

Определение потребной энергоемкости накопителей электробуса методами имитационного моделирования

12, декабрь 2016

Смирнов А. А.¹, Пикалов Н. А.^{1,*}

УДК: 629.341

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

*nikitapikalov@gmail.com

Введение

Мониторинг воздушных бассейнов крупных городов показывает, что основную долю в выбросах вредных веществ занимают выбросы автомобильного транспорта. По разным оценкам [1 - 3] в г. Москве выбросы вредных веществ от автотранспорта составляют от 40 до 90% от общего уровня загрязнения.

Неудовлетворительное состояние экологии в крупных городах, а также ограниченность углеводородных ресурсов приводит к активному развитию автотранспортных средств (АТС) на альтернативных источниках энергии. На сегодняшний день основным направлением решения задачи улучшения экологической обстановки в городах является создание АТС, использующих для передвижения исключительно электроэнергию.

В структуре общественного наземного транспорта для перевозки пассажиров в г. Москве и в г. Санкт-Петербурге доля автобусов составляет 70-75%. Оставшийся общественный транспорт (троллейбусы и трамваи) уже использует электрическую тягу. Поэтому важной задачей является замена городских автобусов с двигателями внутреннего сгорания на электробусы.

С точки зрения Правил ЕЭК ООН № 100, электробус является аккумуляторным электрическим транспортным средством (ТС), т.е. ТС, источником энергии которого служит только электродвигатель, тяговая энергия которого обеспечивается исключительно установленной в этом ТС тяговой батареей.

Основные достоинства электробусов:

- отсутствие вредных выхлопов, которые являются одним из главных источников загрязнения окружающей среды;
- возможность зарядки аккумуляторов от электрической сети;
- более высокий КПД тягового привода, по сравнению с ДВС обычных автобусов;
- меньший уровень шума.

При всех этих достоинствах электробусы имеют и ряд недостатков:

- аккумуляторы имеют ограниченную емкость и обеспечивают меньший запас хода по сравнению с автобусами с ДВС;
- высокая стоимость;
- снаряженная масса электробуса на 12...15% больше, чем у автобусов с ДВС аналогичной вместимости;
- отсутствие соответствующей инфраструктуры и квалифицированного персонала для проведения техобслуживания.

Важнейшим эксплуатационным показателем электробуса, определяющим эффективность его использования для пассажироперевозок наряду с пассажироместимостью, является запас автономного хода, который напрямую связан с емкостью тяговой батареи. На сегодняшний день на примере конструкций опытных образцов электробусов отечественных и зарубежных производителей (см. таблицу 1) отчетливо просматривается тенденция обеспечить автономный ход электробуса на уровне суточного пробега, который, например, для г. Москвы составляет – 100...150 км.

Таблица 1. Характеристики электробусов и троллейбусов с автономным ходом

Тип автобуса, страна-изготовитель	Полная масса, т	Ёмкость накопителей, А·ч	Напряжение на батареях, В	Запас автономного хода, км	Запас энергии на 1 км пути, кВт·ч
Электробус ЛИАЗ 6274, Россия	18,2	700	400	200	1,4
Электробус большого класса ТРОЛЗА-52501, Россия	17,62	700	400	120	2,33
Электробус малого класса КАМАЗ 2257Э, Россия	6	Энергоемкость 35,3 кВт·ч		69	0,51
BYD eBus, Китай	19	Энергоемкость 324 кВт·ч		250	1,3
Электробус Proterra catalyst vehicle, США	39	Энергоемкость 321 кВт·ч		290	1,11
Электробус Bozankaya-TCV Sileo E-Bus	18	Энергоемкость 200 кВт·ч		200	1,0

Поэтому на ранних этапах проектирования электробуса особо остро стоит вопрос о выборе основных характеристик тяговых батарей и, прежде всего, их емкости. Это связано с тем, что применяемые на современных электробусах батареи имеют высокую стоимость, иногда составляющую до 50 % от себестоимости электробуса, значительную массу и объем. С одной стороны, емкость тяговых батарей должна быть достаточной для обеспечения суточного пробега электробуса, с другой – не должна быть чрезмерной для сохранения приемлемой стоимости и пассажироместимости.

В данной работе для оценки энергозатрат на движение и определения потребной емкости тяговых батарей предлагается использовать имитационное математическое моделирование движения электробуса в режиме городского цикла.

Имитационная математическая модель

При разработке математической модели (ММ) движения электробуса были приняты следующие допущения:

- качение колес происходит по ровной твердой опорной поверхности (ОП);
- контакт колеса с ОП – точечный;
- вертикальные реакции колес правого и левого бортов равны;
- валы, соединяющие элементы трансмиссии считаются жесткими;
- положение центра тяжести по высоте относительно ОП не меняется.

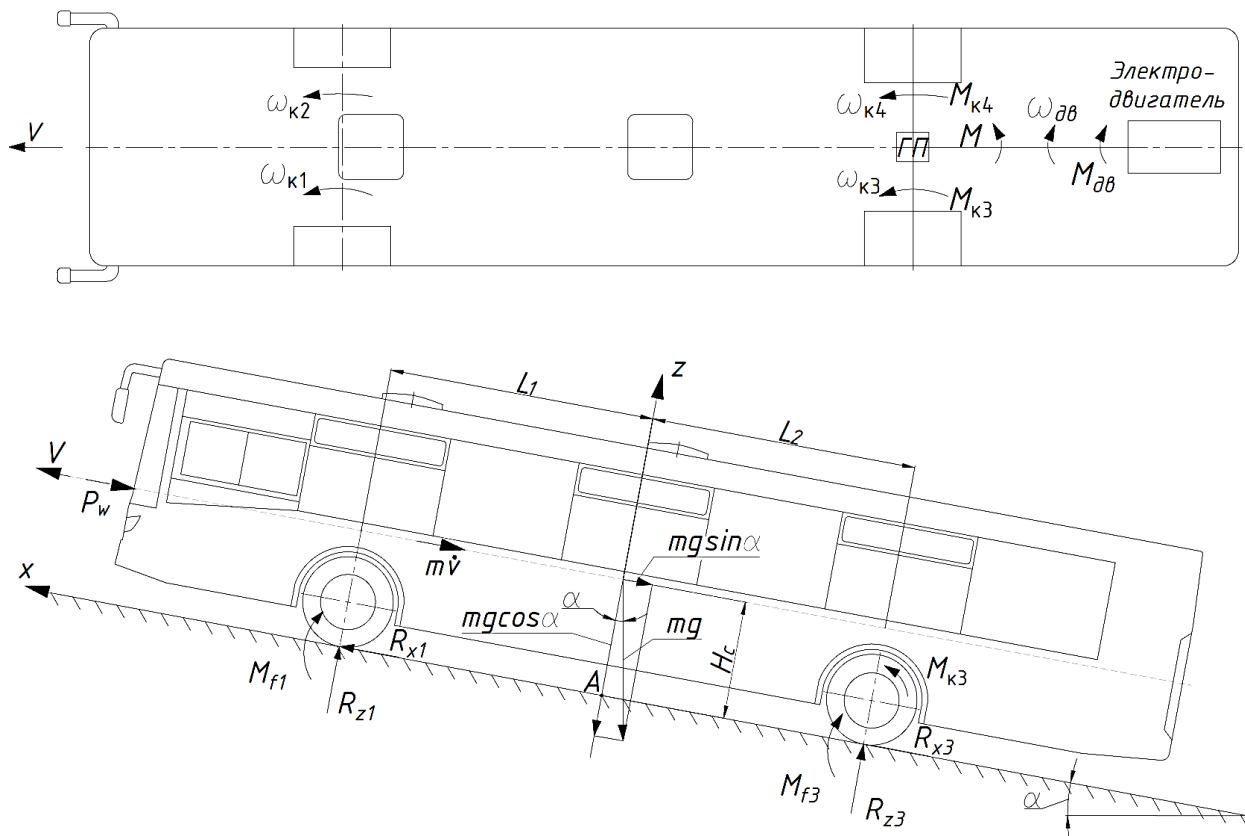


Рис. 1. Расчетная схема электробуса

Электробус приводится в движение тяговым электродвигателем через главную передачу заднего моста. Главная передача оснащена симметричным межколесным дифференциалом, который распределяет крутящий момент по задним колесам левого и правого бортов.

Введем плоскую систему координат: ось x параллельна ОП и направлена в сторону движения ТС, ось z перпендикулярна ОП и направлена вверх.

Расчётная схема электробуса представлена на рис. 1. На данном рисунке и ниже в уравнениях использованы следующие обозначения: V – скорость движения ТС, $\dot{V}$ – ускорение ТС; P_w – полная аэродинамическая сила; mg – сила тяжести ТС (m – масса ТС, g – ускорение свободного падения); R_{zi} – нормальные реакции в пятне контакта колес с ОП; R_{xi} – продольные реакции в пятне контакта колес; M_{fi} – моменты сопротивления качению

колес; H_c – высота центра тяжести ТС; L_1, L_2 – расстояния от центра тяжести до передней и задней оси электробуса, соответственно; α – угол подъема ОП; $\omega_{дв}$ – угловая скорость вращения выходного вала тягового электродвигателя; ω_{ki} – угловые скорости вращения колес; $i = 1, 2, 3, 4$ – номер колеса.

С учетом принятых допущений, движение электробуса описывается системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{aligned} m\dot{V} &= R_{x1} + R_{x2} + R_{x3} + R_{x4} - P_w; \\ J_{дв}\dot{\omega}_{дв} &= M_{дв} - \frac{1}{k_{ГП}\eta_{мех}}(M_{к3} + M_{к4}); \\ J_{к1}\dot{\omega}_{к1} &= -R_{x1}r_d - M_{f1}; \\ J_{к2}\dot{\omega}_{к2} &= -R_{x2}r_d - M_{f2}; \\ J_{к3}\dot{\omega}_{к3} &= -R_{x3}r_d - M_{f3} + M_{к3}; \\ J_{к4}\dot{\omega}_{к4} &= -R_{x4}r_d - M_{f4} + M_{к4}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $M_{дв}$ – крутящий момент на выходном валу тягового электродвигателя; $J_{дв}$ – момент инерции вращающихся частей трансмиссии, приведенный к выходному валу электродвигателя; J_{ki} – момент инерции колеса; r_d – динамический радиус колеса; $k_{ГП}$ – передаточное отношение главной передачи ведущего моста; $\eta_{мех}$ – механический коэффициент полезного действия трансмиссии; $M_{к3}, M_{к4}$ – крутящие моменты, подводимые к ведущим колесам.

Первое уравнение описывает поступательное движение электробуса; второе – вращательное движение выходного вала электродвигателя; оставшиеся уравнения описывают вращательное движение колес ТС. Продольные реакции в пятне контакта R_{xi} при взаимодействии колеса с ОП зависят от величины нормальной реакции и коэффициента сцепления:

$$R_{xi} = \varphi(S) \cdot R_{zi},$$

где $\varphi(S)$ – коэффициент сцепления, зависимость которого от коэффициента буксования S в общем виде может быть выражена уравнением:

$$\varphi(S) = \varphi_{max} \cdot (1 - e^{\frac{-S}{S_0}}) \cdot (1 + e^{\frac{-S}{S_1}}),$$

где постоянные φ_{max}, S_0, S_1 – определяются типом ОП и типом шины. Для сухого асфальтобетонного покрытия $\varphi_{max} = 0,8; S_0 = 0,015; S_1 = 0,04$ [6].

В зависимости от режима движения колеса коэффициент буксования S вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} S &= \frac{V - \omega_k \cdot r_d}{V} - \text{для ведомого режима,} \\ S &= \frac{\omega_k \cdot r_d - V}{\omega_k \cdot r_d} - \text{для ведущего режима.} \end{aligned}$$

Моменты сопротивления качению M_{fi} зависят от величины нормальной реакции и коэффициента сопротивления качению f , зависящему от типа покрытия ОП (для асфальтобетонного покрытия в удовлетворительном состоянии $f = 0,018$):

$$M_{fi} = f R_{zi} r_d. \quad (2)$$

Далее будем рассматривать случай, при котором силовые факторы, а также условия движения для колес левого и правого борта, одинаковы. В этом случае справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\frac{\dot{\omega}_{дв}}{k_{гп}} &= \dot{\omega}_{к3} = \dot{\omega}_{к4}; \\ M_{f1} &= M_{f2}; M_{f3} = M_{f4}; \\ R_{x1} &= R_{x2}; R_{x3} = R_{x4}; \\ R_{z1} &= R_{z2}; R_{z3} = R_{z4}; \\ J_{к1} &= J_{к2} = J_{к3} = J_{к4}.\end{aligned}$$

Для определения нормальных реакций с учетом их перераспределения при ускорении или замедлении ТС используется уравнение моментов всех силовых факторов относительно точки А (см. рис. 1):

$$\sum M_A = R_{z1}L_1 + M_{f1} + P_w H_c + m\dot{V}H_c + mgH_c \sin \alpha + M_{f3} - R_{z3}L_2 = 0.$$

С учетом уравнения (2) имеем:

$$R_{z1} = \frac{R_{z3}(L_2 + fr_d) - P_w H_c - mg H_c \sin \alpha - m\dot{V}H_c}{L_1 + fr_d},$$

$$R_{z3} = mg \cos \alpha - R_{z1}.$$

Сила сопротивления воздуха определяется соотношением:

$$P_w = F_{\text{лоб}} c_x \rho_w \frac{V^2}{2},$$

где $F_{\text{лоб}} = 3,74 \text{ м}^2$ – площадь лобового сечения электробуса; $c_x = 0,7$ – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\rho_w = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.

Реализация математической модели в пакете MATLAB-Simulink

Решение системы уравнений (1) производится в математическом пакете MATLAB-Simulink, в котором была создана соответствующая блок-схема.

Для моделирования тягового электродвигателя используется блок 2-D Lookup Table (рис. 2), выходными данными которого является крутящий момент $M_{дв}$ при заданной частоте вращения и управляющем воздействии. В зависимости от того, происходит разгон (управляющее воздействие – положительное) или торможение двигателем (управляющее воздействие – отрицательное), знак крутящего момента на выходе из блока изменяется.

Блок-схема в MATLAB-Simulink для моделирования движения электробуса представлена на рис. 3.

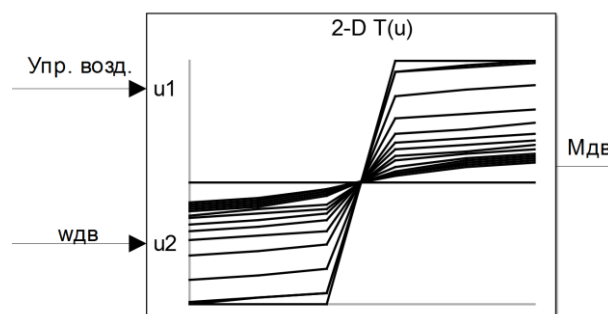


Рис. 2. Математическая модель двигателя

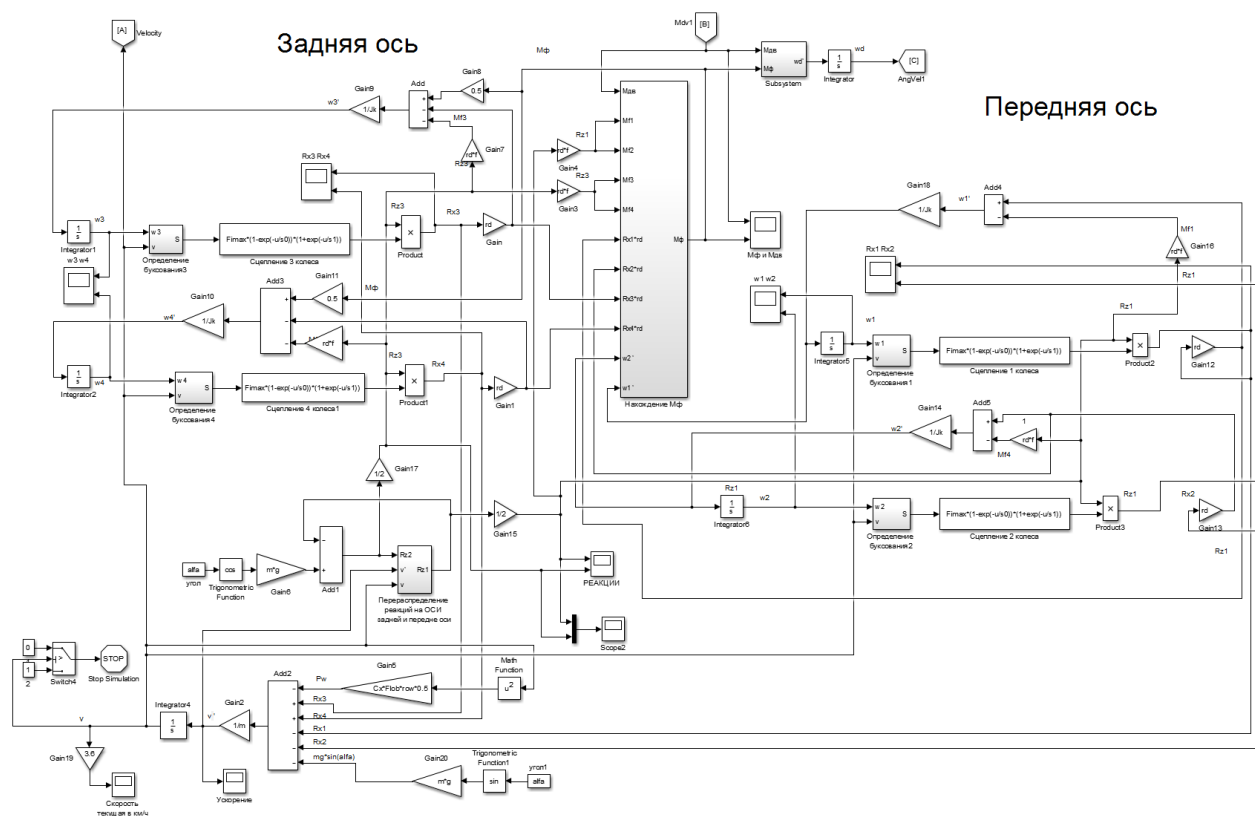


Рис. 3. Блок-схема MATLAB-Simulink для решения уравнений движения электробуса

Очевидно, что энергозатраты электробуса и, следовательно, величина автономного хода, в значительной мере зависят от режима его движения, т.е. от эксплуатационного цикла.

В идеальном случае получение такого эксплуатационного цикла возможно по результатам режимометрирования автобусов или троллейбусов, эксплуатирующихся на маршрутах, на которых планируется использовать электробус. Применение такого подхода позволяет наиболее точно определить энергозатраты на движение, но является очень трудоемким и ориентированным на определенный маршрут. Поэтому в данной работе для оценки энергозатрат на ранних этапах проектирования предлагается использовать типовой городской ездовой цикл Urban Artemis driving cycle [7], который был разработан в результате европейского исследовательского проекта ARTEMIS в 2004 г. Цикл основан на обширном статистическом исследовании, проведенном в Европе, и предназначен, в первую очередь, для оценки загрязнения окружающей среды отработавшими газами. В этом цикле учитываются различные режимы движения ТС в городе: в плотном потоке, на свободной дороге, в пробке с остановками, в пробке с низкими скоростями движения и т.д. Дистанция данного цикла составляет 4874 м, время – 993 с, средняя скорость – 17,7 км/ч, максимальная скорость – 57,3 км/ч. График скорости для данного цикла изображен на рис. 4.

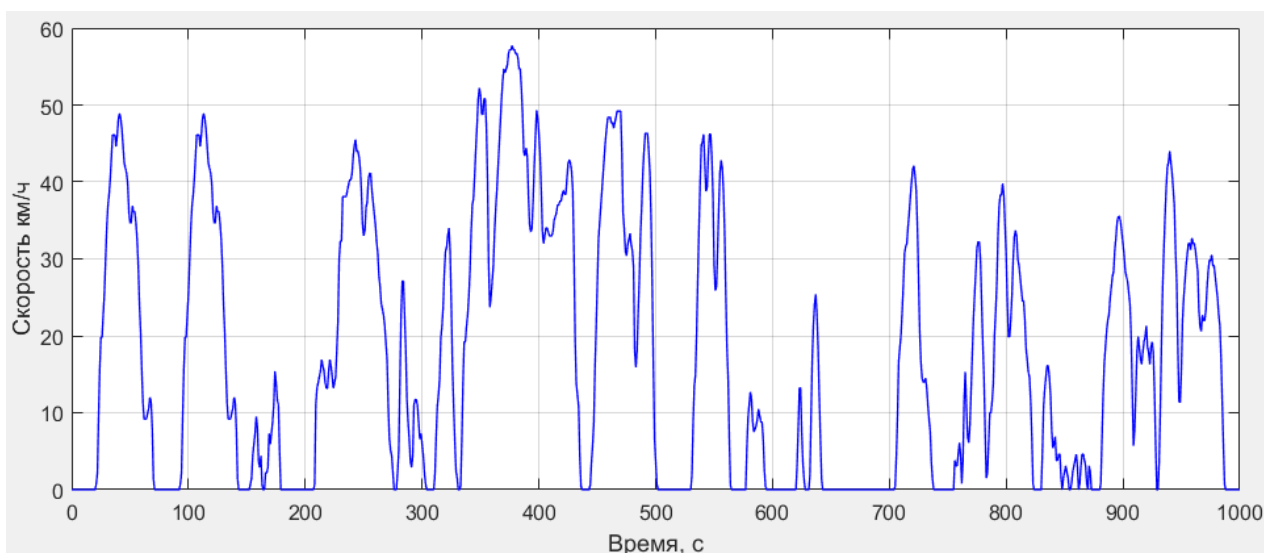


Рис. 4. Городской ездовой цикл Urban Artemis

Для моделирования цикла в MATLAB-Simulink используется блок Driving Cycle, который доступен для скачивания на сайте компании MathWorks [5].

Для того, чтобы обеспечить движение моделируемого электробуса в соответствии с указанным циклом, была разработана простейшая модель «водителя», представляющая собой следящую систему управления с ПД-регулятором (см. рис. 5). Цель следящей системы – управлять электродвигателем ТС таким образом, чтобы обеспечить минимальное отклонение его скорости от заданной в цикле величины. Выполненная настройка параметров ПД-регулятора обеспечивает незначительное расхождение указанных значений (рис. 6).

При проведении вычислительных экспериментов с разработанной ММ движения электробуса были заданы параметры ТС и тягового электродвигателя, приведенные в таблице 2. За основу числовых значений взяты параметры современного низкопольного автобуса ЛИАЗ-5292 и тягового электродвигателя производства фирмы Siemens.

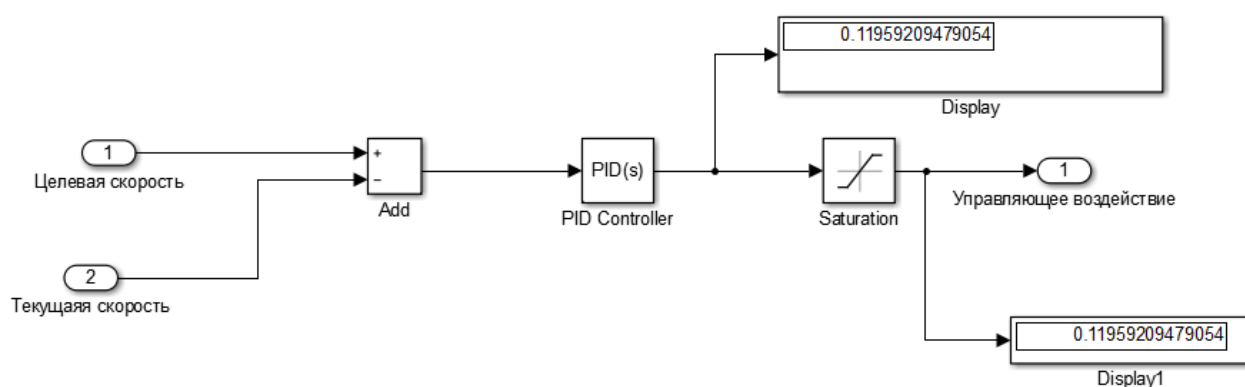


Рис. 5. Блок-схема подсистемы «Водитель»

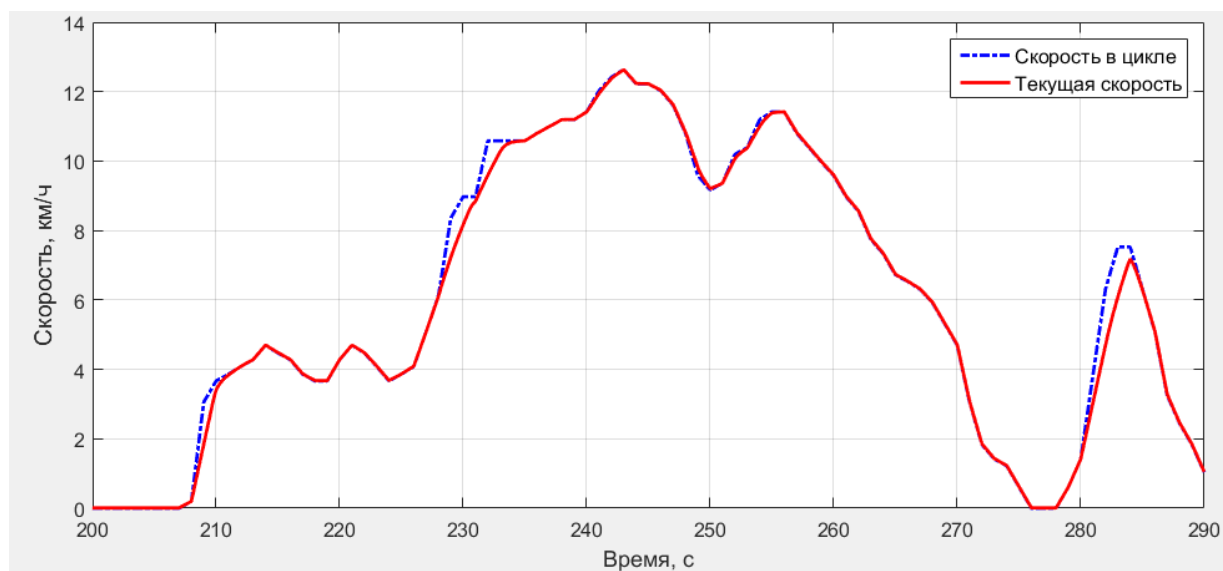


Рис. 6. Отклонение текущей скорости электробуса от заданной в цикле

Таблица 2. Параметры математической модели

Масса, кг	18000
Передаточное число главной передачи	6,21
Радиус колеса, м	0,464
Площадь поперечного сечения, м ²	3,74
База, м	5,96
Высота центра тяжести относительно ОП, м	1,0
Мощность электродвигателя, кВт	160
Максимальный момент электродвигателя, Н·м	2500
Максимальная частота вращения электродвигателя, об/мин	3500

Результаты математического моделирования

Для оценки необходимой емкости накопителя необходимо определить, какая энергия затрачивается при движении электробуса в городском цикле на 1 км пройденного пути. Эту энергию можно определить, проинтегрировав мгновенную мощность тягового электродвигателя по времени на тех временных участках, на которых $M_{дв} > 0$:

$$A_p = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} \omega_{\text{дв}}(t) M_{\text{дв}}(t) dt}{L_{\text{ц}}},$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла, $L_{\text{ц}}$ – дистанция цикла.

Для оценки потенциальных возможностей рекуперации энергии можно определить энергию, затрачиваемую на торможение при движении электробуса в городском цикле на 1 км пройденного пути:

$$A_{\text{т}} = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} \omega_{\text{дв}}(t) |M_{\text{дв}}(t)| dt}{L_{\text{ц}}}.$$

В последней формуле интеграл берется на тех участках, на которых $M_{\text{дв}} \leq 0$.

В результате моделирования были получены следующие значения энергий на 1 км пути:

$$A_p = 7,343 \text{ МДж} = 2,04 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$A_t = 3,993 \text{ МДж} = 1,11 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При переходе от энергии, затрачиваемой на движение, к необходимой энергоемкости накопителя нужно учесть следующие факторы: механический КПД электродвигателя и трансмиссии, КПД электрического преобразователя постоянного тока в переменный, затраты энергии накопителя на привод дополнительного оборудования (насос ГУР, компрессор тормозной системы, компрессор кондиционера, вентиляторы системы охлаждения, светотехника и т.д.). Последний фактор достаточно трудно учесть расчетным путем – необходимо проведение экспериментальных исследований. Следует также отметить, что некоторая часть энергии торможения может быть рекуперирована, т.е. возвращена в накопитель.

Приближенно примем, что общий КПД преобразования электрической энергии накопителя в механическую энергию составляет 85%, доля затрат на дополнительные потребители составляет 10% от энергии, затрачиваемой на движение, а доля рекуперированной энергии торможения составляет 30%. В этом случае получим значение энергии необходимой для движения в городском цикле на 1 км пути

$$A_n = 8,305 \text{ МДж} = 2,31 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следовательно, для обеспечения автономного хода электробуса в 100 км необходимая энергоемкость составляет:

$$A_{n100} = 830,5 \text{ МДж} = 231 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Сравнивая полученные результаты расчетов с данными по накопителям существующих электробусов, приведенными в таблице 1, можно отметить, что расчетное значение затрат энергии на движение в городском цикле несколько выше значений, указываемых производителями электробусов той же полной массы. Это может быть связано с тем, что производители в рекламных целях указывают величину автономного хода, измеренную в идеальных условиях – движение с постоянной скоростью с минимумом остановок и разгонов, минимальным количеством дополнительных потребителей и т.д.

Заключение

Предложенный расчетный метод, основанный на имитационном моделировании, позволяет на ранних этапах проектирования определить необходимую энергоемкость накопителя городского автобуса, зная его массогабаритные характеристики, параметры тягового электродвигателя и необходимый автономный ход.

Список литературы

- [1]. Агентство московских городских новостей: сайт. Режим доступа: <http://www.mskagency.ru/materials/1616967> (дата обращения 6.11.2016).
- [2]. Миронова Д., Сарджвеладзе С. В столице посчитают реальное количество машин, чтобы оценить вредные выбросы: сетевое издание «m24.ru». Режим доступа: <http://www.m24.ru/articles/60963> (дата обращения 6.11.2016).
- [3]. Распопова А., Караваев К. При Собяnine легче дышится: «газета.ру». Режим доступа: https://www.gazeta.ru/auto/2014/06/05_a_6060569.shtml (дата обращения 6.11.2016).
- [4]. Котиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А. Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. №1(48). С. 50-54
- [5]. Driving Cycle (Simulink Block). Режим доступа: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle--simulink-block-?s_tid=srchtitle&requestedDomain=www.mathworks.com (дата обращения 6.11.2016).
- [6]. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 391 с.
- [7]. André M. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. // Science of The Total Environment. 2004. Vol. 334-335. P. 73-84.