

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПНЕВМОСИСТЕМЫ СОЧЛЕНЕННОГО ЭЛЕКТРОБУСА ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.С. Рубанов¹

rubanov_ps@bk.ru

Р.Б. Гончаров²

goncharov.roman@bmstu.ru

Г.И. Скотников²

skotnikovg@bmstu.ru

¹ ООО «ИЦ «КАМАЗ», Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Для городского электротранспорта, активно развивающегося в настоящее время, важно рациональное потребление электроэнергии, перевозимой на борту. Особенно это актуально для электробусов. Оптимизация электропотребления транспортного средства способствует увеличению запаса его хода, тем самым сокращая число подзарядок при движении на маршрутах и повышая эффективность эксплуатации. Одной из систем электробуса, потребляющих электроэнергию, является пневмосистема (в частности, компрессор), для которой в рамках проведенного исследования определен энергоэффективный режим работы на типовом маршруте. Компрессор — это ключевой элемент, обеспечивающий функционирование пневматического привода тормозных механизмов, а также системы подрессоривания, отвечающей за удобство посадки–высадки пассажиров за счет наклона кузова в сторону посадки людей. Расчет проведен аналитически и с применением математического моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink. С помощью математических моделей пневмосистемы и движения электробуса определены средний расход воздуха, изменение давления, время работы, число включений компрессора и количество потребляемой им энергии. При выполнении численных расчетов исследовано влияние увеличения объема пневмосистемы и рабочего давления на число включений компрессора, время его работы и потребление электроэнергии.

Ключевые слова

Электробус, пневмосистема, энергоэффективность, пневмокомпрессор, математическая модель

гии. Полученные результаты могут быть применены при разработке пневмосистемы, отвечающей требованиям энергоэффективности электробуса	Поступила 13.10.2023 Принята 19.01.2024 © Автор(ы), 2024
--	--

Введение. С развитием городского электротранспорта повышается необходимость в улучшении его энергоэффективности, что достигается увеличением точности моделирования рабочих процессов [1–10], оптимизацией законов управления [11–14] и уменьшением энергопотребления компонентов, используемых на данном виде транспорта [15–18]. В настоящей работе проводится моделирование пневмосистемы сочлененного электробуса при различных режимах работы пневмокомпрессора во время движения для определения наиболее энергоэффективного варианта использования. Расчет состоит из двух независимых математических моделей, реализованных в программном комплексе MATLAB Simulink.

Первая математическая модель, описывающая движение сочлененного электробуса, вычисляет тормозные моменты, прикладываемые к колесам автобуса во время торможения [19]. В этой модели учитывается маршрут движения, перераспределение реакции по осям в процессе движения, рекуперация энергии и торможение за счет электродвигателей [20].

Вторая математическая модель имитирует работу пневмосистемы, по полученным тормозным моментам вычисляет расход воздуха, давление в пневмосистеме, время работы компрессора, число включений и энергопотребление компрессора.

При моделировании приняты следующие допущения:

- «приседание» сочлененного электробуса со стороны одного борта и работа стояночной тормозной системы фиксируются только на остановках;
- движение сочлененного электробуса прямолинейное, реакции под колесами одной оси равны;
- производительность компрессора постоянная и не зависит от противодавления в контуре;
- электродвигатель привода компрессора работает на номинальном режиме;
- время включения электродвигателя компрессора не учитывается;
- все контуры пневмосистемы объединены в один, это следует из принципа работы четырехконтурного защитного клапана, контуры разъединяются при давлении менее 0,55 МПа;
- работа систем ABS не учитывается;
- все процессы изотермические и адиабатные;
- утечки воздуха не учитываются.

Режимы работы компрессора в составе пневмосистемы электробуса во время движения. Для определения наиболее энергоэффективного режима использования компрессора в пневмосистеме сочлененного электробуса рассмотрены следующие варианты:

- параметры пневмосистемы сочлененного электробуса стандартные;
- объем пневмосистемы увеличен на 30 % вследствие увеличения числа ресиверов;
- рабочее давление в пневмосистеме увеличено до 9 атм;
- при рабочем давлении 9 атм давление включения компрессора снижено до 7 атм;
- при стандартных параметрах пневмосистемы давление включения компрессора уменьшено до 6 атм.

Данные режимы рассматриваются, чтобы определить влияние объема пневмосистемы, значений рабочего давления и давления включения компрессора на энергоэффективность пневмосистемы.

Параметры пневмосистемы сочлененного электробуса. Для питания потребителей пневмосистемы сжатым воздухом служит винтовой компрессор АКВ-0,4-3-Е с электродвигателем АИР100S2У3 IM2181 (4 кВт, 3420 мин⁻¹, 380 В, 60 Гц).

Основные технические характеристики компрессора и пневмосистемы

Производительность, м ³ /мин	0,44
Максимальное давление нагнетания, МПа	0,9
Давление отключения, МПа	0,8
Рабочее давление, атм	8
Число контуров	4
Суммарный объем, м ³	0,21

Модуль подготовки воздуха осушает воздух, поступающий из компрессора, и разделяет его на четыре контура питания: пневматических баллонов стояночных тормозных механизмов и вспомогательного оборудования; задних, средних и передних рабочих тормозных механизмов.

Для хранения сжатого воздуха на борту сочлененного электробуса используются воздушные баллоны объемом 21 л каждый. Контур питания системы подрессоривания и вспомогательного оборудования состоит из трех баллонов, контуры питания задних, средних и передних рабочих тормозных механизмов состоят из двух баллонов каждый, в контуре питания стояночной тормозной системы имеется один баллон.

В качестве рабочих тормозных механизмов на всех осях сочлененного электробуса используются дисковые тормоза.

Стояночная тормозная система сочлененного электробуса включает в себя передние и задние рабочие тормозные механизмы, четыре энергоаккумулятора, кран управления и ресивер. При движении на маршруте водитель использует стояночные тормозные механизмы только на остановках. Для затормаживания стояночной тормозной системы транспортного средства требуется выпустить воздух в атмосферу, для растормаживания требуется наполнить ресиверы сжатым воздухом. Объем одного энергоаккумулятора равен $0,0035 \text{ м}^3$.

На сочлененном электробусе на всех осях применяется пневматическая зависимая подвеска. В конструкции передней подвески применяются два пневматических упругих элемента рукавного типа Vibracoustic V1E25, по одному на каждое колесо. Деформация пневматического баллона от положения, соответствующего статическому прогибу, до касания буфера сжатия составляет 80 мм. Наружный диаметр резинокордной оболочки 310 мм.

В средней и задней системах поддрессоривания используется по четыре пневматических упругих элемента рукавного типа Vibracoustic V1E26a, по два на каждое колесо. Деформация пневматического баллона от положения, соответствующего статическому прогибу, до касания буфера сжатия, составляет 85 мм. Наружный диаметр резинокордной оболочки равен 325 мм. Расчетная схема пневматического упругого элемента приведена на рис. 1.

Исходные данные пневматического упругого элемента приведены в таблице.

Основные характеристики пневматического упругого элемента

Характеристика	Упругий элемент	
	Передний	Задний
Диаметр цилиндра резинокордной оболочки $D_{\text{рез}}$, м	0,300	0,320
Высота цилиндра резинокордной оболочки при статической нагрузке $H_{\text{рез}}$, м	0,160	0,160
Диаметр цилиндра дополнительного объема $d_{\text{доп}}$, м	0,225	0,225

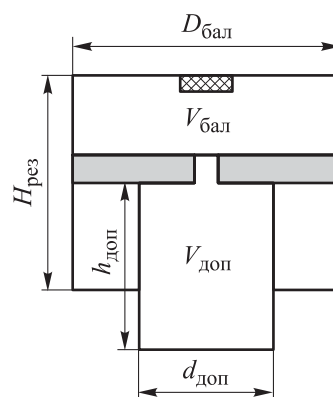


Рис. 1. Расчетная схема пневматического упругого элемента

Окончание таблицы

Характеристика	Упругий элемент	
	Передний	Задний
Высота цилиндра дополнительного объема $h_{\text{доп}}$, м	0,115	0,130
Деформация пневматического баллона от статического положения до буфера $h_{\text{буф}}$, м	0,080	0,085
Деформация пневматического баллона при изменении положения кузова для загрузки и выгрузки пассажиров h_0 , м	0,06	0,068
Число пневматических баллонов на одну сторону $N_{\text{бал}}$, шт.	1	4
Объем пневматического баллона $V_{\text{бал}}$, м ³	0,004	0,0048

Последовательность расчета потребления воздуха в пневмосистеме сочлененного электробуса. Для оценки затрат воздуха необходимо определить:

- усилия в тормозных камерах рабочей тормозной системы и затрачиваемую при этом массу сжатого воздуха;
- массу воздуха, затрачиваемую на подъем правого борта после окончания остановки на маршруте;
- массу воздуха, затрачиваемую на растормаживание энергоаккумуляторов стояночной тормозной системы после окончания остановки на маршруте.

Принцип работы тормозных камер заключается в следующем: при нажатии на педаль тормоза открывается клапан (со следящим действием), соединяющий пневматический баллон с тормозной камерой, при отпуске педали тормоза воздух из тормозной камеры и подводящих трубок выпускается в атмосферу. Потерю этой массы компенсирует компрессор. Сложность определения тормозного момента заключается в том, что в процессе моделирования значение момента непостоянно.

При моделировании движения электробуса математическая модель позволяет определить суммарный тормозной момент, необходимый для обеспечения замедления. Распределение тормозных моментов по колесам электробуса принимаем пропорционально нормальным реакциям, действующим на колеса электробуса:

$$M_{k_i} = \frac{M_{\Sigma} Q_i}{\sum_i Q_i}, \quad (1)$$

где M_{Σ} — суммарный тормозной момент на оси электробуса; Q_i — нормальная реакция, действующая со стороны опорной поверхности на колеса электробуса.

Для определения требуемого усилия, создаваемого в рабочей тормозной камере, воспользуемся известной методикой [15, 16].

Тормозной момент на колесе равен тормозному моменту, создаваемому тормозным механизмом:

$$M_{k_i} = M_{T_i} = n_{\text{кол}} F_{\tau_i} r_{\text{тр}} = n_{\text{кол}} F_i \mu r_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где M_{T_i} — тормозной момент, создаваемый тормозным механизмом; $n_{\text{кол}}$ — число тормозных колодок в одном тормозном механизме; F_{τ_i} — суммарная сила трения, возникающая между тормозным диском и колодкой;

$$r_{\text{тр}} = \frac{2}{3} \frac{r_{\text{н}}^3 - r_{\text{в}}^3}{r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2} \quad (3)$$

— приведенный радиус трения: $r_{\text{н}} = 0,5D$ — наружный радиус тормозного диска; $r_{\text{в}} = 0,5d$ — внутренний радиус тормозного диска; F_i — сила, приложенная к тормозным колодкам по нормали к ним; μ — коэффициент трения пары фрикционная колодка–тормозной диск.

Сила, сжимающая колодки, создается в тормозных камерах и рассчитывается так:

$$F = F_{\text{ш}} U_{\text{т.п}} = p S_{\text{т.к}} U_{\text{т.п}}, \quad (4)$$

где $F_{\text{ш}}$ — сила штока тормозной камеры; $U_{\text{т.п}}$ — передаточное число привода; p — давление воздуха в тормозной камере; $S_{\text{т.к}}$ — активная площадь мембраны камеры.

Необходимый объем сжатого воздуха на одно торможение определяется по формуле

$$V = \Delta S_{\text{т.к}} U_{\text{т.п}}, \quad (5)$$

где Δ — суммарный зазор в приводе тормозных механизмов.

Необходимое давление в тормозной камере вычисляется исходя из силы штока $F_{\text{ш}}$ по формуле

$$p = 148\,285 + \frac{1,1 F_{\text{ш}}}{0,155}. \quad (6)$$

Зависимости силы штока $F_{\text{ш}}$ от давления приведены на рис. 2.

Воздух является сжимаемой средой, объемный расход воздуха зависит от давления в системе, которое не является постоянным при работе пневмосистемы, следовательно, расчет должен проводиться с учетом закона

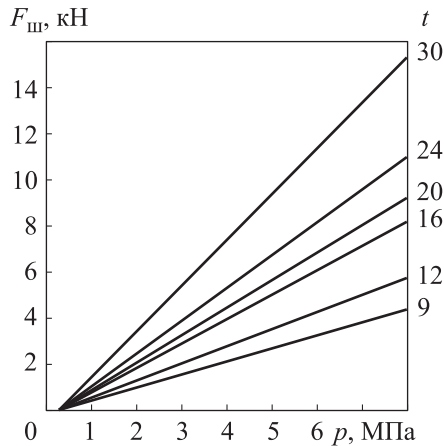


Рис. 2. Зависимости силы штока от давления в пневмосистеме

сохранения массы для получения адекватных результатов. Для создания нужного давления в тормозной камере определяется массовый расход воздуха по формуле:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R'T}{V} (Q_{\text{вх}}^m + Q_{\text{вых}}^m), \quad (7)$$

где $R' = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ — газовая постоянная для воздуха; $T = 293 \text{ К}$ — температура; V — объем системы; $Q_{\text{вх}}^m$ и $Q_{\text{вых}}^m$ — массовые расходы воздуха, входящего и выходящего из системы.

Расход входящего воздуха вычисляется как

$$Q_{\text{вх}}^m = C_v \sqrt{p_{\text{треб}} - p_{\text{т.к}}}. \quad (8)$$

Расход выходящего воздуха определяется по формуле (знак минус учитывает уменьшение количества воздуха камере):

$$Q_{\text{вых}}^m = -C_v \sqrt{|p_{\text{треб}} - p_{\text{т.к}}|}. \quad (9)$$

Здесь C_v — коэффициент, отвечающий за скорость наполнения и опустошения системы (в реальной конструкции площадь проходного сечения); $p_{\text{треб}}$ — требуемое давление воздуха в тормозных камерах; $p_{\text{т.к}}$ — текущее давление воздуха в тормозных камерах.

Наполнение пневмосистемы воздухом вычисляется по формуле массового расхода компрессора:

$$Q^m = Q\rho, \quad (10)$$

где Q — объемный расход компрессора; $\rho = 1,204 \text{ кг}/\text{м}^3$ — плотность воздуха при нормальных условиях.

Масса воздуха, затрачиваемая на подъем правого борта и на растормаживание энергоаккумуляторов стояночной тормозной системы, считается аналогично по формулам (7)–(9).

Описание математических моделей. Модель движения сочлененного электробуса в программе MATLAB [7] приведена на рис. 3. В представленной модели реализован расчет тормозных моментов, необходимых для замедления электробуса, которые возникают при движении по реальному

маршруту. Тормозные моменты рассчитываются исходя из необходимого замедления (степени нажатия на педаль тормоза) и перераспределения вертикальных реакций в пятне контакта на колесах сочлененного электробуса.

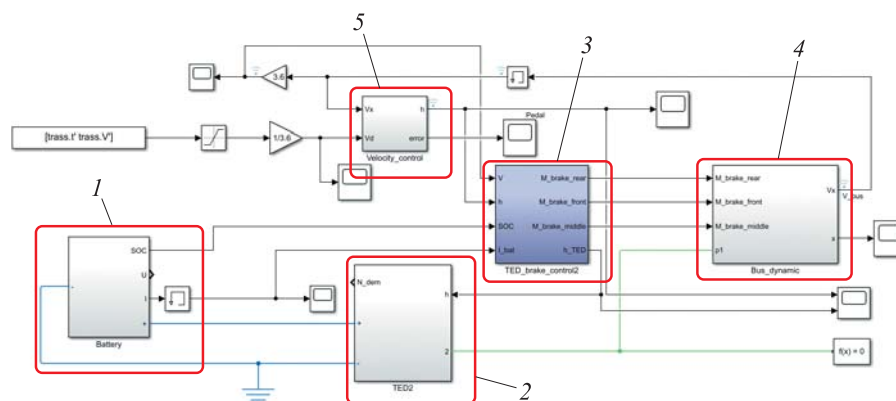


Рис. 3. Блок-схема математической модели движения сочлененного электробуса:

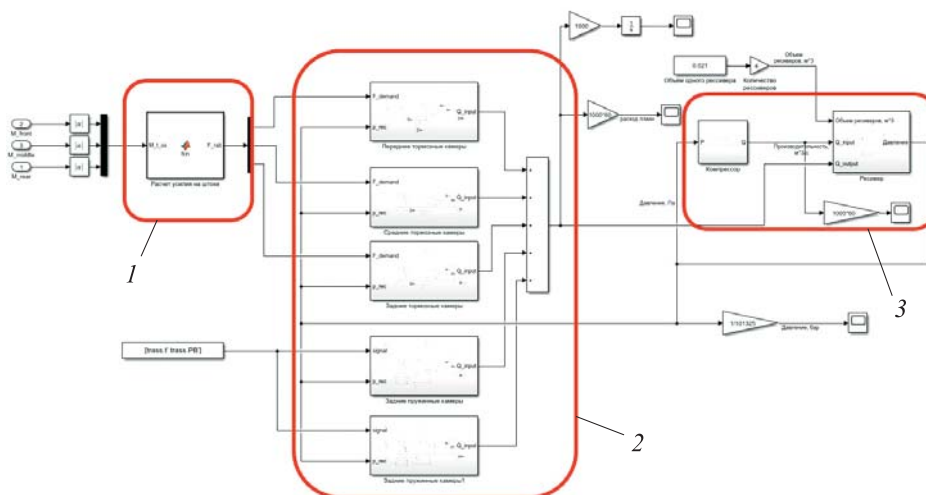
1 — блок моделирования тяговой батареи; 2 — блок электродвигателя; 3 — блок управления педалью газа; 4 — блок расчета динамики ТС; 5 — блок управления скоростью

Блок-схема математической модели пневмосистемы сочлененного электробуса приведена на рис. 4. Входными параметрами для расчета пневмосистемы являются тормозные моменты и таблица с указанием времени начала и продолжительности нахождения на остановке в процессе прохождения маршрута.

Данные собраны во время движения электробуса по реальному маршруту М2. Схема маршрута и карта распределения скорости электробуса на маршруте приведены на рис. 5. Полное время прохождения маршрута составляет 5625 с. В приведенной схеме можно выделить подсистемы: расчет усилий на штоке пневмокамеры, расчет требуемых расходов тормозных систем (рабочая и стояночная) и системы наклона кузова в сторону дверей при посадке и высадке пассажиров. Расчет давления в системе проводился с учетом работы компрессора.

Блок-схема математической модели расчета необходимого давления и расхода сжатого воздуха для привода тормозных механизмов реализуют формулы (7)–(9). Блок «Тормозная камера» содержит функцию, которая позволяет рассчитать давление воздуха по формуле (6), требуемое для торможения при известной силе штока тормозной камеры.

Блок-схемы для энергоаккумуляторов стояночной тормозной системы и пневматических баллонов системы подпрессоривания реализованы по схожему принципу. Отличие заключается в начальном давлении в системе.



1 — блок определения сил штока; 2 — блок моделирования тормозных камер;
3 — блок моделирования компрессора и ресиверов

$$A = \int \sqrt{3} I(t) U dt, \quad (11)$$

С помощью приведенной математической модели выполнены расчеты для пяти режимов работы пневмосистемы при движении сочлененного электробуса по реальному маршруту. Основываясь на результатах исследования, можно сделать следующие выводы:

120 ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2024. № 4

25,3 % времени прохождения маршрута; затрачиваемая электрическая энергия 6440 кДж; число включений компрессора 33;

- уменьшение давления включения компрессора до 6 атм приводит к уменьшению на 9 % времени его работы, до 1292 с; затрачиваемая электрическая энергия 5000 кДж; число включений компрессора 16;

- увеличение на 30 % объема системы приводит к уменьшению на 3 % времени работы компрессора, до 1378 с; затрачиваемая электрическая энергия 5878 кДж; число включений компрессора 26;

- увеличение рабочего давления до 9 атм (8 атм — нижний порог включения компрессора) приводит к увеличению на 23 % времени работы компрессора, до 1757с; затрачиваемая электрическая энергия 7485 кДж; число включений компрессора 33;

- увеличение рабочего давления до 9 атм (7 атм — нижний порог включения компрессора) приводит к уменьшению на 1,5 % времени работы компрессора, до 1400 с; затрачиваемая электрическая энергия 4972 кДж; число включений компрессора 10.

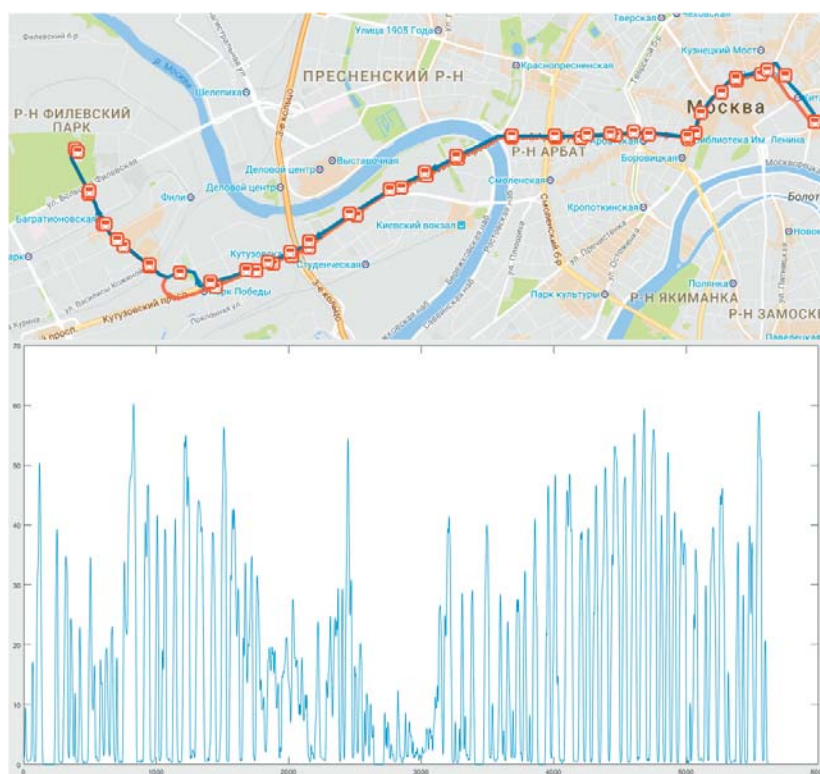


Рис. 5. Схема маршрута М2 и карта распределения скорости электробуса при движении

Графики изменения давления в пневмосистеме с увеличенным верхним порогом для случаев давления включения компрессора 8 и 7 атм приведены на рис. 6.

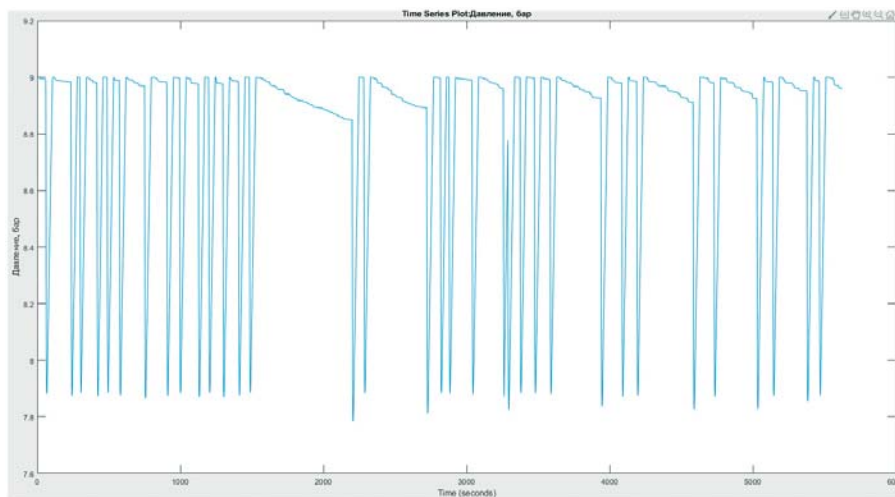
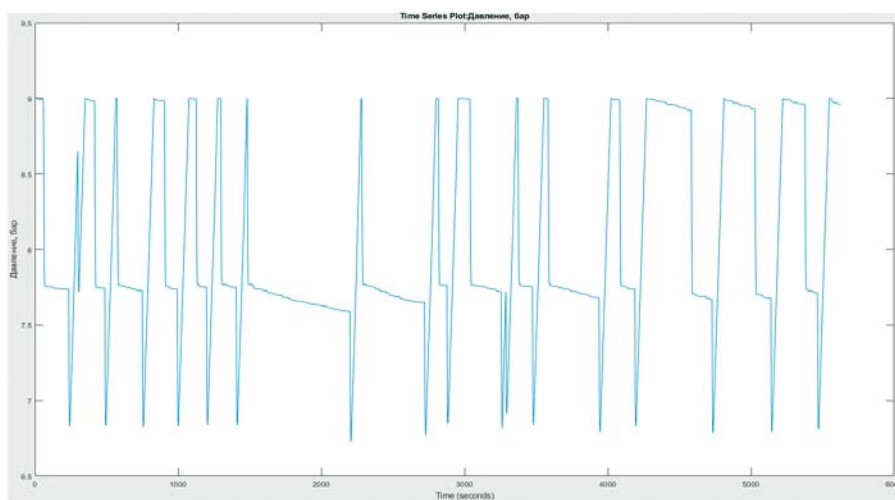
*а**б*

Рис. 6. Графики изменения давления в пневмосистеме при давлении включения компрессора 8 (а) и 7 атм (б)

Видно, что наибольшие потери воздуха в пневмосистеме происходят при остановке. Электробус приседает на один борт для посадки и высадки пассажиров и включает стояночную тормозную систему, выпуская воздух из пневматических баллонов системы подрессоривания и стояночных тормозных камер. В случае уменьшения нижнего порога давления вклю-

чения компрессора (до 7 атм) запаса воздуха достаточно для совершения двух остановок подряд без включения компрессора.

Заключение. В результате проведенной работы определено, что наиболее энергоэффективным вариантом использования пневмокомпрессора в пневмосистеме сочлененного электробуса является режим, в котором рабочее давление равно 9 атм, а давление включения компрессора составляет 7 атм. Потребляемая при этом энергия составляет 4972 кДж. Полученное значение на 22,8 % меньше, чем при стандартной конфигурации пневмосистемы. Наиболее неэффективным является использование компрессора в системе с рабочим давлением 9 атм и давлением включения 8 атм, потребляемая при этом энергия составляет 7485 кДж, что на 16,2 % превышает показатель при стандартных параметрах пневмосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поварехо А.С., Рахлей А.И. К выбору параметров разгрузочного устройства регулятора давления питающей части. В кн.: *Автотракторостроение и автомобильный транспорт*. Т. 1. Минск, БНТУ, 2021, с. 245–250. EDN: SDBBMZ
- [2] Рыжов Ю.Н., Трудко А.В., Тюрин А.В. и др. Сравнительный анализ гидравлических и пневматических систем. *Профессия инженер. Сб. ст. X Всерос. молодеж. науч.-практ. конф.* Орел, ОГАУ им. Н.В. Парахина, 2022, с. 100–106. EDN: HIDGRY
- [3] Черепицкий А., Хороманьский В., Козловский М. и др. Анализ проблемы при зарядке электрических автобусов городского транспорта. *Наука и техника*, 2020, т. 19, № 4, с. 349–355. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-349>
- [4] Мальшаков А.В. Имитационная модель закономерности влияния сезонных условий на надежность пневматической подвески автобусов. *Научное обозрение. Технические науки*, 2016, № 5, с. 81–83. EDN: XQVJRX
- [5] Коптелов О.Г. Эффект использования низкопольных автобусов на изменение времени посадки и высадки пассажиров. *Проблемы функционирования систем транспорта. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 2.* Тюмень, Тюменский индустриальный университет, 2016, с. 197–200. EDN: XRAMXT
- [6] Емельянов М.А., Газизуллин Р.Л., Бузунов Н.В. и др. Выбор рабочего ездового цикла для математического моделирования движения грузовых автомобилей и автобусов на тяговых аккумуляторных батареях с мехатронной трансмиссией. *Вестник УГАТУ*, 2022, т. 26, № 4, с. 103–112. EDN: EKEBAG
- [7] Petyukov A.V., Goncharov R.B., Gonsales Astua A.V. Numerical simulation of airbag module operating features. *AIP Conf. Proc.* 2023, vol. 2833, iss. 1, art. 020043. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0151985>

- [8] Жилейкин М.М., Климов А.В., Маслеников И.К. Алгоритм формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающий энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса. *Известия МГТУ МАМИ*, 2022, т. 16, № 1, с. 51–60.
DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-100232>
- [9] Жилейкин М.М., Климов А.В., Антонян А.В. Метод динамической оценки вертикальных нагрузок на оси и колеса электробуса большого класса. *Автомобильная промышленность*, 2022, № 11, с. 18–21. EDN: HVUZNF
- [10] Рубанов П.С., Гончаров Р.Б., Скотников Г.И. и др. Оценка влияния учета податливости рамы фронтального погрузчика на возникающие нагрузки в системе динамики твердых тел. *Известия МГТУ МАМИ*, 2023, т. 17, № 4, с. 401–409. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-472077>
- [11] Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., et al. Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulator. *Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2019, vol. 534, art. 012004.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/534/1/012004>
- [12] Косицын Б.Б. Экспериментальное исследование энергоэффективного закона управления движением электробуса на городском маршруте. *Журнал автомобильных инженеров*, 2017, № 5, с. 15–23. EDN: YURFCI
- [13] Бутарович Д.О., Косицын Б.Б., Котиев Г.О. Метод разработки энергоэффективного закона управления электробусом при движении по городскому маршруту. *Труды НАМИ*, 2017, № 2, с. 16–27. EDN: ZCSOZF
- [14] Косицын Б.Б., Котиев Г.О. Разработка энергоэффективного закона управления движением электробуса с использованием метода динамического программирования. *Будущее машиностроения России. Сб. докл. X Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*, 2017, с. 510–513. EDN: OAEINJ
- [15] Ермаков А.М., Салахов Р.Р., Данилов Э.Е. и др. Исследование эффективности работы климатической установки электробуса в холодное время года. *Грузовик*, 2023, № 2, с. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-2-14-20>
- [16] Маликов Р.Р., Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е. и др. Влияние работы климатической системы на удельный расход энергии электробуса категории М3. *Труды НАМИ*, 2022, № 1, с. 68–81.
DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-68-81>
- [17] Чикишев Е.М., Капский Д.В., Семченков С.С. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды. *Наука и техника*, 2021, № 1, с. 48–59.
EDN: SQTOPO
- [18] Schafer D., Lamantia M., Chen P. Modeling and spacing control for an electric vehicle with one-pedal-driving feature. *IEEE ACC*, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.23919/ACC50511.2021.9483356>

[19] Бутарович Д.О., Скотников Г.И., Эраносян А.В. Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*, 2022, № 4, с. 275–281.

DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281>

[20] Ле В.Н., Дам П.Х., Нгуен Ч.Х. и др. Исследование стратегии рекуперативного торможения электромобилей. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 2023, т. 66, № 2, с. 105–123.

DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>

Рубанов Павел Сергеевич — инженер-конструктор службы инженерных расчетов и моделирования ООО «ИЦ «КАМАЗ» (Российская Федерация, 143026, Москва, территория ИЦ «Сколково», Большой б-р, д. 62).

Гончаров Роман Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Скотников Глеб Игоревич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рубанов П.С., Гончаров Р.Б., Скотников Г.И. Определение энергоэффективных режимов работы пневмосистемы сочлененного электробуса путем математического моделирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 4 (151), с. 112–128. EDN: YSPGLG

**MATHEMATICAL SIMULATION IN DETERMINING
ENERGY-EFFICIENT MODES OF THE ARTICULATED ELECTRIC
BUS PNEUMATIC SYSTEM OPERATION**

P.S. Rubanov¹

rubanov_ps@bk.ru

R.B. Goncharov²

goncharov.roman@bmstu.ru

G.I. Skotnikov²

skotnikovg@bmstu.ru

¹ LLC KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The urban electric transport is actively developing nowadays all over the world. Therefore, rational power consumption on board becomes an important issue. This is especially true for the electric buses. Optimizing the vehicle power consumption helps to increase its range

Keywords

Electric bus, pneumatic system, energy efficiency, pneumatic compressor, mathematical model

making it possible to reduce the number of recharges in routes, thereby raising the operation efficiency. Pneumatic system (in particular, the compressor) is one of the electric bus power consuming systems. The paper determines an energy-efficient operation mode on a typical route as part of this study. Compressor is a key element that ensures functioning of the brake mechanisms pneumatic drive. Besides, suspension system plays an important role being responsible for convenience in the passengers boarding and disembarking due to the body tilt towards the boarding side. Analytical computation is performed using mathematical simulation in the MATLAB Simulink software package. Mathematical models of the electric bus pneumatic system and its motion are making it possible to determine the average air consumption, pressure alteration, operation time, number of compressor starts and the amount of energy consumed by it. Numerical computation allowed studying the effect of pneumatic system volume and operating pressure increase on the number of starts, compressor operation time and power consumption. The obtained results could be used in design and development of a pneumatic system that meets the electric bus energy efficiency requirements

Received 13.10.2023

Accepted 19.01.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Povarekho A.S., Rakhley A.I. [Mathematical model of the feeding part electropneumatic brake drive]. V kn.: *Avtotraktorostroenie i avtomobilnyy transport*. T. 1 [In: Automotive tractor construction and road transport]. Minsk, BNTU Publ., 2021, pp. 245–250 (in Russ.). EDN: SDBBMZ
- [2] Ryzhov Yu.N., Trudko A.V., Tyurin A.V., et al. [Comparative analysis of hydraulic and pneumatic systems]. *Professiya inzhener. Sb. statey X Vseros. molodezh. nauch.-prakt. konf.* [Engineer Profession. Proc. X Russ. Youth Sc.-Pract. Conf.]. Orel, OGAU im. N.V. Parakhina Publ., 2022, pp. 100–106 (in Russ.). EDN: HIDGRY
- [3] Cherepitskiy A., Khoromanskiy V., Kozlovskiy M., et al. Analysis of the problem of electric buses charging in urban transport. *Nauka i tekhnika* [Science & Technique], 2020, vol. 19, no. 4, pp. 349–355 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-349>
- [4] Malshakov A.V. Simulation model the regularities of the influence of seasonal conditions on the reliability of air suspension buses. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical Science], 2016, no. 5, pp. 81–83 (in Russ.). EDN: XQVJRX
- [5] Koptelov O.G. [Effect of using low-floor buses on changing the time of boarding and disembarking passengers]. *Problemy funktsionirovaniya sistem transporta. Mater. Mezhdunarodnogo nauchnoy konferentsii* [Problems of functioning of transport systems. Materials of the International Scientific Conference], 2019, no. 1, pp. 10–12 (in Russ.). EDN: XQVJRX

nar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. T. 2 [Problems of Transport Systems Functioning. Proc. Int. Sc.-Pract. Conf. of Students, Postgraduates and Young Scientists. Vol. 2]. Tyumen, Tyumenskiy industrialnyy universitet Publ., 2016, pp. 197–200 (in Russ.). EDN: XRAMXT

[6] Emelyanov M.A., Gazizullin R.L., Buzunov N.V., et al. Selection of a working driving cycle for mathematical modeling of the movement of trucks and buses on traction batteries with a mechatronic transmission. *Vestnik UGATU*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 103–112 (in Russ.). EDN: EKEBAG

[7] Petyukov A.V., Goncharov R.B., Gonsales Astua A.V. Numerical simulation of airbag module operating features. *AIP Conf. Proc.* 2023, vol. 2833, iss. 1, art. 020043. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0151985>

[8] Zhileykin M.M., Klimov A.V., Maslenikov I.K. Control signal algorithm of the accelerator pedal providing an effective energy consumption by an electrobus traction gear. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 51–60 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-100232>

[9] Zhileykin M.M., Klimov A.V., Antonyan A.V. Method of dynamic estimation of vertical loads on the axles and wheels of a large class electric bus. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2022, no. 11, pp. 18–21 (in Russ.). EDN: HVUZN

[10] Rubanov P.S., Goncharov R.B., Skotnikov G.I., et al. Assessment of influence of considering the flexibility of the front loader frame on the emerging loads in the multibody system. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 401–409 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321203>

[11] Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., et al. Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulator. *Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2019, vol. 534, art. 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/534/1/012004>

[12] Kositsyn B.B. Experimental study of the energy efficiency electric bus motion control law on the urban route. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2017, no. 5, pp. 15–23 (in Russ.). EDN: YURFCI

[13] Butarovich D.O., Kositsyn B.B., Kotiev G.O. A method for developing an energy-efficient law controlling the electric bus city route. *Trudy NAMI*, 2017, no. 2, pp. 16–27 (in Russ.). EDN: ZCSOZF

[14] Kositsyn B.B., Kotiev G.O. [Developing an energy efficient control law by the dynamic programming method for an electric bus]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii. Sb. dokl. X Vseros. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov* [The Future of Russian Engineering. Proc. X Russ. Conf. Young Scientists and Specialists]. Moscow, BMSTU Publ. 2017, pp. 510–513 (in Russ.). EDN: OAEINJ

[15] Ermakov A.M., Salakhov R.R., Danilov E.E., et al. Study of the efficiency of the climate control system of an electric bus in the cold season. *Gruzovik* [Truck], 2023, no. 2, pp. 14–20 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-2-14-20>

- [16] Malikov R.R., Biksaleev R.Sh., Karpukhin K.E., et al. Operation influence of the climate system on the specific energy consumption of M3 electric bus category. *Trudy NAMI*, 2022, no. 1, pp. 68–81 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-68-81>
- [17] Chikishev E.M., Kapskiy D.V., Semchenkov S.S. Assessment of transport, natural and climatic factors influence on the level of electric buses energy consumption in urban environment. *Science and Technology*, 2021, no. 1, pp. 48–59 (in Russ.). EDN: SQTOPO
- [18] Schafer D., Lamantia M., Chen P. Modeling and spacing control for an electric vehicle with one-pedal-driving feature. *IEEE ACC*, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.23919/ACC50511.2021.9483356>
- [19] Butarovich D.O., Skotnikov G.I., Eranosyan A.V. Regenerative braking control algorithm using the accelerator pedal. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, no. 4, pp. 275–281 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281>
- [20] Le V.N., Dam P.Kh., Nguen Ch.Kh., et al. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], 2023, vol. 66, no. 2, pp. 105–123 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>

Rubanov P.S. — Design Engineer, Engineering Calculations and Modeling Service, LLC KAMAZ Innovation Center (Bolshoy bulvar 62, Skolkovo Innovation Center Territory, Moscow, 143026 Russian Federation).

Goncharov R.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Skotnikov G.I. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Rubanov P.S., Goncharov R.B., Skotnikov G.I. Mathematical simulation in determining energy-efficient modes of the articulated electric bus pneumatic system operation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 4 (151), pp. 112–128 (in Russ.). EDN: YSPGLG