

**МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИИ
В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ****Д. Е. Ишимов^{1*}, Н. Н. Демидов¹, Е. Б. Седакова^{1,2}**¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* daniil_ishimov@mail.ru

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены основные схемы трансмиссий современных транспортных средств, проанализирована практика их использования крупными концернами в составе электромобилей. Показаны возможности и преимущества применения трансмиссий с изменяемым передаточным отношением, выделены основные проблемы, оказывающие влияние на эффективность электромобиля в целом. По результатам выполненных расчетов разработаны рекомендации, касающиеся выбора основных параметров трансмиссии электромобиля в зависимости от требований и условий эксплуатации. Составленные рекомендации направлены на повышение коэффициента полезного действия и улучшение тяговых характеристик транспортного средства электромобиля. В среде MatLab Simulink выполнена модельная оценка трансмиссии с нефиксированным передаточным отношением в составе транспортного средства с электрической силовой установкой и проведен анализ возможности применения такой трансмиссии. Предложена методика определения оптимальных параметров трансмиссии на основе разработанной модели транспортного средства в среде Simulink.

Ключевые слова: электромобиль, эффективность, параметры трансмиссии, тяговые характеристики, коэффициент полезного действия, трансмиссия с изменяемым передаточным числом

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

Ссылка для цитирования: Ишимов Д. Е., Демидов Н. Н., Седакова Е. Б. Модельная оценка возможности применения ступенчатой трансмиссии в электромобиле // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 837–843. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-837-843.

**MODEL ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING A STEPPED TRANSMISSION
IN AN ELECTRIC VEHICLE****D. E. Ishimov^{1*}, N. N. Demidov¹, E. B. Sedakova^{1,2}**¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

* daniil_ishimov@mail.ru

² Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract. The main transmission schemes of modern vehicles are considered, the practice of their use by large concerns as part of electric vehicles is analyzed. The possibilities and advantages of using transmissions with variable gear ratios are shown, and the main problems affecting the efficiency of an electric vehicle as a whole are highlighted. Based on results of calculations, recommendations are developed regarding the selection of the main parameters of the electric vehicle transmission, depending on the requirements and operating conditions. The recommendations are aimed at increasing the efficiency and improving the traction characteristics of an electric vehicle. In the MATLAB Simulink environment, a model evaluation of a transmission with an unfixed gear ratio as part of a vehicle with an electric power plant was performed and an analysis of the possibility of using such a transmission was carried out. A method for determining the optimal transmission parameters based on the developed vehicle model in the Simulink environment is proposed.

Keywords: electric vehicle, efficiency, transmission parameters, traction characteristics, efficiency, variable ratio transmission

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

For citation: Ishimov D. E., Demidov N. N., Sedakova E. B. Model assessment of the possibility of using a stepped transmission in an electric vehicle. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 837–843 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-837-843.

Введение. В настоящее время задача электрификации транспортных средств особо актуальна в связи с рядом преимуществ электродвигателя, по сравнению с классическим двигателем внутреннего сгорания, к которым относятся высокий и ровный вращающий момент, доступный с малых оборотов, пиковый коэффициент полезного действия (КПД), достигающий 99 %, меньшие габариты силовой установки при сравнимой выдаваемой мощности, экологическая безопасность [1–3]. Таким образом, применение электродвигателя в качестве основного тягового агрегата для транспортных средств может обеспечить труднодостижимые для классических автомобилей потребительские характеристики.

Однако транспортные средства с электродвигателем в качестве основной тяговой установки имеют ряд недостатков, к которым следует отнести сложность и неэффективность современных способов генерации и аккумуляции энергии, узкий диапазон высоких значений КПД [4]. В реальных условиях эксплуатации вышеперечисленные недостатки становятся комплексной проблемой для владельцев электромобилей. Для устранения указанных недостатков представляется эффективным использование многоступенчатых трансмиссий [5].

Цель исследований состоит в обосновании возможности применения в составе электромобиля многоступенчатой коробки переключения передач (КПП), позволяющей изменять передаточное отношение, а также в определении основных параметров многоступенчатой трансмиссии для эффективного использования характеристик двигателя.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели были использованы современные системы инженерного анализа (CAE). На рис. 1 представлен фрагмент схемы трансмиссии автомобиля, разработанной для имитационного моделирования движения в среде Simulink: блок TorqueConverter — гидротрансформатор, блок TransmissionRatio — механическая часть КПП с изменяемым, в зависимости от требуемого режима, числом передач.

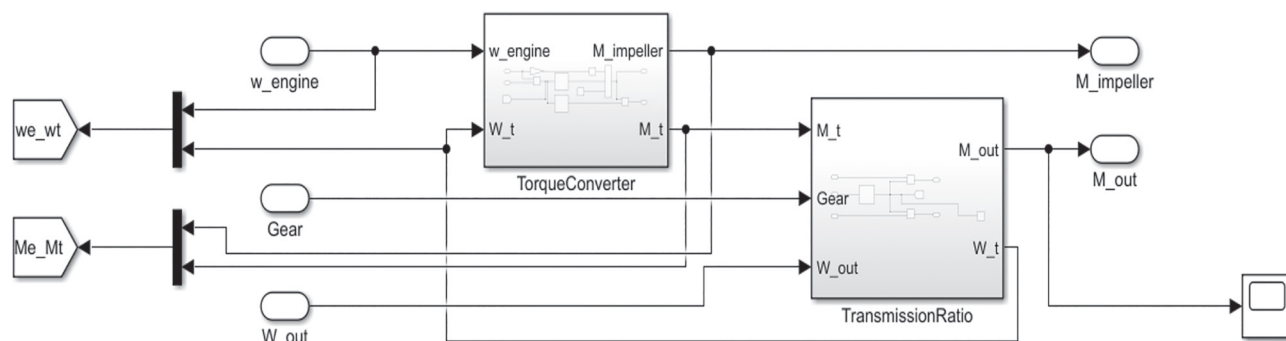


Рис. 1

Входными параметрами для имитационного моделирования по схеме рис. 1 являлись: число оборотов двигателя — w_{engine} , номер передачи — Gear , количество оборотов выходного вала коробки передач — W_{out} . В качестве выходных параметров регистрировались величины вращающих моментов на насосном колесе гидротрансформатора — M_{impeller} и на выходном валу КПП — M_{out} . Остальные выходные переменные (w_{wt} — обороты турбинного колеса, M_{wt} — момент турбинного колеса гидротрансформатора) служили данными для системы управления КПП.

Известно, что электродвигатель постоянного тока характеризуется широким диапазоном рабочих оборотов, это создает возможность применения многоступенчатых трансмиссий [2]. Однако в основном применяемые трансмиссии имеют фиксированное передаточное отношение, что ограничивает тяговые характеристики электромобиля. Для обоснования введения в

трансмиссию функции изменения передаточного отношения в среде MatLab [6] проведены сравнительные тяговые расчеты для нескольких классов транспортных средств: А — миниавтомобили, Е — автомобили бизнес-класса и J — кроссоверы и внедорожники. Транспортные средства были подобраны так, чтобы полезная мощность их силовой установки была схожей. При выборе электродвигателя в качестве базовых были взяты характеристики автомобиля Е-класса BMW E34 525, полезная мощность которого, по результатам тягового расчета, составила 160 кВт [5, 6]. Таким образом, был подобран общий для всех автомобилей-прототипов электродвигатель с характеристиками, приведенными на рис. 2. По результатам моделирования трансмиссии составлена карта значений КПД выбранного применяемого в современных электромобилях двигателя мощностью 160 кВт, фрагмент которой приведен на рис. 2 (пиковое значение КПД для данного двигателя выделено белой рамкой).

Torque (Nm) Speed (rpm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
500	64,66	71,35	72,93	73,39	73,36	73,63	73,78	72,93	72,5	72,25	71,77	71,65	71,52	70,52	70,24
1000	74,3	80,49	81,75	82,56	82,55	82,55	82,81	82,47	82,13	82,01	81,71	81,56	81,34	80,69	80,68
1500	77,19	83,4	85,09	86,06	86,35	86,59	86,38	86,4	86,16	85,78	85,46	85,6	85,53	85,33	84,83
2000	78,03	84,79	86,86	87,84	88,07	88,36	88,3	88,33	88,3	88,14	88,13	87,98	87,7	87,73	87,49
2500	78,95	85,63	87,82	88,79	89,2	89,36	89,51	89,56	89,53	89,36	89,36	89,29	89,22	89,04	88,89
3000	79,15	86,09	88,49	89,39	89,94	90,22	90,32	90,48	90,33	90,42	90,17	90,25	90,24	90,05	89,84
3500	79,57	86,57	88,9	89,81	90,39	90,67	90,93	91,06	91	91,02	90,96	90,99	90,79	90,81	90,62
4000	79,36	86,79	89,15	90,24	90,8	91,25	91,38	91,45	91,47	91,43	91,46	91,53	91,33	91,4	91,2
4500	79,04	86,76	89,22	90,56	91,13	91,46	91,77	91,89	91,95	92	92	91,99	91,87	91,81	91,74
5000	78,67	86,92	89,53	90,65	91,42	91,79	92,21	92,13	92,18	92,36	92,29	92,31	92,22	92,44	92,18
5500	79,51	87,08	89,83	90,91	91,74	92,13	92,15	92,36	92,75	92,6	92,96	92,71	92,65	92,51	92,71
6000	79,45	87,26	90,03	91,04	91,83	92,29	92,53	92,52	92,93	93,09	93,26	93,35	93,05	92,99	92,88
6500	79,18	87,16	89,98	91,18	92	92,42	92,83	93,11	93,32	93,38	93,4	93,31	93,3	93,08	92,88
7000	78,8	87,22	90,05	91,39	92,35	92,62	93	93,19	93,48	93,54	93,53	93,4	93,28	93,24	92,7
7500	77,92	87,01	89,78	91,66	92,2	92,7	93,09	93,63	93,57	93,26	93,01	92,48	92,9	92,57	92,68
8000	77,79	87,04	90,37	91,36	92,73	92,8	93,03	93,48	93,22	93,55	93,18	93,26	92,99	92,87	92,52
8500	77,73	87,05	90,13	91,74	92,48	92,9	93,16	93,42	93,17	93,43	93,09	93,18	92,91	92,82	92,3
9000	77,52	88,02	90,23	91,82	93,14	93	93,17	93,9	92,98	92,87	92,72	93,2	92,22	92,39	91,89
9500	78,12	86,96	90,23	91,93	92,67	92,63	92,67	93,21	93,06	92,53	92,55	92,68	92,48	91,76	91,54
10000	71,71	83,98	88,76	90,06	91,3	91,98	92,51	92,46	92,61	92,73	92,45	92,52	92,11	91,99	
10500	74,09	84,91	88,68	90,54	91,54	92,12	92,4	92,52	92,59	92,51	92,35	92,15	91,87		
11000	75,09	85,18	88,74	90,54	91,5	92,06	92,31	92,4	92,4	92,27	92,17	91,81			
11500	75,2	84,93	88,74	90,48	91,34	91,83	92,17	92,23	92,22	92,07	91,75	91,6			
12000	75,21	84,98	88,55	90,34	91,24	91,74	91,89	92,07	91,97	91,8	91,49				
12500	74,31	85,83	88,87	90,16	91,03	91,78	91,77	91,23	91,21	91,31	91,55				
13000	74,17	84,25	88,15	89,89	90,89	91,33	91,52	91,58	91,37	91,08					
13500	72,9	83,4	87,16	89,01	89,55	90,36	90,41	90,52	90,52	90,18					
14000	72,26	82,95	86,91	88,86	89,79	89,99	90,37	90,29	90,06						
14500	71,94	82,77	86,73	88,43	89,67	90,01	90,26	89,85	89,86						
15000	72,04	82,86	86,75	88,38	89,33	89,66	89,98	89,69							

Рис. 2

В верхней строке карты указаны значения момента на валу электродвигателя с шагом 10 Н·м, при этом максимальный развиваемый момент составляет 300 Н·м. В крайнем левом столбце карты приведены значения частоты вращения якоря электродвигателя с шагом 500 об/мин до максимального значения — 15 000 об/мин. КПД определялся по известной формуле [7]:

$$\eta = \frac{P_3}{P} 100\%, \quad (1)$$

где P_3 — вырабатываемая на валу электродвигателя мощность; P — мощность, потребляемая электродвигателем из сети.

Заметим, что P_3 зависит от величины электромагнитного момента на валу двигателя, который определяется по формуле [7]:

$$M = C\Phi I_a = \frac{9,55P_3}{n}, \quad (2)$$

где Φ — магнитный поток; C — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя; I_a — ток якоря; n — частота вращения якоря электродвигателя.

Из (2) несложно выразить P_3 и далее использовать полученное значение в (1) для расчета КПД электродвигателя. Нижняя отсечка значений КПД по столбцам обусловлена максимальной мощностью электродвигателя.

Результаты и их обсуждение. Анализ типов и схем трансмиссий электромобилей позволил сформулировать некоторые рекомендации по выбору оптимальной схемы для рассматриваемых классов автомобилей [8, 9].

На рис. 3, а приведены зависимости КПД электродвигателя от скорости движения автомобиля Е-класса с трансмиссией, имеющей пять передач (1 — для первой передачи; 2 — второй; 3 — третьей; 4 — четвертой; 5 — пятой), на рис. 3, б — зависимость КПД от скорости движения автомобиля с трансмиссией с фиксированным передаточным отношением (без КПП).

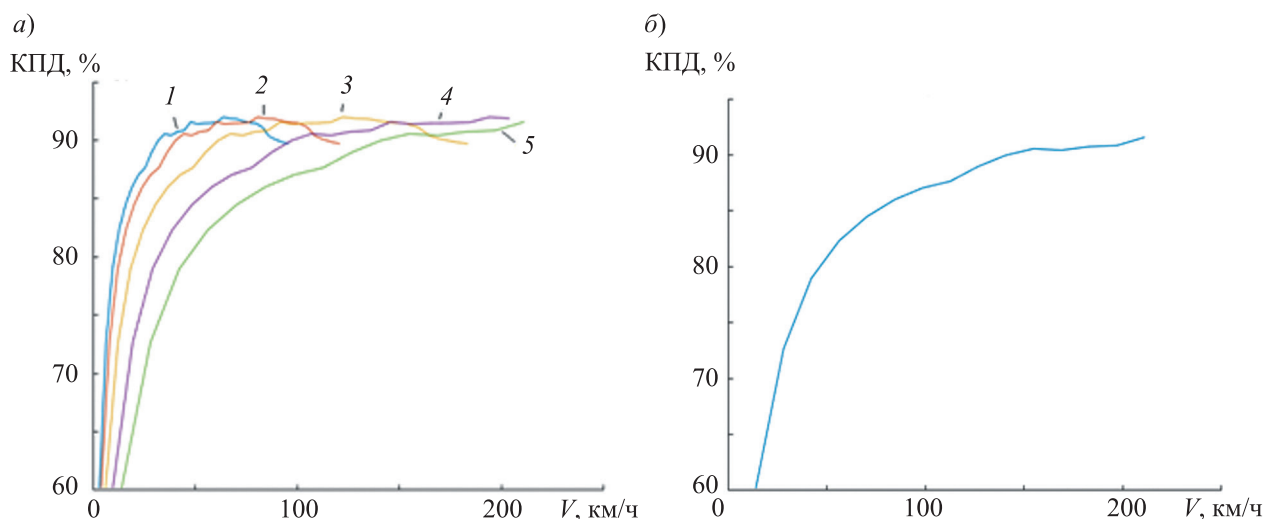


Рис. 3

Из рис. 3 следует, что введение в трансмиссию электромобиля КПП позволяет увеличить КПД двигателя в рабочем диапазоне скоростей движения от 25 до 200 км/ч. В широко используемом диапазоне скоростей 25–100 км/ч КПД возрастает на 12–13 %, достигая 90–93 % (рис. 2), по сравнению с аналогичными показателями, не превышающими 85 %, при использовании фиксированного передаточного отношения [3, 10–13]. Поэтому даже при условии снижения КПД двигателя в случае введения нескольких ступеней КПП суммарный КПД электромобиля вырастает в широком диапазоне скоростей [6].

Прирост КПД зависит от характеристик двигателя, условий движения, разбивки по передачам, типа КПП, но, как следует из проведенных расчетов, суммарно увеличивается на 5–12 % [10–13]. При дальнейшей оптимизации передаточных отношений в среде Simulink этот прирост можно еще увеличить [4–6]. Из рис. 3, а видно, что можно сократить число передач до трех. На рис. 3, а кривая 1 практически полностью совпадает с кривой 2, это означает, что необходимо скорректировать передаточное отношение первой передачи таким образом, чтобы можно было исключить вторую передачу. Затем следует скорректировать передаточные отношения третьей и четвертой передач (кривые 3 и 4 на рис. 3, а) таким образом, чтобы исключить пятую передачу (кривая 5), обеспечив пересечение (переключение передачи) на максимально высоком КПД, при условии достижения максимальной скорости на четвертой передаче (кривая 4). Сокращение числа передач с пяти до трех позволит повысить компактность трансмиссии. Стоит отметить, что пример, приведенный на рис. 3, отображает эффективность транспортного средства в одном из режимов движения. Для более полной оптимизации трансмиссии необходимо дополнить расчетную модель характерными параметрами условий эксплуатации транспортных средств, такими как неравномерность движения, уклоны дороги, наличие препятствий [6, 14, 15].

Повысить эффективность преобразования энергии в работу движения электромобиля за счет улучшения разгонной динамики можно благодаря использованию коробки передач. На

рис. 4 представлены зависимости ускорения a электромобиля с КПП (a ; 1 — для первой передачи; 2 — второй; 3 — третьей; 4 — четвертой; 5 — пятой) и без нее (b) от скорости движения. Из зависимостей, приведенных на рис. 4, следует, что кривая ускорения электромобиля с фиксированным числом передач почти полностью совпадает с кривой ускорения на пятой передаче (рис. 4, a , кривая 5). Таким образом, введение КПП позволяет значительно улучшить динамические характеристики электромобиля (рис. 4, a). Представленные зависимости построены с учетом максимального коэффициента трения колес об асфальтовое покрытие дороги [6].

Проанализировав полученные данные, можно заключить, что для одного и того же электромобиля возможно использовать как менее мощный двигатель, но с КПП и с сохранением динамических характеристик, так и более мощный, но с фиксированным передаточным отношением трансмиссии.

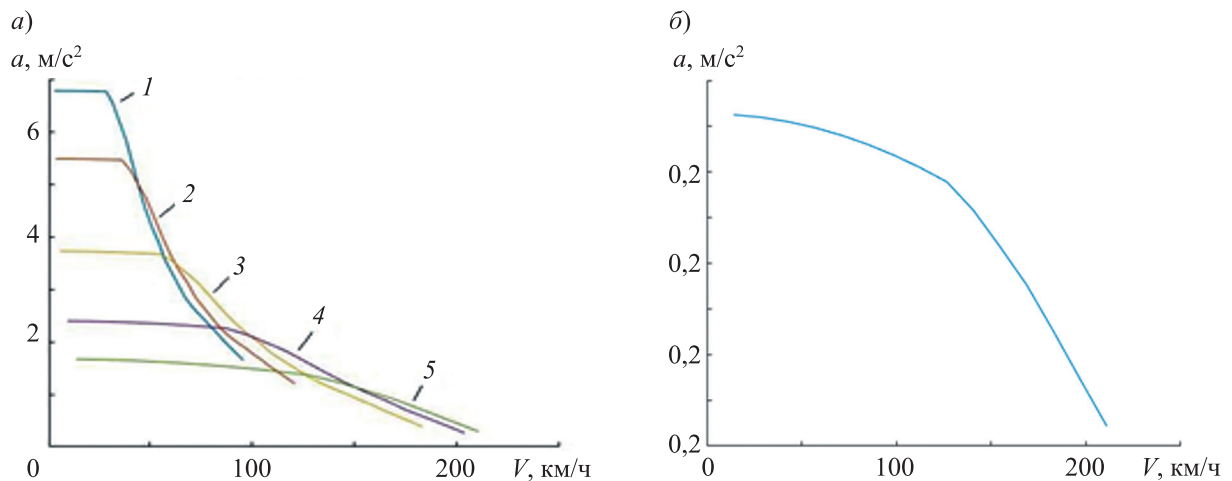


Рис. 4

Необходимо отметить, что массогабаритные характеристики электродвигателя зависят от его мощности. Применение электродвигателя меньшей мощности позволяет снизить стоимость автомобиля. Также к эффективности автомобиля следует отнести возможность обеспечения требуемого ресурса трансмиссии, на который существенно влияет марка применяемого масла. Однако ограничения в поставках импортных масел и работы по совершенствованию отечественных конструкций КПП с вариаторами обеспечивают актуальность триботехнических исследований в части разработки конструкций трибосопряжений и уплотнений [16, 17], применения антифрикционных покрытий рабочих поверхностей, а также разработки рецептур смазочных масел [18–22].

Заключение. Разработка в среде MatLab Simulink расчетной программы, позволяющей подбирать оптимальные характеристики трансмиссии для электромобиля по заданному техническому заданию, является первым этапом в оптимизации трансмиссии. Полученные зависимости показывают, что для большей эффективности электродвигателя в электромобиле необходимо использование трансмиссии с возможностью изменения передаточного отношения.

По результатам сравнительных расчетов тяговых характеристик разных типов электромобилей с КПП с фиксированным передаточным отношением разработаны рекомендации по применению многоступенчатой трансмиссии в составе электромобиля. Так, для автомобилей А-класса целесообразно использовать централизованную схему с понижающей передачей, имеющей фиксированное передаточное отношение. Для легковых автомобилей Е-класса можно рекомендовать централизованную схему с коробкой, имеющей не менее двух передач. Для внедорожных автомобилей, специальной техники и грузовых автомобилей предпочтительно использование распределенной схемы с КПП. Кроме того, представляется эффективным переход от электромобилей, использующих энергию, получаемую путем химических реакций, без применения горения (Full Cell), к автомобилям с гибридными решениями, так как в сложных условиях эксплуатации требуется большая автономность транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баулина Е. Е., Круташов А. В., Серебряков В. В. Нужна ли коробка передач автомобилю с электроприводом? // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 6. С. 93–106.
2. Sorniotti A. et al. Optimization of a multi-speed electric axle as a function of the electric motor properties // 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2010. P. 1–6.
3. Vehviläinen M. et al. Simulation-Based Comparative Assessment of a Multi-Speed Transmission for an E-Retrofitted Heavy-Duty Truck // Energies. 2022. Vol. 15, N 7. P. 2407.
4. Ahssan M. R., Ektesabi M. M., Gorji S. A. Electric vehicle with multi-speed transmission: a review on performances and complexities // SAE International Journal of Alternative Powertrains. 2018. Vol. 7, N 2. P. 169–182.
5. Тарасик В. П., Пузанова О. В. Методика определения основных параметров и характеристик электромобиля // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. № 4(69). С. 50–60.
6. Поршнев Г. П., Поршнева Е. Г., Худорожков С. И. Проектирование автомобилей и тракторов. Конструирование и расчет трансмиссий автомобилей: учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. 106 с.
7. Электротехника / Под ред. В. С. Пантюшина. М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 632 с.
8. Walker P. D. et al. Comparison of powertrain system configurations for electric passenger vehicles // SAE Technical Papers. 2015. March 2015. DOI:10.4271/2015-01-0052.
9. Ruan J., Walker P., Zhang N. Comparison of power consumption efficiency of CVT and multi-speed transmissions for electric vehicle // Intern. Journ. of Automotive Engineering. 2018. Vol. 9, N 4. P. 268–275.
10. Machado F. A. et al. Multi-Speed Gearboxes for Battery Electric Vehicles: Current Status and Future Trends // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2021. Vol. 2. P. 419–435.
11. Ruan J. et al. Development of continuously variable transmission and multi-speed dual-clutch transmission for pure electric vehicle // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10, N 2. P. 1687814018758223.
12. Kwon K., Jo J., Min S. Multi-objective gear ratio and shifting pattern optimization of multi-speed transmissions for electric vehicles considering variable transmission efficiency // Energy. 2021. Vol. 236. P. 121419.
13. Hillesheim T. Energy-efficient Shifting of Electric Multi-speed Transmissions // ATZ worldwide. 2021. Vol. 123, N 5. P. 64–67.
14. Козлова Т. А. Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля // Вестник евразийской науки. 2016. Т. 8, № 5(36). С. 74.
15. Дунаев М. П. Математическое и физическое моделирование электромобиля // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 2(6). С. 65–71.
16. Бреки А. Д., Чулкин С. Г., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г. Обобщенная математическая модель внешнего трения скольжения твердых тел // Материаловедение. 2021. № 10. С. 44–48.
17. Кузьмин А. М., Чулкин С. Г., Бреки А. Д. Приспособление для исследования антифрикционных свойств уплотнений из терморасширенного графита // Актуальные проблемы морской энергетики: Матер. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. СПб, 17–18 февраля 2022 г. С. 377–381.
18. Дроздов Ю. Н., Маленко И. П., Маленко П. И. Исследование резонансных процессов в поверхностных слоях пар трения скольжения со смазочным материалом, вызванных термическими ударами // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 44–52.
19. Кузьмин А. М., Чулкин С. Г., Бреки А. Д. Влияние гидросиликата магния на свойства смазочного масла М8В для пар трения скольжения сталь 35–сталь Р6АМ5 // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № S1. С. 295–297.
20. Лаихи В. Л., Масько С. В., Самусенко В. Д., Щербаков Ю. И., Буяновский И. А. Взаимодействие между присадками различного функционального назначения и их влияние на адсорбционные свойства моторных масел // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 12. С. 543–547.
21. Гаркунов Д. Н., Бабель В. Г., Мельников Э. Л., Щедрин А. В., Миняева Л. Х., Бабель А. Л. Металлосодержащие противоизносные противозадирные присадки к моторным маслам двигателей внутреннего сгорания // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 4. С. 17–24.
22. Пат. РФ 2570643 С1. Противоизносная присадка / А. П. Перекрестов, Ю. Н. Дроздов, В. А. Чанчиков, И. Н. Гужвенко, С. А. Свекольников. 10.12.2015.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Даниил Евгеньевич Ишимов

— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Международный научно-образовательный центр „BflTribology“; E-mail: daniil_ishimov@mail.ru

Николай Николаевич Демидов

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа транспорта; доцент; E-mail: demidov_nn@spbstu.ru

Елена Борисовна Седакова

— д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Международный научно-образовательный центр „BltTribo-Polytechnic“; профессор; Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Лаборатория трения и износа; зав. лабораторией; E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.06.24; одобрена после рецензирования 14.06.24; принята к публикации 23.08.24.

REFERENCES

1. Baulina E.E., Krutashov A.V., Serebryakov V.V. *Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii*, 2014, no. 6, pp. 93–106. (in Russ.)
2. Sornioti A. et al. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–6.
3. Vehviläinen M. et al. *Energies*, 2022, no. 7(15), pp. 2407.
4. Ahssan M. R., Ektesabi M. M., Gorji S. A. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2018, no. 2(7), pp. 169–182.
5. Tarasik V. P., Puzanova O. V. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2020, no. 4(69), pp. 50–60. (in Russ.)
6. Porshnev G.P., Porshneva E.G., Khudorozhkov S.I. *Proyektirovaniye avtomobiley i traktorov. Konstruirovaniye i raschet transmissiy avtomobiley* (Design of Automobiles and Tractors. Design and Calculation of Automobile Transmissions), St. Petersburg, 2015, 106 p. (in Russ.)
7. Pantyushin V.S., ed., *Elektrotehnika* (Electrical Engineering), Moscow, 1960, 632 p. (in Russ.)
8. Walker P. D. et al. *SAE Technical Papers*, March 2015, DOI:10.4271/2015-01-0052.
9. Ruan J., Walker P., Zhang N. *International Journal of Automotive Engineering*, 2018, no. 4(9), pp. 268–275.
10. Machado F. A. et al. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2021, vol. 2, pp. 419–435.
11. Ruan J. et al. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, no. 2(10), pp. 1687814018758223.
12. Kwon K., Jo J., Min S. *Energy*, 2021, vol. 236, pp. 121419.
13. Hillesheim T. *ATZ worldwide*, 2021, no. 5(123), pp. 64–67.
14. Kozlova T.A. *Bulletin of Eurasian Science*, 2016, no. 5(8), pp. 74. (in Russ.)
15. Dunaev M.P. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2017, no. 2(6), pp. 65–71. (in Russ.)
16. Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. *Material Science*, 2021, no. 10, pp. 44–48. (in Russ.)
17. Kuzmin A.M., Chulkin S.G., Breki A.D. *Aktual'nyye problemy morskoy energetiki* (Actual Problems of Marine Energy), Proc. of the 11th International Scientific and Technical Conference, St-Petersburg, February 17–18, 2022, pp. 377–381. (in Russ.)
18. Drozdov Yu.N., Malenko I.P., Malenko P.I. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2015, no. 2, pp. 44–52. (in Russ.)
19. Kuzmin A.M., Chulkin S.G., Breki A.D. *Proceedings of the Krylov State Research Center*, 2021, no. S1, pp. 295–297. (in Russ.)
20. Lashkhi V.L., Mas'ko S.V., Samusenko V.D., Shcherbakov Yu.I., Buyanovskiy I.A. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2023, no. 12, pp. 543–547. (in Russ.)
21. Garkunov D. N. Babel' V.G., Mel'nikov E.L., Shchedrin A.V., Minyazeva L.Kh., Babel' A.L. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya*, 2020, no. 4, pp. 17–24. (in Russ.)
22. Patent RU 2570643 C1, *Protivoiznosnaya prisadka* (Anti-Wear Additive), A.P. Perekrestov, Yu.N. Drozdov, V.A. Chanchikov, I.N. Guzhvenko, S.A. Svekol'nikov, Priority 10.12.2015. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Daniil E. Ishimov

— Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; International Scientific and Educational Center “BaltTribo-Polytechnic”; E-mail: daniil_ishimov@mail.ru

Nikolai N. Demidov

— PhD; Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Higher School of Transport; E-mail: demidov_nn@spbstu.ru

Elena B. Sedakova

— Dr. Sci., Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, International Scientific and Educational Center “BaltTribo-Polytechnic”; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Friction and Wear; Head of the Laboratory; E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Received 03.06.24; approved after reviewing 14.06.24; accepted for publication 23.08.24.