

Процессы энергопреобразования в системе тягового привода электромобиля или автомобиля с комбинированной силовой установкой (ЭМБ или АКСУ) имеют реверсивный характер. Прямой процесс преобразования энергии (электрической энергии в механическую) используется в фазах разгона и установившегося движения. Он предназначен для преодоления сил сопротивления движению и реализации ЭМБ или АКСУ заданного ускорения. Обратный процесс энергопреобразования (механической энергии в электрическую) используется в фазе так называемого рекуперативного торможения для повышения динамических качеств и улучшения энергетических показателей ЭМБ или АКСУ [3, 4]. Разбиение движения на основные фазы позволяет синтезировать заданные транспортные циклы как для аналитических исследований, так и для натурных испытаний тяговых систем на стенде и в дорожных условиях, а также систематизировать и решить общие уравнения (тягового, мощностного и энергетического балансов) движения ЭМБ или АКСУ. Уравнение тягового баланса имеет вид: (1) где F - сила тяги на ведущих колесах, предназначена для преодоления суммарной силы сопротивления движения АТС; $F_{\text{ср}}$ - сила сопротивления качения, Н; m - масса АТС, кг; a - ускорение силы тяжести (9,81 м/с²); μ - коэффициент сопротивления качения; α - угол уклона дороги, равный при малых величинах уклона; $F_{\text{укл}}$ - сила сопротивления уклона дороги; $F_{\text{в}}$ - сила сопротивления воздуха, C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ - плотность; v - скорость движения АТС, м/с; S - площадь миделя АТС, м²; J - сила инерции; β - коэффициент учета вращающихся масс; a - ускорение, м/с². После введения переменных $\mu_{\text{ср}}$ - суммарный коэффициент сопротивления дороги; ; ; , уравнение тягового баланса (1) примет вид: (2) Максимальная сила тяги $F_{\text{кмакс}}$ ограничивается силой сцепления ведущих колес с дорогой $F_{\text{сц}}$: (3) где μ и G - коэффициенты сцепления колес с дорогой - (для асфальтовой дороги = 0,6...0,7), и сцепного веса - . Момент сил сопротивления $M_{\text{к}}$, приведенный к валу ведущего колеса, и частота его вращения определяются через силу тяги $F_{\text{к}}$ и скорость движения АТС v : (4) Уравнение мощностного баланса: (5) где $P_{\text{к}}$ - тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам. Максимальная тяговая мощность $P_{\text{кмакс}}$ при движении АТС с максимальной скоростью $v_{\text{мах}}$ по горизонтальной дороге ($\alpha = 0$): . (6) Мощностной баланс на валу тягового электродвигателя: , (7) где $P_{\text{м}}$ - требуемая механическая мощность на валу тягового электродвигателя (ТЭД), необходимая для преодоления сил сопротивления движения. Требуемая полезная мощность РГЭУ гибридной энергоустановки (ГЭУ) для реализации тяговых свойств АТС: , (8) где ; - КПД ГЭУ, БВП, ТЭД. Пройденный путь АТС L за интервал времени движения t определяется выражением: . (9) Энергетический баланс определяется расходом при движении АТС энергии $W_{\text{к}}$ при известных силе тяги $F_{\text{к}}$ или мощности $P_{\text{к}}$ интегралами: . (10) Приведенный расход энергии $w_{\text{пр}}$ это затраты на за 1 км пройденного пути: (11) Энергетические характеристики АТС. Электрические тяговые системы имеют, как правило,

меньшие потери, чем системы с тепловыми двигателями, так как степень использования энергии удастся получить достаточно высокой за счет рациональной организации процессов энергопреобразования при движении транспортных средств. Это обстоятельство имеет большое значение для оценки перспектив развития электрических тяговых систем, а также для обоснованного подхода к их созданию. Так как условия эксплуатации АТС, характеризуются циклическими изменениями режимов движения, то практическую ценность представляет выявление затрат энергии для динамических режимов. В основу исследования энергозатрат при циклическом движении АТС положен метод энергетического баланса [1, 2]. Из анализа конструкций и силовых схем тяговых систем следует, что тяговая система АТС состоит из энергетических модулей, осуществляющих параллельно-последовательное преобразование и передачу энергии в: гибридной энергоустановке (ГЭУ), состоящей из БНЭ - бортовых накопителей энергии, включая: ЭНН - энергоемкий накопитель; ЭлН - электросилового накопитель и бортового источника энергии в составе Д-ГУ - «двигателя - генераторной установки»; бортовых вентильных преобразователях (БВП); тяговом электродвигателе (ТЭД); трансмиссии (ТР). Зарядное устройство (ЗУ) обеспечивает заряд БНЭ от Д-ГУ (при избыточной мощности, генерируемой при выбеге, торможении, стоянке) и от рекуперации при торможении. При недостаточной энергии со стороны Д-ГУ ТАБ разряжается через разрядное устройство (РУ). Стабилизатор напряжения (СН) дает возможность согласовать работу Д-ГУ с БНЭ при различных режимах движения самого АТС, обеспечивая более эффективное использование источника и накопителей энергии.

Энергетическая диаграмма тяговой системы электромобиля для ездового цикла в общем виде показана на рис.1. Рис. 1 - Баланс энергии при циклическом движении ЭМБ или АКСУ Она помогает составлять уравнения баланса энергии для всего цикла и для отдельных его фаз. В обозначениях величин энергии на диаграмме добавляются в подстрочных индексах сокращенные обозначения фаз разгона (Р), установившегося движения (УД), замедления (З) и торможения (Т). Энергия $W_{ГЭУ}$, необходимая для обеспечения движения АТС: , (12) Энергия $W_{ДГ}$, выработанная Д-ГУ, за цикл движения $t_{Ц}$ АТС равна: (13) При работе Д-ГУ в оптимальном режиме имеем: (14) Энергию $W_{рАБ}$, отдаваемую ТАБ при разряде получаем интегрированием: , (15) где $U_{рАБ}$ - среднее напряжение ТАБ при разряде; i_p , t_p - ток и время разряда. По аналогии рассчитаем энергию заряда $W_{зАБ}$ ТАБ за время заряда t_z при среднем напряжении U_z : , (16) суммарный расход энергии за цикл ГЭУ вычислим по соотношению: (17) где - потери энергии, затрачиваемые на преодоление сил трения качения и аэродинамического сопротивления ; - расход энергии в бортовой сети АТС; - потери энергии в модулях системы тягового привода (ГЭУ, БВП, ТЭД, ТР); - кинетическая энергия, накопленная в фазе разгона; - энергия, рекуперированная в ТАБ при торможении. При движении электромобиля существует режим,

характерный для фазы замедления, когда энергия из батареи не потребляется, т.е. , возврат энергии в нее также отсутствует, т. е. $W_{рек} = 0$. Если пренебречь расходом энергии , то работа по преодолению сил сопротивления движению совершается за счет изменения запаса кинетической энергии . Уравнение баланса энергии в этом случае имеет вид: . (18) Для фазы торможения процесс преобразования энергии в общем случае можно описать соотношением: (19) где работа сил механической системы торможения; - изменение запаса кинетической энергии в фазе торможения равно: (20) Из уравнения (19) можно получить уравнение баланса энергии для случая, когда для остановки электромобиля используется только режим рекуперативного торможения ТЭД: (21) Выражение для энергии рекуперации $W_{рек}$: (22) В конечном итоге уравнения позволяют определить расход энергии ГЭУ за цикл с учетом полной рекуперации запасенной кинетической энергии: (23) Расход энергии ГЭУ за цикл без рекуперации равняется: (24) Однако полученные уравнения энергетического баланса позволяют определить только при известных параметрах модулей ТСЭ. При ориентировочных расчетах, когда еще не определены конкретные параметры модулей ТСЭ, можем выразить в виде: (25) где ; ; - КПД трансмиссии, ТЭД, БВП, ГЭУ при разряде и заряде, соответственно. Окончательно запишем: (26) Для случая торможения без рекуперации имеем: (27) Удельный расход энергии за цикл определяется отношением: (28) где - пробег за цикл движения, км; m - масса АТС, кг. Результаты расчетов, проведенных на основе уравнений, показали, что оптимальная работа ГЭУ позволяет обеспечить автономность автотранспортного средства (АТС) полной массой 8000 кг с комбинированной энергоустановкой мощностью около 30 кВт в течение 12 часов интенсивного обслуживания пассажиропотоков при усреднённой скорости транспортного средства 45...50 км/ч. Тяговая конденсаторная батарея (ТКБ) как электросиловой накопитель обеспечивает демпфирование динамических нагрузок при разгоне АТС, при движении на подъем. Рациональный выбор параметров и режимов ГЭУ позволит ТАБ и ТКБ постоянно находиться в подзаряженном состоянии. Таким образом, БНЭ всегда в состоянии обеспечить бесперебойную эксплуатацию АТС в течение двусменной работы. Понимание процессов энергопреобразования в ГЭУ позволяет оптимизировать массогабаритные показатели самой ГЭУ и таким образом улучшить технико-эксплуатационные показатели АТС в целом.