

УДК 621.33

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-66-74

Оценка эффективности тягового привода электромобиля

М.А. Слепцов, А.М. Омара

Представлен проект системы силового агрегата для автономного электрического транспортного средства (АЭТС) с бортовым источником электроэнергии.

В тяговом приводе АЭТС используются электрические машины с постоянными магнитами. Передние колеса имеют индивидуальные тяговые двигатели без редуктора. Привод задних колес осуществляется одним тяговым двигателем, передающим вращающий момент через редуктор и дифференциал. В качестве бортового источника энергии взяты литий-ионные аккумуляторы, обладающие высокой энергоемкостью и большим сроком службы.

Основная цель настоящей работы — исследование возможностей регулирования расхода электроэнергии в предложенной системе тягового электропривода, обеспечивающего наибольшую экономичность при движении в условиях, оговоренных стандартным европейским ездовым циклом (СЕЕЦ). Данные исследований позволяют в дальнейшем сравнить в одинаковых условиях наибольший достижимый пробег электромобиля и автомобиля.

Для удовлетворения требований к рабочим характеристикам электромобиля при заданных параметрах рассчитана необходимая мощность тягового электропривода. Для увеличения пробега между подзарядками аккумуляторной батареи привод задних колес работает только в зоне низких скоростей (до 40 км/ч), а при более высокой скорости в работе остаются только приводы передних колес. С целью экономии энергии алгоритм управления тяговыми приводами обеспечивает большую продолжительность их работы с высокой частотой вращения. Тяговые характеристики привода передних и задних колес дают требуемую динамику электромобиля при пуске и торможении. Моделирование работы системы тягового привода выполнено на базе программного продукта AVL CRUISE. Предложены алгоритмы управления в режимах тяги и торможения с распределением потока мощности между передними и задними колесами для экономичного использования энергии аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: автономные электрические транспортные средства (АЭТС), управление и контроль мощности привода, аккумуляторная батарея, электромобиль, максимальный пробег.

Для цитирования: Слепцов М.А., Омара А.М. Оценка эффективности тягового привода электромобиля // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 66—74. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-66-74.

Evaluating the Electric Vehicle Traction Drive Effectiveness

М.А. Sleptsov, A.M. Omara

The design of a powertrain system for an autonomous electric vehicle (AEV) with an on-board power source is presented.

The AEV traction drive system uses electrical machines with permanent magnets. The front wheels are driven by individual traction motors without a gear. The rear wheels are driven by one traction motor, which transmits the torque through a reduction gearbox with a differential. Lithium-ion batteries are used as on-board energy sources owing to their high-energy intensity and a long lifetime.

The main aim of this work is to investigate the possibilities of regulating the electric power consumption in the proposed electric traction drive system to ensure the highest efficiency when driving under the conditions specified by the Standard New European Driving Cycle (NEDC). The data of these studies will make it possible to compare the largest achievable mileages of electric and motor vehicles under the same conditions.

To meet the performance requirements for the electric vehicle at the specified parameters, the required traction electric drive power capacity is calculated. To increase the mileage between the battery recharges, the rear wheel drive operates only in the low speed range (up to 40 km/h), and at a higher speed, only the front wheel drives remain in operation. To save energy, the traction drive control algorithm ensures a long duration of their operation with high rotation frequency. The traction characteristics of the front and rear wheel drives provide the required electric vehicle dynamics during its starting and braking. The traction drive operation was simulated using the AVL CRUISE software package. Control algorithms are proposed in traction and braking modes with a power flow distribution between the front and rear wheels for economically efficient use of the storage battery charge.

Key words: autonomous electric vehicles (AEV), drive power monitoring and control, storage battery, electric vehicle, maximum mileage.

For citation: Sleptsov M.A. Omara A.M. Evaluating the Electric Vehicle Traction Drive Effectiveness. MPEI Vestnik. 2018;6:66—74. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-66-74.

Введение

Автономное электрическое транспортное средство (АЭТС) с аккумуляторной батареей (электромобиль) в настоящее время является перспективным решением в условиях обострения проблемы получения энергии из традиционных источников и роста загрязнения окружающей среды [1 — 5]. Прогресс в области тягового электропривода и технологий аккумуляторных батарей позволяет вести разработки эффективных, экономичных и надежных систем тягового привода для электромобилей.

Тяговый электропривод выполняется на базе бесконтактных электрических машин. В настоящей работе за основу взят вентильный электродвигатель постоянного тока (ВЭД ПТ) [6]. Это сделано с целью исключения возможности регулирования потока возбуждения и воздействия только по цепи якоря, что позволяет упростить анализ. В качестве бортовых источников энергии использованы литий-ионные аккумуляторы, обладающие высокой энергоемкостью и большим сроком службы [1].

Предложенная конфигурация системы тягового электропривода (ТЭП) показана на рис. 1. Задние колеса вращаются одним тяговым двигателем через редуктор и дифференциал. Каждое из передних колес имеет индивидуальный привод.

Основная цель — исследование возможностей управления расходом электроэнергии в предложенной системе ТЭП, обеспечивающего наибольшую экономичность при движении в условиях, оговоренных Стандартным европейским ездовым циклом (СЕЕЦ). Полученные данные позволят сравнить в одинаковых условиях наибольший достижимый пробег электромобиля и автомобиля. По аналогичной методике оценивается расход органического топлива на автомобиле.

Параметры транспортного средства и цикла движения

Приведем основные параметры и требования к рабочим характеристикам, определяющим показатели силового агрегата, электромобиля.

Параметры транспортного средства

| | |
|---|--------|
| Снаряженная масса m_c , кг | 1200 |
| Масса брутто m_g , кг | 1580 |
| Площадь лобовой поверхности A , м ² | 1,97 |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления C_D | 0,284 |
| Коэффициент сопротивления качению f_r | 0,015 |
| Момент инерции колеса J_w , кг·м ² | 0,1431 |
| Радиус качения R_R , мм | 287 |
| Передаточное отношение заднего мотора T_R | 7,09 |
| Дифференциальная инерция J_{diff} , кг·м ² | 0,01 |
| КПД трансмиссии η_t , % | 90 |

Требования к рабочим характеристикам

| | |
|---|------|
| Максимальная скорость транспортного средства V_{max} , км/ч | 120 |
| Время разгона (от 0 до 100 км/ч) t_a , с | 15 |
| Тангенс максимального угла подъема G_{max} | 0,3 |
| Дальность поездки S , км | >200 |

Новый европейский цикл движения, предназначенный для оценки уровней вредного выброса двигателей внутреннего сгорания и расхода топлива, состоит из четырех циклов ECE 15 (езда в городе со скоростью до 50 км/ч с низкой нагрузкой на двигатель) и цикла EUDC (пригородный цикл с разгоном до максимальной скорости на загородной трассе). Указанный цикл показан на рис. 2 с общим временем прохождения, равным 1180 с. Общее сопротивление движению для стандартного европейского цикла движения приведено на рис. 3 и определяется квадратичной функцией скорости транспортного средства:

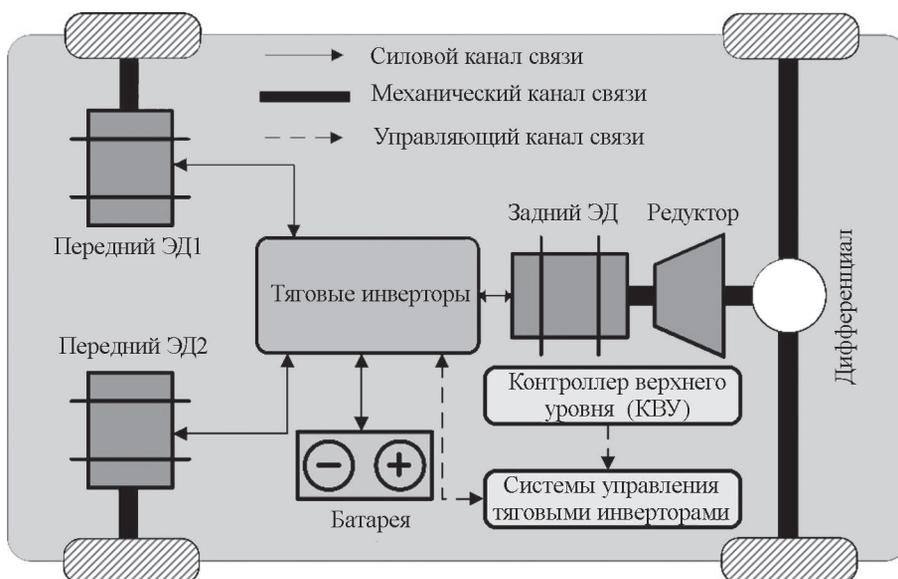


Рис. 1. Система силового агрегата ЭТС

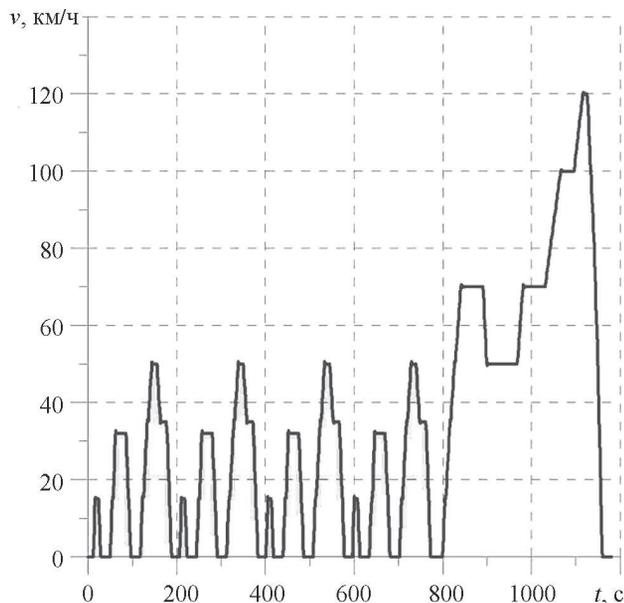


Рис. 2. Цикл вождения для автоматического привода с желаемой скоростью автомобиля v

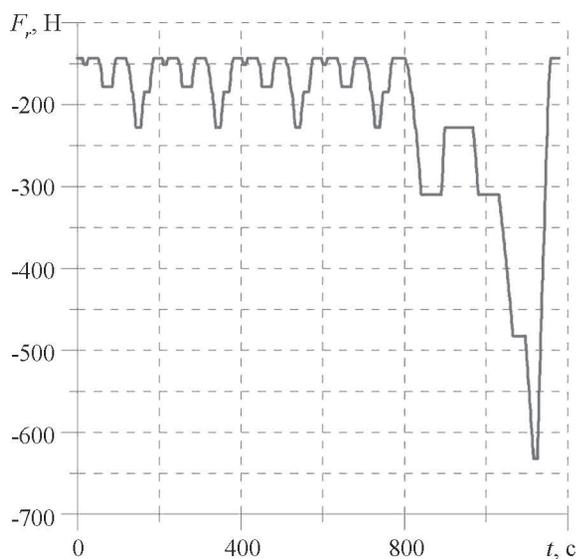


Рис. 3. Общее сопротивление движению F_r на основе стандартного цикла

$$F_r = C_1 + C_2 v + C_3 v^2,$$

где F_r — общее сопротивление движению; $C_1 = 143,06$ Н; $C_2 = 0,0$ Н/(км/ч); $C_3 = 0,03399$ Н/(км/ч)².

Требования к мощности привода

Для удовлетворения требований к рабочим характеристикам электромобиля при заданных параметрах можно рассчитать необходимую мощность тягового электропривода. Методика расчета принята в соответствии с [5].

Требуемая мощность для движения с максимальной скоростью

Максимальная потребляемая мощность для движения транспортного средства с необходимой максимальной

скоростью $v_{\max} = 120$ км/ч вычисляется следующим образом:

$$P_{v_{\max}} = \left(m_g g f_r + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21,15} \right) \frac{v_{\max}}{3600 \eta_T},$$

где $P_{v_{\max}}$ — требуемая мощность, кВт; g — ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с².

Требуемая мощность на максимальном профиле подъема пути

Требуемая мощность при максимальном профиле подъема без учета основного сопротивления движению равна:

$$P_{G_{\max}} = (m_g g f_r \cos(\alpha) + m_g g \sin(\alpha)) \frac{v_G}{3600 \eta_m},$$

где $P_{G_{\max}}$ — требуемая мощность, кВт; v_G — скорость транспортного средства на подъеме, $v_G = 10$ км/ч; α — угол, соответствующий максимальному подъему, $\alpha = \text{tg}^{-1} G_{\max}$, рад.

Требуемая мощность, соответствующая заданной величине ускорения при разгоне

При пуске транспортного средства от нуля до 100 км/ч требуемая мощность, обеспечивающая заданное время разгона 15 с, выглядит как

$$P_{acc} = \left(\frac{\mu m_g v_{acc}}{7,2 t_a} + \frac{m_g g f_r v_{acc}}{1,5} + \frac{0,4 C_D A v_{acc}^2}{21,15} \right) \frac{v_{acc}}{3600 \eta_T},$$

где P_{acc} — требуемая мощность, кВт; μ — коэффициент инерции вращающихся масс, $\mu = 1,05$; v_{acc} — скорость в конце разгона, $v_{acc} = 100$ км/ч.

Приведем расчетные значения максимальных мощностей для удовлетворения заданных параметров движения транспортного средства:

$$P_{v_{\max}} = 22,72 \text{ кВт}; P_{G_{\max}} = 14,43 \text{ кВт}; P_{acc} = 55,46 \text{ кВт}.$$

Требования к выбору мощности тягового электродвигателя

$$P_{\max} > P_{acc}; \quad (1)$$

$$P_{rated} > \max(P_{v_{\max}}, P_G); \quad (2)$$

$$n_{\max} = \frac{v_{\max} T_R}{0,377 R_R};$$

$$n_{rated} = n_{\max} / \beta,$$

где P_{\max} , P_{rated} , n_{\max} , n_{rated} — максимальные и номинальные мощности привода и число оборотов двигателя; β — отношение скорости двигателя, $\beta = 2,5$.

В соответствии с условиями (1), (2) и расчетными значениями максимальной требуемой мощности представим следующие параметры тягового электродвигателя.

Характеристики тягового электродвигателя

| | |
|---|------|
| Максимальная мощность P_{max} , кВт | 25 |
| Номинальная мощность P_{rated} , кВт | 10 |
| Максимальная скорость N_{max} , об/мин | 2500 |
| Номинальная скорость N_{rated} , об/мин | 1000 |
| Максимальный крутящий момент T_{max} , Н·м | 223 |
| Номинальный крутящий момент T_{rated} , Н·м | 90 |

В предлагаемой системе электропривода использованы три идентичные синхронные машины с постоянными магнитами вместо одного двигателя с одинаковой суммарной мощностью (см. рис. 1). Двигатель задних колес передает вращающий момент через редуктор и дифференциал. Для передних колес используется безредукторный тяговый электропривод. Для моделирования взяты характеристики зависимости вращающего момента от скорости синхронной машины с постоянными магнитами. Для увеличения пробега между зарядами аккумуляторной батареи привод задних колес работает только в зоне низких скоростей (до 40 км/ч), а при более высокой скорости в работе остаются только приводы передних колес. Для увеличения коэффициента полезного действия (КПД) алгоритм управления приводами обеспечивает большую продолжительность их работы с высокой скоростью. Тяговые характеристики приводов передних и задних колес дают требуемую динамику электромобиля при пуске и торможении.

Тяговые характеристики приводов передних и задних колес изображены на рис. 4. Частота вращения двигателей передних колес равна частоте вращения колес из-за отсутствия редуктора, а частота враще-

ния двигателя привода задних колес отличается от частоты их вращения из-за передаточного отношения редуктора. При моделировании проанализирована эффективность тяговых машин. На рис. 5 показано, что КПД двигателей существенно меняется при изменении вращающего момента и скорости. Следовательно, увеличение КПД достигается более высокими рабочими скоростями при одинаковом вращающем моменте. При одинаковой скорости КПД увеличивается с ростом вращающего момента. Таким образом, предложенная конфигурация тягового электропривода позволяет обеспечить работу двигателей при более высоких скоростях с большей эффективностью.

Гармонизация параметров батарей

Литий-ионные батареи используются в качестве основного источника питания для электромобилей благодаря высокой энергоемкости и длительному сроку работы [7]. Максимальная выходная мощность батареи должна соответствовать требуемым параметрам электродвигателя электромобиля. Необходимая энергия батареи при движении электромобиля с постоянной скоростью 100 км/ч составит 48,62 кВт·ч:

$$E_B = \frac{(m_g g f_r + C_D A v^2 / 21,15)}{3600 SOC \eta_m \eta_{eDrive} \eta_B (1 - \eta_a)} S,$$

где E_B — энергия батареи, кВт·ч, SOC — начальный заряд батареи, равный 95%; S — дальность пробега, $S = 200$ км; η_{eDrive} — КПД электропривода (90%); η_a — КПД устройств электромобиля.

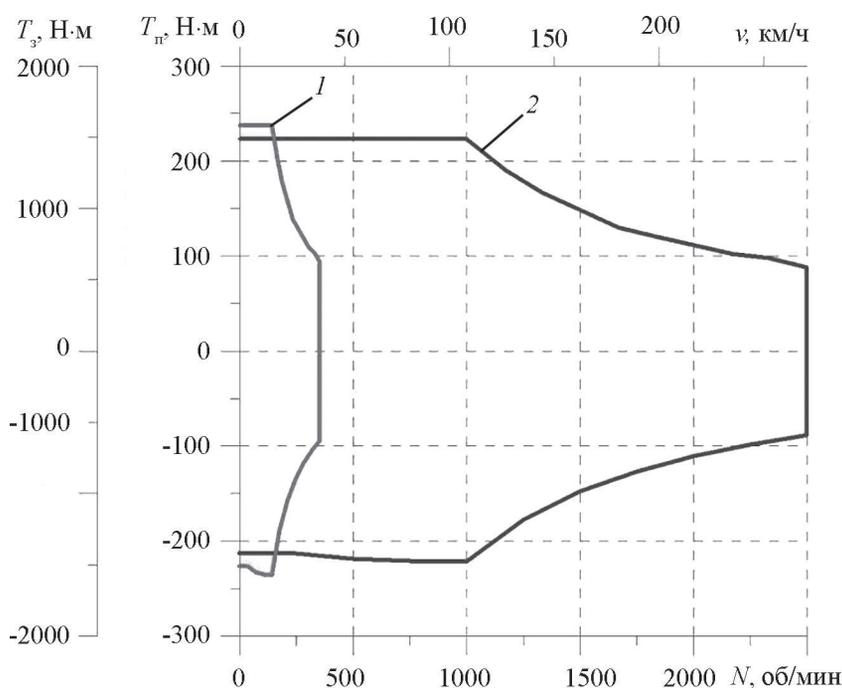


Рис. 4. Вращающий момент характеристики передних двигателей, расположенных в колесах, и заднего двигателя в сочетании с тяговым редуктором и дифференциалом:

1, 2 — передний и задний ТЭД; T_n, T_z — крутящие моменты переднего и заднего ТЭД; v, N — скорости ЭТС и ТЭД

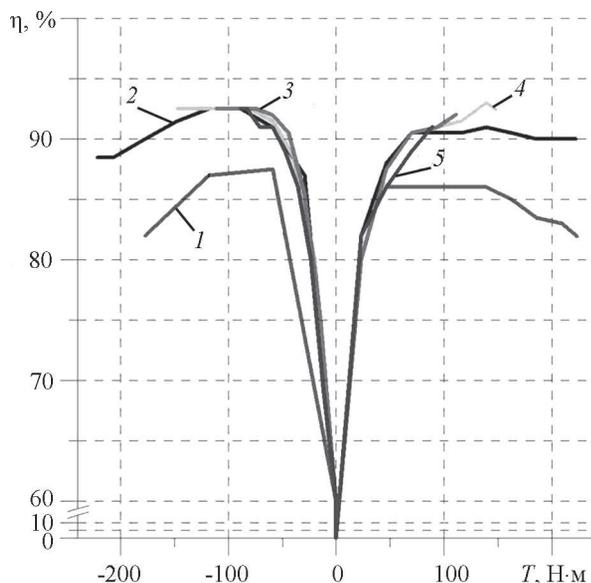


Рис. 5. Эффективность характеристики крутящего момента двигателя T при различных скоростях вращения $N = 500$ (1); 1000 (2); 2000 (3); 1500 (4); 2500 (5) об/мин:

η — КПД ТЭД

В соответствии со спецификацией доступных на рынке батарей выбрана литий-ионная батарея 51,2 кВт·ч с емкостью 160 А·ч.

Характеристики литий-ионной батареи

| | |
|---|----------|
| Номинальное напряжение, В | 320 |
| Минимальное напряжение, В | 220 |
| Максимальное напряжение, В | 420 |
| Начальное состояние заряда (СЗАБ), % | 95 |
| Количество ячеек | 5 |
| Емкость одной ячейки, А·ч | 32 |
| Рабочая температура, °С | 25 |
| Внутреннее сопротивление при зарядке, Ω | 0,8 |
| Внутреннее сопротивление в процессе разряда, Ω | 0,6 |
| Диапазон состояния заряда (СЗАБ), % | 40...100 |

Алгоритмы и структурная схема управления приводом

Алгоритм управления мощностью электропривода (РМС) и заряда батареи принят, исходя из условий низкой цены вычислений. Основные требования к РМС — уменьшение разряда аккумуляторной батареи и наибольший пробег электромобиля. Поэтому представленная в качестве первоначального привода конфигурация ЭМ обеспечивает низкое потребление и высокий КПД. Для всех моделируемых конфигураций первоначальная система привода использует привод передних колес, а привод задних колес включается при необходимости. Система привода передних колес — основная при достижении нулевого вращающего момента заднего привода.

Алгоритм делит вращающий момент T_{req} между задними и передними T_{front} колесами, как показано на рис 6.

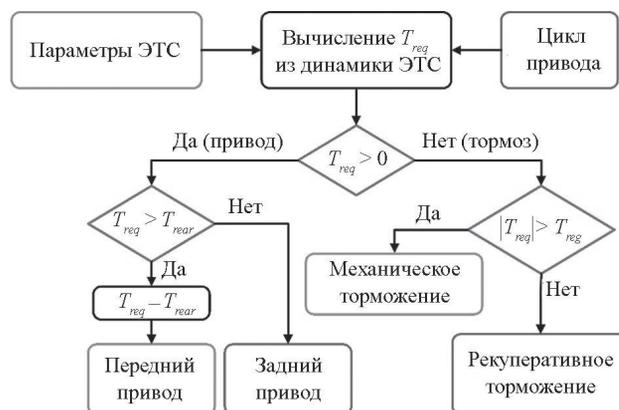


Рис. 6. Схема стратегии УПК

Для каждого привода электромобиля вращающий момент T_{req} рассчитывали, исходя из динамики движения, основанной на параметрах электромобиля и цикла его движения. В режиме тяги вращающий момент делился между приводами передних и задних колес. В режиме торможения рекуперированная энергия использовалась для заряда батареи до тех пор, пока не включилось механическое торможение.

Результаты моделирования

Для моделирования предложенного силового агрегата электромобиля использована платформа AVL CRUISE (рис. 7). Она представляет собой программный инструмент, разработанный AVL LIST GmbH, служащий для моделирования систем привода, расхода топлива и эмиссии продуктов сгорания. Модульная концепция позволяет свободно моделировать всевозможные конфигурации привода электромобиля, обеспечивая при этом возможно короткое время для вычислительных процедур.

Предложенная система силового агрегата электромобиля, как показано на рис. 8, удовлетворяет требованиям движения в цикле NEDC, когда моделируемая скорость движения соответствует желаемой.

Графики напряжения батареи, потребляемого тока и начального заряда изображены на рис. 9.

Следует отметить, что батарея заряжается с небольшими колебаниями напряжения при рекуперативном торможении. После одного цикла движения ее заряд составляет 92,64% с вариацией 2,36%. Мощность батареи и потери мощности представлены на рис. 10, а скорость автомобиля, ускорение и пройденный путь в течение одного цикла — на рис. 11.

Длина пройденного пути $S_{cyc} = 11015$ м. Полный пробег электромобиля получен повторением отдельных циклов до тех пор, пока заряд батареи не снизился до 40%. Длина полного пробега $S_{range} = 256,7$ км и рассчитана следующим образом:

$$S_{range} = \frac{SOC_{int}(1 - \eta_a)S_{cyc}}{1000 \times \Delta SOC}.$$

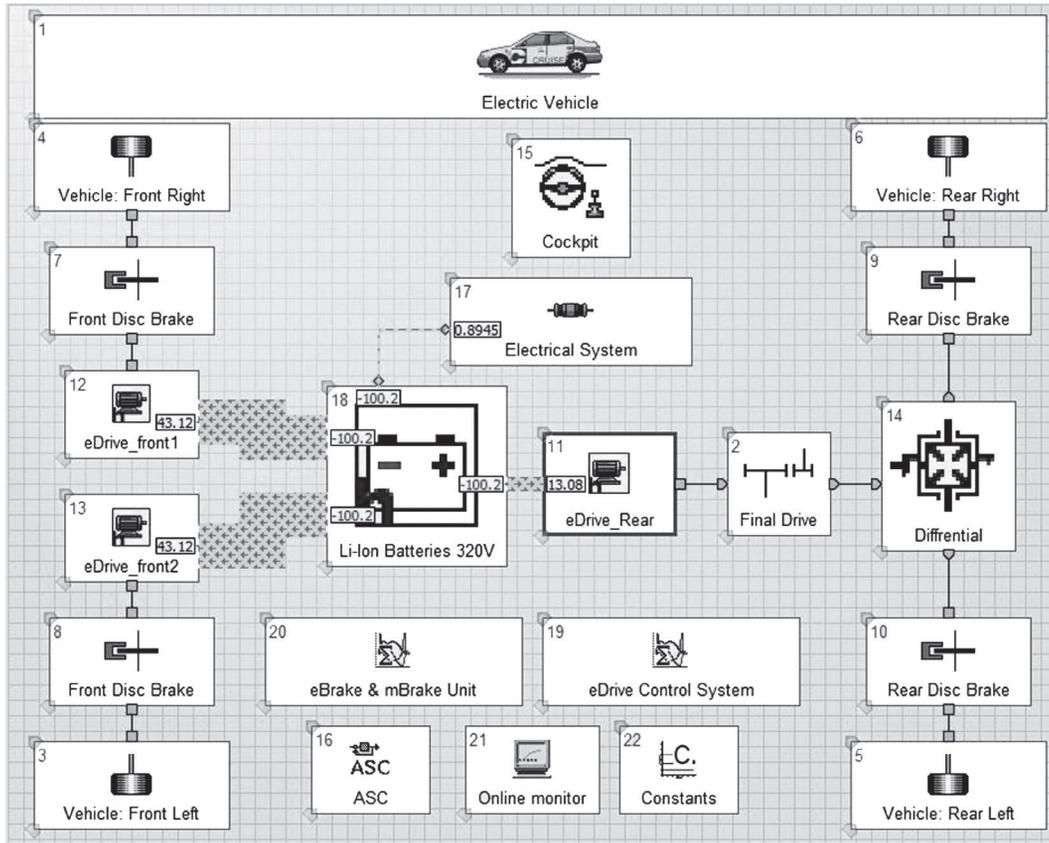


Рис. 7. Система расчетов AVL CRUISE для предлагаемого ЭТС

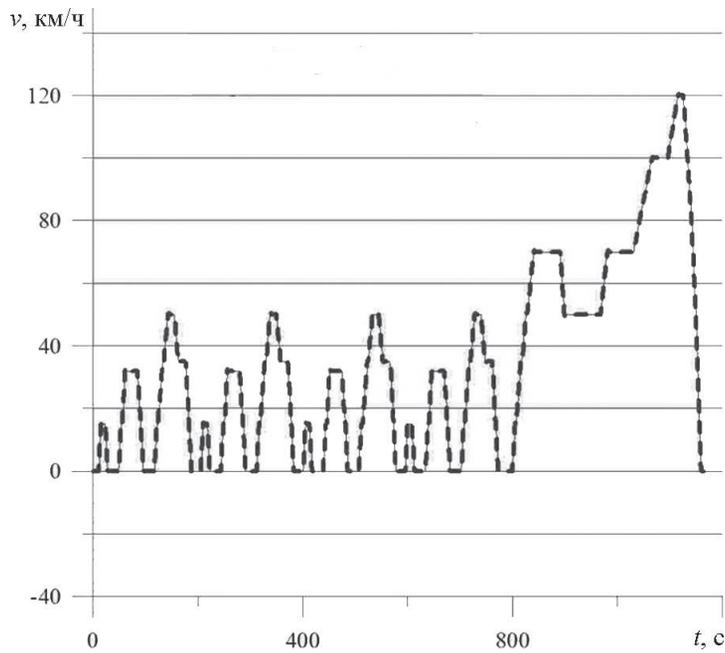


Рис. 8. Фактическая (---) и желаемая (—) скорости транспортного средства при цикле вождения

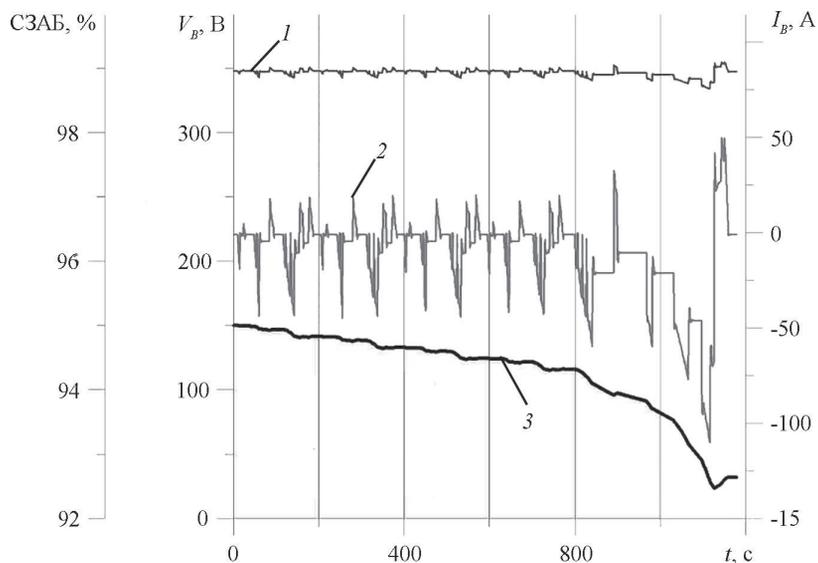


Рис. 9. Напряжение V_B (1), ток I_B (2) и состояние заряда батареи СЗАБ (3)

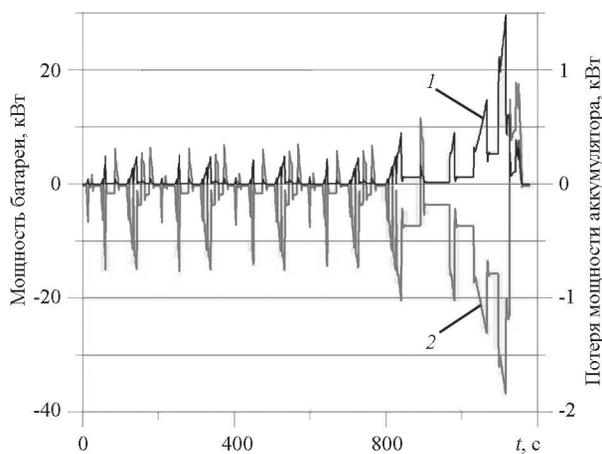


Рис. 10. Кривые потерь электрической мощности (1) и мощности батареи (2)

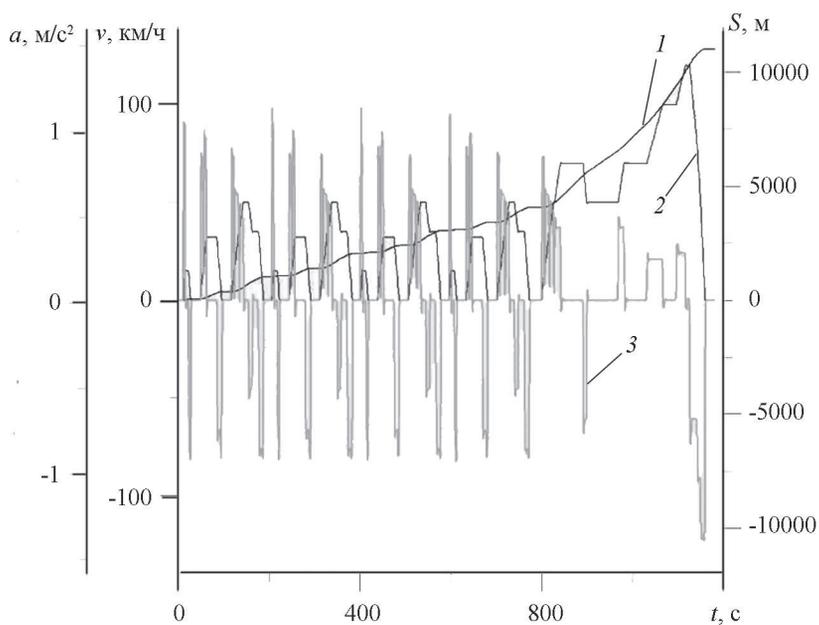


Рис. 11. Графики дальности S (1), скорости v (2) и ускорения a (3)

Графики скорости и вращающего момента для электродвигателей заднего и переднего приводов даны на рис. 12, 13. На них отчетливо видно, что электродвигатель задних колес обеспечивает реализацию вращающего момента при скорости электромобиля менее 40 км/ч, в то время как привод передних колес обеспечивает движение при более высоких скоростях.

Выводы

Представлен проект электромобиля с аккумуляторной батареей. Параметры силового агрегата выбраны на основе производительности и мощности транспортного средства. Описаны конфигурации тягового электропривода с использованием двух двигателей по схеме «Мотор – колесо» и одного двигателя с редуктором

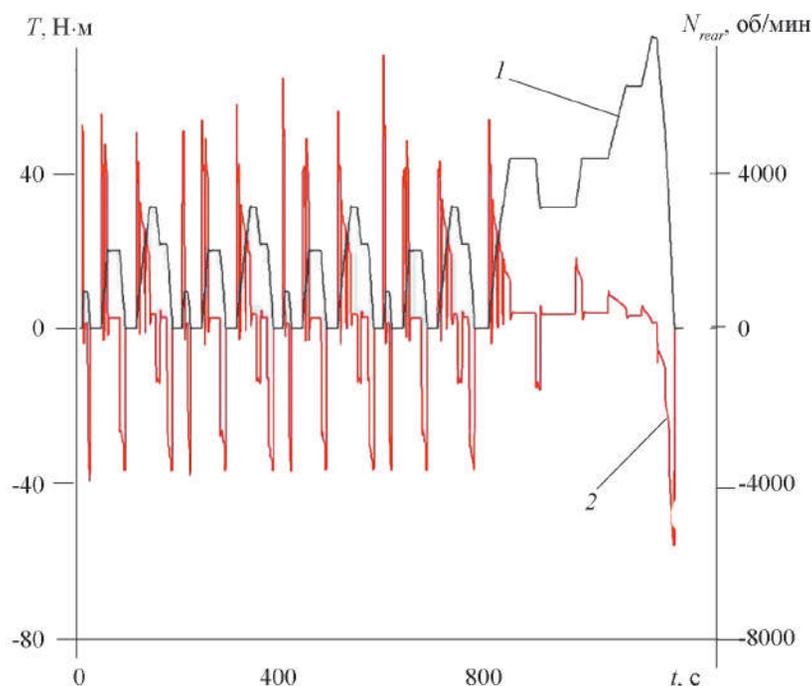


Рис. 12. Скорость (1) и крутящий момент (2) заднего двигателя

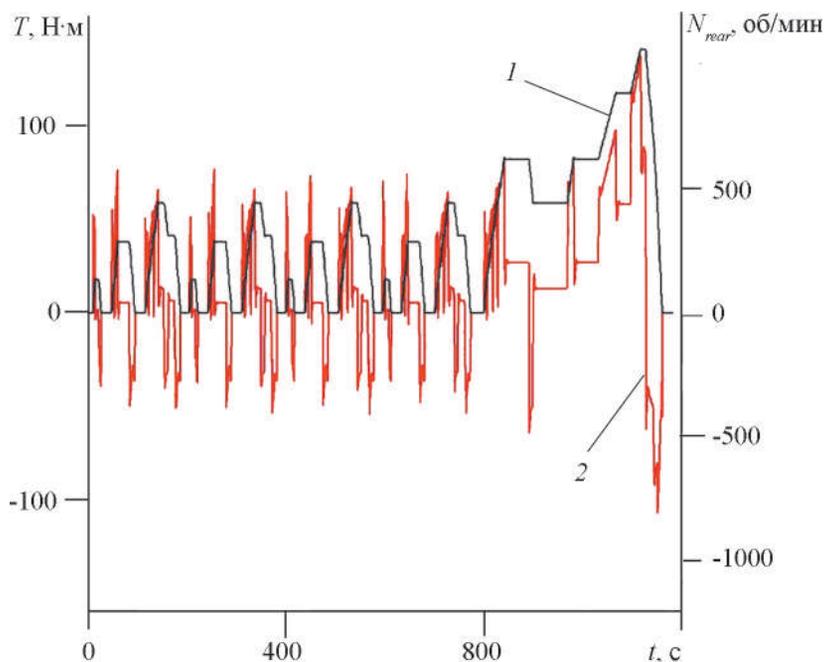


Рис. 13. Скорость (1) и крутящий момент (2) переднего двигателя

и дифференциалом для задних колес. Модель предложенного электромобиля построена на платформе AVL CRUISE в соответствии с рассчитанными параметрами батареи и привода. Для достижения высокой эффективности электромобиля разработан алгоритм управления мощностью привода и заряда батареи (PMC).

Результаты моделирования показали, что действительная и требуемая (желаемая) скорости и параметры спроектированного силового агрегата электромобиля

соответствуют необходимым требованиям. Благодаря использованию предложенной конфигурации привода удалось реализовать экономное расходование энергии за счет ее перераспределения между тяговыми двигателями разных ведущих осей.

Следует отметить, что предложенная конфигурация обеспечивает хорошее поддержание уровня заряда батареи и способствует увеличению дальности пробега электромобиля.

Литература

1. **Kumar L., Jain S.** Electric Propulsion System for Electric Vehicular Technology: a Review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014. V. 29. Pp. 924—940.
2. **Rajashékara K.** Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies // *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2013. V. 1. No. 1. Pp. 3—10.
3. **Bianchi N., Carraro E.** Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Non-uniform Airgap and Conventional Rotor for Electric Vehicle Applications // *IET Electr. Power Appl.* 2014. V. 8. No. 6. Pp. 240—249.
4. **Dougal R.A.** Dynamic Lithiumion Battery Model for System Simulation // *IEEE Trans. Components Packag. Technol.* 2002. V. 25. No. 3. Pp. 495—505.
5. **Shaohua L. e. a.** A Rule-based Energy Management Strategy for a New BSG Hybrid Electric Vehicle // *Proc. 3rd Glob. Congr. Intell. Syst.* 2012. Pp. 209—212.
6. **Zeng X., Peng Y., Song D.** Powertrain Parameter Matching of A Plug-in Hybrid Electric Vehicle // *Proc. IEEE Conf. and Expo, Transportation Electrification Asia-Pacific.* Beijing, 2014. Pp. 1—5.
7. **Слепцов М.А., Нагайцев В.И., Комаров В.Г., Банакин А.В.** Обзор состояния и перспектив тягового электропривода автономного транспорта // *Вестник МЭИ.* 2016. № 4. С. 21—28.

Сведения об авторах:

Слепцов Михаил Александрович — кандидат технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: SleptsovMA@mpei.ru

Омара Ахмед Мохамед — аспирант кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ»

Information about authors:

Sleptsov Mikhail A. — Ph.D. (Techn.), Professor of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: SleptsovMA@mpei.ru

Omara Akhmed M. — Ph.D.-student of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 25.10.2017

The article received to the editor: 25.10.2017

References

1. **Kumar L., Jain S.** Electric Propulsion System for Electric Vehicular Technology: a Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014;29:924—940.
2. **Rajashékara K.** Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2013;1;1:3—10.
3. **Bianchi N., Carraro E.** Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Non-uniform Airgap and Conventional Rotor for Electric Vehicle Applications. *IET Electr. Power Appl.* 2014;8;6:240—249.
4. **Dougal R.A.** Dynamic Lithiumion Battery Model for System Simulation. *IEEE Trans. Components Packag. Technol.* 2002;25;3:495—505.
5. **Shaohua L. e. a.** A Rule-based Energy Management Strategy for a New BSG Hybrid Electric Vehicle. *Proc. 3rd Glob. Congr. Intell. Syst.* 2012:209—212.
6. **Zeng X., Peng Y., Song D.** Powertrain Parameter Matching of A Plug-in Hybrid Electric Vehicle . *Proc. IEEE Conf. and Expo, Transportation Electrification Asia-Pacific.* Beijing, 2014:1—5.
7. **Sleptsov M.A., Nagaytsev V.I., Komarov V.G., Banakin A.V.** Obzor Sostoyaniya i Perspektiv Tyagovogo Elektroprivoda Avtonomnogo Transporta. *Vestnik MPEI.* 2016;4:21—28. (in Russian).