

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

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

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

В работе представлены результаты аналитического моделирования тяговой системы электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой.

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

The results of analytical modeling of electric traction systems and vehicles with a combined power plant.

Накопленный опыт разработок и исследований в электромобилестроении 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 - $G(H)$; мощность комбинированной энергоустановки (ГЭУ) - $P_{ГЭУ}$ (Вт), количество ведущих колес - n ; номинальная сила тяги - $F_H(H)$, обеспечивающая АТС движение с номинальной скоростью v_m по подъему i_m ; максимальная скорость $v_{\max}$ (км/ч); максимальная сила тяги - $F_{\max}(H)$, обеспечивающая АТС преодоление предельного подъема $i_{пр}$ при движении со скоростью $v_{\min}$ (км/ч); перегрузочная сила тяги - $F_{пе}(H)$, обеспечивающая АТС движение по подъему $i_{пе}$ со скоростью v_H 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 электромобиля и работой тяговой системы, на основании чего упорядочивается определение параметров и характеристик ее силовых агрегатов.

Большое влияние на формирование тяговой характеристики электромобиля $F(v)$ оказывают

регулируемые 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 $P_{ГЭУ}$ и КПД тяговой системы $\eta_{тс}$ АТС. Максимальная требуемая полезная мощность $P_{ГЭУ\max}$ ГЭУ в стационарных режимах рассчитывается для заданной максимальной скорости $v_{\max}$ АТС при ровной дороге ($i = 0$) по формуле:

$$P_{КЭУ\max} = \frac{G(f + K_w v_{\max}^2) v_{\max}}{\eta_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где f и K_w - соответственно коэффициенты сопротивления движения. Используя выражение (3.1), тяговую характеристику $F(v)$ АТС представим выражением:

$$F(v) = \frac{P_{КЭУ\max} \eta_{\Sigma}}{v} \quad (2)$$

когда дана максимальная мощность $P_{ГЭУ\max}$ ГЭУ, или соотношением

$$F(v) = \frac{P_{КЭУ\max} \eta_{\Sigma}}{v} \quad (3)$$

при заданных требованиях к основным эксплуатационным показателям. Тяговые свойства АТС можно выразить на графике тягового баланса (рис. 1) характеристикой в координатах (v, F) .

Здесь представлены как сила тяги F , так и суммарные силы F_{Σ} сопротивления движению, рассчитываемые по уравнению тягового баланса транспортного средства для заданных в требованиях преодолеваемых подъемов дороги: $i = 0; i = i_H; i = i_{пе}; i = i_{пр}$.

Здесь представлены как сила тяги F , так и суммарные силы F_{Σ} сопротивления движению, рассчитываемые по уравнению тягового баланса транспортного средства для заданных в требованиях преодолеваемых подъемов дороги: $i = 0; i = i_H; i = i_{пе}; i = i_{пр}$.

Проведем на графике тягового баланса прямые, параллельные осям координат, которые соответствуют максимальной силе тяги рис.1 (штриховая линия АВ):

$$F_{\max} = G(f + i_{\text{пр}} + K_w v_{\text{эп}}^2), \quad (4)$$

максимальной скорости $v_{\max}$ (штриховая линия DE), определяемые как решение уравнений тягового баланса, выводимого из системы, характеризующей тяговые свойства АТС $F(v)$ и суммарную силу сопротивления F_{Σ} при движении его по ровной дороге:

$$F_c = G(f + K_w v^2). \quad (5)$$

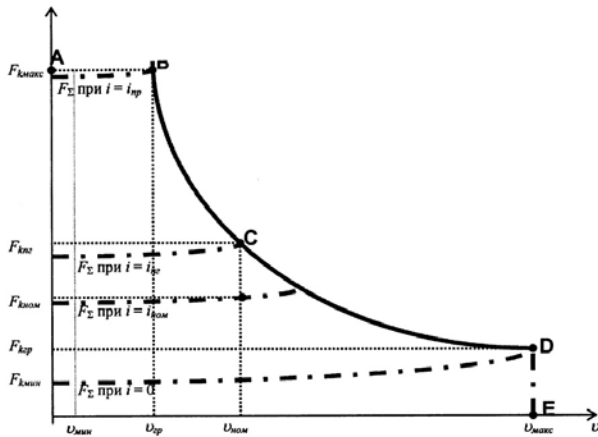


Рис. 1 - Предельные тяговые характеристики АТС

Тяговая характеристика $F(v)$ представляется тремя характерными участками. Линия АВ ограничивает тяговое усилие на уровне $F_{\max}$. Точка В пересечения прямой $F = F_{\max}$ с зависимостью $F(v)$ определяет диапазон изменения скорости от нуля до граничной скорости $v_{\text{эп}}$.

$$F_{\max} = G(f + i_{\text{пр}} + K_w v_{\text{эп}}^2) = \frac{P_{\text{ГЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{v_{\text{эп}}} \quad (6)$$

При известных $P_{\text{КЭУмакс}}$, $i_{\text{пр}}$ расчетной формулой для граничной скорости $v_{\text{эп}}$:

$$v_{\text{гр}} = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w} + \sqrt{\left(\frac{f + i_{\text{пр}}}{3K_w}\right)^3 + \left(\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w} + \sqrt{\left(\frac{f + i_{\text{пр}}}{3K_w}\right)^3 + \left(\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w}\right)^2}} \quad (7)$$

Точка D пересечения характеристики $F(v)$ с прямой $v = v_{\max}$ (рис.1) определяет граничное тяговое усилие $F_{\text{эп}}$: $F_{\text{эп}} = G(f + K_w v_{\max}^2)$.

Участок гиперболы BCD характеризует полученную эффективность энергопреобразования в силовых агрегатах тяговой системы при выбранной мощности автономной энергоустановки. Точка С тяговой характеристики $F(v)$ используется для

определения режима энергопреобразования, при котором выявляются перегрузочные (по температуре) свойства силовых агрегатов тяговой системы. Ее положение задается выбором номинальной скорости v_H . Вторая координата точки С характеризует силу $F_{\text{пр}}$, затрачиваемую на преодоление суммарной силы $F_c(v_H)$ сопротивления движению электромобиля по подъему $i_{\text{пе}}$ с номинальной скоростью v_H .

Точкой N на прямой $v = v_H$ задается номинальная сила тяги F_H . Подъем, для которого характеристика суммарной силы сопротивления движению $F_c(v)$ проходит через данную точку, принимается за номинальный (i_H). Положение точки N, как точки номинального тягового режима, выбирается из соображений придания электромобилю динамических свойств, требуемых при движении в городских условиях. Следует отметить, что по величине F_H определяются номинальный момент M_H ТЭД и возможность длительной работы силовых агрегатов тяговой системы по условиям нагрева.

Номинальная F_H и перегрузочная силы тяги $F_{\text{пр}}$ определяется соотношениями:

$$F_H = G(f + i_H + K_w v_H^2); \quad (8)$$

$$F_{\text{пе}} = G(f + i_H + K_w v_H^2) = \frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{v_H}. \quad (9)$$

Номинальная скорость v_H при известном уклоне дороги $i_{\text{пе}}$:

$$v_H = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w} + \sqrt{\left(\frac{f + i_{\text{пр}}}{3K_w}\right)^3 + \left(\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w} + \sqrt{\left(\frac{f + i_{\text{пр}}}{3K_w}\right)^3 + \left(\frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{2GK_w}\right)^2}} \quad (10)$$

При известной величине $i_{\text{пе}}$ значение подъема находится из выражения

$$i_{\text{пе}} = \frac{P_{\text{КЭУмакс}} \eta_{\Sigma}}{G v_H} - (f + K_w v_H^2). \quad (11)$$

Необходимо отметить, что выбор величины номинальной скорости v_H предопределяет энергетическую эффективность создаваемого транспортного средства, поскольку эта величина совместно со значением F_H формирует область работы силовых агрегатов тяговой системы с максимальным КПД. Поэтому при создании тяговых систем АТС за номинальную скорость v_H выбирают такую, которая преобладает при заданных условиях эксплуатации и обеспечивает АТС наилучшие технико-эксплуатационные показатели.

Требуемые кратности максимальной скорости движения АТС:

$$K_v = v_{\max} / v_H, \quad (12)$$

Максимальная сила тяги:

$$K_F = \frac{F_{\max}}{F_H} = \frac{f + i_{np} + K_w v_{гр}^2}{f + i_H + K_w v_H^2}. \quad (13)$$

Диапазоны изменения тяговых усилий и скоростей могут достигать соответственно значений $K_F = 3...4$ и $K_v = 3...6$.

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 электромотоцикла, так и транспортного средства в целом.

Вращающий момент M , развиваемый ТЭД, для заданной тягово-динамической характеристики ЭМБ или АКСУ определяется выражением:

$$M = \frac{F_k r_k}{u_T \eta_T}, \quad (14)$$

где u_T и η_T - соответственно передаточное число и КПД трансмиссии; r_k - радиус качения ведущего колеса.

Для вращающего момента M :

$$M = M_{\text{дин}} + M_c. \quad (15)$$

Здесь $M_c = a + b\omega^2$, M_c - статический момент на валу ТЭД, Нм;

$$a = \frac{G \psi r_k}{u_T \eta_T}; \quad b = \frac{0,5 c_x \rho S r_k^3}{u_T^3 \eta_T^3}; \quad (16)$$

ω - угловая скорость вращения вала ТЭД, равная

$$\omega = \frac{v u_T}{r_k}; \quad (17)$$

$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$ - динамический момент, обуславливаемый приведенным к валу ТЭД моментом инерции J_{Σ} частей, совершающих вращательное и поступательное движение,

$$J_{\Sigma} = J + \sum_{i=1}^n J_K = J + \frac{1}{u_T^2 \eta_T^2} + \frac{m r_k^2}{u_T^2 \eta_T^2}. \quad (18)$$

Для определения механической характеристики $M(\omega)$ ТЭД необходимо воспользоваться тяговой характеристикой $F(v)$ АТС. Тогда при заданной максимальной мощности $P_{\text{ГЭУ.макс}}$ ГЭУ механическая характеристика ТЭД представляется выражением

$$M = \frac{P_{\text{ГЭУ.макс}} \eta_k}{\omega}. \quad (19)$$

Для принятой методики исследования тяговой системы электромотоцикла (ТСЭ) «от дороги к ГЭУ» должны удовлетворяться технические требования к ТСЭ, при этом механическая характеристика ТЭД имеет вид:

$$M = \frac{G(f + K_w v_{\max}^2) \psi_{\max} \eta_{\Sigma}}{\omega}. \quad (20)$$

Используя приведенные выше соотношения, можно построить механическую характеристику ТЭД (рис. 2) для некоторого постоянного передаточного числа трансмиссии ($u_T = \text{const}$).

На рис. 3 изображены механическая характеристика $M(\omega)$ и зависимости, приведенных к валу ТЭД, статических моментов M_c суммарных сил сопротивления движению ЭМ для различных уклонов дороги.

По аналогии с тяговой характеристикой $F(v)$ механическая - $M(\omega)$ имеет три характерных участка: участок АВ - постоянного (максимального) момента $M_{\max}$, развиваемого ТЭД; участок BCD - постоянной мощности ($M(\omega) = \text{const}$), которая определяется предельными параметрами КЭУ и ТЭД; участок DE - максимальной скорости $\omega_{\max}$. При этом справедливы следующие отношения:

$$K_v = \frac{v_{\max}}{v_{гр}} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{гр}} = K_{\omega}; \quad K_F = \frac{F_{\max}}{F_{гр}} = \frac{M_{\max}}{M_{гр}} = K_M. \quad (21)$$

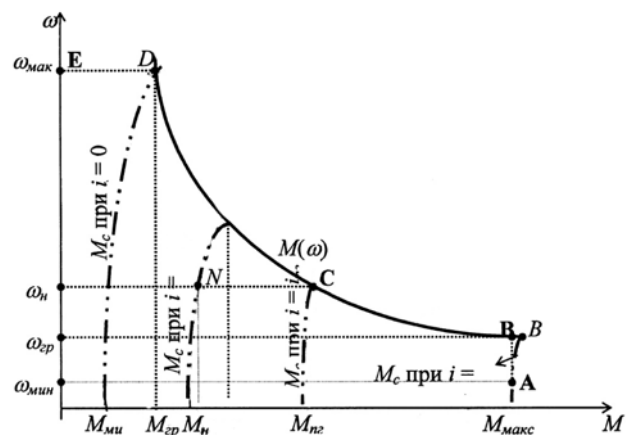


Рис. 2 - Механическая и нагрузочные характеристики тягового электродвигателя

Пользуясь известными соотношениями, зависимость $M(\omega)$ можно преобразовать в вольтамперную характеристику ТЭД $U(I)$ (U - напряжение и ток ТЭД) (рис. 3). Для двигателя

постоянного тока независимого возбуждения имеем соотношения:

$$U = E + IR; E = k\omega\Phi; I = M/(k\Phi), \quad (22)$$

где k - конструктивный коэффициент двигателя; Φ - магнитный поток; E - противо-ЭДС двигателя; R - суммарное сопротивление цепи якоря, Ом (рис. 3).

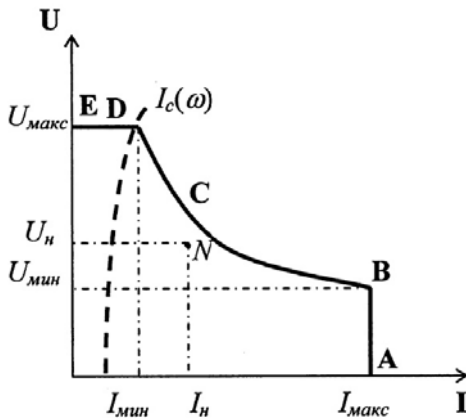


Рис. 3 - Зависимость $U(I)$ тягового электродвигателя

Величина тока I двигателя получается из выражения баланса мощности $P_{ГЭУ}\eta_{\Sigma} = M_{\omega}$ решением квадратичного уравнения:

$$I^2 - UI/R + P_{КЭУ}\eta_{\Sigma}/R = 0, \quad (23)$$

в результате получим:

$$I = (U - \sqrt{U^2 - 4RP_{КЭУ}\eta_{\Sigma}}) / (2R) \quad (24)$$

Принимая координаты точки N в качестве номинальных значений напряжения и тока ($U_N = U_n; I_N = I_n$), тогда режимы работы ТЭД, соответствующие точкам В и D, описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_B = U_{мин} &= E_n \omega_{B*} \Phi_{B*} + K_M \frac{\Delta U_n}{\Phi_{B*}}; \\ U_D = U_{макс} &= E_n \omega_{D*} \Phi_{D*} + M_{вр*} \frac{\Delta U_n}{\Phi_{D*}}; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} I_B = I_{макс} &= \frac{U_{мин} - \sqrt{U_{мин}^2 - 4RG(f + K_w v_{макс}^2) v_{макс} \eta_{\Sigma}}}{2R}; \\ I_D = I_{мин} &= \frac{U_{макс} - \sqrt{U_{макс}^2 - 4RG(f + K_w v_{макс}^2) v_{макс} \eta_{\Sigma}}}{2R}; \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где $\omega_{B*} = \omega_B/\omega_n$; $\omega_{D*} = \omega_D/\omega_n$; $\Phi_{B*} = \Phi_B/\Phi_n$; $\Phi_{D*} = \Phi_D/\Phi_n$; $M_{вр*} = M_{вр}/M_n$; ω_B и Φ_B - угловая скорость и магнитный поток ТЭД для точки В зависимости $M(\omega)$ на рис. 3; ω_D и Φ_D - то же самое для точки D; $M_{гр}$ - значение момента ТЭД в точке D; $\Delta U_n = I_n R$ - 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 В и D следующие расчетные формулы:

$$\left. \begin{aligned} M_B = M_{макс} &= \frac{Gr_k}{U_T \eta_T} (f + i_{пр} + K_w v_{гр}^2); \\ M_D = M_{гр} &= \frac{Gr_k}{U_T \eta_T} (f + K_w v_{макс}^2); \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

И, следовательно:

$$\left. \begin{aligned} I_{макс} &= \frac{Gr_k}{k\Phi_{макс} U_T \eta_T} (f + i_{пр} + K_w v_{гр}^2); \\ I_{мин} &= \frac{Gr_k}{k\Phi_{мин} U_T \eta_T} (f + K_w v_{макс}^2); \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где $\Phi_{макс}$, $\Phi_{мин}$ - максимальное и минимальное значения магнитного потока ТЭД.

Использование уравнений (28) позволяет определить кратность K_{Φ} максимального магнитного потока электродвигателя

$$K_{\Phi} = \frac{\Phi_{макс}}{\Phi_{мин}} = \frac{f + i_{пр} + K_w v_{гр}^2}{f + K_w v_{макс}^2} \frac{I_{мин}}{I_{макс}}. \quad (29)$$

Из уравнения мощностного баланса для точки D на механической характеристике $M(\omega) - P_{КЭУ\max} \eta_{\Sigma} = M_D \omega_{макс}$, выводится расчетная формула для минимального магнитного потока:

$$\Phi_{мин} = \frac{P_{КЭУ}\eta_{\Sigma}}{kI_{мин}\omega_{макс}}. \quad (30)$$

На основе выражений (29, 30) можно рассчитать величину максимального магнитного потока $\Phi_{макс}$ по формуле:

$$\Phi_{макс} = \frac{f + i_{пр} + K_w v_{гр}^2}{f + K_w v_{макс}^2} \frac{P_{КЭУ}\eta_{\Sigma}}{kI_{мин}\omega_{макс}} \quad (31)$$

а затем определить диапазон изменения магнитного потока:

$$\Delta\Phi = \Phi_{макс} - \Phi_{мин} = \frac{P_{КЭУ}\eta_{\Sigma}}{kI_{мин}\omega_{макс}} \left(\frac{f + i_{пр} + K_w v_{гр}^2}{f + K_w v_{макс}^2} - 1 \right). \quad (32)$$

Из уравнения мощностного баланса на механической характеристике $M(\omega)$ решением квадратного уравнения

$$\omega^2 - \frac{U}{k\Phi_{макс}} \omega + \frac{RP_{КЭУ\max}\eta_{\Sigma}}{(k\Phi_{макс})^2} = 0, \quad (33)$$

находится выражение для расчета номинальной угловой скорости:

$$\omega_n = \frac{U_n + \sqrt{U_n^2 - 4RP_{КЭУ\max}\eta_{\Sigma}}}{2k\Phi_{макс}}. \quad (34)$$

Кратность максимальной угловой скорости можно рассчитать по выражению:

$$K_w = \frac{\omega_{макс}}{\omega_n} = \frac{2k\Phi_{макс}\omega_{макс}}{U_n + \sqrt{U_n^2 - 4RP_{КЭУ\max}\eta_{\Sigma}}}. \quad (35)$$

Номинальный ток ТЭД I_n определяется через момент M_n в точке N на предельной механической характеристике двигателя:

$$I = \frac{Gr_k}{k\Phi_n U_T \eta_T} (f + i_n + K_w v_n^2). \quad (36)$$

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 U_T определяется выражением:

$$U_T = \frac{r_k \omega_H}{U_H} \quad (37)$$

где ω_H определяется по (34).

Учитывая, что $E_H = U_H - \Delta U_H$, получим:

$$U_{мин*} = \frac{U_{мин}}{U_H} = \left(1 - \frac{\Delta U_H}{U_H}\right) \omega_{B*} \Phi_{B*} + \frac{K_M}{\Phi_{B*}} \frac{\Delta U_H}{U_H}; \quad (38)$$

$$U_{макс*} = \frac{U_{макс}}{U_H} = \left(1 - \frac{\Delta U_H}{U_H}\right) K_{\omega} \Phi_{D*} + \frac{M_{гр}}{\Phi_{D*}} \frac{\Delta U_H}{U_H}; \quad (39)$$

Анализ выражений (38, 39), относительно параметров K_{ω} и K_M дает возможность оценить приемлемый способ управления ТЭД - способ двухзонного регулирования, для реализации закона регулирования M_{ω} и, следовательно, тяговой характеристики F_v .

Управление ТЭД в диапазоне угловых скоростей $\omega < \omega_H$ 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 $\Phi_{B*} = 1...1,5$. Получение максимальных скоростей достигается уменьшением потока и поддержанием постоянства напряжения $U \geq U_H$, при этом значение Φ_{D*} , лимитируется, прежде всего, потенциально-коммутационными условиями на коллекторе ТЭД, при чрезмерном снижении магнитного потока. Выбираем величину минимально потока равной $\Phi_{D*} = 0,2...0,3$. Если $K_{\omega} = 4...6$, то напряжение на зажимах ТЭД повышают до $U_{макс*} = 1,3...1,5$. В общем случае соотношение между параметрами Φ_{D*} и $U_{макс*}$ определяется заданной кратностью максимальной угловой скорости, соображениями экономичности и требованиями минимизации массы и размеров ТЭД и ГЭУ.

Определив зависимость $U(I)$, переходим к построению внешней вольтамперной характеристики ГЭУ с регулятором, которая должна соответствовать заданной тяговой характеристике ЭМ:

$$U_{ГЭУ} = \frac{U}{k_U}; I_{ГЭУ} = \frac{I}{k_I}, \quad (40)$$

где k_U, k_I - 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 P_H согласно заданному длительному режиму работы силовых агрегатов тяговой системы ЭМБ или АКСУ, и кратностью максимальной угловой скорости K_{ω} :

$$P_{расч} = K_{\omega} P_H \approx M_H \omega_{макс}. \quad \text{В процессе проектирования (или выбора) ТЭД необходимо учитывать значение максимального тока нагрузки}$$

$$I_{макс*} = I_{макс} / I_H = K_M / \Phi_{B*}.$$

Расчетную мощность $P_{ГЭУрасч}$

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 выдерживать токи нагрузки $I_{ГЭУмакс}$. Так как наибольшее длительное значение тока имеет место в номинальном режиме, то расчетная мощность $P_{ГЭУрасч}$ пропорциональна максимальному напряжению $U_{ГЭУрасч}$. Выражения, позволяющие рассчитать максимальные значения напряжения и тока ГЭУ:

$$\left. \begin{aligned} U_{КЭУмакс*} &= \frac{U_{КЭУмакс}}{U_{КЭУ}} = \frac{U_{макс*}}{k_{UD*}}; \\ I_{КЭУмакс*} &= \frac{I_{КЭУмакс}}{I_{КЭУ}} = \frac{I_{макс*}}{k_{IB*}} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

где $k_{UD*} = k_{UD} / k_{UH}; k_{IB*} = k_{IB} / k_{IH}; k_{UD}; k_{IB}$ - соответственно передаточные коэффициенты вентильных преобразователей по напряжению и току, определяемые его работой в точках D и B зависимости $U(I)$. Тогда:

$$P_{ГЭУрасч} = P_{ГЭУH} U_{ГЭУмакс*} = P_{ГЭУH} U_{макс*} / k_{UD*}. \quad (42)$$

Таким образом, рассмотренные уравнения связи между основными параметрами ТЭД, БВП и ГЭУ позволяют определить величины $K_{\omega}, K_M, U_{макс*}, I_{макс*}$, 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.

Литература

1. Машихлин А.Д., Мансурова А.З. Особенности решения задач тяговых расчетов автосамосвалов с электрическим приводом//ЭТП. Сер. Тяговое и подъемно-трансп. электрооборуд. -1975. -Вып. 4(37).

2. 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.
3. 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.
4. 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.