

Fredriksson, V.S. Kumar // Proc. of IROS 1997 Workshop on Dynamic Simulation: Methods and Applications - 1997.

11. Johnson, K. L. Contact Mechanics. / Cambridge University Press - 1985. - 452 p.

12. Archard, J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces // Journal of Applied Physics - 1953. – V. 24. - P. 981-988.

13. Archard, J. F., Hirst, W. P. The wear of metals under unlubricated conditions // Proceedings of the Royal Society of London - 1956 - V. 236 - № 1206 - P. 397-410.

14. Stribeck, R. Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager // Zeitschrift Des Vereines Deutcher Ingenieure, - 1902 - 86 p.

15. Bo, L. C. The friction-speed relation and its influence on the critical velocity of the stick–slip motion. / L. C. Bo, D. Pavelescu // Wear - 1982. - V. 82. - № 3. - P. 277–289.

D.V. Antufev<sup>1</sup>, Yu.B. Zhitkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, antufev.d@compmechlab.ru

## MODELLING RIGID BODY WEAR IN UNIVERSAL MECHANISM SOFTWARE COMPLEX

### Abstract

Wear forecasting is an important task in mechanical engineering. Russian software for modeling multibody dynamics, such as a Universal Mechanism, includes contact models of the interaction of bodies, but does not have a model for computing their wear. The aim of this work is to develop a way to expand the functionality of Russian software complex Universal mechanism for wear modeling. The classical dry friction model and the Archard wear model were used in the work. A library has been developed in the SimInTech software package, which includes a mathematical description of the contact interaction of solids with wear accumulation, which can be used in the Universal Mechanism software package.

*Keywords:* wear, contact interaction, Universal mechanism, SimInTech.

УДК 62-235

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-259

Д.Е. Ишимов<sup>1</sup>, Н.Н. Демидов<sup>1</sup>, Ли Сяньшунь<sup>3</sup>, Е.Б. Седакова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, daniil\_ishimov@mail.ru

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСМИССИИ С ИЗМЕНЯЕМЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ЧИСЛОМ В СОВРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ

### Аннотация

В работе рассмотрены основные схемы трансмиссий современных электромобилей, применяемые крупными автоконцернами. При серийном производстве электромобилей возникает необходимость увеличения эффективности всего транспортного средства в целом. В результате проделанной работы,

разработаны рекомендации, касающиеся основных параметров трансмиссии электромобиля, которые позволят повысить эффективность и тяговые характеристики транспортного средства на электротяге.

*Ключевые слова:* электромобиль, эффективность, параметры трансмиссии, тяговые характеристики.

## Введение

В настоящее время проблема электрификации транспортных средств актуальна как никогда в связи с рядом преимуществ электродвигателей по сравнению с классическими двигателями внутреннего сгорания (ДВС), а именно: высокий и ровный крутящий момент, доступный с малых оборотов, пиковый коэффициент полезного действия (КПД) достигающий 99%, меньшие габариты силовой установки при сравнимой выдаваемой мощности [1-3]. Таким образом, применение электродвигателя в качестве основного тягового агрегата для транспортных средств могло бы позволить получить труднодостижимые для классических автомобилей потребительские характеристики.

Однако существующие транспортные средства с электродвигателем в качестве основной тяговой установки имеют ряд недостатков: сложность и неэффективность современных способов генерации и аккумуляции энергии для работы электродвигателя, узкий диапазон наивысших значений КПД (Рисунок 2) [4]. В совокупности с переменчивой средой использования транспортных средств вышеперечисленные сложности становятся комплексной проблемой для электромобилей. Для устранения указанных недостатков представляется эффективным использование многоступенчатых трансмиссий [5].

Цель исследований – анализ и обоснование применения многоступенчатой трансмиссии с изменяемым передаточным числом в составе электромобиля с определением основных параметров многоступенчатой трансмиссии, для эффективного использования характеристик электродвигателя в составе транспортного средства.

## Методы и материалы

Для достижения поставленной цели использовали современные системы инженерного анализа (CAE). На рисунке 1 представлен фрагмент схемы трансмиссии автомобиля для имитационного моделирования движения в среде Simulink.

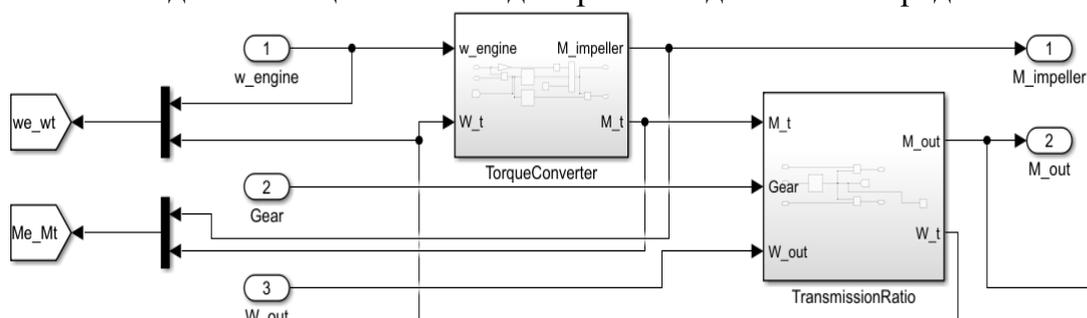


Рисунок 1 – Фрагмент схемы трансмиссии для симуляции движения в среде Simulink.

На рисунке 1 блок «TorqueConverter» является гидротрансформатором, блок «TransmissionRatio» представляет собой механическую часть коробки передач, с возможностью их изменения в зависимости от требуемого режима. Входящие переменные «w\_engine», «Gear», «W\_out» это обороты двигателя, номер передачи и обороты выходного вала коробки передач соответственно. Выходные параметры

«M\_impeller» и «M\_out» это крутящий момент на насосном колесе гидротрансформатора и выходной крутящий момент на выходном валу КПП. Остальные выходные переменные служат данными для системы управления КПП.

Электродвигатель имеет широкий диапазон рабочих оборотов, это создает необходимость применения многоступенчатых трансмиссий [2]. В основной массе такие трансмиссии имеют фиксированное передаточное число. Для обоснования введения в трансмиссию возможности изменения передаточного числа, в среде MatLab были проведены сравнительные тяговые расчеты [6] нескольких классов транспортных средств: А - компактные автомобили, Е - автомобили бизнес класса и J - кроссоверы и внедорожники. Транспортные средства были подобраны так, чтобы потребная мощность силовой установки была идентичной. За основу выбора электродвигателя, были взяты характеристики автомобиля Е класса BMW E34 525, из результатов тягового расчета [5,6], потребная мощность составила 160 киловатт. Таким образом, была подобрана общая, для всех автомобилей-прототипов, электромашина с приведенными на рисунке 2 характеристиками.

На рисунке 2 представлена таблица КПД выбранной электромашины в результате эмпирических измерений на испытательном стенде. По верхней строчке таблицы представлен крутящий момент электромотора с шагом в 10 Н·м. Максимальный момент развиваемый электромотором 300 Н·м. По левому столбцу обороты выходного вала электродвигателя с шагом 500 об/мин, максимальное значение для выбранного мотора 15000 об/мин. Нижняя отсечка значений КПД обусловлена максимальной мощностью электродвигателя. Зависимость выдаваемой мощности от оборотов и крутящего момента двигателя описывается следующей формулой (1):

$$P = \frac{M \cdot n}{9550}; \text{ кВт (1)}$$

Где, P – мощность в киловаттах; M – крутящий момент Н·м; n – обороты в минуту; 9550 – поправочный коэффициент, перевода частоты вращения из об/мин в рад/сек;

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							

Рисунок 2 - Фрагмент карты КПД электродвигателя мощностью 160 кВт, применяемый в современных автомобилях. Пиковое значение КПД для данного двигателя выделено зеленой рамкой.

## Результаты и обсуждение

Анализ существующих типов и схем трансмиссий электромобилей позволил сформировать некоторые рекомендации для выбора оптимальной схемы для рассматриваемых классов автомобилей [7,8].

В результате проведенных расчетов были получены оптимальные передаточные числа трансмиссии [6,9,10,11] и зависимости КПД электродвигателя от скорости движения транспортного средства,  $v$ . На рисунке 3 приведены зависимости КПД электродвигателя от скорости движения автомобиля класса Е с трансмиссией, имеющей 5 передач, на рисунке 4 показана зависимость КПД от  $v$  автомобиля с трансмиссией имеющей фиксированное передаточное число.

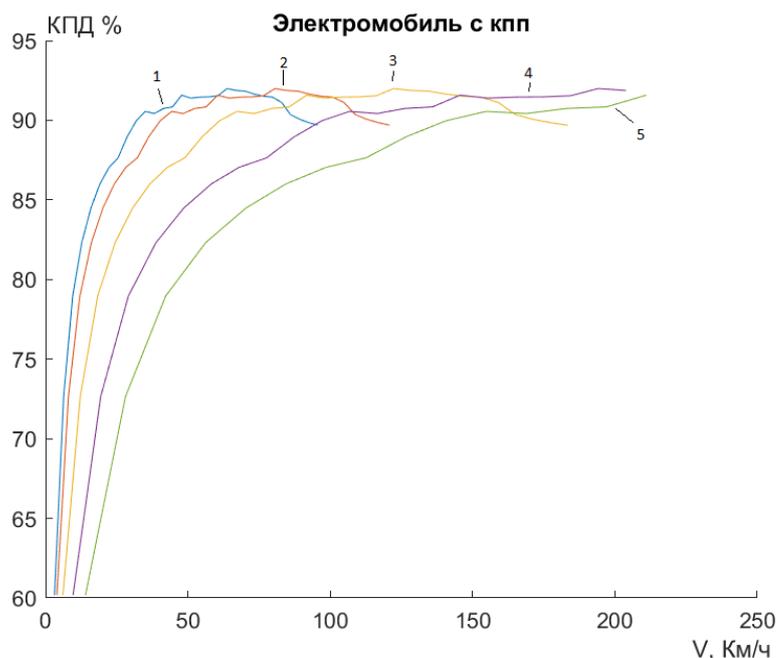


Рисунок 3 - Зависимости КПД электродвигателя от скорости  $V$  движения электромобиля с КПП имеющей 5 передач: 1 – первая передача; 2 – вторая передача; 3 – третья передача; 4 – четвертая передача; 5 – пятая передача;

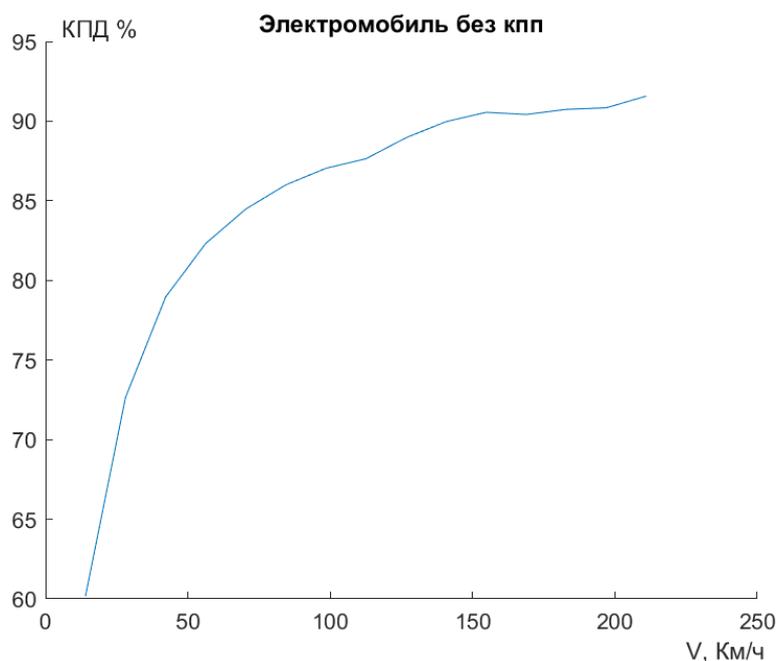


Рисунок 4 - Зависимость КПД электродвигателя от скорости  $V$  движения электромобиля с фиксированным числом передач

Из данных рисунка 3 и 4 следует, что введение в трансмиссию классического электромобиля коробки переключения передач (КПП) позволяет увеличить КПД электромотора в рабочем диапазоне скоростей от 25 до 200 км/ч. Особенно отчётливо это наблюдается в диапазоне с 25 до 100 км/ч (наиболее распространенный диапазон скоростей), где КПД использования электромотора возрастает на 12-13% и достигает номинального значения в 90-93% (рисунок 2), по сравнению с аналогичными показателями равными 80% при использовании фиксированного передаточного числа [3,9,12-15]. Поэтому, даже при условии снижения общего КПД трансмиссии, от введения нескольких ступеней, до уровня 94%-97% против 98% у редукторов, 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 просчитанного примера, суммарно увеличивается на 5 - 12% [12-15]. При дальнейшей работе по оптимизации передаточных чисел в среде Simulink, этот прирост можно увеличить [4-6]. Из рисунка 3 очевидно, что 5 передач избыточно для КПП и можно сократить их число до 3-х. На рисунке 3 кривая 1 практически полностью повторяет кривую 2, это означает, что необходимо скорректировать передаточное отношение первой передачи таким образом, чтобы можно было полностью исключить вторую передачу. Затем следует скорректировать передаточное отношение 3-й и 4-й передач, на (рисунке кривые 3 и 4 кривые, соответственно, таким образом, чтобы исключить пятую передачу (кривая 5), обеспечив пересечение (переключение передачи) на максимально высоком значении спадающего КПД, при условии достижения максимальной скорости на 4-й передаче, кривая 4. Оптимизация количества передач с 5-и до 3-х позволит повысить компактность и компактуемость трансмиссии. Стоит отметить, что пример приведенный на рисунках 3 и 4, отображает эффективность транспортного средства в одном из режимов движения, для учета большего числа режимов и более точной оптимизации трансмиссии необходимо дополнить расчетную модель характерными параметрами окружающей среды: неравномерность движения, уклоны дороги, препятствия и прочее [6,10,11].

К вышеперечисленным преимуществам применения коробок передач в области эффективности преобразования энергии батареи в работу движения электромобиля, так же можно отнести улучшения разгонной динамики. На рисунках 5 и 6 представлены графики ускорения электромобиля с КПП и без неё, соответственно, в зависимости от скорости движения.

Введение дополнительного числа передач позволяет значительно улучшить динамические характеристики электромобиля, это следует из сравнения рисунка 5 и рисунка 6, кривая ускорения электромобиля с фиксированным числом передач почти полностью совпадает с кривой ускорения на пятой передаче, кривая 5 на рисунке 5. Зависимости построены с учетом максимального коэффициента трения колес с асфальтом [6]. Таким образом можно сделать вывод, что для одного и того же электромобиля можно применить менее мощный электродвигатель, но с КПП с сохранением динамических характеристик как с более мощным двигателем, но с фиксированным передаточным числом трансмиссии. Уменьшение мощности электродвигателя напрямую влияет на его габарит, а значит и на стоимость, а также на компактуемость агрегата в целом.

Также к эффективности автомобиля следует отнести возможность обеспечения требуемого ресурса трансмиссии, на который оказывает существенное

влияние применения масла, марка которого рекомендована заводом-изготовителем автомобиля. Однако при существующих ограничениях в поставках импортных марок масел и проводимых работах по совершенствованию отечественных конструкций вариаторов становятся актуальными триботехнические исследования в части разработки конструкций трибосопряжений и уплотнений [17-20], применения антифрикционных покрытия рабочих поверхностей и разработки рецептов смазочных масел [21-26].

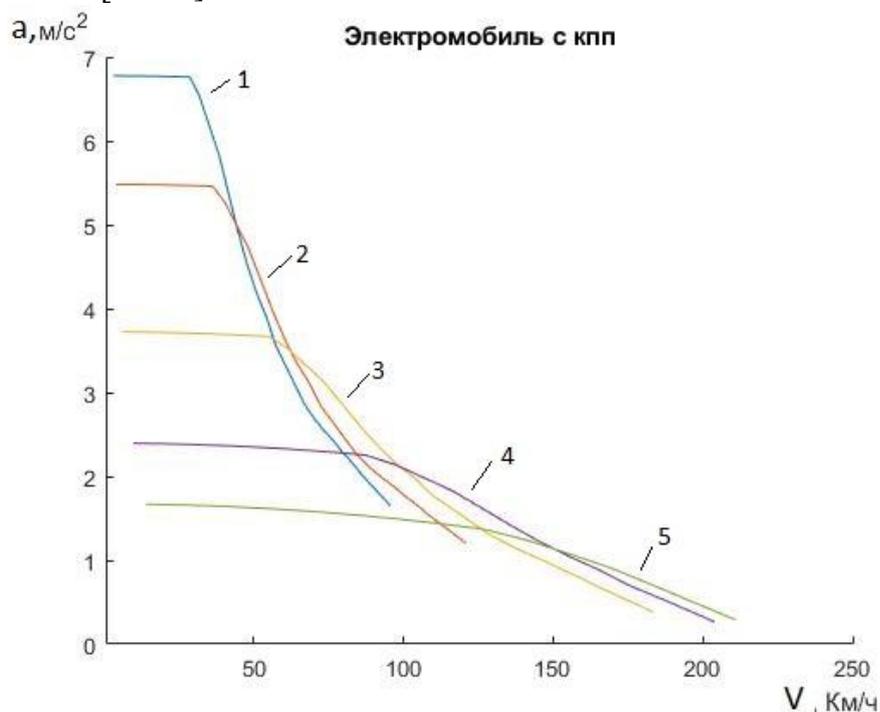


Рисунок 5 – Зависимость ускорения  $a$  от скорости электромобиля с КПП имеющей 5 передач: 1 – первая передача; 2 – вторая передача; 3 – третья передача; 4 – четвертая передача; 5 – пятая передача;

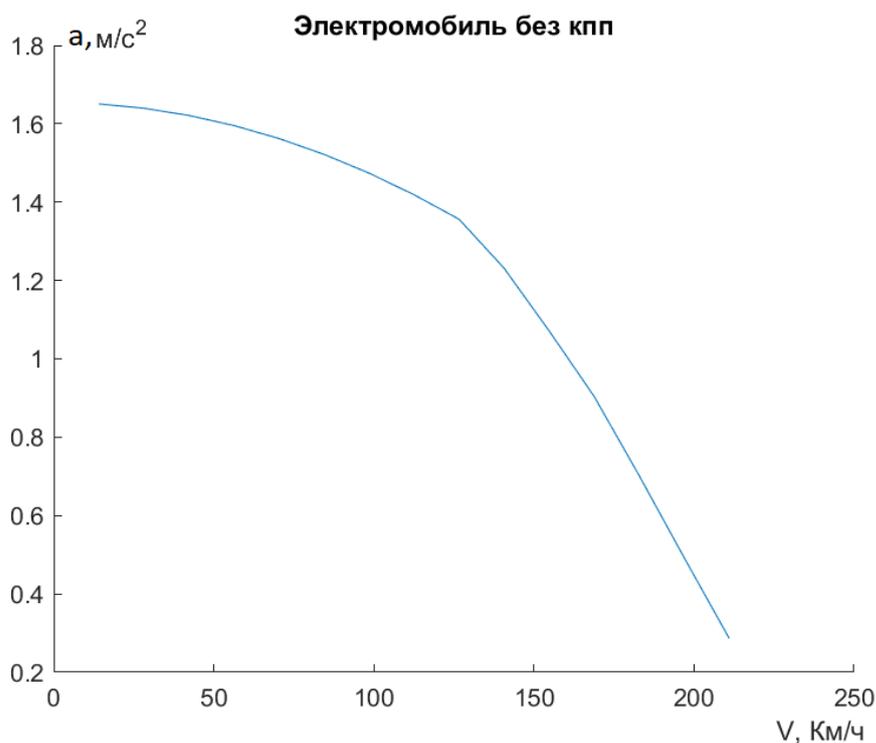


Рисунок 6 - Зависимость ускорения  $a$  от скорости электромобиля с фиксированным числом передач.

## **Заключение**

Разработанная расчетная программа в среде MatLab позволяет производить подбор оптимальных характеристик трансмиссии для электромобиля по заданному техническому заданию и является первой ступенью в оптимизации трансмиссии. Полученные зависимости показывают, что для более эффективного использования электромотора в электрокаре необходимо использование трансмиссии с возможностью изменения передаточного числа.

По результатам проведенных сравнительных тяговых расчетов разных типов электромобилей с несколькими передаточными числами трансмиссии и с фиксированным передаточным числом разработаны рекомендации по применению многоступенчатой трансмиссии в составе электромобиля, в зависимости от его типа.

Для автомобилей А класса целесообразно использовать централизованную схему с понижающей передачей, имеющей фиксированное передаточное число.

Для легковых автомобилей Е-класса можно рекомендовать централизованную схему с коробкой передач, имеющую не менее 2-х передач.

Для внедорожных автомобилей, специальной технике, грузовых автомобилей предпочтительно использование распределённой схемы с редуктором или без него. 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 тяжёлых условиях эксплуатации требуется большая автономность транспортных средств.

## **Благодарности**

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

## **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. - IEEE, 2010. - С. 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. - Т. 15. - №. 7. - С. 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. - Т. 7. - №. 2. - С. 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. Проектирование автомобилей и тракторов. Конструирование и расчет трансмиссий автомобилей: учебное пособие / Г.П. Поршнева, Е.Г. Поршнева, С.И. Худорожков. СПб.: Изд-во Политехнического. ун-та, 2015. - 106с.
7. Walker P. D. et al. Comparison of powertrain system configurations for electric passenger vehicles //SAE Technical Papers. - 2015.
8. Ruan J., Walker P., Zhang N. Comparison of power consumption efficiency of CVT and multi-speed transmissions for electric vehicle //International journal of automotive engineering. - 2018. - Т. 9. - №. 4. - С. 268-275.
9. Синтез и анализ планетарных коробок передач с двумя степенями свободы. Особенности первых этапов проектирования планетарных КП. Методические указания /

- В.Д. Кошечев, В.Ю. Павлов, Г.П. Поршневу, В.И. Яугонен. СПб.: Гос.техн.ун-т. 1999 г. - 27с.
10. Козлова Т. А. Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля //Вестник евразийской науки. - 2016. - Т. 8. - №. 5 (36). - С. 74.
  11. Дунаев М. П. Математическое и физическое моделирование электромобиля //Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2017. - №. 2 (6). - С. 65-71.
  12. Machado F. A. et al. Multi-Speed Gearboxes for Battery Electric Vehicles: Current Status and Future Trends //IEEE Open Journal of Vehicular Technology. - 2021. - Т. 2. - С. 419-435.
  13. Ruan J. et al. Development of continuously variable transmission and multi-speed dual-clutch transmission for pure electric vehicle //Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Т. 10. – №. 2. – С. 1687814018758223.
  14. 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. – Т. 236. – С. 121419.
  15. Hillesheim T. Energy-efficient Shifting of Electric Multi-speed Transmissions //ATZ worldwide. – 2021. – Т. 123. – №. 5. – С. 64-67.
  16. Бреки А. Д. и др. Эмпирическая математическая модель изменения фактической площади контакта металлов в зависимости от пути трения //Чебышевский сборник. – 2022. – Т. 23. – №. 5 (86). – С. 188-197.
  17. БРЕКИ А. Д. и др. Обобщенная математическая модель внешнего трения скольжения твердых тел //Материаловедение. – 2021. – №. 10. – С. 44-48.
  18. БРЕКИ А. Д. и др. Обобщенная математическая модель внешнего трения скольжения твердых тел //Материаловедение. – 2021. – №. 10. – С. 44-48.
  19. Кузьмин А. М., Чулкин С. Г., Бреки А. Д. Приспособление для исследования антифрикционных свойств уплотнений из терморасширенного графита //Актуальные проблемы морской энергетики. – 2022. – С. 377-381.
  20. Бреки А. Д. и др. Эмпирическая математическая модель изменения фактической площади контакта металлов в зависимости от пути трения //Чебышевский сборник. – 2022. – Т. 23. – №. 5 (86). – С. 188-197.
  21. 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.
  22. 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.
  23. Лашхи В.Л., Масько С.В., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И., Буяновский И.А. Взаимодействие между присадками различного функционального назначения и их влияние на вазорбционные свойства моторных масел //Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – №. 12. – С. 543-547.
  24. Гаркунов Д. Н. Бабель В.Г., Мельников Э.Л., Щедрин А.В., Минязева Л.Х., Бабель А.Л. Металлосодержащие противоизносные противозадирные присадки к моторным маслам двигателей внутреннего сгорания //Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2020. – №. 4. – С. 17-24.
  25. Скотникова М.А. Шашерина С.А., Паитова О.В., Цветкова Г.В. Триботехнические свойства наноструктурированных медно-никелевых покрытий //Современное машиностроение. Наука и образование. – 2018. – №. 7. – С. 370-382.
  26. Перекрестов А.П., Дроздов Ю.Н., Чанчиков В.А., Гужвенко И.Н., Свекольников С.А. Противоизносная присадка. Патент на изобретение RU 2570643 С1, 10.12.2015. Заявка № 2014130314/04 от 22.07.2014.

D.E. Ishimov<sup>1</sup>, N.N. Demidov<sup>1</sup>, Li Xianshun<sup>3</sup>, E.B. Sedakova<sup>1,2</sup>

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Saint Petersburg, Russia, daniil\_ishimov@mail.ru

<sup>2</sup>Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian academy of sciences, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## JUSTIFICATION OF THE USE OF A MULTI-STAGE TRANSMISSION IN A MODERN ELECTRIC VEHICLE

### Abstract

The paper considers the main transmission schemes of modern electric vehicles used by large automakers. In the mass production of electric vehicles, there is a need to increase the efficiency of the entire vehicle as a whole. As a result of the work done, recommendations have been developed regarding the main parameters of the electric vehicle transmission, which will improve the efficiency and traction characteristics of an electric vehicle.

*Keywords:* electric vehicle, efficiency, transmission parameters, traction characteristics.

УДК 538.95

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-260

Н.Н. Горобей, А.С. Лукьяненко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия, n.gorobey@mail.ru

## РОЛЬ АНГАРМОНИЗМА В НАНОДИНАМИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

### Аннотация

Анализ термоупругого эффекта Джоуля-Томсона указывает на необходимость разделения полной энергии изолированного тела на две составляющие – квазистатическую энергию упругой деформации, которая включает в себя термическое расширение, и энергию колебаний атомов. В качестве инструмента анализа предложена динамическая статистическая сумма, которая позволяет вычислять средние значения наблюдаемых за большой промежуток времени, в том числе, при наличии внешних сил, зависящих от времени. На основании того, что, в соответствии с эргодической гипотезой, пределом динамического статистического распределения для изолированного тела служит микроканоническое распределение, а для его подсистем – каноническое распределение Гиббса, предложено определение температуры изолированного тела. Баланс энергии в термоупругом эффекте находится в полном соответствии с первым началом термодинамики для изолированного тела.

*Ключевые слова:* ангармонизм, стохастичность, деформация, энергия, температура.