

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМОБИЛЯ

Одержано математичну модель тягового електроприводу автомобіля на основі вентильного електродвигуна при оптимальному управлінні вектором струму статора і тягової NiMH акумуляторної батареї. Дана модель дозволяє досліджувати взаємодію тягового електроприводу і тягової акумуляторної батареї під час руху автомобіля з використанням електротяги і в процесі рекуперації енергії гальмування.

Получена математическая модель тягового электропривода автомобиля на основе вентильного двигателя при оптимальном управлении вектором тока статора и тяговой NiMH аккумуляторной батареи. Данная модель позволяет исследовать взаимодействие тягового электропривода и тяговой аккумуляторной батареи при движении автомобиля с использованием электротяги и в процессе рекуперации энергии торможения.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным направлением решения задачи повышения экологической чистоты и экономичности автомобилей считается использование тягового электропривода. Это направление связано как с дальнейшим совершенствованием автомобилей, так и с разработками транспортных средств (ТС), оснащенных гибридными силовыми установками.

В настоящее время в качестве тягового электропривода часто применяют вентильный двигатель (ВД). ВД представляет собой систему регулируемого электропривода, состоящую из синхронного электродвигателя переменного тока с возбуждением от расположенных на роторе постоянных магнитов, вентильного преобразователя и устройства управления, обеспечивающего коммутацию цепей обмоток статора в зависимости от углового положения ротора. Использование ВД имеет ряд конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ: бесконтактность и отсутствие узлов, требующих обслуживания; большая перегрузочная способность по моменту; наивысшие энергетические показатели из-за отсутствия потерь на возбуждение; простота системы охлаждения из-за отсутствия на роторе нагреваемых током нагрузки обмоток; большой срок службы, надежность; лучшие массогабаритные и стоимостные показатели по сравнению с двигателями постоянного тока.

В роли накопителя энергии ТС с тяговым электроприводом чаще всего выступают электрохимические источники тока – тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ). Имеется большое количество типов аккумуляторов, пригодных для выполнения данной функции, однако ни один из этих типов в полной мере не отвечает всем требованиям, предъявляемым к ТАБ: высокие удельные значения энергии и мощности, высокий КПД, большое число циклов "заряд-разряд", низкая стоимость, безопасность в эксплуатации, надежность, низкая стоимость технического обслуживания, малое время заряда. В настоящее время большинство производителей гибридных автомобилей и электромобилей отдают предпочтение никель-металлогидридным (NiMH) аккумуляторным батареям, которые имеют хорошие удельные показатели и срок службы, но на сегодняшний день достаточно дороги. Перспективными для использования в тяговом электроприводе считаются аккумуляторы на основе лития (литий-ионные, в частности литийфосфатжелезные). Широкое внедрение литий-ионных ТАБ в настоящее время сдерживает ряд нерешенных технологических проблем и высокая стоимость.

При проектировании новых силовых установок электромобилей и гибридных ТС возникает сложная проблема научного обоснования их базовых параметров и характеристик. Для решения данной проблемы используются методики, основанные на проведении вычислительных экспериментов с соответствующими математическими моделями. Результаты таких экспериментов служат основанием для сравнительного анализа различных конструктивных решений. Данная работа посвящена идентификации математической модели, описывающей взаимодействие ВД в составе тягового электропривода и NiMH ТАБ в качестве накопителя энергии на различных тягово-скоростных режимах.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В последние годы появилось достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных идентификации математических моделей тягового электропривода, накопителя энергии и системы рекуперации энергии различных ТС. Это говорит об актуальности рассматриваемой проблемы. В частности в работах [1-7] изложены подходы к моделированию силовых установок гибридных автомобилей, включающих ВД в качестве тягового электропривода, и соответствующих систем управления. В работах [7-12] исследуются вопросы математического моделирования ВД, а также оптимизации управления вектором тока статора. В работах [5, 6, 13-20] рассматриваются вопросы идентификации математической модели ТАБ.

Однако задача сравнительного анализа различных конструктивных решений автомобильных силовых установок, включающих ВД и ТАБ, на основании вычислительного эксперимента порождает ряд особенностей при синтезе моделей. Так, вопросы технической реализации законов управления оказываются несущественными. В то же время оптимальность управления вектором тока статора ВД на всех задаваемых тягово-скоростных режимах приобретает особое значение. При моделировании ТАБ можно пренебречь точностью описания многих физико-химических процессов, сопровождающих процессы разряда и заряда. В то же время такая модель должна с максимальной точностью отражать изменение эксплуатационных характеристик ТАБ в процессе её функционирования. Уровень сложности получаемых моделей должен обеспечивать возможность исследования работы силовой установки в стандартном ездовом цикле движения автомобиля.

Известные публикации, посвященные иденти-

кации математических моделей силовых установок электромобилей и гибридных ТС, не отвечают в полной мере рассматриваемой задаче.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является идентификация математической модели силовой установки, которая отражает взаимодействие тягового ВД и ТАБ при движении автомобиля с использованием электротяги, а также в процессе рекуперации излишков кинетической энергии ТС при торможении или потенциальной энергии при движении под уклон.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать модели тягового ВД при оптимальном управлении вектором тока статора, ТАБ, исследовать ограничения, которые накладывают на силовую установку параметры трансмиссии ТС, исследовать влияние возмущающих воздействий, обусловленных изменением рельефа опорной поверхности и аэродинамическим сопротивлением.

МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим систему координат (d, q) , связанную с ротором ВД и неподвижную относительно его. Будем считать, что ось d совмещена с осью магнитного потока ротора. В данной системе координат уравнения для электромагнитных процессов ВД в скалярной форме можно записать в виде

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + L_{1d} \cdot \frac{di_d}{dt} - p_p \cdot \omega \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + L_{1q} \cdot \frac{di_q}{dt} + p_p \cdot \omega \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega \cdot \Psi_{mag} \\ M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\Psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q \end{cases}$$

где u_d, u_q, i_d, i_q – проекции векторов напряжения и тока статора на оси вращающейся системы координат; L_{1d} и L_{1q} – полные индуктивности обмоток статора по продольной и поперечной осям; R_1 – активное сопротивление фазных обмоток; Ψ_{mag} – вектор потокосцепления статора относительно магнитного потока ротора; p_p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения ротора; M_{VD} – электромагнитный момент ВД. Поскольку ВД является обратимой электрической машиной, $M_{VD} > 0$ соответствует двигательному режиму работы, а $M_{VD} < 0$ – генераторному.

Область допустимых режимов работы ВД ограничена соотношениями:

$$I_m = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max}; U_m = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{max},$$

где I_{max} – максимально-допустимый ток фазы, обусловленный особенностями вентильного преобразователя или тепловыми ограничениями; U_{max} – максимально-допустимое напряжение фазы $U_{max} = U_{DC} / \sqrt{3}$; U_{DC} – постоянное напряжение тяговой бортовой сети.

Управление электромагнитным моментом ВД может осуществляться посредством регулирования продольной и поперечной составляющих тока статора с учетом ограничений области допустимых режимов. Значения составляющих тока статора ВД i_d^* и i_q^* , требуемые для обеспечения заданного тягово-скоростного режима, определяются с учетом выбранного критерия качества управления. Если критерием качества выступает минимум полного тока потребления ВД в статическом режиме, оптимальная зависимость $[i_d^*, i_q^*] = f(\beta_M, \omega)$ может

быть получена из условия:

$$\begin{cases} i_d^* = \arg \min_{i_d \in [-I_{max}, 0]} (I_m(i_d, M_{VDzd})) \\ i_q^* = \sqrt{\left(\min_{i_d \in [-I_{max}, 0]} (I_m(i_d, M_{VDzd})) \right)^2 - i_d^{*2}} \\ M_{VDzd} = \text{const}, \end{cases}$$

$$\text{где } I_m = \sqrt{i_d^2 + \left(\frac{2 \cdot M_{VDzd}}{3 \cdot p_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\Psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q}))^2}} -$$

– модуль вектора тока статора (полный ток потребления ВД); M_{VDzd} – задаваемый электромагнитный момент, необходимый для поддержания требуемого тягово-скоростного режима автомобиля; $\beta_M \in [-1, 1]$ – сигнал управления электромагнитным моментом ВД; $\beta_M = M_{VDzd} / M_{VDmax}$; M_{VDmax} – максимальный момент вращения ВД.

Оптимальное, согласно выбранному критерию, соотношение продольной и поперечной составляющих тока может быть обеспечено только в тех зонах области допустимых режимов работы ВД, где не используется режим ослабления поля. В противном случае необходимо осуществить перераспределение составляющих i_d^* и i_q^* таким образом, чтобы общий ток потребления не превышал I_{max} , а электромагнитный момент вращения был максимально близок к заданному.

Статические характеристики ВД, имеющего параметры $\Psi_{mag} = 104$ мВб; $L_{1q} = 0,56$ мГн; $L_{1d} = 0,23$ мГн; $R_1 = 7,9$ мОм; $p_p = 2$, на различных тягово-скоростных режимах при оптимальном управлении вектором тока статора приведены на рис. 1. При построении данных характеристик были приняты следующие ограничения области допустимых режимов: $I_{max} = 226,3$ А; $U_{max} = 190$ В; $M_{VDmax} = 80$ Нм.

В качестве регулятора тока тягового электропривода в [7] предложен регулятор вида:

$$\begin{cases} u_d^* = k_{pd} \cdot (i_d^* - i_d) + k_{id} \cdot \int_0^t (i_d^* - i_d) dt - \omega \cdot p_p \cdot \hat{L}_{1q} \cdot i_q - R_{ad} \cdot i_d \\ u_q^* = k_{pq} \cdot (i_q^* - i_q) + k_{iq} \cdot \int_0^t (i_q^* - i_q) dt + \omega \cdot p_p \cdot \hat{L}_{1d} \cdot i_d - R_{aq} \cdot i_q \end{cases}$$

где: u_d^*, u_q^* – составляющие вектора напряжения на обмотках статора ВД, необходимые для поддержания заданного тягово-скоростного режима; $k_{pd} = a_c \cdot \hat{L}_{1d}$; $k_{pq} = a_c \cdot \hat{L}_{1q}$; $k_{id} = a_c (\hat{R}_1 + R_{ad})$; $k_{iq} = a_c (\hat{R}_1 + R_{aq})$; $R_{ad} = a_c \cdot \hat{L}_{1d} - \hat{R}_1$; $R_{aq} = a_c \cdot \hat{L}_{1q} - \hat{R}_1$; $\hat{L}_{1d}, \hat{L}_{1q}, \hat{R}_1$ – оценки величин L_{1d}, L_{1q} и R_1 соответственно; a_c – параметр, определяющий требуемую ширину полосы пропускания замкнутой системы управления. Обычно $a_c > \hat{R}_1 / L_{1q}$.

В данном регуляторе первые две составляющие выражений для продольного и поперечного каналов представляют собой стандартный ПИ-регулятор. Третьи составляющие данных выражений предназначены для компенсации связности токовой динамики между продольным и поперечным каналами модели ВД. Последние, четвертые, составляющие обеспечивают активное демпфирование.

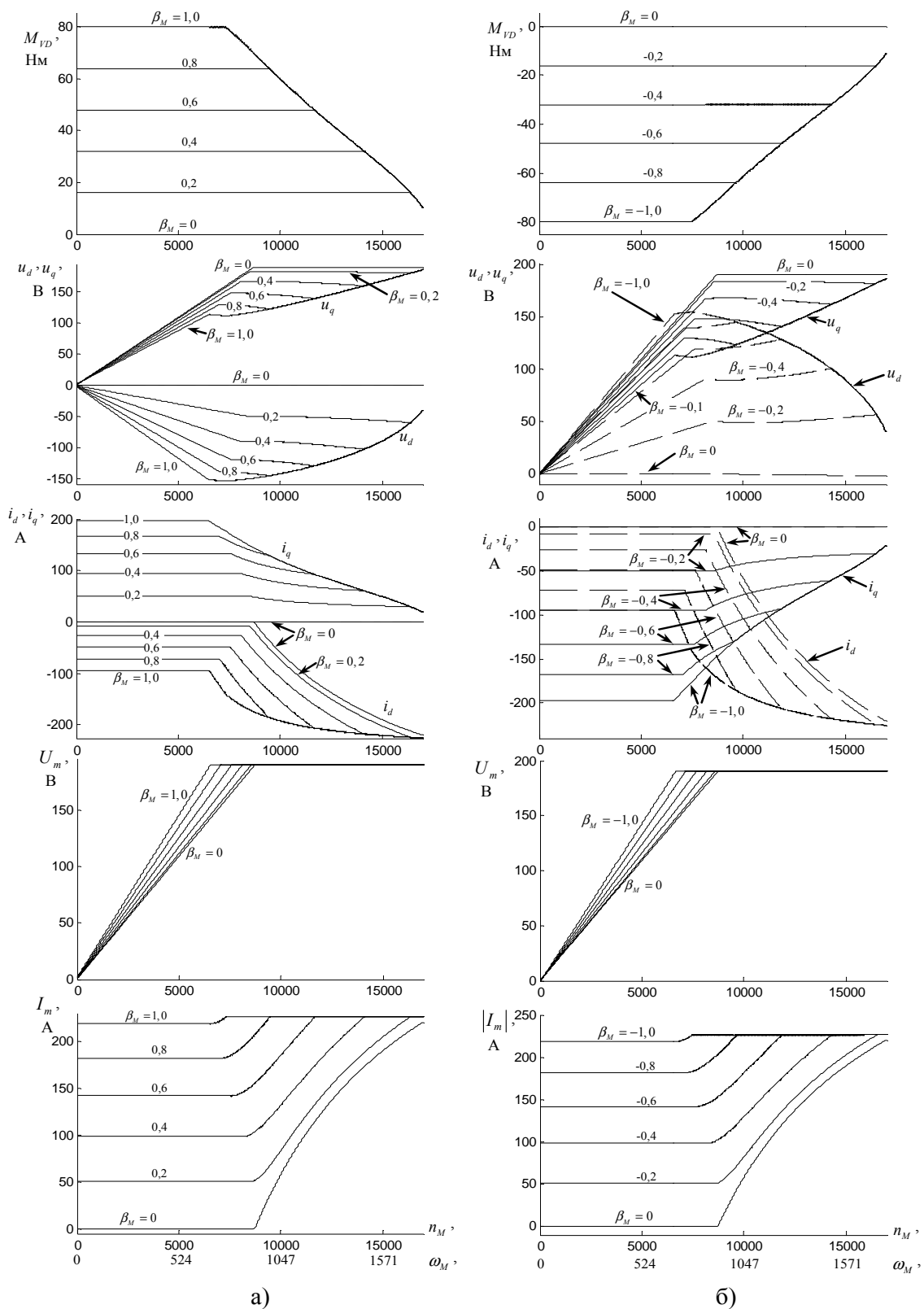


Рис. 1. Статические характеристики ВД с расширенным диапазоном скоростей ротора за счет применения режима ослабления поля. а – двигательный режим; б – генераторный режим

Инерционность вентиляльного преобразователя, включающего трехфазный инвертор с ШИМ, может быть охарактеризована чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции T_{PWM} . Для упрощения задачи будем рассматривать инвертор как линейный усилитель мощности с коэффициентом усиления $k_u = 1$ и постоянной времени $T_u = T_{PWM}$ [9]:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{k_u}{p \cdot T_u + 1} \begin{bmatrix} u_A^* \\ u_B^* \\ u_C^* \end{bmatrix},$$

где p – оператор дифференцирования. Используя преобразование координат, можно получить описание

трехфазного инвертора с ШИМ в связанной с ротором вращающейся системе координат:

$$\begin{cases} u_d = \frac{k_u}{T_u \cdot p+1} \cdot u_d^* + \frac{T_u \cdot p_p \cdot \omega}{T_u \cdot p+1} \cdot u_q \\ u_q = \frac{k_u}{T_u \cdot p+1} \cdot u_q^* - \frac{T_u \cdot p_p \cdot \omega}{T_u \cdot p+1} \cdot u_d \end{cases}$$

Последнее выражение отражает также существующие взаимовлияния продольного и поперечного каналов управления, которые усиливаются при увеличении частоты вращения ротора ВД. Данные взаимовлияния можно рассматривать как возмущения, действующие на токовые контуры. Для их минимизации необходимо уменьшать величину периода ШИМ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Степень заряженности ТАБ можно оценить согласно выражению [15, 16]

$$\theta_{TAB} = \theta_{TAB0} - \frac{1}{3600 \cdot C_{TABnom}} \cdot \int_0^t I_{TAB} dt,$$

где θ_{TAB0} – степень заряженности ТАБ в момент времени $t = 0$; C_{TABnom} – номинальная емкость ТАБ; I_{TAB} – ток разряда ($I_{TAB} > 0$) или заряда ($I_{TAB} < 0$).

Рассмотрев эквивалентную схему замещения ТАБ [6, 18] в виде последовательного соединения эквивалентной ЭДС (E_{TAB}) и эквивалентного внутреннего сопротивления (R_{TAB}), можно получить:

$$I_{TAB} = \frac{1}{2 \cdot R_{TAB}} \cdot \left(E_{TAB} - \sqrt{E_{TAB}^2 - 4 \cdot R_{TAB} \cdot P_{TAB}} \right),$$

где P_{TAB} – мощность, отдаваемая или потребляемая аккумуляторной батареей: $P_{TAB} < P_{TABmax} = E_{TAB}^2 / 4 \cdot R_{TAB}$.

В общем случае E_{TAB} и R_{TAB} являются функциями степени заряженности ТАБ, температуры электролита, величины и направления тока I_{TAB} .

Результаты параметрической идентификации математической модели ТАБ, проведенные по методике, изложенной в [15], позволяют сделать вывод о том, что для никельсодержащих аккумуляторов влияние температуры и величины тока на ЭДС оказывается несущественным и им можно пренебречь. В то же время направление тока и степень заряженности ТАБ существенно влияют на ЭДС. Если принять во внимание, что в процессе функционирования силовой установки степень заряженности ТАБ всегда находится в диапазоне $\theta_{TAB} = 0,4 \dots 0,8$, можно ограничиться линейной аппроксимацией зависимости $E_{TAB} = E_{TAB}(\theta_{TAB}, \text{sign}(I_{TAB}))$:

$$\begin{cases} E_{TAB} = n_{TAB} \cdot (0,093727 \cdot \theta_{TAB} + 1,197), & [\text{В}], \\ \quad \quad \quad \text{при } I_{TAB} > 0 \\ E_{TAB} = n_{TAB} \cdot (0,16112 \cdot \theta_{TAB} + 1,2352), & [\text{В}], \\ \quad \quad \quad \text{при } I_{TAB} < 0 \end{cases}$$

где n_{TAB} – число последовательно включенных аккумуляторов, составляющих ТАБ (для NiMH ТАБ компании Panasonic автомобиля Toyota Prius $n_{TAB} = 228$). Среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации в заданном диапазоне изменения θ_{TAB} для режима разряда ТАБ ($I_{TAB} > 0$) составляет $\sigma_{Edis} = 0,010644$ В, а для режима заряда ($I_{TAB} < 0$) – $\sigma_{Echg} = 0,0099754$ В.

Результаты экспериментальных исследований NiMH ТАБ гибридного автомобиля Toyota Prius, отражающие характер изменения внутреннего сопро-

тивления при изменении θ_{TAB} в режимах заряда и разряда приведены в [5]. Для диапазона $\theta_{TAB} = 0,4 \dots 0,8$ приемлемой точности можно достичь, применив линейную аппроксимацию зависимости $R_{TAB} = R_{TAB}(\theta_{TAB}, \text{sign}(I_{TAB}))$:

$$\begin{cases} R_{TAB} = 0,076 \cdot \theta_{TAB} + 0,9937, & [\text{Ом}], \\ \quad \quad \quad \text{при } I_{TAB} > 0 \\ R_{TAB} = 0,03705 \cdot \theta_{TAB} + 0,73112, & [\text{Ом}], \\ \quad \quad \quad \text{при } I_{TAB} < 0 \end{cases}$$

Среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации в заданном диапазоне изменения θ_{TAB} при $I_{TAB} > 0$ составляет $\sigma_{Rdis} = 0,018274$ Ом, а при $I_{TAB} < 0$ – $\sigma_{Rchg} = 0,0075985$ Ом.

Если питание тягового электропривода осуществляется только от ТАБ, а мощность, производимая им при работе в генераторном режиме, расходуется на подзарядку ТАБ и питание дополнительных потребителей, то можно записать:

$$\begin{cases} P_{TAB} = \frac{P_{VD}}{\eta_{inv}} + P_{dop}, & \text{при } P_{VD} \geq 0 \\ P_{TAB} = P_{VD} \cdot \eta_{inv} + P_{dop}, & \text{при } P_{VD} < 0 \end{cases},$$

где $P_{VD} = 1,5 \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q)$ – мощность тягового ВД; P_{dop} – мощность, потребляемая от бортовой сети дополнительным электрооборудованием; η_{inv} – КПД трехфазного инвертора с ШИМ.

Часто наряду с ТАБ и параллельно ей в качестве накопителя энергии в силовых установках гибридных транспортных средств используются суперконденсаторы. Такое техническое решение позволяет преодолеть некоторые ограничения, свойственные использованию аккумуляторных батарей (неспособность отдавать и принимать большие мощности в кратковременном пике при разгоне и рекуперативном торможении, малый диапазон рабочих температур). Использование суперконденсаторов эквивалентно включению в математическую модель накопителя энергии апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_{SC} = 0,1 \dots 10$ с.

МОДЕЛЬ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ С ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

При включенном сцеплении и выбранном передаточном отношении трансмиссии в случае прямолинейного движения без пробуксовывания колес силовая установка автомобиля и непосредственно связанный с ней потребитель мощности (собственно автомобиль) образуют жесткую механическую вращательную систему с одной степенью свободы. Уравнение динамического равновесия такой системы, приведенное к оси вращения ротора ВД может быть записано в виде

$$J_B \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{VD} - \frac{1}{k_m} \cdot M_C - M_F,$$

где J_B – суммарный момент инерции вращающихся масс системы, приведенный к оси вращения ВД; k_m – передаточное отношение трансмиссии от ротора ВД к ведущим колесам; M_C – момент сопротивления, приложенный к ведущим колесам ТС; M_F – момент сопротивления, обусловленный силами трения в элементах трансмиссии, приведенный к оси вращения ВД.

Суммарный момент инерции можно представить в виде суммы двух составляющих: момента инерции ротора ВД (J_{VD}) и приведенного к оси вращения ВД момента инерции масс автомобиля. Последний может

быть определен из условия равенства кинетической энергии приведенной вращающейся массы и кинетической энергии масс, которые действительно находятся в движении. Таким образом, получим:

$$J_B = J_{VD} + k_{vm} \cdot m_A \cdot \left(\frac{r_{kol}}{k_m} \right)^2,$$

где k_{vm} – коэффициент учета вращающихся масс автомобиля; m_A – масса автомобиля; r_{kol} – радиус качения ведущих колес.

Сила сопротивления движению ТС имеет три составляющие: сопротивление качению, сопротивление движению на подъем и под уклон и аэродинамическое сопротивление. Момент сопротивления, приложенный к ведущим колесам, можно определить из выражения:

$$M_C = r_{kol} \cdot \left[\begin{array}{l} k_{pk} \cdot m_A \cdot g \cdot \cos(\Theta) + \\ + m_A \cdot g \cdot \sin(\Theta) + \\ + 0,5 \cdot \rho_0 \cdot c_W \cdot S_A \cdot (V + \vartheta_0)^2 \end{array} \right],$$

где k_{pk} – коэффициент сопротивления перекатыванию, который зависит от особенностей дорожного покрытия и качества шины; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; Θ – угол продольного уклона дороги; ρ_0 – плотность воздуха; c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления; S_A – площадь наибольшего поперечного сечения автомобиля; $V = r_{kol} \omega / k_m$ – скорость автомобиля; ϑ_0 – скорость встречного ветра.

При совершении поворотов сопротивление качению дополняется сопротивлением повороту, которое является функцией скорости автомобиля, радиуса поворота, геометрических характеристик подвески автомобиля, типа шин, давления в шинах, поведения автомобиля под действием поперечного ускорения.

ВЫВОДЫ

Получена математическая модель автомобиля с тяговым электроприводом на основе ВД при оптимальном управлении вектором тока статора и тяговой NiMH аккумуляторной батареей.

Данная модель позволяет производить сравнительный анализ различных конструктивных решений автомобильных силовых установок на основании вычислительного эксперимента. В частности, исследовать влияние конструктивных особенностей на энергетический баланс силовой установки с учетом рекуперации кинетической энергии торможения при движении по стандартному ездовому циклу и при различном характере рельефа подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сериков С.А. Постановка задачи оптимального управления гибридной силовой установкой // Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр. – Харьков: РИО ХНАДУ. – 2008. – Вып. 43. – С. 95-100.
2. Сериков С.А. Синтез оптимального управления гибридной силовой установкой // Проблемы управления и информатики. – 2009. – № 2. – С. 37-47.
3. Сериков С.А., Борошенко Ю.Н. Силовая установка гибридного автомобиля как объект управления // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. Науковий журнал. – Донецьк: ПП "Молнія", 2009. – № 3. – С.45-50.
4. Сериков С.А., Борошенко Ю.Н. Гибридная силовая установка автомобиля как объект управления // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. – Выпуск 24. – С. 15-19.
5. Francesco Esposito. A sub-optimal energy management strategy for hybrid electric vehicles. http://www.fedo.unina.it/1944/1/Esposito_Francesco_Ingegneria_Elettrica.pdf.
6. James Larminie, John Lowry. Electric vehicle technology explained. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate,

Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. – 2003. – 296 p.

7. Oskar Wallmark. On control of permanent-magnet synchronous motors in hybrid-electric vehicle applications. Technical reports at the school of electrical engineering. Department of electric power engineering. Chalmers university of technology. Sweden. – 2004. 115 pp.

8. Сериков С.А. Управление вектором тока тягового вентильного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. – Выпуск 25. – С. 127-133.

9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник для вузов. М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 262 с.

10. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников: Курс лекц.– СПб.: Корона-Век, 2006. – 336 с.

11. Гусевский Ю.И., Демченко Ф.О., Загарий Г.И., Семчук Р.В., Дука А.К., Гусев И. Управление синхронными двигателями с постоянными магнитами в области скоростей выше номинальной // Інформаційно-керуючі системи не залізничному транспорті. – 2006. – № 4. – С.74-79.

12. Дука А.К., Чернышев В.М., Демченко Ф.О., Загарий Г.И., Семчук Р.В. Моделирование тягового частотно управляемого электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами // Інформаційно-керуючі системи не залізничному транспорті. – 2006. – № 5-6. – С. 80-86.

13. Dhameja, Sandeep. Electric vehicle battery systems / Sandeep Dhameja. Sandeep Dhameja. Newnes, 2002, 230 p.

14. K.J.Kelli, M.Mihalic, M.Zolot. Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight for various chassis dynamometer test procedures. Preprint. NREL/CP-540-31306, November, 2001. <http://www.osti.gov/bridge>.

15. Loic Boulon, Daniel Hissel, Marie-Cecile Pera. Multi physics model of a nickel based battery suitable for hybrid electric vehicle simulation // Journal of Asian Electric Vehicle, Vol. 6, No. 2, December 2008. pp. 1175-1179.

16. Osvaldo Barbarisi, Roberto Canaletti, Luigi Glielmo, MicheleGosso, Francesco Vasca. State of charge estimator for NiMH batteries // Proceedings of the 41-st IEEE conference on decision and control. – Las Vegas, Nevada USA, December, 2002, pp.1739-1734.

17. Nickel-metal hydride. Application Manual. 2001. http://data.energizer.com/PDF/nickelmetalhydride_appman.pdf.

18. A H2 PEM Fuel Cell and High Energy Dense Battery Hybrid Energy Source for an Urban Electric Vehicle. N. Schofield, H. T. Yap, C. M. Bingham. <http://bioage.typepad.com>.

Поступила 29.03.2010

Сериков Сергей Анатольевич, к.т.н., доц.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, кафедра автомобильной электроники, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25 тел. (057) 700-38-52, e-mail: srkv@inbox.ru

Serikov S.A.

A mathematical model of a hybrid electric vehicle high-voltage battery identification.

A mathematical model of a vehicle tractive electric drive based on a permanent-magnet synchronous motor under optimal control of the current vector of the stator and NiMH high-voltage battery is developed. This model allows studying interaction of the tractive electric drive and the high-voltage battery during the vehicle electric motive power motion and during recuperation of braking kinetic energy.

Key words – identification, mathematical model, tractive electric drive, permanent-magnet synchronous motor, high-voltage battery, electromotive force, internal resistance, state of charge, rated battery capacity.