

УДК 629.331

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ГОРОДСКОГО БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА****А.А. Штанг, М.В. Ярославцев***Новосибирский государственный технический университет*

При проектировании получающих распространение комбинированных энергетических установок транспортных средств возникает новая задача определения характеристик источников энергии в ее составе. С использованием предложенной авторами методики определена энергоемкость накопителя энергии автобуса с комбинированной энергетической установкой в зависимости от мощности первичного источника энергии. Расчет произведен на основе зависимости скорости движения транспортного средства от времени. Выполнен анализ возможных источников исходных данных для ее расчета. Рассмотрено использование расчетных кривых движения, стандартных циклов, применяемых для исследования топливной экономичности транспортных средств, а также экспериментальных записей скорости движения транспортного средства. Показана необходимость использования экспериментальных записей при проектировании транспортных средств, имеющих комбинированную энергетическую установку. Установлено, что в исследованных условиях энергоемкость буферного накопителя энергии, определенная на основе экспериментальных данных, приблизительно в 2 раза превосходит энергоемкость, полученную на основе расчетных циклов движения. Показано, что в этом случае при заданной мощности первичного источника энергии величина энергоемкости буферного накопителя слабо зависит от длины перегона и ускорения транспортного средства, но определяется максимальной скоростью, достигнутой за цикл разгона и торможения.

Ключевые слова: комбинированная энергетическая установка, гибридное транспортное средство, городской безрельсовый транспорт, комбинированный тяговый привод, буферный накопитель энергии, первичный источник энергии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120

Введение

Рост экологических требований, повышение стоимости топлива и развитие накопителей электрической энергии делают актуальной задачу создания транспортных средств (ТС) с комбинированными энергетическими установками (КЭУ). Основным их достоинством является низкий расход энергии, обеспечивающий низкие эксплуатационные расходы и меньший объем выбросов по сравнению с обычными автомобилями. Как правило, такие энергоустановки сочетают два источника энергии. В состав их тягового привода входят первичный источник (ПИЭ, обычно двигатель внутреннего сгорания) и накопитель энергии (БНЭ, выполняемый на основе конденсатора двойного электрического слоя либо аккумуляторной батареи) [1–4].

Одной из наиболее перспективных областей внедрения ТС с КЭУ является городской безрельсовый пассажирский транспорт. Автобусы и троллейбусы имеют сравнительно малое ускорение, ограниченную зону работы, большое пространство для размещения дополнительного оборудования и движутся в цикле с частыми остановками, что позволяет достичь значительной экономии топлива. При проектировании КЭУ важно определить рациональные параметры ее элементов, обеспечивающие наилучшие массогабаритные и экономические показатели ТС.

1. Методика определения основных характеристик комбинированной энергоустановки

Проектирование новых ГТС связано с проблемой выбора параметров гибридного тягового привода. Ее определяют две ключевых величины: мощность первичного источника энергии и энергоемкость буферного накопителя. Они определяют стоимость основных узлов и количество энергии, которая может быть повторно использована [5]. Расчет объема БНЭ должен учитывать возможность повторной реализации циклов разгона и торможения с большим средним расходом энергии, превышающим мощность ПИЭ. Поэтому при определении параметров гибридного привода необходимо учитывать ожидаемый цикл движения ТС.

Методика определения зависимости между энергоемкостью БНЭ и мощностью ПИЭ предложена в [6]. В качестве исходных данных задается зависимость скорости движения ТС от времени $V(t)$. Затем находится зависимость мощности тягового привода от времени $P(t)$ и ее интегрированием определяется расход энергии (рис. 1). Для этого принята следующая последовательность расчета.

1. По значениям мгновенной скорости были рассчитаны сопротивление движению ТС ω и его ускорение a [7]:

$$\omega_i = 16 + 0,004v_i^2, \text{ Н/кН};$$

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}, \text{ м/с}^2,$$

где v_i – значение скорости в i -й точке записи регистратора, м/с; Δt – шаг времени записей регистратора, равный 0,5 с.

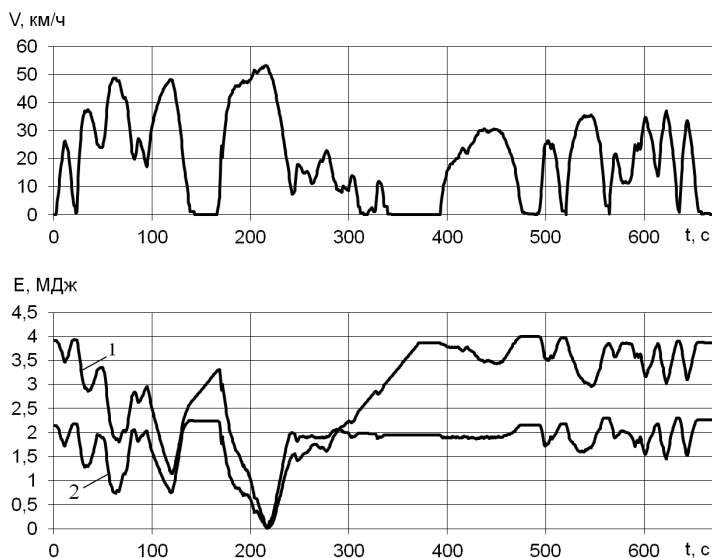


Рис. 1 – Зависимость запаса энергии БНЭ от времени при мощности первичного источника энергии 25 кВт (линия 1) и 50 кВт (линия 2), соответствующая фрагменту записи скорости движения транспортного средства от времени

Fig. 1 – Relationship of buffer storage energy and time at primary energy source power 25 kW (line 1) and 50 kW (line 2) corresponding to a fragment of speed–time record for the vehicle

2. На основании полученных величин найдены значения сил тяги и торможения, развиваемых тяговым приводом в каждый момент времени t_i :

$$F_i = \gamma m a_i + m g \omega_i, \text{ кН},$$

где γ – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; m – масса троллейбуса, т.

3. Определена мощность, потребляемая либо возвращаемая тяговым приводом в режимах тяги и торможения, по одному из выражений:

$$P_i = \begin{cases} \frac{F_i v_i}{\eta_T}, & \text{кВт,} \\ F_i v_i \eta_p \end{cases}$$

где η_T – КПД тягового привода в режиме тяги; η_p – КПД тягового привода в режиме рекуперации.

4. Определен запас полезной энергии БНЭ:

$$E_{\text{БНЭ } i} = \begin{cases} E_{\text{БНЭ } i-1} + P_T \Delta t + P_i \Delta t, & \text{если } E_{\text{БНЭ max}} - E_p > E_{\text{БНЭ } i}, \\ E_{\text{БНЭ } i-1} + P_i \Delta t, & \text{если } E_{\text{БНЭ max}} - E_p > E_{\text{БНЭ } i} > E_{\text{БНЭ max}}, \\ E_{\text{БНЭ max}}, & \text{если } E_{\text{БНЭ } i} > E_{\text{БНЭ max}}. \end{cases} \text{ кДж,}$$

где P_T – мощность генератора, приводимого от ДВС; $E_{\text{БНЭ max}}$ – максимальная полезная энергия БНЭ; E_p – запас энергии БНЭ для приема энергии рекуперации.

При суммировании реализована следующая логика работы привода. При малой величине полезной энергии БНЭ осуществляется его заряд генератором до величины $E_{\text{БНЭ max}} - E_p$. Дальнейшее увеличение запаса энергии БНЭ возможно только за счет энергии рекуперативного торможения, что обеспечивает ее более полное использование. Величина запаса энергии E_p выбрана на основании статистического анализа осуществляемых торможений [6].

Результатом расчета является зависимость заимствованной из БНЭ энергии от времени. При расчете выбирается такое значение $E_{\text{БНЭ max}}$, чтобы минимальный запас полезной энергии $E_{\text{БНЭ } i}$ за время движения был равен нулю. Такое значение $E_{\text{БНЭ max}}$ является минимальным, обеспечивающим движение ТС в заданном режиме при выбранной мощности генератора P_T . На рис. 1 показаны полученные зависимости скорости движения и запаса энергии БНЭ для одного из рейсов при мощности генератора 25 и 50 кВт.

2. Применение стандартных циклов движения для определения основных характеристик комбинированной энергоустановки

Одним из возможных источников исходных данных для расчета параметров гибридного привода являются стандартные циклы движения, используемые для определения топливной экономичности автомобилей. Другим способом получить их является использование экспериментальных записей. В современных исследованиях отсутствует консенсус в вопросе выбора цикла движения для проектирования гибридных автобусов. Например, в [8] сравниваются стандартные циклы UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), HWFET (Highway Fuel Economy

Test Cycle) и NEDC (New European Driving Cycle), а также экспериментальные записи для различных характерных поездок. В [9] упоминается также цикл FTP-75 (Federal Test Procedure). В России для измерения топливной экономичности городских автобусов использовался цикл, определенный ГОСТ 20306–90 [10], построение которого связано с конструктивными особенностями испытуемого автобуса, что принципиально не позволяет получить универсальную зависимость скорости движения ТС от времени.

В [11, 12] для верификации расчета энергетической установки используются экспериментальные записи скорости движения автобуса за один рейс. В [13, 14] сравниваются циклы, принятые для определения расхода топлива автобусов в различных городах. Например, авторами [14] рассмотрены шесть циклов, принятых в различных городах США и ЕС. Для имитации длительного рейса циклы многократно повторяются. В результате участки, требующие различного потребления энергии, оказываются равномерно распределенными по протяженности рейса, что может не выполняться на практике. В [15] авторами предложен собственный цикл, составленный из чередующихся циклов для различных режимов движения ТС.

Как видно из приведенного обзора, в настоящее время отсутствует единый подход к выбору цикла движения ТС для исследования его энергопотребления. Существует ряд циклов, используемых для исследования топливной экономичности транспортных средств, однако они не могут быть непосредственно использованы для определения характеристик гибридной энергоустановки, если существенной является не только частота повторения циклов разгона-торможения до заданной скорости, но и длительность повторения схожих циклов. В зависимости от выбранного исходного цикла результаты расчета необходимой энергоемкости БНЭ могут различаться в несколько раз. Таким образом, сложность выбора необходимого расчетного цикла приводит к необходимости исследования записей $V(t)$, полученных для реального ТС в эксплуатационных условиях.

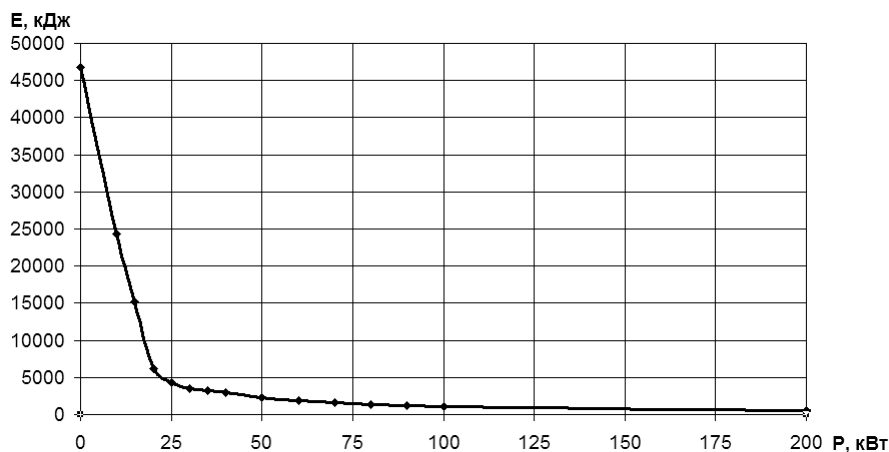


Рис. 2 – Зависимость необходимой для обеспечения заданного режима движения энергоемкости буферного накопителя от мощности первичного источника энергии

Fig. 2 – Dependence of buffer energy storage capacity needed to maintain required dynamic properties of the vehicle on primary energy source power

Для получения экспериментальных записей циклов движения, соответствующих российским условиям, было выполнено исследование режимов движения и потребления энергии. В качестве образца был выбран троллейбус, работающий на

одном из маршрутов Новосибирска. Длина кузова троллейбуса составляет 12 м, номинальная вместимость – 110 пассажиров, вес тары – 12 т. Для записи скорости движения был разработан специальный регистратор, подключаемый к системе управления троллейбуса посредством CAN-интерфейса и получающий показания датчика частоты вращения двигателя. На рис. 1 приведен пример зависимости расчетной мощности тягового электропривода транспортного средства от времени. Отрицательные значения мощности соответствуют выработке энергии в режиме торможения, а положительные – потреблению энергии в режиме тяги. На рис. 2 приведена зависимость необходимых для обеспечения заданного режима движения энергоемкости БНЭ от мощности первичного источника энергии, полученная с помощью предложенной в [6] методики по экспериментальным данным.

3. Сравнение результатов, полученных при использовании в качестве исходных данных расчетных и экспериментальных кривых движения

Для сравнения результатов, полученных на основе экспериментальных и расчетных циклов движения, а также с целью выявления зависимости необходимой энергоемкости буферного накопителя от особенностей цикла движения построены зависимости энергоемкости БНЭ от мощности ПИЭ для случая движения ТС по расчетному циклу, состоящему из тяги, выбега и торможения. При расчете было принято предположение, что движение осуществляется по перегону стандартной длиной 350 м, с требованием обеспечить среднюю скорость движения 17 км/ч при времени стоянки, равном 30 с.

Для получения серий исходных зависимостей скорости движения ТС от времени поочередно варьировались скорость, ускорение и длина перегона. На рис. 3–5 показано изменение зависимости $E_{\text{БНЭ}}(P_{\text{ПИЭ}})$ в зависимости от исследованных факторов.

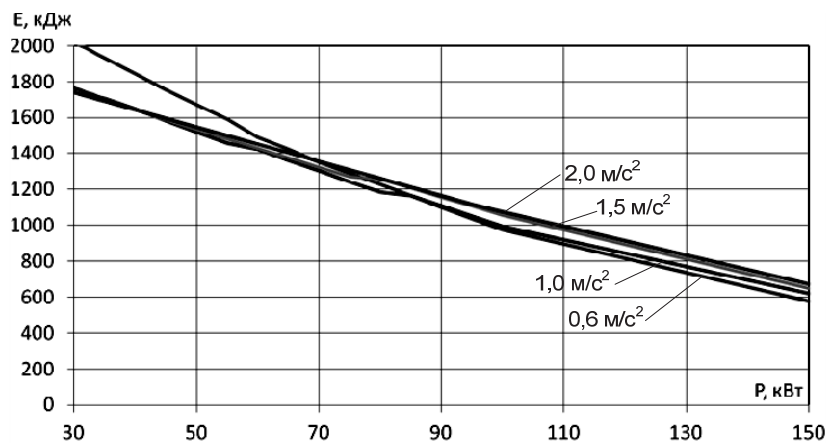


Рис. 3 – Влияние ускорения транспортного средства в режиме тяги на энергоемкость буферного накопителя

Fig. 3 – Effect of acceleration of the vehicle on buffer energy storage capacity

По полученным результатам можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим параметры комбинированной энергетической установки, является скорость сообщения при движении транспортного средства по маршруту. Результаты расчета также показали, что при чередовании на протяжении рейса ТС пере-

гонов с различной средней скоростью параметры накопителя необходимо выбирать для цикла движения по перегону, в котором достигается наибольшая скорость сообщения.

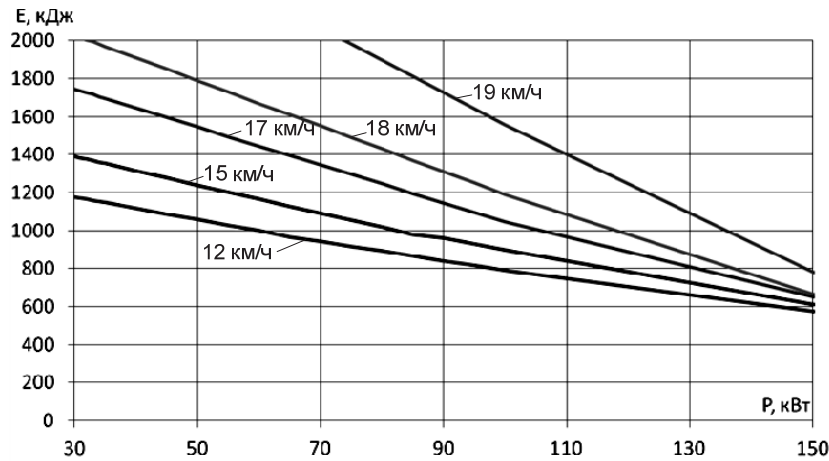


Рис. 4 – Влияние средней скорости движения транспортного средства на энергоёмкость буферного накопителя

Fig. 4 – Effect of average speed of the vehicle on buffer energy storage capacity

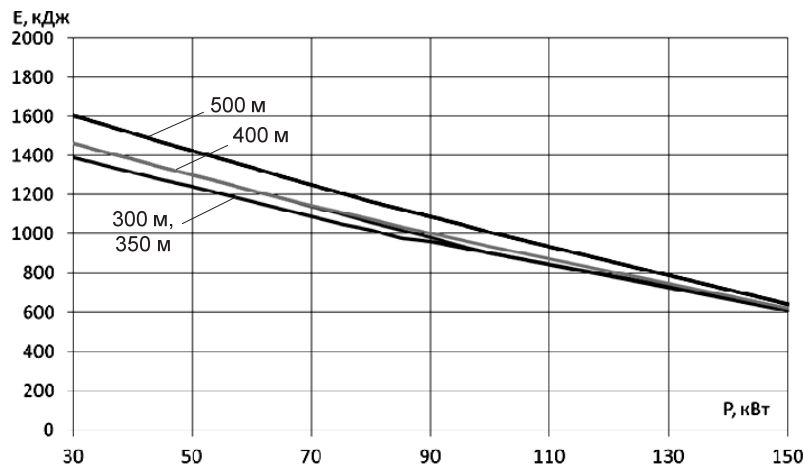


Рис. 5 – Влияние длины перегона на энергоёмкость буферного накопителя

Fig. 5 – Effect of span length on buffer energy storage capacity

Необходимо отметить, что полученные значения энергоёмкости существенно (в 1,5...2,5 раза) ниже значений, найденных на основе экспериментальных данных при той же мощности ПИЭ и скорости сообщения за рейс. Это объясняется тем, что на протяжении рейса ТС периодически реализуются отдельные циклы движения со средней скоростью, значительно превышающей общую скорость сообщения. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены зависимости $E_{\text{БНЭ}}(P_{\text{ПИЭ}})$ при разной скорости сообщения, полученные при использовании в качестве исходных данных фрагментов экспериментальных кривых движения ТС.

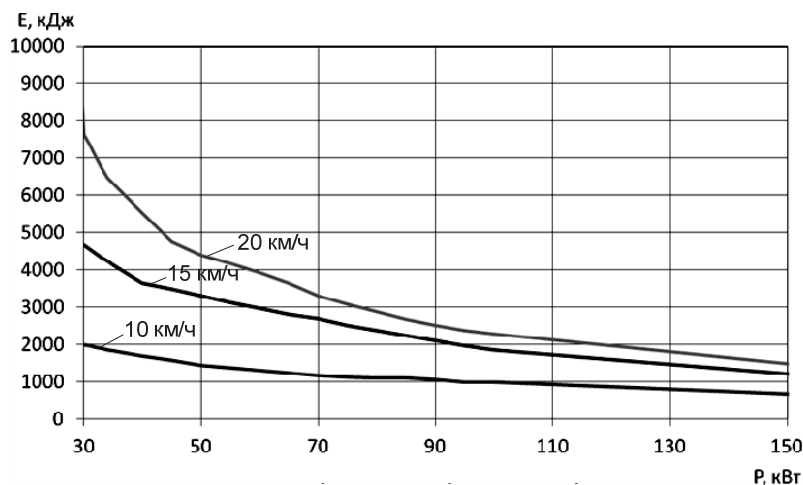


Рис. 6 – Влияние средней скорости движения ТС на энергоемкость буферного накопителя. Расчет выполнен по фрагментам экспериментальных кривых движения

Fig. 6 – Effect of average speed of the vehicle on buffer energy storage capacity, calculated by fragments of experimental drive curves

Закключение

В работе выполнен анализ способов получения зависимостей скорости от времени, описывающих движение пассажирских транспортных средств, которые могут быть использованы для определения основных характеристик комбинированных энергетических установок. Показано, что применение в качестве исходных данных для расчета стандартных циклов, используемых для определения топливной экономичности транспортных средств, не позволяет получить однозначный результат. Решением может являться использование экспериментальных записей достаточно большого объема, полученных в реальных эксплуатационных условиях.

Выполнено сравнение результатов расчета энергоемкости буферного накопителя энергии пассажирского транспортного средства с комбинированной энергоустановкой, полученных на основе расчетных и экспериментальных кривых движения. В результате сравнения установлено, что основным фактором, влияющим на энергоемкость накопителя при заданной мощности первичного источника энергии, является эксплуатационная скорость транспортного средства. Ее влияние подтверждено расчетами, выполненными на основе фрагментов экспериментальных записей движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штанг А.А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 18.10.2006. – Новосибирск, 2006. – 233 с.
2. Аносов В.Н., Спиридонов Е.А., Штанг А.А. Моделирование режимов работы тягового привода троллейбуса с емкостным накопителем энергии // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 10–13.
3. Alternative fuels and advanced vehicle technologies for improved environmental performance / ed. by R. Folkson. – Amsterdam: Woodhead Publ.: Elsevier, 2014. – 784 p.

4. **Bayindir K.C., Gözükcük M.A., Teke A.** A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units // *Energy Conversion and Management*. – 2011. – Vol. 52, no. 2. – P. 1305–1313.
5. **Ярославцев М.В.** Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 17–21.
6. **Yaroslavlsev M.V., Schurov N.I., Belova E.A.** Assessment of performance factors of hybrid electric vehicle powertrain // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 7–11.
7. **Байрыева Л.С., Шевченко В.В.** Электрическая тяга. – М.: Транспорт, 1986. – 206 с.
8. Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles / J. Ribau, C. Silva, F.P. Brito, J. Martins // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 58. – P. 120–133.
9. **Tie S.F., Tan C.W.** A review of energy sources and energy management system in electric vehicles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 20. – P. 82–102.
10. ГОСТ 20306–90. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 34 с.
11. **Ma Z.** Parameters design for a parallel hybrid electric bus using regenerative brake model // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 2014. – Art. 760815.
12. Experimental analysis of the auxiliaries consumption in the energy balance of a pre-series plug-in hybrid-electric vehicle / A. Santiangeli, C. Fiori, F. Zuccari, A. Dell’Era, F. Orecchini, A. D’Orazio // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 45. – P. 779–788.
13. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement / M. Masih-Tehrani, M.-R. Ha’iri-Yazdi, V. Esfahanian, A. Safaei // *Journal of Power Sources*. – 2013. – Vol. 244. – P. 2–10.
14. **Lajunen A.** Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses // *Transportation Research. Part C*. – 2014. – Vol. 38. – P. 1–15.
15. Predictive energy management for hybrid vehicle / S. Kermani, S. Delprat, T.M. Guerra, R. Trigui, B. Jeanneret // *Control Engineering Practice*. – 2012. – Vol. 20. – P. 408–420.

EVALUATION OF THE MAIN PARAMETERS OF HYBRID POWERTRAIN UNITS FOR CITY ROAD VEHICLES

Shtang A.A., Yaroslavlsev M.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Hybrid electric vehicles are getting widespread in production at the current time. While designing hybrid power train units it is necessary to solve a new problem of evaluating characteristics of their power sources. The dependence of the buffer energy storage capacity on the primary energy source power is obtained using the method proposed by the authors. The calculation is based on the speed-time relationship describing a vehicle drive cycle. Possible data sources of drive cycles which can be used in the hybrid vehicle design are discussed. The calculated drive curves, standard drive cycles and experimental drive cycles are compared. The necessity to use experimental drive cycle records in designing the hybrid power train unit is shown. It is determined that under investigated conditions the buffer energy storage capacity calculated using experimental data is approximately 2 times greater than the capacity calculated with theoretical drive curves. It is also shown that the buffer energy storage capacity for a given primary energy source power is weakly dependent on the span length and acceleration of the vehicle but is determined by the maximal speed reached during the acceleration and braking cycle.

Keywords: Hybrid electric vehicle; road transit vehicle; hybrid power train unit; buffer energy storage; primary energy source

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120

REFERENCES

1. Shtang A.A. *Povyshenie effektivnosti elektrotransportnykh sistem na osnove ispol'zovaniya nakopitelei energii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing efficiency of electric transit systems by means of energy storage devices. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2006. 233 p.
2. Anosov V.N., Spiridonov E.A., Shtang A.A. Modeling operating mode for trolleybus traction drive with capacitance energy storage. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, iss. 6, pp. 288–291. doi: 10.3103/S1068371211060034. Translated from *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 10–13.
3. Folkson R., ed. *Alternative fuels and advanced vehicle technologies for improved environmental performance*. Amsterdam, Woodhead Publ., Elsevier, 2014. 784 p.
4. Bayindir K.C., Gozukucuk M.A., Teke A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, no. 2, pp. 1305–1313.
5. Yaroslavl'tsev M.V. Determination of parameters of a hybrid car powertrain by modeling of the energy consumption process. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, iss. 12, pp. 724–728. doi: 10.3103/S1068371214120153. Translated from *Elektrotehnika*, 2014, no. 12, pp. 17–21.
6. Yaroslavl'tsev M.V., Schurov N.I., Belova E.A. Assessment of performance factors of hybrid electric vehicle powertrain. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 7–11.
7. Bairyeva L.S., Shevchenko V.V. *Elektricheskaya tyaga* [Electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1986. 206 p.
8. Ribau J., Silva C., Brito F.P., Martins J. Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 58, pp. 120–133.
9. Tie S.F., Tan C.W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 20, pp. 82–102.
10. GOST 20306–90. *Avtotransportnye sredstva. Toplivnaya ekonomichnost'. Metody ispytaniy* [State standard 20306–90. Automobiles. Fuel efficiency. Testing methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1990. 34 p.
11. Ma Z. Parameters design for a parallel hybrid electric bus using regenerative brake model. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 2014, art. 760815.
12. Santiangeli A., Fiori C., Zuccari F., Dell'Era A., Orecchini F., D'Orazio A. Experimental analysis of the auxiliaries consumption in the energy balance of a pre-series plug-in hybrid-electric vehicle. *Energy Procedia*, 2014, vol. 45, pp. 779–788.
13. Masih-Tehrani M., Ha'iri-Yazdi M.–R., Esfahanian V., Safaei A. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 244, pp. 2–10.
14. Lajunen A. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research. Part C*, 2014, vol. 38, pp. 1–15.
15. Kermani S., Delprat S., Guerra T.M., Trigui R., Jeanneret B. Predictive energy management for hybrid vehicle. *Control Engineering Practice*, 2012, vol. 20, pp. 408–420.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Штанг Александр Александрович – родился в 1978 году, канд. техн. наук, декан факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрический транспорт. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: shtang@corp.nstu.ru).

Shtang Alexandr (b. 1978) – Candidate of Sciences (Eng.), Dean of the Mechatronics and Automation Faculty, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electric transport. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: shtang@corp.nstu.ru).



Ярославцев Михаил Викторович – родился в 1987 году, ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрический транспорт. Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: yaroslavcev@corp.nstu.ru).

Yaroslavtsev Mikhail (b. 1987) – an assistant lecturer at the electrotechnical complexes department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electric transport. He is the author of 25 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: yaroslavcev@corp.nstu.ru).

Статья поступила 17 ноября 2016 г.

Received November 17, 2016

To Reference:

Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V. Opredelenie osnovnykh kharakteristik kombinirovannoi energeticheskoi ustanovki dlya orodskogo bezrel'sovogo transporta [Evaluation of main parameters of road city transit vehicle hybrid powertrain]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 111–120. doi: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120