

УДК 621.233:629.113.65:519.87

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**А. И. Шевченко, А. В. Павленко, В. В. Павленко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: avtotr@kdu.edu.ua

Рассматриваются вопросы рационального выбора элементов тягового электропривода электромобиля с позиций обеспечения необходимых эксплуатационных свойств. Для рассматриваемого варианта тягового электропривода разработана математическая модель, описывающая процессы, проходящие в приводе ведущих колес при различных режимах движения. Тяговый электропривод состоит из первичного источника энергии, обеспечивающего возможность движения электромобиля с постоянной максимальной скоростью, и супермаховика, который обеспечивает необходимое ускорение электромобиля.

Ключевые слова: тяговый электропривод, электромобиль, пробег, частотно регулируемый электропривод.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**О. І. Шевченко, О. В. Павленко, В. В. Павленко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: avtotr@kdu.edu.ua

Розглядаються питання раціонального вибору елементів тягового електроприводу електромобіля з позицій забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей. Для варіанту електроприводу, що розглядається, розроблено математичну модель, яка описує процеси, що відбуваються у приводі ведучих коліс за різних режимів руху. Тяговий електропривод складається з первинного джерела енергії, що забезпечує можливість руху електромобіля з усталеною максимальною швидкістю, і супермаховика, що забезпечує необхідне прискорення.

Ключові слова: тяговий електропривод, електромобіль, пробіг, частотно регулюємий привод.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одной из основных причин интенсивного развития и продвижения на рынке автомобилей с гибридными силовыми установками является их более высокая экологическая безопасность. Немаловажную роль в этом процессе занимает стоимость жидкого топлива нефтяного происхождения. Необходимость перевода автомобильного пневмоколесного транспорта на электрическую тягу (гибридную силовую установку можно рассматривать как переходной этап этого процесса) обусловлен экологическими, экономическими и энергетическими факторами.

Минимальные требования к электромобилю сформулированы еще в 70-х годах прошлого столетия, [1]. Для того, чтобы такой автомобиль мог составить конкуренцию автомобилю с бензиновым двигателем, дальность его пробега на одной зарядке должна быть не менее 300 км, средняя скорость достигать 90 км/час, разогнаться должен с 16 до 48 км/час за 10 с. По данным [2] для автомобилей, эксплуатирующихся в городских условиях, достаточно обеспечить среднюю скорость движения 30–60 км/час. Значение максимальной скорости должно находиться в пределах 90–120 км/час.

Несмотря на разнообразие условий эксплуатации и конструктивных схем электромобилей, все они имеют систему тягового электропривода (ТЭП), которая включает силовую установку, электропривод ведущих колес и аппаратуру регулирования. Выбор схемы и элементов системы ТЭП выполняется таким образом, чтобы обеспечить требуемые скоростные свойства с учетом свойств элементов: мощностные показатели, род тока, характеристики электроустановок, особенности пополнения запаса энергии, специфики физических процессов преобразования и передачи энергии в силовой цепи, регулиро-

вочных свойств электродвигателей и др. Также необходимо учесть скоростной режим движения: разгон, движение с постоянной скоростью, торможение, а в городских условиях – частые остановки.

С целью повышения КПД системы ТЭП необходимо предусмотреть возможность рекуперации накопленной кинетической энергии при торможении, и при этом стремиться рекуперировать ее полностью.

Источник энергии, как и в других гибридных схемах, необходимо выбирать исходя из критерия удельной энергии, что обеспечит минимальную массу силовой установки и максимальный КПД при движении с установившейся скоростью. Использование рекуперированной энергии обеспечит необходимые динамические и экономические показатели. Следовательно, создание системы ТЭП электромобиля является многофакторной задачей проектирования.

Целью данной работы является создание инструмента – математической модели ТЭП – для синтеза структуры ТЭП электромобиля и основных параметров ее элементов в разных режимах движения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В соответствии с изложенными принципами структурная схема ТЭП электромобиля будет иметь вид, представленный на рис. 1.

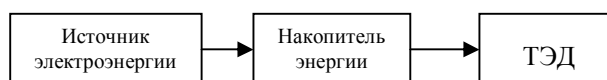


Рисунок 1 – Структурная схема ТЭП электромобиля: ТЭД – тяговый электродвигатель

В качестве накопителя энергии может быть применен накопитель электрической энергии (иони-

стор) или накопитель механической энергии (супермаховик).

Положительные стороны применения супермаховика в качестве накопителя энергии рассмотрены в [2]. В этом случае структурная схема ТЭП примет следующий вид (рис. 2).

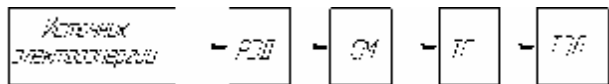


Рисунок 2 – Структурная схема ТЭП с супермаховиком: РЭД – разгонный электродвигатель; СМ – супермаховик; ТГ – тяговый генератор переменного тока с выпрямителем

В качестве источника электроэнергии могут использоваться топливные элементы (ТЭ) или система двигатель внутреннего сгорания – электрический генератор (ДВС–ЭГ). В случае применения ДВС, он постоянно работает в одном, наиболее экономичном и экологичном режимах. Применение аккумуляторных батарей является неперспективным, т.к. не обеспечивают достаточный пробег [1].

Мощность источника электрической энергии (системы ДВС–ЭГ или топливных элементов) выбирается из условия обеспечения установившейся скорости движения с максимальной скоростью (90–120 км/час). Если требуемая мощность в текущий момент движения меньше мощности, вырабатываемой источником, то происходит накопление избыточной энергии в супермаховике.

Учитывая высокую скорость вращения СМ (20–30 тыс. об/мин [2]) для его привода используется частотно-регулируемый электропривод системы автономный инвертор-асинхронный ЭД (АИ–АД) с питанием от источника постоянного тока.

Тяговый электропривод представляет собой систему Г–Д переменного, переменного-постоянного или постоянного тока.

Режимы работы тягового электропривода электромобиля.

1. Предварительный разгон супермаховика.

Разгон супермаховика (СМ) производится при постоянном номинальном моменте разгонного электродвигателя (РЭД) до частоты вращения, например, 20000 об/мин. Максимальная частота вращения (25000–30000 об/мин) должна быть больше, чтобы обеспечить возможность накопления энергии торможения электромобиля (ЭМ), что связано с ростом частоты вращения СМ.

2. Разгон электромобиля.

Крутящий момент РЭД недостаточен для обеспечения требуемой динамики, поэтому при разгоне ЭМ используется энергия СМ, преобразуемая тяговым генератором в электрическую. Частота вращения СМ снижается, но после завершения разгона достигает прежнего значения за счет крутящего момента РЭД.

3. Торможение электромобиля.

При электрическом торможении электромобиля момент ТД становится тормозным, а момент ТГ – движущим. Энергия торможения накапливается на маховике, частота вращения которого увеличивается.

4. Остановка электромобиля.

При кратковременной остановке ЭМ, если частота вращения маховика выше определенного значения (например, выше 20000 об/мин), энергия маховика может быть снижена за счет тока заряда АБ. При достижении заданной частоты вращения заряд АБ прекращается.

При остановке ЭМ на длительное время весь запас энергии СМ может быть преобразован в энергию заряда АБ. Алгоритм работы всей системы при остановках, а также использование механических тормозов, в том числе для гашения избыточной энергии торможения, требует более детального рассмотрения, и в данном материале рассматриваться не будет.

Моделирование ТЭП.

Моделирование ТЭП электромобиля с инерционным накопителем выполним в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 3.

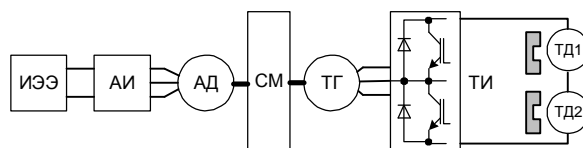


Рисунок 3 – Функциональная схема ТЭП электромобиля: ИЭЭ – источник электроэнергии, АИ – автономный инвертор; АД – асинхронный электродвигатель; СМ – супермаховик; ТГ – тяговый генератор, ТИ – тяговый инвертор, ТД1, ТД2 – тяговые ЭД

В представленной модели в качестве привода супермаховика применен частотно-регулируемый электропривод с асинхронным ЭД. Крутящий момент АД недостаточен для обеспечения требуемой динамики, поэтому при разгоне ЭМ используется энергия маховика. Частота вращения маховика снижается, но после завершения разгона достигает прежнего значения за счет крутящего момента АД.

Тяговый электропривод построен по системе генератор–двигатель (Г–Д) переменного-постоянного тока. В качестве ТГ применен трехфазный синхронный генератор переменного тока с IGB–транзисторным инвертором. Выпрямление переменного тока синхронного генератора в тяговом режиме осуществляется диодами тягового инвертора. При рекуперации энергии торможения, когда ТД работают в генераторном режиме, преобразование постоянного тока в переменный осуществляется транзисторным инвертором. При этом энергия торможения накапливается в СМ. Электрическое торможение не исключает при необходимости использование механических тормозов электромобиля.

В качестве тягового двигателя (ТД) может быть применен высокомоментный электродвигатель по-

стоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов или вентильный электродвигатель переменного тока с постоянным магнитом в роторе. Математическое моделирование обоих типов электродвигателей не имеет существенных отличий ввиду идентичности их электромеханических характеристик. Частота вращения и момент двигателей обоих типов регулируются изменением подводимого напряжения. Однако применение вентильного двигателя предпочтительно, т.к. он не имеет щеточно-коллекторного узла. Оба электродвигателя включены последовательно, что обеспечивает равенство их крутящих моментов.

При принятом допущении, что траектория движения электромашины прямолинейна и диаметры ведущих колес одинаковы, частоты вращения валов тяговых электродвигателей одинаковы. Это позволит существенно упростить математическую модель ТЭП.

Регулирование тока силовой цепи ТД в тяговом и тормозном режимах осуществляется изменением ЭДС генератора путем регулирования его тока возбуждения. Система регулирования – трёхконтурная подчиненного регулирования. Функциональная схема системы регулирования ТЭП представлена на рис. 4.

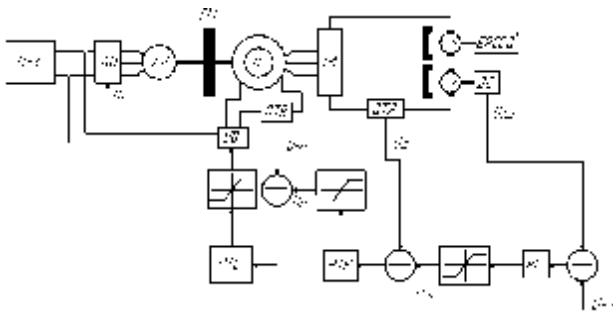


Рисунок 4 – Функциональная схема системы регулирования ТЭП: УВ – управляемый возбудитель; ДТВ, РТВ – датчик и регулятор тока возбуждения ТГ; ДТЯ, РТЯ – датчик и регулятор тока силовой цепи системы ТГ–ТД; ДС, РС – датчик и регулятор скорости движения электромашины; U_{dij} ,

U_{div} , U_{dc} – напряжения обратной связи по току якоря ТД, току возбуждения ТГ и скорости электромашины; U_{dc} , U_{zj} , U_{zdv} , U_{zc} – напряжения задания частоты АИ, тока якоря ТД, тока возбуждения ТГ и скорости электромашины, БРССД – блок расчета сил сопротивления движению

Координаты регулирования – ток возбуждения, ток силовой цепи системы ТГ–ТД, частота вращения вала ТД (скорость автомобиля).

Тяговые генератор и двигатели имеют общую силовую цепь, представленную в математической модели аperiodическим звеном с параметрами $Rэ$ и $Tэ$ – эквивалентным сопротивлением и эквивалентной постоянной времени. Цепь возбуждения ТГ модели-

руется аperiodическим звеном, учитывающим постоянные времени обмотки возбуждения (ОВ). Система регулирования – трехконтурная подчиненного регулирования. Внешний контур регулирования – контур регулирования скорости автомобиля с П-регулятором. Датчиком скорости автомобиля является датчик частоты вращения вала ТД. Внутренний по отношению к контуру скорости – контур регулирования тока силовой цепи ТД – настроен на модульный оптимум (МО) и имеет пропорционально-интегральный регулятор тока. Внутренний по отношению к контуру тока – контур регулирования тока цепи возбуждения ТГ – также настроен на МО и имеет ПИ – регулятор.

Основные уравнения математической модели.

1. Система АД–СМ–ТГ

Скольжение асинхронного двигателя Δw ограничивается в двигательном режиме значением Δw_1 , что соответствует максимальному крутящему моменту

$$\Delta w = w_i - w(t),$$

$$w_i = 2p \cdot f = 2p \cdot kU_{zd},$$

$$\text{если } \Delta w > \Delta w_1, \Delta w(t) = \Delta w_1,$$

крутящий момент асинхронного двигателя

$$M_{ad} = K_{ad} \cdot \Delta w,$$

где K_{ad} – коэффициент пропорциональности, определяемый по механической характеристике электродвигателя; $w_i(t)$ – частота вращения магнитного поля АД; U_{zd} – напряжение задания частоты АИ f .

Уравнение движения системы АД–СМ–ТГ

$$w(t) = \frac{1}{J_i} \cdot \int_0^t (M_{ad}(t) - M_{tg}(t)) dt,$$

где $w(t)$ – частота вращения вала системы АД – СМ – ТГ; M_{tg} – статический момент сопротивления на валу АД; J_m – суммарный момент инерции АД, супермаховика и ТГ.

2. Система ТГ – 2ТД

Момент, развиваемый тяговым генератором,

$$M_{tg} = \kappa \Phi_{tg} \cdot I_{tg}.$$

Ток i_{tg} в силовой цепи системы ТГ – 2ТД определяется уравнением

$$T_e \frac{di_{td}}{dt} + i_{td}(t) = (E_{tg}(t) - 2E_{td}(t)) / R_e,$$

где R_e – эквивалентное сопротивление якорной цепи ТГ – 2ТД; T_e – эквивалентная постоянная времени якорной цепи ТГ – 2ТД; $E_{tg}(t)$, $E_{td}(t)$ – ЭДС тяговых генератора и двигателя соответственно;

$$E_{td}(t) = w_{td}(t) \cdot \kappa \Phi_{td},$$

$$E_{tg}(t) = w(t) \cdot \kappa \Phi_{tg}(t),$$

где $w_{id}(t)$ – частота вращения вала ТД; κ – постоянные двигателя и генератора; Φ_{id} , $\Phi_{ig}(t)$ – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно.

Момент тягового электродвигателя

$$M_{id}(t) = i_{id}(t) \cdot \kappa \Phi_{id}.$$

3. Система управления ТЭП

3.1. Цепь возбуждения ТГ с управляемым возбудителем (УВ)

Ток возбуждения i_{vg} синхронного тягового генератора

$$T_{ovg} \frac{di_{vg}}{dt} + i_{vg}(t) = E_v(t) / R_{ovg},$$

$$T_n \frac{dE_v}{dt} + E_v(t) = U_y \cdot \kappa_v,$$

где E_v , κ_v , U_y – ЭДС, коэффициент усиления и напряжение управления возбудителя;

T_{ovg} , R_{ovg} – постоянная времени и сопротивление обмотки возбуждения ТГ.

3.2. Датчики и регуляторы контуров регулирования

Напряжение на выходах датчиков тока возбуждения, якоря ТД и скорости электромобиля

$$U_{div} = \kappa_{iv} \cdot i_{iv},$$

$$U_{dij} = \kappa_{ij} \cdot i_{ij},$$

$$U_{dc} = \kappa_c \cdot w_{id},$$

где κ_{iv} , κ_{ij} , κ_c – коэффициенты передачи датчиков.

Выходное напряжение П-регулятора скорости ЭМ, ограниченное на выходе регулятора значением 10В, является напряжением задания тока силовой цепи ТД (рис. 4):

$$U_{zj} = (U_{zca} - U_{dca}) \cdot \kappa_{pc},$$

где κ_{pc} – коэффициент усиления регулятора скорости ЭМ (регулятора частоты вращения ТД).

Математическая модель ПИ – регулятора:

$$U_u(t) = (1/T_p) \int U_{inp}(t) dt,$$

$$U_n(t) = U_{inp} \cdot \kappa_p,$$

$$U_y(t) = U_n(t) + U_u(t),$$

где T_p , κ_p – постоянная времени и коэффициент передачи ПИ-регулятора.

В соответствии с функциональной схемой системы управления ТЭП электромобиля (рис. 4) и на основании уравнений элементов математической модели системы построена математическая модель в среде математического аппарата «MATLAB» для исследования статических и динамических режимов работы ТЭП (рис. 5). На рис. 6 показана математическая модель одного из блоков – блока расчета сил сопротивления движению.

Результаты моделирования разгона автомобиля до скорости 80 км/час, движение с постоянной скоростью, торможением до скорости 40 км/час и торможением до остановки представлен графиками изменения ряда координат ТЭП (скорость электромобиля, частота вращения маховика, токи возбуждения и якоря ТД, ЭДС тягового генератора) (рис. 7).

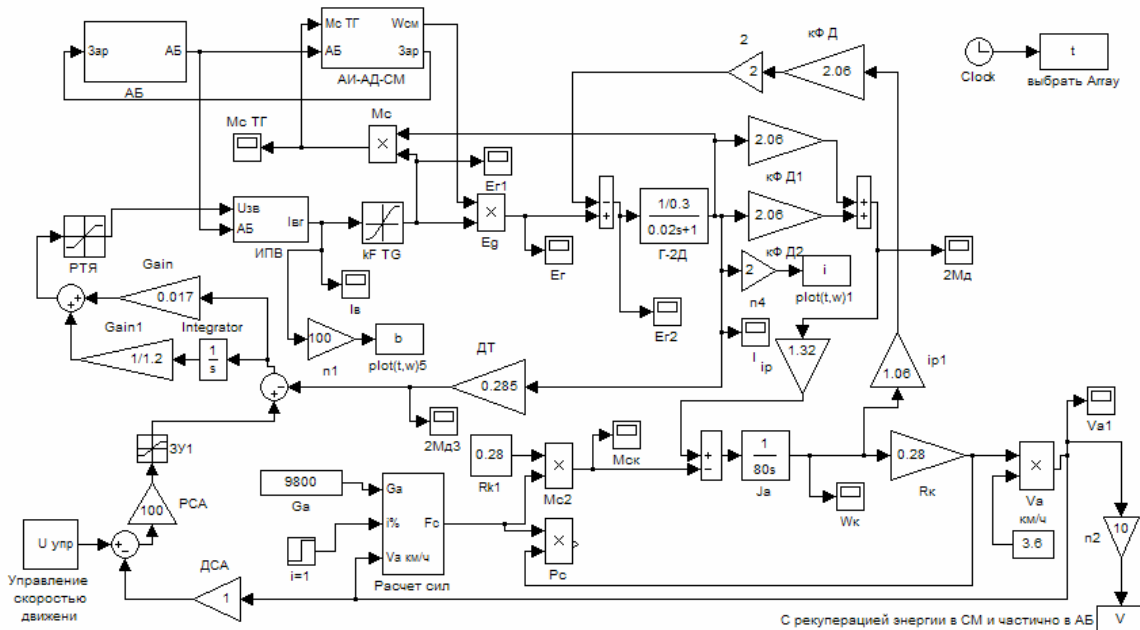


Рисунок 5 – Математическая модель ТЭП

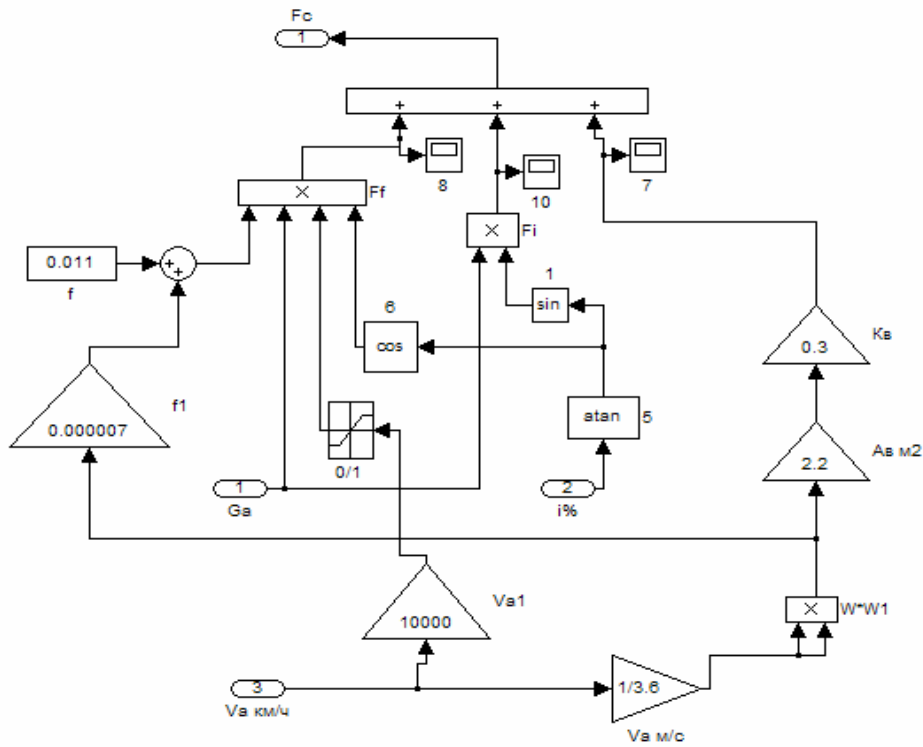


Рисунок 6 – Математическая модель блока расчета сил сопротивления движению

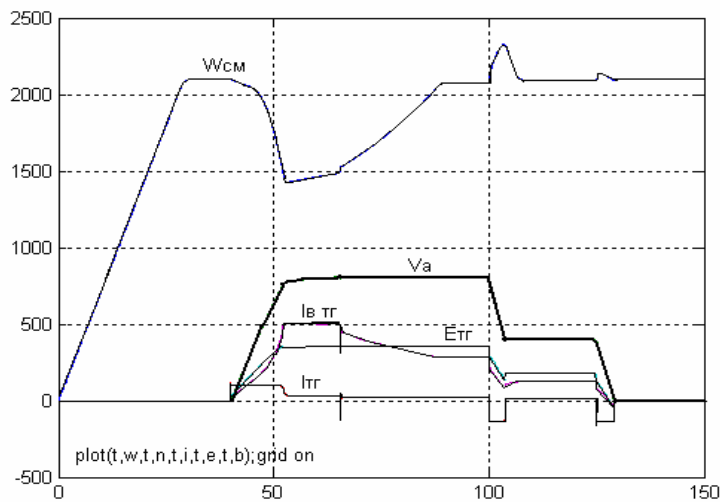


Рисунок 7 – Графики зависимостей частоты вращения маховика W_{cm} , скорости автомобиля V_a , ЭДС ТГ E_{tr} , тока ТГ I_{tr} и его цепи возбуждения I_b при задании скорости в цикле 0–80–40–0 км/час

ВЫВОДЫ. Основная задача, поставленная для разрабатываемой математической модели на данном этапе, состояла в моделировании качественной связи угловой скорости супермаховика и текущей скорости движения электромобиля. При этом мощность источника энергии (ДВС или ТЭ) обеспечивает мощностной баланс для движения с постоянной максимальной скоростью. Энергия, необходимая для обеспечения требуемых показателей разгона, будет получена от предварительно разогнанного

супермаховика. Он же обеспечивает и возможность рекуперации энергии. Кривая угловой скорости супермаховика W_{cm} демонстрирует зависимость от режима движения автомобиля, рис. 7, что в дальнейшем позволит выбирать параметры маховика и первичного источника энергии. При разгоне, когда интенсивно отбирается мощность от супермаховика, его угловая скорость заметно снижается. С момента начала движения электромобиля с постоянной скоростью излишек мощности ИЭ плавно разгоняет

супермаховик до заданной скорости. На данном этапе принято допущение о том, что вся кинетическая энергия торможения будет полностью рекуперирована в энергию вращающегося супермаховика. Этот процесс характеризуется резким всплеском угловой скорости супермаховика, причем амплитуда этого всплеска прямопропорциональна интенсивности торможения. Передаваемая к СМ мощность рекуперации ограничена условиями сцепления колес с опорной поверхностью и параметрами ТЭП.

Таким образом, получена работоспособная модель работы ТЭП электромобиля с накопителем механической энергии в виде супермаховика. Эта модель требует дальнейшего развития в направлении

использования современной элементной базы в системах управления ТЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов И.С., Пролыгин А.П., Андреев Ю.М., Миндлин А.Б. Теория и расчет тягового привода электромобилей: Учеб. пособие для вузов по спец. «Городской электрический транспорт» и «Электрическая тяга и автоматизация тяговых устройств»/ Под ред. И.С. Ефремова. – М.: Высшая школа, 1984. – 383 с.
2. Гулия Н.В. Накопители энергии. – М.: Наука, 1980. – 152 с.

MODELLING OF ELECTRIC VEHICLE TRACTION DRIVE

A. Shevchenko, A. Pavlenko, V. Pavlenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: avtotr@kdu.edu.ua

The problems of rational choice of electric vehicle traction drive elements from a perspective of the required performing characteristics are studied. The mathematic model for such electric traction drive is worked out. This model describes the wheel drive processes in different traffic modes. The electric vehicle traction drive includes the primary power source providing the electromobile motion with constant maximum velocity and super flywheel that provides the electromobile acceleration required.

Key words: electric traction drive, electric vehicle, run, variable-frequency electric drive.

REFERENCES

1. Yefrenov I.S., Prolygyn A.P., Andreyev Y. M., Mindlyn A.B. *Theory and calculations of electromobiles traction drive; Textbook for higher educational establishments in speciality "Municipal electric traffic" and "Electric traction and automatization of traction devices"*/ Ed. by I.S. Yefremov. – М.:Vysshaja Shcola, 1984. – 383 p. [in Russian].

2. Gulia N.V. *Energy accumulators*. – М.: Nauka, 1980. – 152 p. [in Russian].

Стаття надійшла 25.05.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Синчуком О.М.