

Накопленный опыт разработок и исследований в автомобилестроении позволяет сформулировать требования к технико-эксплуатационным показателям (ТЭП) АТС с учетом характерных условий работы транспортного средства. Основные эксплуатационные показатели, оказывающие влияние на выбор силовых агрегатов его тяговой системы, это полный вес АТС -; мощность комбинированной энергоустановки (ГЭУ) - РГЭУ (Вт), количество ведущих колес - n ; номинальная сила тяги -, обеспечивающая АТС движение с номинальной скоростью по подъему; максимальная скорость - (км/ч); максимальная сила тяги -, обеспечивающая АТС преодоление предельного подъема при движении со скоростью (км/ч); перегрузочная сила тяги -, обеспечивающая АТС движение по подъему со скоростью при допустимом нагреве силовых агрегатов тяговой системы; производительность; удельно-приведенный расход энергии и эффективность тяговой системы. Требуемые ТЭП обеспечиваются оптимизацией взаимосвязей в АТС, что наиболее рационально может быть выполнено при использовании методики исследования тяговых систем «от двигателя к энергоустановке». Эта методика учитывает назначение АТС и его заданных ТЭП. Развивая заложенный в ней подход к анализу согласованного функционирования совокупности элементов, узлов и агрегатов, составляющей транспортное средство в целом, силовые агрегаты тяговой системы в настоящей работе рассматривались в составе системы дорога - колеса - двигатель преобразователи - ГЭУ [1]. Этот принцип дал возможность аналитически описать в едином координатном базисе взаимосвязи между дорожными условиями движения автомобиля и работой тяговой системы, на основании чего упорядочивается определение параметров и характеристик ее силовых агрегатов. Большое влияние на формирование тяговой характеристики автомобиля оказывают регулировочные свойства и показатели ТЭД, параметры и внешние характеристики бортовой энергоустановки (БЭУ). Известно, что сила тяги, развиваемая АТС, определяется отдаваемой БЭУ, в нашем случае - ГЭУ, полезной мощностью и КПД тяговой системы АТС. Максимальная требуемая полезная мощность ГЭУ в стационарных режимах рассчитывается для заданной максимальной скорости АТС при ровной дороге (1) по формуле: (1) (2) где α и β - соответственно коэффициенты сопротивления движения. Используя выражение (3.1), тяговую характеристику АТС представим выражением: (2) когда дана максимальная мощность ГЭУ, или соотношением (3) при заданных требованиях к основным эксплуатационным показателям. Тяговые свойства АТС можно выразить на графике тягового баланса (рис. 1) характеристикой в координатах (). Здесь представлены как сила тяги F , так и суммарные силы сопротивления движению, рассчитываемые по уравнению тягового баланса транспортного средства для заданных в требованиях преодолеваемых подъемов дороги: Здесь представлены как сила тяги F , так и суммарные силы сопротивления движению, рассчитываемые по уравнению

тягового баланса транспортного средства для заданных в требованиях преодолеваемых подъемов дороги: Проведем на графике тягового баланса прямые, параллельные осям координат, которые соответствуют максимальной силе тяги рис.1 (штриховая линия АВ): (4) максимальной скорости (штриховая линия DE), определяемые как решение уравнений тягового баланса, выводимого из системы, характеризующей тяговые свойства АТС и суммарную силу сопротивления при движении его по ровной дороге: . (5) Рис. 1 - Предельные тяговые характеристики АТС Тяговая характеристика представляется тремя характерными участками. Линия АВ ограничивает тяговое усилие на уровне . Точка В пересечения прямой с зависимостью определяет диапазон изменения скорости от нуля до граничной скорости . (6) При известных расчетной формулой для граничной скорости : (7) Точка D пересечения характеристики с прямой (рис.1) определяет граничное тяговое усилие Участок гиперболы BCD характеризует полученную эффективность энергопреобразования в силовых агрегатах тяговой системы при выбранной мощности автономной энергоустановки. Точка С тяговой характеристики используется для определения режима энергопреобразования, при котором выявляются перегрузочные (по температуре) свойства силовых агрегатов тяговой системы. Ее положение задается выбором номинальной скорости . Вторая координата точки С характеризует силу , затрачиваемую на преодоление суммарной силы сопротивления движению автомобиля по подъему с номинальной скоростью . Точкой N на прямой задаётся номинальная сила тяги . Подъем, для которого характеристика суммарной силы сопротивления движению проходит через данную точку, принимается за номинальный (). Положение точки N, как точки номинального тягового режима, выбирается из соображений придания автомобилю динамических свойств, требуемых при движении в городских условиях. Следует отметить, что по величине определяются номинальный момент ТЭД и возможность длительной работы силовых агрегатов тяговой системы по условиям нагрева. (8) Номинальная и перегрузочная силы тяги определяется соотношениями: (8) (9) Номинальная скорость при известном уклоне дороги (10) При известной величине значения подъема находится из выражения (11) Необходимо отметить, что выбор величины номинальной скорости предопределяет энергетическую эффективность создаваемого транспортного средства, поскольку эта величина совместно со значением формирует область работы силовых агрегатов тяговой системы с максимальным КПД. Поэтому при создании тяговых систем АТС за номинальную скорость выбирают такую, которая преобладает при заданных условиях эксплуатации и обеспечивает АТС наилучшие технико-эксплуатационные показатели. Требуемые кратности максимальной скорости движения АТС: (12) Максимальная сила тяги: (13) Диапазоны изменения тяговых усилий и скоростей могут достигать соответственно значений $= 3...4$ и $= 3...6$. Таким образом, учет заданных

основных ТЭП АТС и параметров силовых агрегатов СТП и КЭУ в процессе создания тяговых систем АТС позволяет конкретизировать исследования, детерминировать расчеты и исключить ряд неопределенностей, затрудняющих обеспечение требуемых тяговых характеристик. При создании образцов АТС в качестве инженерной методики использовалась последовательность выше полученных зависимостей. При создании городского ЭМБ или АКСУ первоочередной задачей является установление совокупности взаимосвязей и закономерностей между ТЭП и заданными тягово-динамическими характеристиками ЭМБ или АКСУ с учетом параметров и характеристик гибридной энергоустановки (ГЭУ) и тягового электродвигателя (ТЭД), составляющих основу силовой цепи преобразования и передачи энергии [1].

Одна из основных задач при этом состоит в обосновании рациональных методов их выбора и согласования, выявления путей оптимизации агрегатов для получения заданных (или желательных) энергетических и технико-эксплуатационных показателей как тяговой системы электромобиля, так и транспортного средства в целом. Вращающий момент M , развиваемый ТЭД, для заданной тягово-динамической характеристики ЭМБ или АКСУ определяется выражением: (14) где i - соответственно передаточное число и КПД трансмиссии; r - радиус качения ведущего колеса. Для вращающего момента M :

(15) Здесь M_0 - статический момент на валу ТЭД, Нм; (16) ω - угловая скорость вращения вала ТЭД, равная (17) M_d - динамический момент, обуславливаемый приведенным к валу ТЭД моментом инерции частей, совершающих вращательное и поступательное движение, (18) Для определения механической характеристики ТЭД необходимо воспользоваться тяговой характеристикой АТС. Тогда при заданной максимальной мощности ГЭУ механическая характеристика ТЭД представляется выражением (19) (20) Для принятой методики исследования тяговой системы электромобиля (ТСЭ) «от дороги к ГЭУ» должны удовлетворяться технические требования к ТСЭ, при этом механическая характеристика ТЭД имеет вид: (20) Используя приведенные выше соотношения, можно построить механическую характеристику ТЭД (рис. 2) для некоторого постоянного передаточного числа трансмиссии (i). На рис. 3 изображены механическая характеристика и зависимости, приведенных к валу ТЭД, статических моментов суммарных сил сопротивления движению ЭМ для различных уклонов дороги. По аналогии с тяговой характеристикой механическая $M_{\text{мех}}$ имеет три характерных участка: участок АВ постоянного (максимального) момента $M_{\text{д}}$, развиваемого ТЭД; участок BCD - постоянной мощности ($P = \text{const}$), которая определяется предельными параметрами КЭУ и ТЭД; участок DE - максимальной скорости v_{max} . При этом справедливы следующие отношения: (21) Рис. 2 - Механическая и нагрузочные характеристики тягового электродвигателя Пользуясь известными соотношениями, зависимость можно преобразовать в вольтамперную характеристику ТЭД (U - напряжение и ток ТЭД)

(рис. 3). Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения имеем соотношения: (22) где k - конструктивный коэффициент двигателя; Φ - магнитный поток; E - противо-ЭДС двигателя; R суммарное сопротивление цепи якоря, Ом (рис. 3). Рис. 3 - Зависимость тягового электродвигателя Величина тока I двигателя получается из выражения баланса мощности решением квадратичного уравнения: (23) в результате получим: (24) Принимая координаты точки N в качестве номинальных значений напряжения и тока, тогда режимы работы ТЭД, соответствующие точкам B и D, описываются уравнениями: (25) (26) где ω и Φ - угловая скорость и магнитный поток ТЭД для точки B зависимости на рис. 3; ω_D и Φ_D - то же самое для точки D; M_D - значение момента ТЭД в точке D; $U_{\text{пад}}$ - внутреннее падение напряжения ТЭД в номинальном режиме. Здесь и далее индекс (*) соответствует относительному значению параметра, т. е. отношению текущего значения к номинальному, отмеченному подстрочным индексом «н».

При известных параметрах двигателя и трансмиссии можно вывести из механической характеристики по выражениям для момента в точках B и D следующие расчетные формулы: (27) И, следовательно: (28) где Φ_{max} и Φ_{min} - максимальное и минимальное значения магнитного потока ТЭД. Использование уравнений (28) позволяет определить кратность максимального магнитного потока электродвигателя (29) Из уравнения мощностного баланса для точки D на механической характеристике, выводится расчетная формула для минимального магнитного потока: (30) На основе выражений (29, 30) можно рассчитать величину максимального магнитного потока по формуле: (31) а затем определить диапазон изменения магнитного потока: (32) Из уравнения мощностного баланса на механической характеристике решением квадратного уравнения (33) находится выражение для расчета номинальной угловой скорости: (34) Кратность максимальной угловой скорости можно рассчитать по выражению: (35) Номинальный ток ТЭД определяется через момент в точке N на предельной механической характеристике двигателя: (36) Передаточное число трансмиссии играет важную роль в процессе энергопреобразования. С одной стороны, он определяет величину среднего КПД силовой цепи преобразования и передачи энергии от КЭУ к ведущим колесам, с другой - обеспечивает достижение максимальной скорости по предельной тяговой характеристике ЭМ. Используя соотношение (17) передаточное число трансмиссии определяется выражением: (37) где определяется по (34). Учитывая, что получим: (38) (39) Анализ выражений (38, 39), относительно параметров и дает возможность оценить приемлемый способ управления ТЭД - способ двухзонного регулирования, для реализации закона регулирования и, следовательно, тяговой характеристики. Управление ТЭД в диапазоне угловых скоростей осуществляется за счет снижения напряжения, подводимого к его зажимам. Одновременно, как правило, увеличивают ток возбуждения, а значит, и магнитный поток, значение которого ограничивается в основном степенью

насыщения ТЭД и не превышает $= 1 \dots 1,5$. Получение максимальных скоростей достигается уменьшением потока и поддержанием постоянства напряжения, при этом значение, лимитируется, прежде всего, потенциально-коммутационными условиями на коллекторе ТЭД, при чрезмерном снижении магнитного потока. Выбираем величину минимально потока равной $= 0,2 \dots 0,3$. Если $= 4 \dots 6$, то напряжение на зажимах ТЭД повышают до $= 1,3 \dots 1,5$. В общем случае соотношение между параметрами и определяется заданной кратностью максимальной угловой скорости, соображениями экономичности и требованиями минимизации массы и размеров ТЭД и ГЭУ. Определив зависимость, переходим к построению внешней вольтамперной характеристики ГЭУ с регулятором, которая должна соответствовать заданной тяговой характеристике ЭМ: (40) где соответственно передаточные коэффициенты бортовых вентильных преобразователей по напряжению и току. Регулирование угловой скорости и напряжения в широком диапазоне вверх и вниз от номинальных значений обуславливает соответствующий подход к выбору расчетной мощности тягового электрооборудования. Так расчетная мощность ТЭД определяется его номинальной мощностью согласно заданному длительному режиму работы силовых агрегатов тяговой системы ЭМБ или АКСУ, и кратностью максимальной угловой скорости: . В процессе проектирования (или выбора) ТЭД необходимо учитывать значение максимального тока нагрузки. Расчетную мощность комбинированной энергоустановки выбирают из условия реализации требуемой мощности в длительном режиме с учетом принятого закона регулирования напряжения на ее зажимах. При этом ГЭУ должна кратковременно выдержать токи нагрузки. Так как наибольшее длительное значение тока имеет место в номинальном режиме, то расчетная мощность пропорциональна максимальному напряжению. Выражения, позволяющие рассчитать максимальные значения напряжения и тока ГЭУ: (41) где - соответственно передаточные коэффициенты вентильных преобразователей по напряжению и току, определяемые его работой в точках D и B зависимости. Тогда: . (42) Таким образом, рассмотренные уравнения связи между основными параметрами ТЭД, БВП и ГЭУ позволяют определить величины, расчетные мощности агрегатов силовой цепи и другие параметры, обусловленные режимами работы ТСЭ. Указанные величины существенно влияют на энергетические и технико-эксплуатационные показатели, а также на выбор конструктивного исполнения, номинальных данных и внутренних параметров ТЭД, БВП и КЭУ.