

В. И. Строганов, В. Н. Козловский, А. Г. Сорокин,
Л. Х. Мифтахова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Ключевые слова: электромобиль; автомобиль с комбинированной силовой установкой; математическое моделирование процессов.

В работе представлены результаты моделирования энергетических процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой.

Keywords: electric vehicles; hybrid vehicles; mathematical modeling of processes.

The paper presents the results of simulation of energy processes and electric vehicles with a combined power plant.

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:

$$F_k = F_{\Sigma} = F_f + F_{\alpha} + F_w + F_j, \quad (1)$$

где F_k - сила тяги на ведущих колесах, предназначена для преодоления суммарной силы сопротивления движения АТС F_{Σ} ;

$F_f = mgf \cos \alpha$ - сила сопротивления качения, Н;

m - масса АТС, кг;

g - ускорение силы тяжести (9,81 м/с²);

f - коэффициент сопротивления качения;

α - угол уклона дороги, равный $\alpha = \text{tg} \alpha$ при малых величинах уклона;

$F_{\alpha} = \pm mg \sin \alpha$ - сила сопротивления уклона дороги;

$F_w = 0,5 c_x \rho S v^2$ - сила сопротивления воздуха,

c_x - коэффициент аэродинамического сопротивления;

ρ - плотность;

v - скорость движения АТС, м/с;

S - площадь миделя АТС, м²;

$$F_j = \delta m \frac{dv}{dt} \text{ — сила инерции;}$$

δ - коэффициент учета вращающихся масс;

$\frac{dv}{dt}$ - ускорение, м/с².

После введения переменных $\psi = f \cos \alpha \pm \sin \alpha$ - суммарный коэффициент сопротивления дороги; $K_w = \frac{0,5 c_x \rho S}{mg}$; $F_j = \frac{\delta}{g}$;

$G = mg$, уравнение тягового баланса (1) примет вид:

$$F_k = G \left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt} \right) \quad (2)$$

Максимальная сила тяги $F_{k\text{max}}$ ограничивается силой сцепления ведущих колес с дорогой $F_{\text{сц}}$:

$$\left. \begin{aligned} F_{k\text{max}} &\leq F_{\text{сц}}, \\ F_{\text{сц}} &= K_c mg \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где φ и $K_c = 0,5$ - коэффициенты сцепления колес с дорогой - φ (для асфальтовой дороги $\varphi = 0,6 \dots 0,7$), и сцепного веса - K_c .

Момент сил сопротивления M_k , приведенный к валу ведущего колеса, и частота его вращения ω_k определяются через силу тяги F_k и скорость движения АТС v :

$$\left. \begin{aligned} M_k &= F_k r_k, \\ \omega_k &= v; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Уравнение мощностного баланса:

$$P_k = F_k v = G \left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt} \right) v \quad (5)$$

где P_k - тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам.

Максимальная тяговая мощность $P_{k\text{max}}$ при движениях АТС с максимальной скоростью v_{max} по горизонтальной дороге ($\alpha = 0$):

$$F_{k\text{max}} = G(f + K_w v^2)_{v_{\text{max}}} \quad (6)$$

Мощностной баланс на валу тягового электродвигателя:

$$P_M = \frac{P_k}{\eta_{TP}}, \quad (7)$$

где P_m - требуемая механическая мощность на валу тягового электродвигателя (ТЭД), необходимая для преодоления сил сопротивления движения.

Требуемая полезная мощность $P_{ГЭУ}$ гибридной энергоустановки (ГЭУ) для реализации тяговых свойств АТС:

$$P_{ГЭУ} = \frac{P_k}{\eta_{\Sigma}}, \quad (8)$$

где $\eta_{\Sigma} = \eta_{ГЭУ} \eta_{БВП} \eta_{ТЭД} \eta_{ТР}$; $\eta_{ГЭУ}, \eta_{БВП}, \eta_{ТЭД}$ - КПД ГЭУ, БВП, ТЭД.

Пройденный путь АТС L за интервал времени движения t определяется выражением:

$$L = \int_0^t v dt. \quad (9)$$

Энергетический баланс определяется расходом при движении АТС энергии W_k при известной силе тяги F_k или мощности P_k интегралами:

$$W_k = \int_0^t F_k dl = \int_0^t P_k dt. \quad (10)$$

Приведенный расход энергии $W_{пр}$ - это затраты на за 1 км пройденного пути:

$$W_{пр} = \frac{W_k}{L} \quad (11)$$

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 - электросиловой 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.

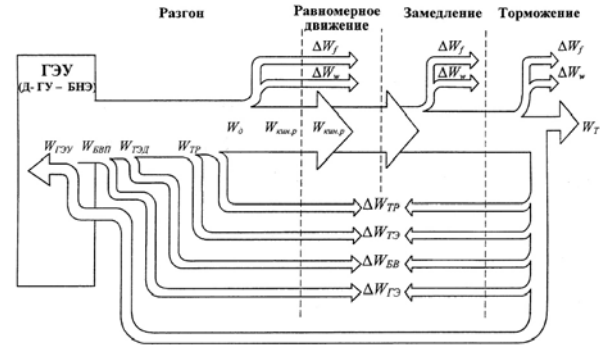


Рис. 1 - Баланс энергии при циклическом движении ЭМБ или АКСУ

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:

$$W_{ГЭУ} = W_{Д-ГУ} + W_{БНЭ}, \quad (12)$$

Энергия $W_{ДГ}$, выработанная Д-ГУ, за цикл движения $t_{ц}$ АТС равна:

$$W_{ДГ} = \int_0^{t_{ц}} U_{ДГ} I_{ДГ} dt \quad (13)$$

При работе Д-ГУ в оптимальном режиме имеем:

$$I_{ДГ} = I_{ДГ}^{ОПТ}; U_{ДГ} = U_{ДГ}^{ОПТ}. \quad (14)$$

Энергию $W_{РАБ}$, отдаваемую ТАБ при разряде получаем интегрированием:

$$W_{РАБ} = U_{срАБ} \int_0^{t_p} i_p dt, \quad (15)$$

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_3 при среднем напряжении U_3 :

$$W_{ЗАБ} = U_3 \int_0^{t_3} i_3 dt, \quad (16)$$

суммарный расход энергии за цикл $W_{ГЭУ}^{ц}$ ГЭУ вычислим по соотношению:

$$W_{ГЭУ}^{ц} = (\Delta W_c + \Delta W_{тр} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{БС} + \Delta W_{ГЭУ})_p + W_{кин,р} + (\Delta W_c + \Delta W_{тр} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} \Delta W_{БС} + \Delta W_{ГЭУ})_{уд} - W_{рек} \quad (17)$$

где $\Delta W_c = \Delta W_f + \Delta W_w$ - потери энергии,

затрачиваемые на преодоление сил трения качения (ΔW_f) и аэродинамического сопротивления (ΔW_w);

ΔW_{BC} - расход энергии в бортовой сети АТС;

$\Delta W_{БВП}$, $\Delta W_{ТЭД}$, $\Delta W_{ТР}$ - потери энергии в модулях системы тягового привода (ГЭУ, БВП, ТЭД, ТР);

$W_{кин.р}$ - кинетическая энергия, накопленная в фазе разгона;

$W_{рек}$ - энергия, рекуперлируемая в ТАБ при торможении.

При движении электромобиля существует режим, характерный для фазы замедления, когда энергия из батареи не потребляется, т.е. $\Delta W_{ГЭУ} = 0$, возврат энергии в нее также отсутствует, т.е. $W_{рек} = 0$. Если пренебречь расходом энергии ΔW_{BC} , то работа по преодолению сил сопротивления движению совершается за счет изменения $\Delta W_{кин.з}$ запаса кинетической энергии $\Delta W_{кин.р}$. Уравнение баланса энергии в этом случае имеет вид:

$$\Delta W_{кин.з} = (\Delta W_C + \Delta W_{ТР})_3. \quad (18)$$

Для фазы торможения процесс преобразования энергии в общем случае можно описать соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta W_{кин.т} = & (\Delta W_C + \Delta W_{ТР})_3 + W_{рек} + W_{мех.т} + \\ & + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{BC} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} + \\ & + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{BC} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \end{aligned} \quad (19)$$

где $W_{кин.т}$ - работа сил механической системы торможения;

$W_{мех.т}$ - изменение запаса кинетической энергии в фазе торможения равно:

$$\Delta W_{кин.т} = W_{кин.р} - W_{кин.з} \quad (20)$$

Из уравнения (19) можно получить уравнение баланса энергии для случая, когда для остановки электромобиля используется только режим рекуперативного торможения ТЭД:

$$\begin{aligned} \Delta W_{кин.т} = & (\Delta W_C + \Delta W_{ТР})_т + W_{рек} + \\ & + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \end{aligned} \quad (21)$$

Выражение для энергии рекуперации $W_{рек}$:

$$\begin{aligned} W_{рек} = & W_{кин.р} - (\Delta W_C + \Delta W_{ТР})_3 - (\Delta W_C + \\ & + \Delta W_{ТР})_т - (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \end{aligned} \quad (22)$$

В конечном итоге уравнения позволяют определить расход энергии ГЭУ за цикл с учетом полной рекуперации запасенной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} W_{ГЭУ}^u = & (\Delta W_C + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{BC} + \\ & + \Delta W_{ГЭУ})_р + W_{кин.р} + (\Delta W_C + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \\ & + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{BC} + \Delta W_{ГЭУ})_{уд} \end{aligned} \quad (23)$$

Расход энергии $W_{ГЭУ}^u$ ГЭУ за цикл без рекуперации равняется:

$$\begin{aligned} W_{ГЭУ}^u = & (\Delta W_C + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{BC} + \\ & + \Delta W_{ГЭУ})_р + (\Delta W_C + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \\ & + \Delta W_{BC} + \Delta W_{ГЭУ})_{уд} + (\Delta W_C + \Delta W_{ТР})_3 + (\Delta W_C + \\ & + \Delta W_{ТР})_т + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \end{aligned} \quad (24)$$

Однако полученные уравнения энергетического баланса позволяют определить $W_{ГЭУ}^u$ только при известных параметрах модулей ТСЭ. При ориентировочных расчетах, когда еще не определены конкретные параметры модулей ТСЭ, можем выразить $W_{ГЭУ}^u$ виде:

$$\begin{aligned} W_{ГЭУ}^u = & \frac{\Delta W_{C.р} + W_{кин.р} + W_{C.уд}}{\eta_{р\Sigma}} - W_{рек} \\ W_{рек} = & (W_{кин.р} - \Delta W_{C.р} + W_{C.т})\eta_{з\Sigma} \end{aligned} \quad (25)$$

где $\eta_{р\Sigma} = \eta_{ТР}\eta_{ТЭД}\eta_{БВП}\eta_{ГЭУ}$;

$\eta_{з\Sigma} = \eta_{ТР}\eta_{ТЭД}\eta_{БВП}\eta_{зГЭУ}$;

$\eta_{ТР}, \eta_{ТЭД}, \eta_{БВП}, \eta_{рГЭУ}, \eta_{зГЭУ}$ - КПД трансмиссии, ТЭД, БВП, ГЭУ при разряде и заряде, соответственно.

Окончательно запишем:

$$\begin{aligned} W_{ГЭУ}^u = & \frac{\Delta W_{C.р} + \Delta W_{C.уд}}{\eta_{р\Sigma}} + (\Delta W_{C.з} + \Delta W_{C.т})\eta_{з\Sigma} + \\ & + W_{кин.р} \left(\frac{1}{\eta_{р\Sigma}} - \eta_{з\Sigma} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

Для случая торможения без рекуперации имеем:

$$W_{ГЭУ}^u = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} (\Delta W_{C.р} + \Delta W_{C.уд} + W_{кин.р}) \quad (27)$$

Удельный расход энергии за цикл определяется отношением:

$$W_{ГЭУ}^u = \frac{W_{ГЭУ}^u}{mL_u} \quad (28)$$

где L_u - 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 электросилового 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.

Литература

1. Доржинкевич И.Б. Особенности проектирования электрооборудования электро-мобиля// Электротехника. -1981. № 10.
2. Диланян, Э.М. Определение оптимальных весовых соотношений в электромобиле / Э. М. Диланян, С.Г. Коряган, А.А. Момджян, Ю.В. Агабабян // Электротехника. Сер. XII-Ереван: -1974. -Вып.1.
3. Ефремов, И.С. Системная оптимизация энергетических характеристик тягового привода электромобиля / И.С. Ефремов, Д.И. Гурьянов, С.Д. Усов // Тез. докл. всесоюз. научно-техн. конф.: Состояние и перспективы развития электротехнологии (Вторые Бенардосовские чтения). - Иваново: МЭИ, 1985.
4. Строганов, В.И. Инновационные методы исследования качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой: монография / В.И. Строганов, В.Н. Козловский. – М.: ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)». – 2012. – 228 с.
5. Козловский, В.Н. Аналитические исследования качества автомобилей в эксплуатации: монография / В.Н. Козловский, В.И. Строганов. - «Palmarium Academic Publishing», AV Akademikerverland «GmbH&Co.», Deutschland, 2013. – 140 с.
6. Сорокин А.Г., Горбачевский Н.И., Мифтахова Л.Х. Методы моделирования электромагнитных и тепловых полей системы индукционного нагрева для технологических комплексов производства пластмассы. – Вестник КГТУ, 2014, т.17, №.1 – с.111-114.
7. Козловский В.Н., Горбачевский Н.И., Сорокин А.Г., Кислинский В.Б., Мифтахова Л.Х. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой. - Вестник КГТУ, 2014, т.17, №.3 – с.227-230.

© **В. И. Строганов** – к.т.н., МАДГТУ «МАДИ», г. Москва; **В. Н. Козловский** - д.т.н., ПВГУС г.Тольятти; **А. Г. Сорокин** - канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий НХТИ КНИТУ, prepodkse@yandex.ru, **Л. Х. Мифтахова** – аспирант каф. ТОТ КНИТУ, ст. препод. каф. ЭТЭОП НХТИ КНИТУ, lina_miftahova@mail.ru.