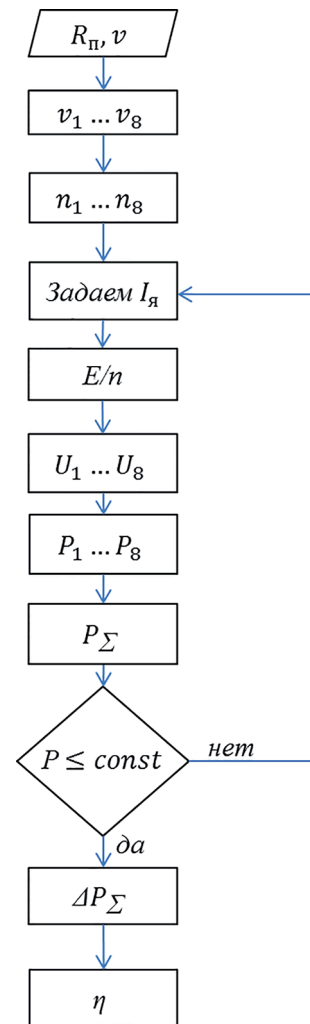


Рис. 5. Методика расчета КПД при равенстве токов ТЭД:

R_{π} – радиус поворота; v – скорость автопоезда; $I_{я}$ – ток якоря; v_i, n_i – частота вращения кожного колеса; E_i – ЭДС; U_i – напряжение; P_{Σ} – суммарная мощность; ΔP_{Σ} – суммарные потери; η – КПД

Fig. 5. Methodology for calculating the efficiency with equal traction currents: R_{π} – turning radius; v – velocity of the road train; $I_{я}$ – armature current; v_i, n_i – rotation frequency of the skin wheel; E_i – electromotive force; U_i – voltage; P_{Σ} – total power; ΔP_{Σ} – total losses; η – efficiency

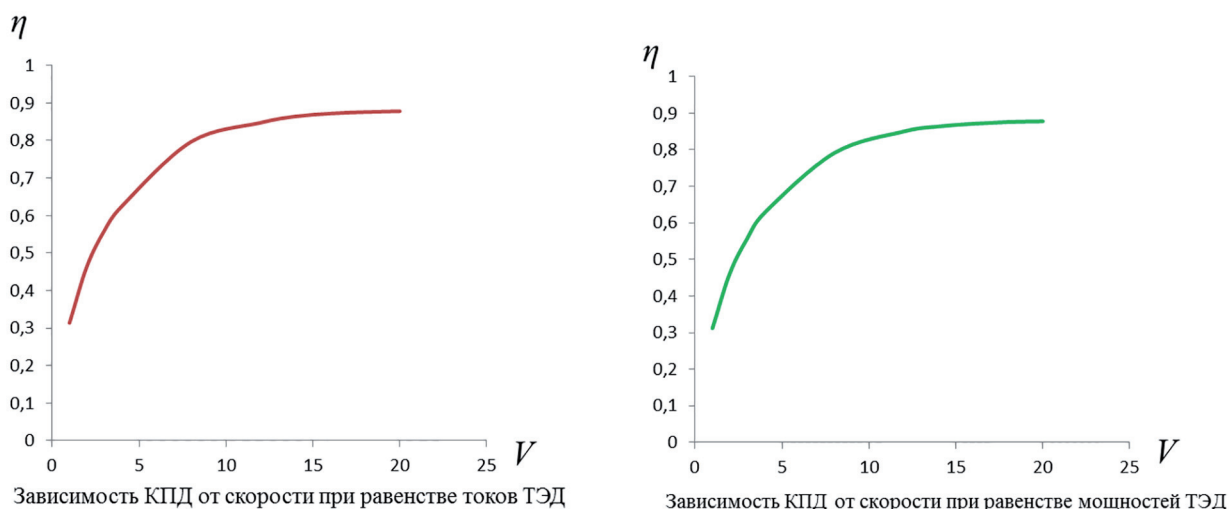


Рис. 6. Зависимости КПД

Fig. 6. Efficiency dependencies

Таблица 1

Расчет КПД при $V = 10$ км/ч, $R_n = 25$ м, $N_e = 650$ л.с.

Table 1. Efficiency calculation at $V = 10$ km/h, $R_n = 25$ m, $N_e = 650$ HP

Условие управления	Диапазон частот вращения ТЭД n [об/мин]	Диапазон токов I_n [А]	Диапазон суммарных потерь ΔP_{Σ} [Вт]	Диапазон КПД η [%]
Равенство токов ТЭД	8,95–10,62	182	7163–7440	83,4–84,9
Равенство мощностей ТЭД	8,95–10,62	174–192	6909–7826	80,5–82,9
Равенство напряжений ТЭД	8,95–10,62	150–221	5399–9877	79,7–83,3

– установка обтекаемых кабин и дополнительных устройств, снижающих аэродинамическое сопротивление кабины и полуприцепа;
– использование в двигателе и агрегатах трансмиссии смазочных материалов с уменьшенной вязкостью и другие.

Данные мероприятия позволяют уменьшить потери в трансмиссии и ходовой части, улучшить аэродинамические свойства автопоезда и снизить расход топлива на 10–15 %.

Литература

1. Tatievskiy D. Realization of reverse motion of the model of a semitrailer road train. Eureka: Physics and Engineering. 2018. № 3. С. 59–66.
2. Corbo P., Corcione F.E., Migliardini F., Veneri O. Experimental study of a fuel cell power train for road transport application. Journal of Power Sources. 2005. Т. 145. № 2. С. 610–619.
3. Saikin A.M., Evgrafov V.V., Shagurin A.L., Maslov K.V., Novozhilov A.A. Issues and possible approaches to development of intelligent transport systems for the arctic zone of Russia. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Т. 9. № 9. С. 2046–2055.
4. Ling L., Guan Q., Dhanasekar M., Thambiratnam D.P. Dynamic simulation of train-truck collision at level crossing. Vehicle System Dynamics. 2017. Т. 55. № 1. С. 1–22.
5. Usinin U., Grigoryev M., Shishkov A., Belousov E., Zhuravlev A.M., Bychkov A., Sychev D., Gladyshev S. The traction: electric drive of the active trailer for pipe transportation. SAE Technical Papers. 2015. Т. 2015-September.
6. McNicol B.D., Rand D.A.J., Williams K.R. Fuel cells for road transportation purposes – yes or no? Journal of Power Sources. 2001. Т. 100. № 1–2. С. 47–59.
7. S.M. Zuev, A.M. Fironov, D.O. Varlamov, V.V. Kuksa. The search of new diagnosing and predicting methods to the thermomechanical and strength characteristics of the component base of control systems for unmanned vehicles of the “smart city” based on 5G technologies. Journal of Physics: Conference Series, 1347 (2019), 012122, XV International Russian-Chinese Symposium Advanced.

8. Pudovikov O.E., Tun A.Z. A system of automatic control of motion speed of a city transport system electric train. Russian Electrical Engineering. 2016. T. 87. № 9. С. 536–540.
9. R.A. Maleev, S.M. Zuev, A.M. Fironov, N.A. Volchkov, A.A. Skvortsov. The starting processes of a car engine using capacitive energy storages. Periodico Tche Quimica, 2019, vol.16, № 33, p. 877–888. Index Scopus.
10. Ling L., Dhanasekar M., Thambiratnam D.P. Frontal collision of trains onto obliquely stuck road trucks at level crossing: derailment mechanisms and simulation. International Journal of Impact Engineering. 2017. T. 100. C. 154–165.

Reference

1. Tatievskiy D. Realization of reverse motion of the model of a semitrailer road train. Eureka: Physics and Engineering. 2018. No 3, pp. 59–66.
2. Corbo P., Corcione F.E., Migliardini F., Veneri O. Experimental study of a fuel cell power train for road transport application. Journal of Power Sources. 2005. Vol. 145. No 2, pp. 610–619.
3. Saikin A.M., Evgrafov V.V., Shagurin A.L., Maslov K.V., Novozhilov A.A. Issues and possible approaches to development of intelligent transport systems for the arctic zone of Russia. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No 9, pp. 2046–2055.
4. Ling L., Guan Q., Dhanasekar M., Thambiratnam D.P. Dynamic simulation of train-truck collision at level crossing. Vehicle System Dynamics. 2017. Vol. 55. No 1, pp. 1–22.
5. Usinin U., Grigoryev M., Shishkov A., Belousov E., Zhuravlev A.M., Bychkov A., Sychev D., Gladyshev S. The traction: electric drive of the active trailer for pipe transportation. SAE Technical Papers. 2015. T. 2015-September.
6. McNicol B.D., Rand D.A.J., Williams K.R. Fuel cells for road transportation purposes – yes or no? Journal of Power Sources. 2001. Vol. 100. No 1–2, pp. 47–59.
7. S.M. Zuev, A.M. Fironov, D.O. Varlamov, V.V. Kuksa. The search of new diagnosing and predicting methods to the thermomechanical and strength characteristics of the component base of control systems for unmanned vehicles of the “smart city” based on 5G technologies. Journal of Physics: Conference Series, 1347 (2019), 012122, XV International Russian-Chinese Symposium Advanced
8. Pudovikov O.E., Tun A.Z. A system of automatic control of motion speed of a city transport system electric train. Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. No 9, pp. 536–540.
9. R.A. Maleev, S.M. Zuev, A.M. Fironov, N.A. Volchkov, A.A. Skvortsov. The starting processes of a car engine using capacitive energy storages. Periodico Tche Quimica, 2019, Vol.16, No 33, pp. 877–888. Index Scopus.
10. Ling L., Dhanasekar M., Thambiratnam D.P. Frontal collision of trains onto obliquely stuck road trucks at level crossing: derailment mechanisms and simulation. International Journal of Impact Engineering. 2017. Vol. 100, pp. 154–165.

STUDY OF THE COMBINED DRIVE OF THE ROAD TRAIN

PhD in Physics and Mathematics **S.M. Zuyev**¹, PhD in Engineering **R.A. Maleyev**¹, **YU.M. Shmatkov**¹, **P.S. Shirokov**¹,
PhD in Engineering **D.R. Yakhutl'**²

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

²Research and Experimental Institute of Automotive Electronics and Electrical Equipment, Moscow, Russia

eoqe@mospolytech.ru

This article describes purpose, areas of application and main parameters of heavy road trains for the transportation of special and general cargo. Heavy-duty road trains with drive wheels of trailed links are considered. The advantages of using heavy-duty road trains in comparison with single trucks are shown. Additional energy sources for a standard engine (diesel or gas turbine engine for driving a three-phase generator), designed to overcome steep ascents and difficult road sections, are considered. The analysis of the turn of the road train is carried out. The advantages of ring and parallel circuit with individual control are shown. The analysis of the traction forces on the wheels and the spread of losses when turning the road train in a multi-engine drive are made. The traction and dynamic properties of road trains are presented. They characterize the limiting power and kinematic capabilities of road trains in various modes of movement.

A search for a rational distribution of currents depending on the forces acting on the wheels and losses in the tires was made.

The study of the turning of the vehicle was carried out. The values of currents, the magnitude of the spread of currents and their influence on the efficiency were calculated. The economic characteristics of road trains were determined.

A methodology and algorithms for calculating losses and efficiency were developed. An algorithm for calculating at equal currents is presented. Calculations of the efficiency at various speeds and turning radii when the road train is moving are carried out. The analysis of the efficiency at the equality of currents and powers when the speed of movement is changed was made.

Various design and technological measures are proposed to improve the technical characteristics of the road train.

Keywords: road train, thermoelectric drive, large-sized heavy object, modular conveyor, cargo platform, control system, maneuverability, controllability, controller, support swing angle, steering program, setting action, misalignment.

Cite as: Zuyev S.M., Maleyev R.A., Shmatkov YU.M., Shirokov P.S., Yakhutl' D.R. Study of the combined drive of the road train. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 2 (48), pp. 26–35 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-26-35.