

УДК 621.331

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАТИВНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

В.Б. Клепиков, докт.техн.наук, **А.В. Семиков**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичёва, 2, Харьков, 61002, Украина, e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

Выведены соотношения для определения энергии, которая может быть возвращена источнику питания электромотоцикла при реализации электроприводом торможений в рекуперативном режиме. Рассмотрены случаи динамического снижения скорости и спуска с заданной скоростью. Учтены потери от сил трения и аэродинамического сопротивления воздуха. Получены графики зависимости удельной (на единицу массы электромотоцикла) экономии энергии в зависимости от параметров движения. Выполнены расчёты для стандартных городских циклов движения и показано, что экономия может достигать 12...22% от общих затрат на движение. Библ. 11, рис. 5.

Ключевые слова: электропривод, электромотоцикл, энергоэффективность, рекуперативное торможение.

Развитие автомобилестроения в последнее десятилетие сопровождается неуклонным ростом числа создаваемых электромотоциклов. По утверждению ряда авторов во многих видах автотранспорта в перспективе альтернативы электромотоциклу нет [4, 7]. Это объясняется необходимостью сохранения для последующих поколений таких органических энергоносителей, как нефть, газ, используемых также для производства пластмасс, пестицидов и др. Автомобили с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) выхлопными газами отравляют атмосферу, и уже сейчас во многих крупных городах уровень её загрязнения достигает критического [3].

Большинство ведущих автомобильных фирм «Мерседес», «Нисан», «Тойота», «Тесла», «Фольксваген» и другие разрабатывают и производят электромотоциклы, которые по своим техническим характеристикам – скорости, приемистости, дальности пробега успешно конкурируют с автомобильными аналогами [9]. Впечатляют успехи электромотоцикла с источником электроэнергии на солнечных элементах, осуществлявшим кругосветный пробег ещё в 2008 году [11]. В некоторых странах (Норвегия, Германия, Индия) планируется принять решения о запрете в ближайшие 20...30 лет выпуска легковых автомобилей с ДВС [10].

Источником электропитания в электромотоцикле, как правило, является аккумуляторная батарея (АБ) либо АБ с буферной суперконденсаторной батареей (СКБ) [1, 8]. Для электромотоциклов с АБ исключительно актуально увеличение дальности пробега на одной зарядке.

Одним из важных достоинств электромотоцикла по сравнению с автомобилем с ДВС является способность электропривода электромотоцикла, создавая тормозное усилие, преобразовывать механическую энергию движения (кинетическую или потенциальную) в энергию электрическую и возвращать её источнику электропитания, увеличивая дальность пробега. Актуальность реализации возврата энергии в тормозных режимах обусловлена частыми торможениями в реальных режимах городских циклов движения и наличием протяжённых спусков при движении на трассе. Существует довольно широкое разнообразие стандартных циклов движения: ECE-15, New European Driving Cycle (NEDC), Common Artemis Driving Cycles (CADC), Japan 10 Mode Cycle (J10m), Japan 10-15 Mode Cycle (J10-15m), JC08, US FTP 72 [6]. Примеры, подтверждающие наличие довольно частых интервалов торможения, тахограмм циклов NEDC и US FTP 72, приведены на рис. 1, а и б.

Существует большое многообразие марок автомашин, типов электроприводов, условий торможения, поэтому целесообразно обеспечить теоретический аппарат, позволяющий с общих позиций производить оценку энергоэффективности использования рекуперативных режимов торможения, как средства экономии электрической энергии и увеличения дальности пробега электромотоцикла на одной зарядке АБ. Следует заметить, что помимо вышеуказанного эффекта это обеспечивает сокращение потерь времени на перезарядку АБ, а в определённых случаях и времени поездки к месту цели.

Цель работы – получить аналитические соотношения для определения возможных объёмов энергии, возвращаемых источнику электропитания в тормозных режимах электромобиля при снижении скорости и спусках. Установить влияние на величину этой энергии условий торможения и оценить на конкретном примере объёмы экономии для стандартных городских и смешанных циклов движения.

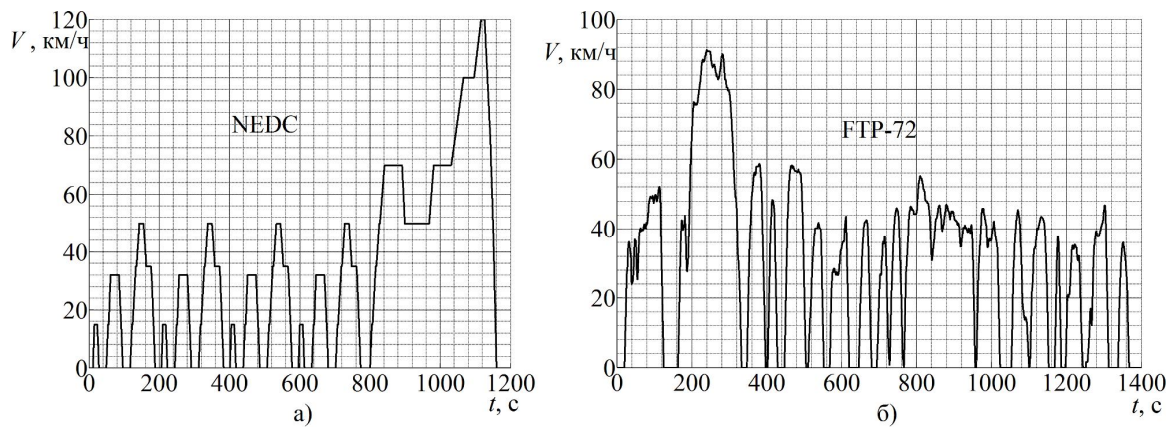


Рис. 1

Определим величину возвращаемой энергии на горизонтальном участке пути при снижении электромобилем массой m скорости с V_0 до V_1 . При этом произойдёт изменение кинетической энергии электромобиля с W_1 до W_2 на величину

$$W_{\dot{\epsilon}} = W_1 - W_2 = \gamma m (V_0^2 - V_1^2) / 2, \quad (1)$$

где $\gamma \approx 1,05 \dots 1,1$ учитывает кинетическую энергию масс вращения.

Эта энергия частично расходуется на работу A_{mp} по преодолению сил трения качения F_{mp} , частично на работу A_{δ} по преодолению аэродинамических сил сопротивления воздуха F_{δ} . Остальная энергия W_p воспринимается электроприводом и за вычетом потерь в его составных частях (трансмиссия, электродвигатель, полупроводниковый преобразователь) превращается в электрическую энергию и возвращается источнику питания электромобиля с учётом коэффициента полезного действия электропривода (ЭП) $\eta_{\text{ЭП}}$. Величина этой рекуперированной энергии равна

$$W_{\delta} = (W_{\dot{\epsilon}} - A_{\delta\delta} - A_{\dot{\epsilon}}) \eta_{\text{ЭП}}. \quad (2)$$

Работа A_{mp} при перемещении электромобиля за время t_m со скорости V_0 до V_1 равна

$$A_{\delta\delta} = \int_0^{S_{\dot{\epsilon}}} F_{\delta\delta} ds = \int_0^{t_{\dot{\epsilon}}} F_{\delta\delta} V dt, \quad (3)$$

где, как известно, сила трения качения

$$F_{\delta\delta} = F_{\dot{\epsilon}} = \mu m g, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения качения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Для лучшего согласования математических соотношений с физическим смыслом быстроту снижения скорости определим абсолютной величиной ускорения (имеющего при снижении скорости V отрицательное значение)

$$\epsilon = |a| = \left| \frac{dV}{dt} \right|. \quad (5)$$

Примем, что величина ϵ во время торможения неизменна и равна

$$\epsilon = (V_0 - V_1) / t_m. \quad (6)$$

В этом случае текущее значение скорости

$$V = V_0 - \epsilon t, \quad (7)$$

что при подстановке в (3) даёт

$$A_{mp} = F_{\kappa} (V_0 t_m - \epsilon t_m^2 / 2) = F_{\kappa} (V_0 + V_1) t_m / 2 = F_{\kappa} (V_0^2 - V_1^2) / 2\epsilon. \quad (8)$$

Из (8) следует, что потери на трение качения будут тем меньше, чем меньше время торможения t_m или, что тоже самое, чем больше быстрота снижения скорости ϵ . С физической точки зрения

это объясняется тем, что при одинаковом значении изменения скорости $\Delta V = V_0 - V_1$, но больших значениях ε будет пройден меньший путь, на котором и имеют место потери энергии.

Подставив в соотношение (8) выражение (4) и учтя (1), получаем

$$A_{\text{од}} = \frac{\mu mg}{2\varepsilon} (V_0^2 - V_1^2) = \frac{\mu g}{\varepsilon \gamma} (W_1 - W_2), \quad (9)$$

откуда следует, что при одинаковом изменении кинетической энергии $W_k = W_1 - W_2$ торможение со значением $\varepsilon = 1 \text{ м/с}^2$ с точки зрения потерь энергии от трения качения как бы эквивалентно почти 10-тикратному увеличению коэффициента трения качения μ . Зависимость работы на преодоление силы трения от скорости при торможении до нуля показана рис. 2, а.

Найдём выражение для величины A_a – работы по преодолению силы аэродинамического сопротивления воздуха F_a . Известно, что

$$F_a = C_x \rho_\varepsilon S_{\text{лс}} V^2 / 2, \quad (10)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, $S_{\text{лс}}$ – площадь лобового сопротивления автомобиля, м^2 , ρ_ε – плотность воздуха, кг/м^3 , V – скорость электромобиля, м/с или

$$F_a = k_a V^2, \quad (11)$$

где $k_a = C_x \rho_\varepsilon S_{\text{лс}} / 2$ – постоянная, определяемая маркой автомашины.

Работа по преодолению сил сопротивления воздуха равна

$$A_a = \int_0^{t_m} P_a dt = \int_0^{t_m} F_a V dt = \int_0^{t_m} k_a V^3 dt. \quad (12)$$

$$\text{Или с учётом (7)} \quad A_a = k_a \int_0^{t_m} V^3 dt = k_a \int_0^{t_m} (V_0 - \varepsilon t)^3 dt, \quad (13)$$

что после интегрирования даёт

$$A_a = k_a \left(V_0^3 t_m + V_0 \varepsilon^2 t_m^3 - \frac{3}{2} V_0^2 \varepsilon t_m^2 - \frac{\varepsilon^3}{4} t_m^4 \right) = k_a \frac{\Delta V}{\varepsilon} \left(V_0^3 + V_0 \Delta V^2 - \frac{3}{2} V_0^2 \Delta V - \frac{\Delta V^3}{4} \right). \quad (14)$$

Из (14) следует, что, как и для трения качения, снижению аэродинамических потерь за счёт сокращения тормозного пути способствует увеличение быстроты торможения ε . Влияние этого фактора проявляется ещё в большей мере, чем для трения качения, поскольку аэродинамическая сила сопротивления воздуха имеет квадратичную зависимость от скорости движения.

При торможении до полной остановки $V_1 = 0$ и соответственно $V_0 = \Delta V$, $\varepsilon = V_0 / t_m$. Выражение по преодолению аэродинамического сопротивления в этом случае приобретает вид, показанный на рис. 2, б

$$A_a = \frac{C_x \rho_\varepsilon S_{\text{лс}}}{8} V_0^3 t_m. \quad (15)$$

Вид данной зависимости показывает, что при одинаковых изменениях скорости аэродинамические потери кинетической энергии существенно больше для больших значений скорости движения.

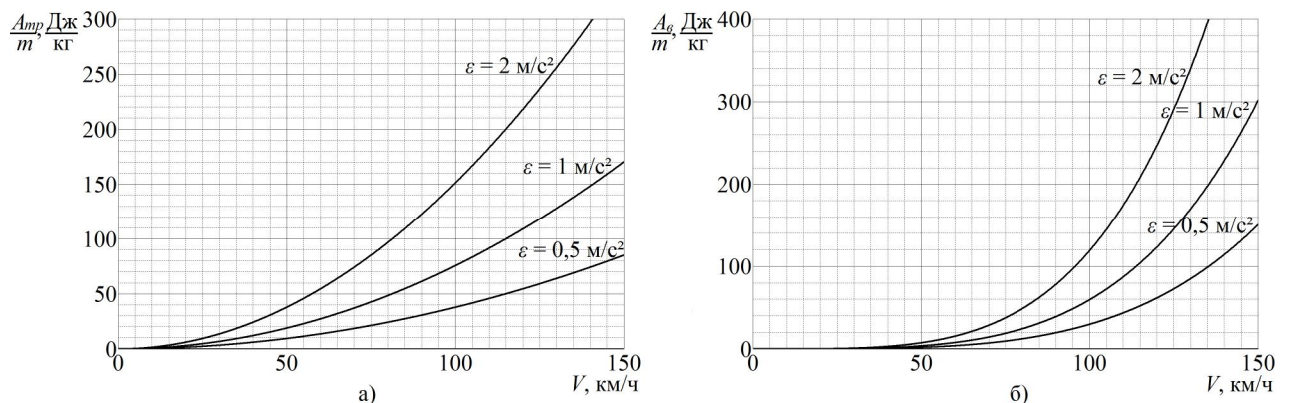


Рис. 2

Таким образом, объём рекуперированной энергии W_p при снижении скорости на горизонтальном участке пути на величину $\Delta V = V_0 - V_1$ в соответствии с (2) равен

$$W_\delta = \frac{m(V_0^2 - V_1^2)}{2} \left(\gamma - \frac{\mu g t_\delta}{\Delta V} \right) - \frac{C_x \rho_a S_{en} t_\delta}{2} f(V_0, \Delta V). \quad (16)$$

При торможениях до полной остановки, что нередко имеет место в режимах городского цикла движения,

$$W_\delta = \frac{mV_0^2}{2} \left(\gamma - \frac{\mu g t_\delta}{\Delta V} \right) - \frac{C_x \rho_a S_{en} V_0^3 t_\delta}{8}. \quad (17)$$

Графическая зависимость рекуперированной удельной (на единицу массы) энергии при торможениях до полной остановки на горизонтальном участке с различной быстротой замедления

$$\frac{W_\delta}{m} = \frac{V_0^2}{2} \left(\gamma - \frac{\mu g}{\varepsilon} - \frac{k_a V_0^2}{2\varepsilon} \right) \quad (18)$$

представлена на рис. 3 для электромотоцикла на базе автомобиля «Ланос» (масса 1500 кг, γ принято равным 1, площадь лобового сопротивления 2 м², коэффициент аэродинамического сопротивления 0,4). Верхняя кривая отображает значение кинетической энергии, которой обладает электромотоцикл в момент начала торможения. Из кривых видно, что при торможении со скорости 90 км/ч при $\varepsilon = 2$ м/с²

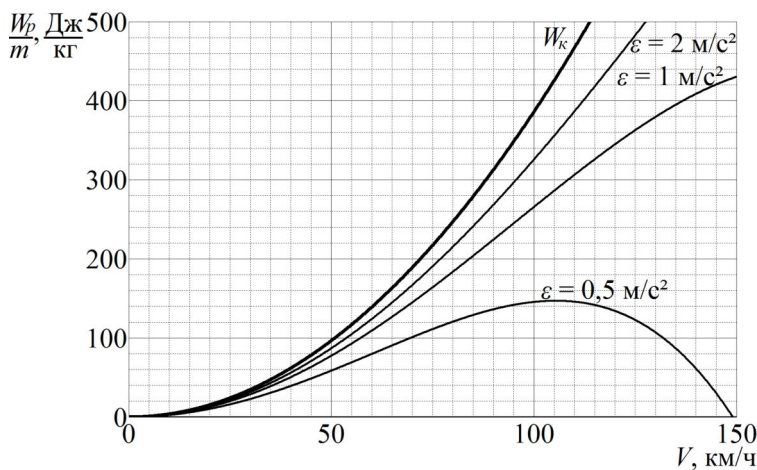


Рис. 3

возвращается 280 кДж электроэнергии, а при $\varepsilon = 0,5$ м/с² — лишь 130 кДж, хотя первоначальный запас кинетической энергии одинаков. Это объясняется существенно большей долей потерь на преодоление сил аэродинамического сопротивления вследствие более медленного снижения скорости, величина которой в 3-ей степени влияет на мощность этих потерь. Более того, при медленных торможениях ($\varepsilon = 0,5$ м/с²), начиная со скорости около 105 км/ч, сила аэродинамического сопротивления настолько возрастает, что доля рекуперированной энергии при торможении до полной остановки становится сопостави-

мой с энергией торможения со скорости 40 км/ч, хотя исходный запас кинетической энергии более, чем в 10 раз больший. Это следует учитывать при управлении движением.

Если снижение скорости в рекуперативном режиме электропривода осуществляется при движении на подъёме с углом α , то часть кинетической энергии электромотоцикла ΔW_n пойдёт на преодоление сил тяжести

$$\Delta W_n = mg\Delta h, \quad (19)$$

где Δh — перепад высот за время торможения.

Поскольку пройденный за время торможения путь $S_\delta = 0,5(V_0 + V_1)t_\delta$, то

$$\Delta h = S_m \sin \alpha = 0,5(V_0 + V_1)t_m \sin \alpha. \quad (20)$$

Соответственно, величина возвращённой энергии при движении на подъём по сравнению с торможением на горизонтальном участке уменьшается на ΔW_n

$$W_{pn} = W_p - \Delta W_n. \quad (21)$$

Найдём соотношения для рекуперированной энергии в случае спуска электромотоцикла с перепадом высоты Δh при условии, что скорость движения $V = V_c$ сохраняется неизменной и угол наклона дороги равен α . В этом случае преобразованию и возврату подлежит потенциальная энергия электромотоцикла в соответствии с выражением (19). За вычетом потерь на преодоление сил трения и аэродинамического сопротивления воздуха F_δ величина возвращённой источнику питания энергии составляет

$$W_\delta = (\Delta W_i - A_{\delta\delta} - A_a) \eta_{\text{вн}}. \quad (22)$$

Поскольку сила нормального давления

$$F_n = mg \cos \alpha, \quad (23)$$

сила трения качения

$$F_k = \mu mg \cos \alpha, \quad (24)$$

а работа по преодолению этой силы

$$A_k = F_k S_m, \quad (25)$$

то работа по преодолению аэродинамического сопротивления равна

$$A_a = F_a S_m = \frac{C_x \rho_a S_{лс} V_c^2}{2} \frac{\Delta h}{\sin \alpha}. \quad (26)$$

Соотношение (26) показывает, что в отличие от торможения с изменением скорости при спуске, сокращение времени торможения за счёт увеличения скорости V_c приводит не к уменьшению, а к увеличению аэродинамических потерь. И в этом случае с учётом соотношений (22)–(26) возвращаемая источнику питания энергия равна

$$W_{\partial} = \frac{\Delta h \eta_{\partial}}{\sin \alpha} \left(mg \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \mu) - \frac{C_x \rho_a S_{лс} V_c^2}{2} \right). \quad (27)$$

Анализ соотношения (27) также показывает, что при спуске, в отличие от рекуперации при торможении на горизонтальном участке с изменением скорости движения, сокращение времени торможения за счёт большего значения V_c приводит к большим потерям и меньшему значению рекуперированной энергии. Это подтверждают графические зависимости удельной рекуперированной энергии на единицу перепада высот при различных значениях уклона $W_{\partial} / \Delta h = f(V_c, \alpha)$, приведенные на рис. 4.

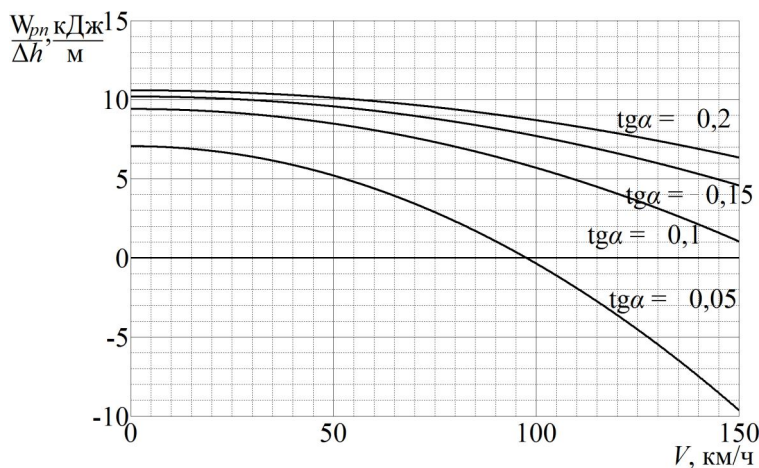


Рис. 4

Из кривых видно, что при одной и той же скорости торможения, но больших уклонах, величина рекуперированной энергии больше. Это объясняется тем, что при одном и том же перепаде, но больших уклонах, пройденный автомобилем путь меньше, и, следовательно, меньше потери на преодоление сил трения и аэродинамического сопротивления воздуха. При малом уклоне ($\operatorname{tg} \alpha = 0,05$) при скорости порядка 100 км/ч потери на преодоление силы сопротивления воздуха возрастают в такой мере, что значение $W_{\partial} / \Delta h$ становится отрицательным, а это означает, что при такой скорости не только не будет рекуперации,

но даже потребуются затраты дополнительной энергии на компенсацию потерь.

Экспериментальная проверка приведенных выше соотношений определения рекуперированной энергии была выполнена на электромобиле, созданном на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «Харьковский политехнический институт» на базе автомобиля «Ланос» [1], при сотрудничестве с Институтом электродинамики НАН Украины. Источник питания электропривода электромобиля выполнен в виде параллельно соединённых через разделительный диод аккумуляторной и суперконденсаторной батарей [5]. СКБ обеспечивает приём возвращаемой энергии, воспринимая токи, достигающие при торможении 100...500 А. Аккумуляторная батарея выполнена на гелевых свинцово-кислотных аккумуляторах фирмы «Владар», а суперконденсаторная батарея набрана из элементов фирмы «Wima». Объём возвращаемой энергии W_p определялся по значениям напряжения U_1 на СКБ в момент начала торможения и U_2 – по его окончании

$$W_p = C \frac{U_2^2 - U_1^2}{2}, \quad (28)$$

где C – ёмкость СКБ, Ф, а объём изменения кинетической энергии, подлежащей рекуперации W_k , по зафиксированным скоростям движения в начале торможения V_0 и в конце V_1 определяется соотношением (1).

Эксперименты на электромобиле показали необходимость учёта снижения КПД ЭП при малых скоростях. В связи с этим было проведено компьютерное моделирование процессов торможения, учитывающее возрастание потерь в активном сопротивлении якорной цепи и СКБ. Данные потери оказываются весьма значительными по отношению к начальной кинетической энергии вследствие больших токов, достигающих нескольких сотен ампер при быстрых замедлениях, что подтверждает кривая при $\varepsilon = 2 \text{ м/с}^2$ (рис. 5).

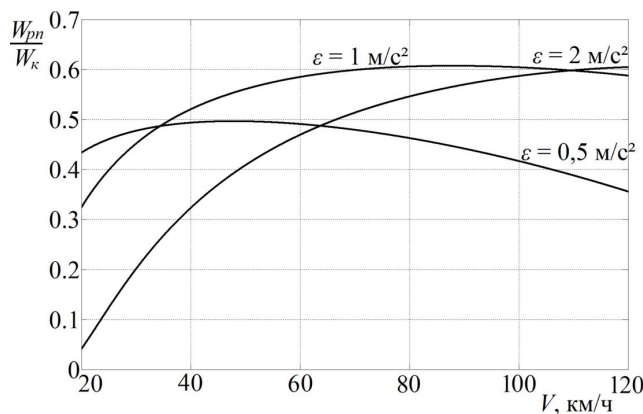


Рис. 5

пределах от 12 до 22% [2], что несколько выше данных, которые фиксируются при эксплуатации в реальных условиях известных марок электромобилей (7...14%). Отличие частично может объясняться тем, что при моделировании использовалась схема ЭП постоянного тока, которая имеет в 2 раза меньшее число вентилях по цепи протекания тока, как в двигательном, так и рекуперативном режимах, а также наличием суперконденсаторной батареи, принимающей рекуперированную энергию, внутреннее сопротивление которой существенно меньше, чем внутреннее сопротивление литий-ионной аккумуляторной батареи.

Заключение. Выведены аналитические соотношения для определения объёма возможной экономии электроэнергии за счёт реализации электроприводом рекуперативных режимов торможения электромобиля. Соотношения учитывают потери на трение качения и на аэродинамическое сопротивление, при движении с торможением на горизонтальном участке, на подъём и под уклон. При снижении скорости и торможении до полной остановки повышению доли рекуперированной энергии способствует более быстрое торможение (особенно при больших начальных скоростях $V_n > 70 \text{ км/ч}$) и, наоборот, при медленных торможениях с увеличением начальной скорости (более 40 км/ч) доля рекуперированной энергии снижается. При движении под уклон с постоянной скоростью доля рекуперированной энергии на единицу перепада высот с увеличением скорости уменьшается, а при малых уклонах ($\text{tg} \alpha < 0,05$) при скорости более 100 км/ч рекуперация энергии не происходит. По результатам компьютерного моделирования получено, что в определённых случаях при торможении до полной остановки может быть возвращено до 60 % кинетической энергии электромобиля. Расчёты по стандартным городским циклам показывают возможность экономии до 12...22 % энергии от общих затрат по сравнению с движением без рекуперации с соответствующим увеличением дальности проезда на одной зарядке АБ.

1. Клепиков В.Б., Семиков А.В., Гончар А.С., Моисеев А.Н., Касторный П.М., Тимощенко А.В., Пиеничников Д.А., Ковтун В.В., Банев Е.Ф., Хорева А.В. Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015. – Вып. № 112 (1121). – С. 195–198.
2. Семиков А.В. Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в электроприводе электромобиля с суперконденсаторной батареей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015. – Вып. № 112 (1121). – С. 93–95.
3. Степановских А.С. Экология. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 703 с.
4. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47.
5. Клепиков В.Б., Гончар О.С., Касторный П.М., Моисеев О.М., Тимощенко А.В., Банев С.В., Пиеничников Д.О. Электропривод электромобиля. Пат. 85585 Украина. Опублік. 25.11.2011. Бюл. № 22. – 3 с.
6. Параметры циклов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dieselnet.com/standards/>
7. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. – Taylor & Francis Group, 2009. – 471 с.

8. Mehrdad Ehsani. Modern Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles. – Taylor & Francis Group, 2010. – 534 с.
9. Compare Electric Cars and Plug-in Hybrids By Features, Price, Range [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plugincars.com/cars>
10. Germany pushes to ban petrol-fuelled cars within next 20 years [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.independent.co.uk/news/world/europe/germany-petrol-car-ban-no-combustion-diesel-vehicles-2030-a7354281.html>
11. Solar-powered car completes round-the-world trip [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.reuters.com/article/us-climate-taxi-idUSTRE4B35JL20081204>

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РЕКУПЕРАТИВНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

В.Б. Клепиков, докт.техн.наук, О.В. Семіков

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Кирпичева, 2, Харків, 61002, Україна,

e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

Виведено співвідношення для визначення енергії, яка може бути повернута джерелу живлення електромобіля при реалізації електроприводом гальмувань у рекуперативному режимі. Розглянуто випадки динамічного зниження швидкості і спуску з заданою швидкістю. Враховано втрати від сил тертя і аеродинамічного опору повітря. Отримано графіки залежності питомої (на одиницю маси електромобіля) економії енергії в залежності від параметрів руху. Виконано розрахунки для стандартних міських циклів руху і показано, що економія може досягати 12...22% від загальних витрат на рух. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: електропривод, електромобіль, енергоефективність, рекуперативне гальмування.

ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC VEHICLE REGENERATIVE MODE

V.B. Klepikov, A.V. Semikov

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",

str. Kirpicheva, 2, Kharkov, 61002, Ukraine,

e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

Relations for the determination of energy, which can be returned to the power source of the electric vehicle when the braking system is implemented in the regenerative mode by the electric drive, are derived. The cases of dynamic decrease in speed and descent with a given speed are considered. The losses from frictional forces and aerodynamic drag of air are taken into account. The dependence of the specific energy saving on the parameters of motion is obtained. Calculations have been made for standard urban traffic cycles and it is shown that savings can reach 12...22% of total traffic consumption. References 11, figures 5.

Keywords: electric drive, electric vehicle, energy efficiency, regenerative braking.

1. Klepikov V.B., Semikov O.V., Gonchar O.S., Moiseev O.N., Kastornyiy P.M., Timoschenko A.V., Pshenichnikov D.O., Kovtun V.V., Banev E.F., Horeva O.V. From the experience of the creation of electric vehicle electric drive with supercapacitor energy storage // Vestnik NTU «KhPI». – 2015. – Iss. No 112 (1121). – Pp. 93–95. (Rus)
2. Semikov A.V. Computer simulation of electromagnetic processes at the electric drive of electric vehicle with supercapacitor battery // Vestnik NTU «KhPI». – 2015. – Iss. No 112 (1121). – Pp. 93–95. (Rus)
3. Stepanovskii A.S. Ecology. – Moskva: YUNITI-DANA, 2001. – 703 p. (Rus)
4. Shidlovskii A.K., Pavlov V.B., Popov A.V. Application of supercapacitors in an autonomous battery electric transport // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2008. – No 4. – Pp. 43–47. (Rus)
5. Klepikov V.B., Honchar O.S., Kastornyiy P.M., Moiseiev O.M., Tymoschenko A.V., Baniev Y.F., Pshenichnikov D.O. Electric vehicle electric drive. Patent of Ukraine No 85585. (Ukr)
6. Cycles parameters. – Available at: <http://www.dieselnet.com/standards/>
7. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. – Taylor & Francis Group, 2009. – 471 p.
8. Mehrdad Ehsani. Modern Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles. – Taylor & Francis Group, 2010. – 534 p.
9. Compare Electric Cars and Plug-in Hybrids By Features, Price, Range. Available at: <http://www.plugincars.com/cars>
10. Germany pushes to ban petrol-fuelled cars within next 20 years. Available at: <http://www.independent.co.uk/news/world/europe/germany-petrol-car-ban-no-combustion-diesel-vehicles-2030-a7354281.html>
11. Solar-powered car completes round-the-world trip Available at: <http://www.reuters.com/article/us-climate-taxi-idUSTRE4B35JL20081204>

Надійшла 13.07.2017
Остаточний варіант 21.07.2017