

УДК 62.83

Е. А. Смотров, канд. техн. наук,
Д. В. Вершинин, А. Ю. Сусленко, В. В. Субботин

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЯ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аннотация. Проанализирована зависимость удельного расхода электроэнергии в функции режима движения и скорости электротранспортного средства. Приведена поэтапная оценка влияния различных составляющих: сил сопротивления, потерь в трансмиссии и др. на величину расхода электроэнергии. В качестве примера использован макетный образец экобуса и ряд опытных данных.

Ключевые слова: удельный расход, электротранспортные средства, электропривод, мотор-колесо, энергия, потери, оптимум, условия движения, эффективность

E. A. Smotrov, PhD.,
D.V. Vershinin, A. Y. Suslenko, V.V. Subbotin

ANALYSIS OF INDEX OF SPECIFIC POWER CONSUMPTION OF THE ELECTRIC VEHICLES

Abstract. In this paper the dependence of the specific energy consumption as a function of mode and speed of electric vehicles analyzed. To evaluate the effect of different components: the resistance forces, losses in transmission and other by the amount of power consumption staged of computation are shown. The sample model of eco-bus and some experimental data has being used as example.

Keywords: specific energy consumption, electric vehicles, electric drive, motor-wheel, energy, energy loss, optimum, traffic conditions, efficiency

Є. О. Смотров, канд. техн. наук,
Д. В. Вершинин, О. Ю. Сусленко, В. В. Суботин

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКА ПИТОМИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

Анотація. Проаналізовано залежність питомих втрат електроенергії в функції режиму руху та швидкості електротранспортного засобу. Наведено поетапну оцінку впливу різних складових: сил опору, втрат у трансмісії та ін. на величину втрат електроенергії. Оцінку проведено на прикладі макетного зразка екобуса та на основі ряду експериментальних даних.

Ключові слова: питомі втрати електроенергії, електротранспортні засоби, електропривод, мотор-колесо, енергія, втрати енергії, оптимум, умови руху, ефективність

Введение. Основной характеристикой для оценки эффективности двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также транспортных средств (ТС) в пассажирских грузоперевозках является удельный расход топлива (милль/галлон или л/км).

Для электрических транспортных средств (ЭТС), понятие «удельный расход топлива» заменяется понятием «удельный расход электроэнергии» $K_{уд}$, который представляет собой отношение затраченной энергии к массе ЭТС и пробегу (кВт·ч/(т·км)).

На расход топлива/энергии любого ТС оказывают влияние различные факторы, среди которых следует выделить следующие:

– человеческий фактор (определяет стиль вождения и характер эксплуатации ТС);

– некачественная настройка двигателя и его систем (изменяется режим сгорания топлива, ухудшается эффективность);

повышенное сопротивление движению (неверные углы установки колес – развал – схождение, настройка тормозов, неисправности в трансмиссии и т.д.)

На расход влияют также климатические условия, рельеф местности, план автодорог (число поворотов на единицу длины трассы), дорожные условия и др. Вследствие большого числа факторов, влияющих на оценку удельного расхода, а также для обеспечения повторяемости испытаний, измерение удельного расхода топлива проводят на специальных динамометрических стендах. На стендах

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,
Сусленко А.Ю., Субботин В.В., 2013

нагрузочные барабаны, в соответствии с заданной программой, изменяют режим движения транспортного средства. Для испытаний на стендах разработаны циклы городского, загородного и смешанного движений. На несоответствии режимов движения, зафиксированных в городских циклах, реальным режимам движения в городе [10] останавливаться не будем.

Цель работы:

– анализ зависимости удельного расхода электроэнергии от режима движения и от скорости ЭТС,

– определение степени влияния отдельных составляющих потерь на коэффициент расхода,

– выявление возможных путей уменьшения удельного расхода электроэнергии в динамических режимах.

Материалы исследования. Анализ влияния параметров режима движения на удельный расход электроэнергии проведем на примере экспериментального образца электробуса на шасси «Фиат Дукато», разработанного и изготовленного в ТЭЭМПе [7].

Основные характеристики электробуса: полная масса $m = 3,1$ т; высота ЭТС $H = 2,37$ м; ширина ЭТС $B = 1,926$ м; радиус колеса $R_k = 0,36$ м; аэродинамический коэффициент $c_x = 0,31$; коэффициент трения качения $\mu = 0,016$.

Примем, что плотность воздуха $\rho = 1,24$ кг/м³ и ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с², используется два приводных двигателя.

При движении ЭТС по горизонтальной дороге алгебраическая сумма сил, действующих на ЭТС,

$$F_{\Sigma} = F_k + F_v + F_{\text{дин}} + F_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $F_{\hat{e}} = \mu mg$ – сила трения качения. При линейной скорости ЭТС до 100 км/ч прием величиной постоянной [9];

$$F_v = \frac{\rho c_x}{2} v^2 0,9BH - \text{аэродинамическая}$$

составляющая силы сопротивления движения с линейной скоростью ЭТС v при отсут-

ствии ветра $F_{\text{дин}} = ma$ – динамическая сила, определяющая величину ускорения ЭТС; $F_{\text{доп}} = \eta \square P_{x.x} / \omega_k$ – составляющая силы сопротивления движению, эквивалентная дополнительным потерям в трансмиссии.

Наличие дополнительных потерь, которые обусловлены использованием шарниров равных угловых скоростей (ШРУСов), применяемых для стыков колес с электродвигателями, и потерь, которые вносятся тормозной системой (затиранием тормозных колодок), учтем опытным путем (рис.1). Внутренние потери указаны с учетом КПД электропривода, так как измерения проводились по входу инвертора.

Рассмотрим частный случай горизонтального движения по ровной дороге – движение ЭТС с постоянной скоростью. Выпишем основные соотношения, справедливые для этого характера движения.

Момент сил, приходящийся на колесо:

$$M_k = \frac{F_k + F_v + F_{\text{доп}}}{N_k} R_k, \quad (2)$$

где N_k – число ведущих колес (в рассматриваемом примере $N_k = 2$).

Механическая мощность, необходимая для преодоления сил сопротивления:

$$P_{\text{мех}} = (F_k + F_v + F_{\text{доп}}) v. \quad (3)$$

Угловая скорость вращения колеса:

$$\omega_{\hat{e}} = v / R_{\hat{e}} = \pi n_{\hat{e}} / 30.$$

Коэффициент полезного действия может быть получен как функция от двух переменных: момента сил, развиваемого колесом, и угловой скорости вращения колеса:

$$\eta = f(M_k, \omega_k).$$

Для этого достаточно получить аналитическую зависимость семейства характеристик КПД в функции момента при разных частотах вращения. Пример такого семейства, полученный экспериментально, приведен на рис. 2. Однако в расчетах удобнее оперировать аппроксимацией потерь, а не КПД:

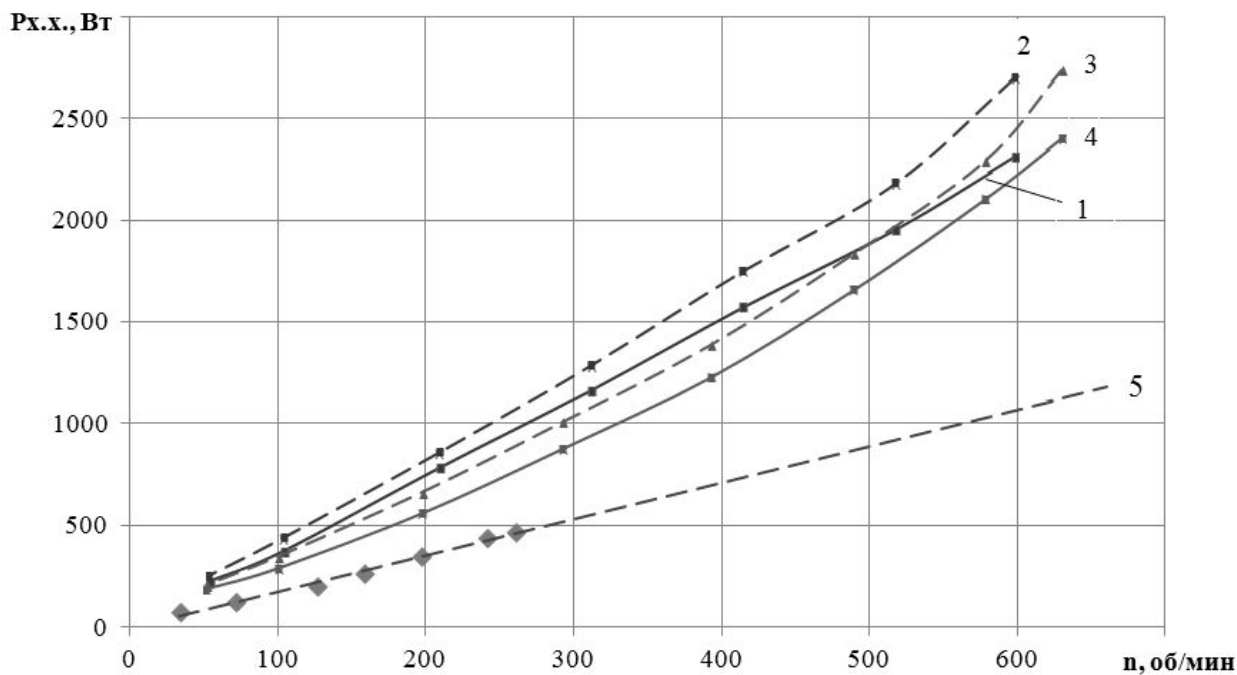


Рис. 1. Внутренние потери, приходящиеся на колесо: 1 – переднее левое (ПЛ) при нулевом угле поворота руля (УПР), 2 – ПЛ при максимальном УПР; 3 - переднее правое (ПП) при нулевом УПР; 4 – ПП при максимальном УПР; 5 – потери в электродвигателе и преобразователе на холостом ходу

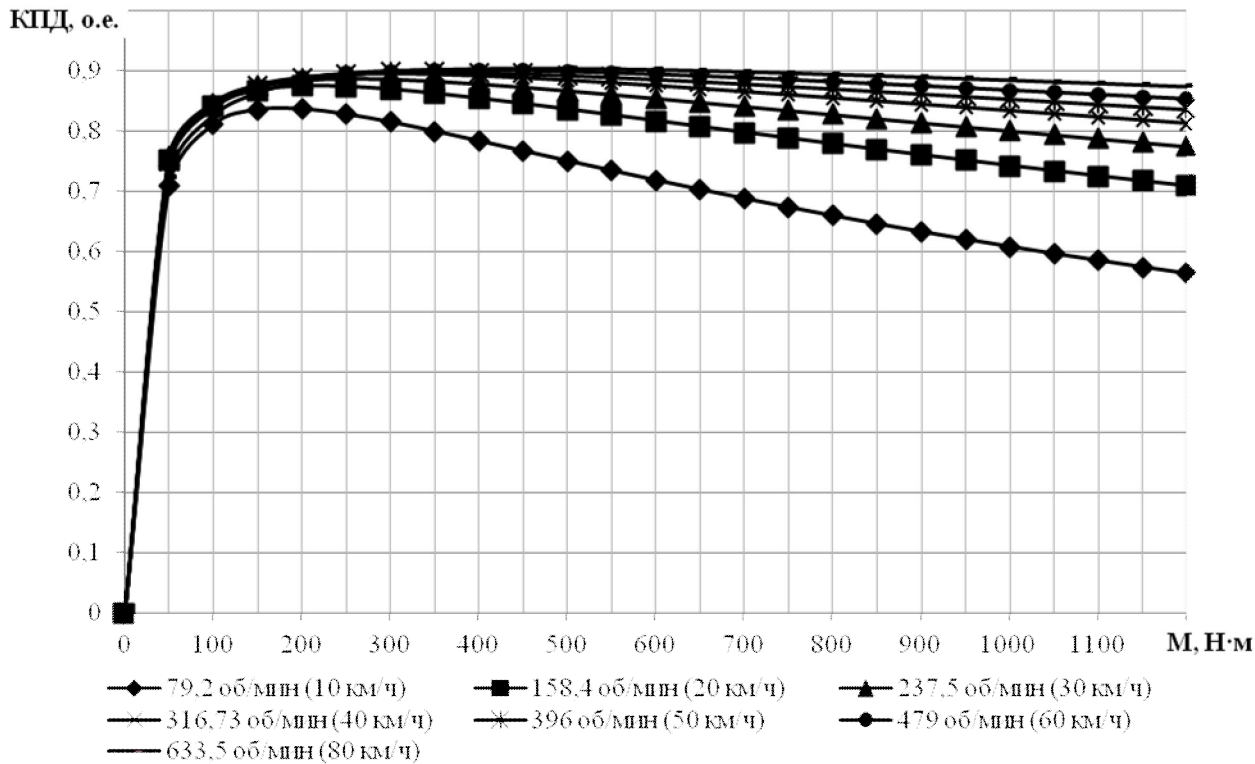


Рис. 2. Экспериментальные зависимости КПД при разных частотах вращения

$$\Delta P = f_2(M_k, \omega_k).$$

Электрическая мощность

$$P_{эл} = P_{мех} / \eta = P_{мех} + \Delta P \cdot N_k. \quad (4)$$

Затраты электроэнергии при движении с постоянной скоростью

$$A_{эл} = P_{эл} t = P_{эл} s / v. \quad (5)$$

Удельный расход электроэнергии

$$K_{уд} = A_{эл} / (ms) = P_{эл} / (m \cdot v). \quad (6)$$

На рис. 3 представлены зависимости удельного коэффициента расхода электроэнергии, КПД и суммарного усилия в зависимости от скорости движения электробуса.

Сила трения качения составляет 456 Н, сила сопротивления воздуху: 95 Н (21 %) при скорости 40 км/ч; 250 Н (55 %) при скорости 65 км/ч и 480 Н (105 %) при скорости 90 км/ч. Изменению силы сопротивления движения от 568 Н (при 20 км/ч) до 952 Н (при 80 км/ч) соответствует изменение момента на колесе от 95 Н·м до 159 Н·м. Из кривых КПД (рис. 2) видно, что в указанном диапазоне моментов КПД мало зависит от

скорости (при скоростях 20 – 80 км/ч). Поэтому рост удельного коэффициента расхода, начиная от скорости 20 км/ч, связан именно с ростом аэродинамического сопротивления.

При малых скоростях движения, меньше 5 км/ч, момент на колесе не превышает 80 Н·м – КПД электропривода, который работает в таком режиме, будет ниже рассмотренного ранее. Это и является причиной высоких значений удельного расхода электроэнергии при малых скоростях.

Оценим удельный расход электроэнергии при разгоне с постоянным ускорением ($a = \text{const}$).

Рассмотрим интервал времени от t_i до t_{i+1} . Очевидно, что за время разгона t_i ЭТС достигнет скорости $v_i = at_i$ и пройдет путь $s = at_i^2 / 2$. За интервал времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ скорость ЭТС изменится на $\Delta v = a\Delta t$, а путь изменится на величину $\Delta s = 0,5a(t_{i+1}^2 - t_i^2)$

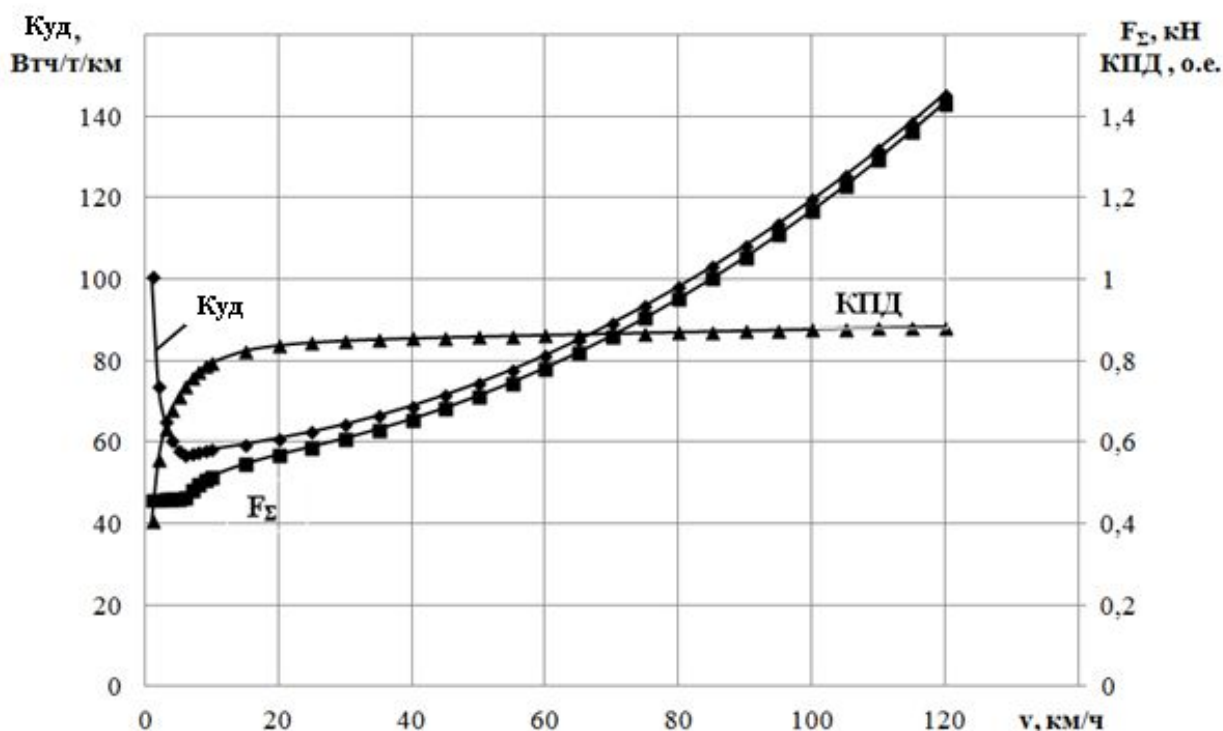


Рис. 3. Зависимость удельного коэффициента расхода электроэнергии $K_{уд}$, КПД и суммарной силы сопротивления движению F_{Σ} от скорости движения ЭТС

Суммарное требуемое усилие в начале интервала

$$F_i = F_{\text{дин}} + F_{\text{к}} + F_{v(i)} + F_{\text{доп}},$$

$$F_i = ma + \mu mg + F_{\text{доп}}(v_i) + 0,5c_x \rho (0,9BH)v_i^2$$

и в конце интервала

$$F_{i+1} = F_{\text{дин}} + F_{\text{к}} + F_{v(i+1)} + F_{\text{доп}},$$

$$F_{i+1} = ma + \mu mg + F_{\text{доп}}(v_{i+1}) +$$

$$+ 0,5c_x \rho (0,9BH)v_{i+1}^2$$

$$F_{i+1} = F_i + \Delta F.$$

Требуемая механическая мощность в начале интервала $P_{\text{мех}i} = F_i \cdot v_i$, в конце интервала $P_{\text{мех}i+1} = F_{i+1} \cdot v_{i+1}$ и соответствующие электрические мощности в начале интервала $P_{\text{эл}i} = P_{\text{мех}i} / \eta_i$, в конце интервала $P_{\text{эл}i+1} = P_{\text{мех}i+1} / \eta_{i+1}$.

Энергия, затраченная на прохождение дистанции Δs за время Δt ,

$$\Delta A = 0,5(P_{\text{эл}i+1} + P_{\text{эл}i}) \Delta t.$$

Удельный расход электроэнергии

$$K_{\text{уд}} = \frac{\Delta A}{m \Delta s} = \frac{a}{\eta_{\text{ср}}} + \frac{g\mu}{\eta_{\text{ср}}} + \frac{F_{\text{доп}}}{m\eta_{\text{ср}}} + \frac{0,5c_x \rho (0,9BH)v_{i+1}^2}{m\eta_{\text{ср}}},$$

где $\eta_{\text{ср}} = \frac{\eta_{i+1} + \eta_i}{2}$.

Оценим удельные затраты при торможении с постоянным ускорением (замедлением). Очевидно, что справедливы соотношения для режима разгона, только требуемое суммарное усилие

$$F_{\text{торм}} = F_{\text{дин}} - (F_{\text{к}} + F_{v(i)} + F_{\text{доп}}).$$

$$F_{\text{торм}} = -\mu mg - 0,5c_x \rho (0,9BH)v_i^2 - F_{\text{доп}} + ma.$$

Учитывая изменение направления потока энергии, электрическая мощность

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} \eta.$$

Тогда удельный расход электроэнергии

$$K_{\text{уд}} = a\eta - g\mu\eta - \frac{F_{\text{доп}}}{m}\eta - \frac{0,5c_x \rho (0,9BH)v_i^2}{m}\eta.$$

На рис. 4 приведено семейство удельного расхода электроэнергии при различных скоростях движения ЭТС и при различных уровнях постоянных ускорений разгона и торможения.

По сравнению с зависимостью $K_{\text{уд}}$ от скорости при нулевом ускорении (рис. 3 и рис. 4) величина ускорения увеличивает общий расход и расширяет начальный участок с завышенным удельным расходом (перемещает точку перегиба в область больших скоростей).

При ускорении 1 м/с^2 момент на колесе равен $615 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (при 20 км/ч) и $678 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (при 80 км/ч), при этом КПД изменяется от 81% до 91% .

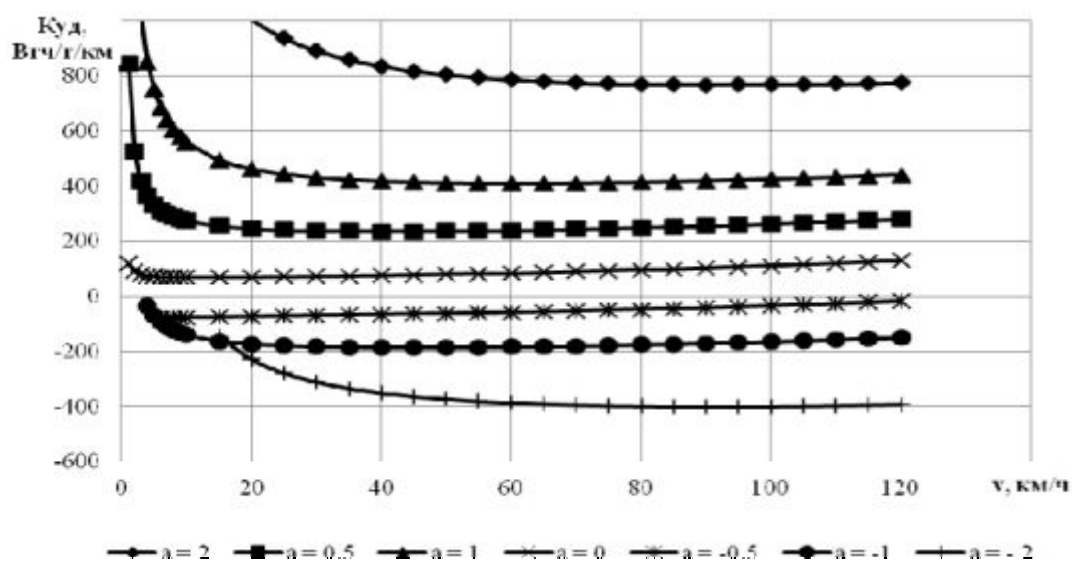


Рис. 4. Удельный расход электроэнергии в функции скорости и режима движения ЭТС (при различной величине ускорения)

Этим объясняется изгиб зависимости $K_{уд}$ в указанном диапазоне скоростей. Начальный участок выражен более ярко по сравнению с рис. 3, что связано с наличием динамической составляющей момента.

Физически увеличение коэффициента расхода означает увеличение количества энергии, которую необходимо затратить, чтобы двигаться с заданной скоростью или затратить на изменение скорости.

Отрицательные значения $K_{уд}$, полученные для режима торможения, определяют количество энергии, которое можно рекуперировать. Видно, что с ростом замедления величина $K_{уд}$ увеличивается по абсолютному значению. Влияние КПД электропривода проявляется в расширении зоны неэффективного торможения аналогично разгону.

Характерно, что подобные зависимости для ТС с ДВС (расход топлива л/100 км) имеют такой же характер и объясняются теми же причинами [1].

Вывод

Наименьший расход электроэнергии достигается при движении с постоянной скоростью. В зоне малых нагрузок удельный коэффициент расхода определяется КПД электрической машины. Коэффициент удельного расхода прямо пропорционально зависит от интенсивности изменения скорости движения ЭТС. Очевидно, наиболее экономичным режимом движения является движение с постоянной скоростью. Для уменьшения расхода электроэнергии в динамических режимах, связанных со сменой скорости, можно рекомендовать различные оптимальные законы управления: минимум греющих потерь, минимум потребляемой мощности или параметрическое ограничение ускорения в зависимости от скорости движения ЭТС.

Список использованной литературы

1. Berry I. M. The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles. *Massachusetts Institute of Technology*, 2010. – 140 p.
2. Gant L. R. Energy Losses for Propelling and Braking Conditions of an Electric Vehicle, (2011), *Virginia Polytechnic Institute*, Virginia, USA, 64 p.
3. Mobasser S. m. , and Soltani H. Impact of Driving Style on Fuel Consumption. *Nature and*

Science. – 2013. – № 11 (12). – P. 87 – 89.

4. Ortuzar M., Moreno J., and Dixon J. Ultra-capacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, (2007), Vol. 54, Issue 4, doi: 10.1109/TIE.2007.894713.

URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4273667&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4273667.

5. Perrotta D., Macedo J. L., Rossetti R. J. F., Afonso J. L., Kokkinogenis Z., and Ribeiro B. Driver's Attitude and its Influence on the Energy Waste of Electric Buses, (2013), *Workshop on Superconductivity and Magnetism Associated with Geometry and Dimensionality from Organics to Inorganics (SUMO2013)*, Berlin-Adlershof, Germany, pp. 103 – 107.

6. Schwickart T., Voos H., Hadji-Minaglou J.-R., and Darouach M. An Efficient Nonlinear Model-Predictive Eco-Cruise Control for Electric Vehicles. *Industrial Informatics (INDIN)*, (2013), *11th IEEE International Conference on*, pp. 311 – 316, doi: 10.1109/INDIN.2013.6622901.

7. Stevic Z., and Radovanovic I. Energy Efficiency of Electric Vehicles, New Generation of Electric Vehicles, (2012), *In Tech*, PAGES 95, doi: 10.5772/55237.

URL: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles/energy-efficiency-of-electric-vehicles>.

8. Вершинин Д. В. Построение тягового электропривода транспортного средства на основе многодвигательной схемы / Д. В. Вершинин, О. Г. Дашко, Е. В. Савилов, Е. А. Смотров // Журнал автомобильных инженеров. – 2011. – № 5 (70). – С. 30 – 34.

9. Ларин В. В. Теория движения полноприводных колесных машин / В. В. Ларин. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 392 с.

10. Смотров Е. А. К вопросу об оценке энергетической характеристики электротранспортных средств / Е. А. Смотров, Д. В. Вершинин, В. В. Субботин // XXIX Международная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике». 2013.

URL: <http://sibac.info/12441>.

Дата обращения: 10.01.2013.

Получено 09.10.2013

References

1. Berry I.M. The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles, (2010), *Massachusetts Institute of Technology*, 140 p. (In English).

2. Gant L.R. Energy Losses for Propelling and Braking Conditions of an Electric Vehicle, (2011), *Virginia Polytechnic Institute*, 64 p. (In English).

3. Mobasser S., and Soltani H. Impact of Driving Style on Fuel Consumption, (2013), *Nature and Science Publ.*, No. 11(12), pp. 87 – 89 (In English).

4. Ortuzar M., Moreno J., and Dixon J. Ultra-capacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation, (2007), *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 54, Issue 4 (In English), doi: 10.1109/TIE.2007.894713.

URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4273667&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4273667.

5. Perrotta D., Macedo J.L., Rossetti R.J.F., Afonso J.L., Kokkinogenis Z., and Ribeiro B. Driver's Attitude and its Influence on the Energy Waste of Electric Buses, (2013), *Workshop on Superconductivity and Magnetism Associated with Geometry and Dimensionality from Organics to Inorganics (SUMO2013)*, Berlin–Adlershof, Germany. pp. 103 – 107 (In English).

6. Schwickart T., Voos H., Hadji-Minaglou J.-R., and Darouach M. An Efficient Nonlinear Model-Predictive Eco-Cruise Control for Electric Vehicles, (2013), *Industrial Informatics (INDIN), 11th IEEE International Conference on*, pp.311 – 316, doi:10.1109/INDIN.2013.6622901.

7. Stevic Z., and Radovanovic I. Energy Efficiency of Electric Vehicles, New Generation of Electric Vehicles, (2012), *In Tech Publ.*, (In English). PAGES 95, doi: 10.5772/55237. URL: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles/energy-efficiency-of-electric-vehicles>.

8. Vershinin D.V., Dashko O.G., Savilov E.V., and Smotrov E.A. Postroenie tyagovogo elektropivoda transportnogo sredstva na osnove mnogodvigatel'noi skhemy [Construction of Traction Electric Vehicle Based on Multimotor Scheme], (2011), *Journal of Automotive Engineers*, No. 5 (70), pp. 30 – 34 [In Russian].

9. Larin V.V. Teoriya dvizheniya polnoprivodnykh kolesnykh mashin [Theory of Motion-wheel Drive Wheeled Machines], (2010), Moscow, Russian Federation, *Publishing MSTU name of N. E. Bamann*, 392 p. (In Russian).

10. Smotrov E.A., Vershinin D.V., and Subbotin V.V. K voprosu ob otsenke energeticheskoi kharakteristiki elektrotransportnykh sredstv [On the Estimation of the Energy Characteristics of Electric Vehicles], (2013), *XXIX International Scientific and Practical Conference "Engineering - from theory to practice"*. URL: <http://sibac.info/12441>. Date of application: 10.01.2013.



Смотров Евгений Александрович, канд. техн. наук, вед. инж. госуд. предприятия научно-технического центра «Станкосерт», тел. 048-728-85-05 e-mail: ukrniisip@gmail.com



Вершинин Дмитрий Вениаминович, инж.–исследователь Одесского специального конструкторского бюро специальных станков, тел. 048-728-85-05 e-mail: ukrniisip@gmail.com



Сусленко Александр Юрьевич, аспирант каф. компьютерных систем управления Одесского нац. политехн. ун-та, e-mail: ukrniisip@gmail.com



Субботин Виктор Владимирович, магистр каф. электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского нац. политехн. ун-та, e-mail: ukrniisip@gmail.com