

SELECTION OF A WORKING DRIVING CYCLE FOR MATHEMATICAL MODELING OF THE MOVEMENT OF TRUCKS AND BUSES ON TRACTION BATTERIES WITH A MECHATRONIC TRANSMISSION

M. A. Emelyanov ^a, R. L. Gazizullin ^b, N. V. Buzunov ^c, A. B. Kartashov ^d

N. E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (MSTU)

^a emelyanov@bmstu.ru, ^b rlgazizullin@bmstu.ru, ^c buzunovnv@bmstu.ru, ^d kartashov@bmstu.ru

Submitted 2022, October 29

Abstract. Application of electric energy to drive the driving elements of wheeled vehicles is becoming increasingly popular, which inevitably leads to the replacement of cars with internal combustion engines and traditional transmission schemes. The use of an electric traction drive as part of vehicles with traction batteries (TAB) solves a number of problems that manufacturers of this type of equipment face today: reducing harmful emissions into the atmosphere, reducing noise, recycling used lubricants, and increasing energy efficiency. From the point of view of scientific research, this type of wheeled vehicles is also of high interest in view of the large number of problems and tasks that have formed at the moment. It is known that one of the main problematic issues for vehicles on traction batteries is a rather limited range. In cargo electric vehicles and buses, to reduce the size and increase the usable volume of the passenger compartment or cargo space, as well as to unify the products of the power unit and drive, transmissions are used, which are a combination of mechanical and electrical components with appropriate control systems. The mechanical component includes a gearbox with one or more gear ratios, an interwheel differential, axle shafts, bearings and other components. The electrical component is a traction motor located directly in the drive axle or on the outside of the crankcase, as well as a voltage converter with a control system and the necessary switching elements. Similar implementations of the driving axles of vehicles with traction batteries are called mechatronic transmissions.

Keywords: mechatronic transmission; wheeled hybrid vehicle; electric vehicle.

ВЫБОР РАБОЧЕГО ЕЗДОВОГО ЦИКЛА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ И АВТОБУСОВ НА ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЯХ С МЕХАТРОННОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

М. А. Емельянов ^a, Р. Л. Газизуллин ^b, Н. В. Бузунов ^c, А. Б. Карташов ^г

ФГБОУ-ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ)

^a emelyanov@bmstu.ru, ^b rlgazizullin@bmstu.ru, ^c buzunovnv@bmstu.ru, ^d kartashov@bmstu.ru

Поступила в редакцию 29.10.2022

Аннотация. Применение электрической энергии для привода ведущих элементов колесных транспортных средств становится все более популярным, что неизбежно приводит к вытеснению автомобилей с двигателями внутреннего сгорания и традиционными схемами трансмиссии. Использование тягового электропривода в составе транспортных средств с тяговыми аккумуляторными батареями (ТАБ) решает ряд задач, которые на сегодняшний день стоят перед производителями указанного вида техники: уменьшение вредных выбросов в атмосферу, снижение шума, утилизация отработанных смазочных материалов, повышение энергоэффективности. С точки зрения научных исследований данный вид объектов колесной техники также представляет высокий интерес в виду большого количества сформировавшихся на текущий момент проблем и задач. Известно, что одним из основных проблемных вопросов для транспортных средств на тяговых аккумуляторных батареях является достаточно ограниченный запас хода. В грузовых электромобилях и автобусах для уменьшения габаритов и увеличения полезного объема салона или грузового пространства, а также унификации изделий силового агрегата и привода используются трансмиссии, представляющие собой совокупность механической и электрической составляющих с соответствующими системами управления. Механическая составляющая подразумевает собой редуктор с одним или несколькими передаточными числами, межколесный дифференциал, полуоси, подшипники и другие компоненты. Электрической составляющей является тяговый электродвигатель, расположенный непосредственно в составе ведущего моста (интегрированный) или на внешней стороне картера, а также преобразователь напряжения с системой управления и необходимыми элементами коммутации. Подобные реализации ведущих мостов транспортных средств с тяговыми аккумуляторными батареями получили наименование мехатронных трансмиссий.

Ключевые слова: мехатронная трансмиссия; колесное гибридное транспортное средство; электромобиль.

ВВЕДЕНИЕ

В период с 1999 года по настоящее время опубликовано большое количество научно-исследовательских работ, посвященных мехатронным трансмиссиям грузовых автомобилей и автобусов различного типа, что отражено на рис. 1, а также в области электротранспорта [1–5]. Данная зависимость свидетельствует о том, что вопросы выбора кинематической схемы, компоновки конструкции, режимов работы, оптимизации управления мехатронными трансмиссиями изучены достаточно. Анализ работ позволяет правильно сформулировать требования к вновь разрабатываемым мехатронным трансмиссиям и рекомендации к вариантам улучшения конструкции с точки зрения достижения требуемых характеристик.

В большей части работ, посвященных повышению энергоэффективности мехатронных трансмиссий, внимание в основном уделяется проблемам оптимизации подбора передаточных чисел трансмиссии и выбора алгоритма переключения передач. С другой стороны, исследования по новым механизмам и схемам управления переключением передач публикуются достаточно редко.

Интерес к созданию мехатронных трансмиссий грузовых автомобилей и автобусов получил развитие с 2010-х годов с появлением литий-ионных аккумуляторов. Количество опытных образцов данной техники с указанного периода до сегодняшних дней выросло в четыре раза, а серийных – на 65 %.

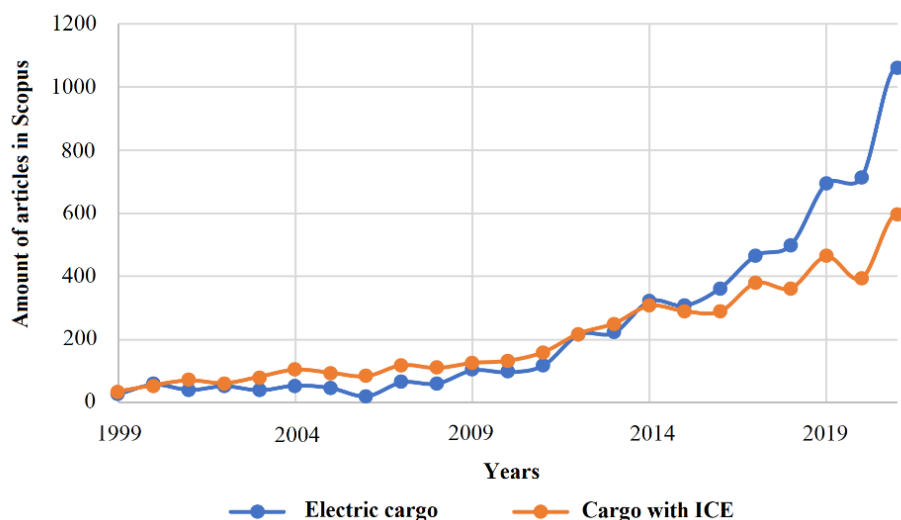


Рис. 1. Количество статей в Scopus по тематике грузовых автомобилей

Для снижения энергопотребления при движении, а также для оптимизации времени переключения передач, оптимизации передаточного числа, уменьшения ударных нагрузок на трансмиссию необходимо составить математическую модель движения автомобиля по подходящему или рекомендуемому ездовому циклу для данного типа транспортного средства. Некорректный выбор ездового цикла может привести к увеличению погрешности в результатах моделирования. В ряде случаев может быть рассмотрен вопрос о разработке индивидуального ездового цикла для отдельных видов работ или территорий. Повышение точности моделирования рабочих процессов транспортных средств с мехатронными трансмиссиями в конечном счете позволит увеличить запас хода.

ОБЗОР И АНАЛИЗ ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ

Для моделирования движения городского электрического или гибридного транспорта используется несколько ездовых циклов, каждый из которых обладает определенными особенностями и недостатками.

Первый цикл – New European Driving Cycle (NEDC), график которого приведен на рис. 2 [6–8].

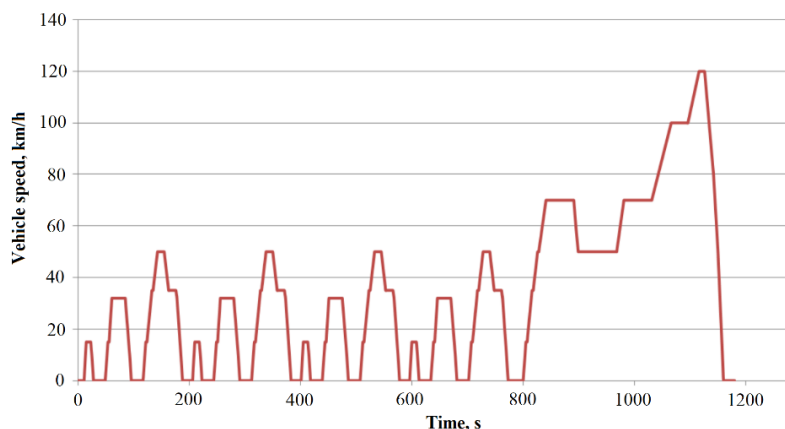


Рис. 2. График ездового цикла NEDC

Приведенный цикл считается применимым для городского транспорта, однако последний участок подразумевает движение со скоростью 100 и 120 км/ч, что редко достижимо в городских условиях даже для легковых автомобилей. Также цикл NEDC на сегодняшний день считается устаревшим.

График цикла 10–15 приведен на рис. 3. Данный цикл характеризуется меньшей по сравнению с NEDC средней скоростью движения. На последнем участке максимальная скорость движения не превышает 70 км/ч.

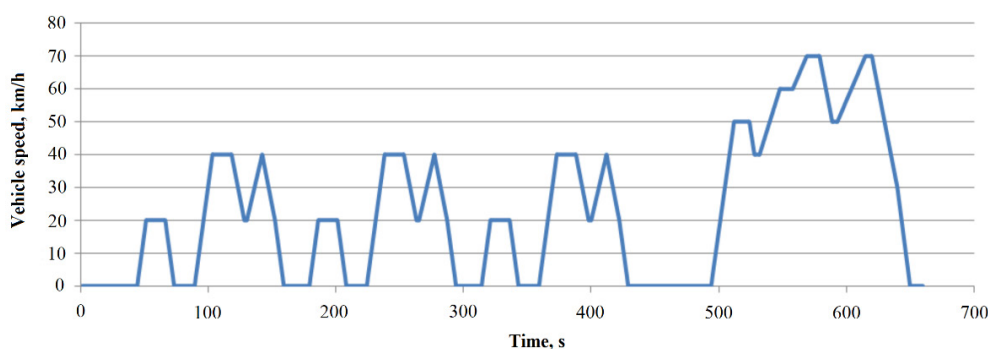


Рис. 3. График ездового цикла 10–15

Третий цикл – UDDS или FTP-72 (Federal test Procedure). График цикла приведен на рис. 4. Данный цикл имеет две фазы, разграниченные красной вертикальной линией. На первой фазе средняя скорость движения выше, чем на второй, что говорит о заложенном в цикле выезде транспортного средства на высокоскоростную трассу. На второй фазе значения скоростей больше соответствуют городским условиям. Стоит отметить, что в данном цикле нет повторяющихся участков, чего нельзя сказать о NEDC и 10–15.

Более современный вариант этого цикла имеет обозначение FTP75. Отличие от UDDS в том, что после второй фазы снова наступает первая, что отражено на рис. 5.

По результатам моделирования установлено среднее по трем циклам снижение энергопотребления на 4 % относительно энергопотребления при моделировании движения на параметрах трансмиссии до оптимизации.

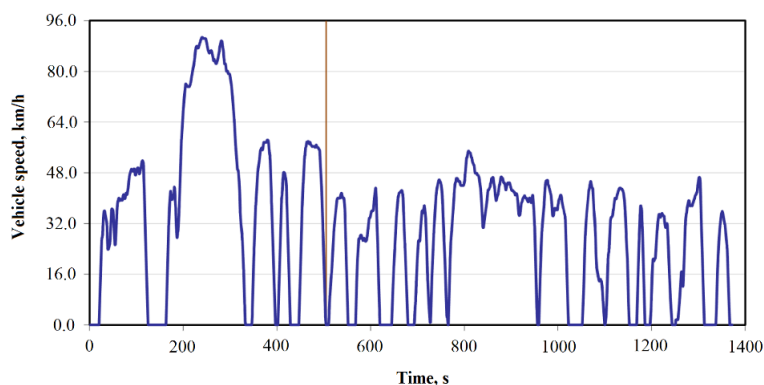


Рис. 4. График ездового цикла UDDS (FTP-72)

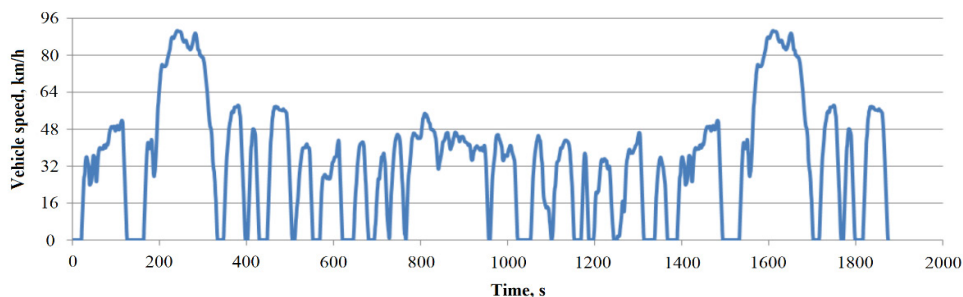


Рис. 5. График ездового цикла FTP-75

Также в работе [9] проводится оптимизация передаточных чисел двухскоростной коробки передач при моделировании движения электромобиля с ездовыми циклами NEDC и UDDS [9]. Отмечено, что результат моделирования на двух ездовых циклах расходится не более, чем на 0,02 %.

В статье [10] проводится сравнительное моделирование движения электромобиля с многоступенчатой коробкой передач и вариатором по двум ездовым циклам. Один из них – FTP75, характеризующий движение по городу. Другой – HWFET (High Way Fuel Economy Test). График последнего приведен на рис. 6. Данный ездовой цикл предназначен для оценки параметров экономичности при движении по загородной трассе, о чем свидетельствуют значения скорости в начале и конце пути – только в этих точках она достигает нуля.

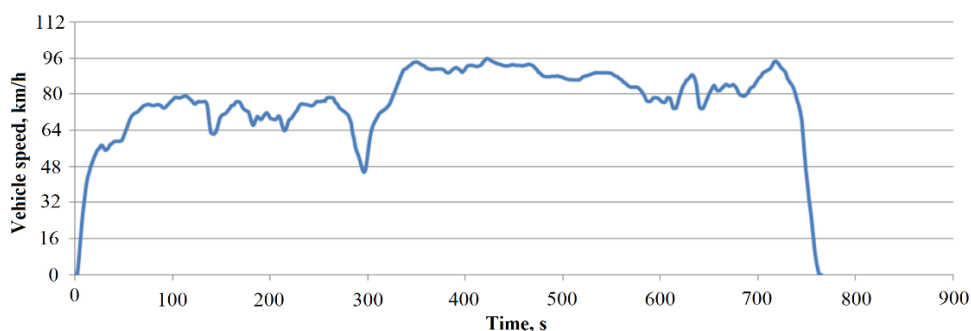


Рис. 6. График ездового цикла HWFET

В статье [11] проводится моделирование движения электромобиля с двумя электродвигателями, работающими одновременно на разных режимах, по комбинированному ездовому циклу, состоящего из двух последовательных UDDS (FTP72) и HWFET, что отражено на рис. 7.

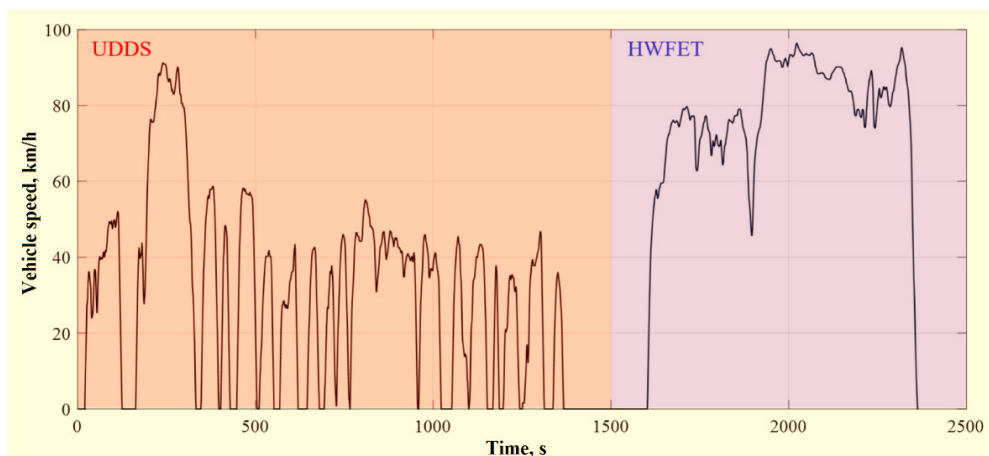


Рис. 7. График комбинированного ездового цикла

Ездовой цикл UDDS введен для моделирования движения в городской среде, а HWFET, как и ранее – по загородной трассе. В результате оптимизации передаточных чисел авторам удалось достичь снижения времени разгона на 9,3 %, а уменьшения потребления энергии – на 11,2 % относительно значения этих параметров при моделировании движения до оптимизации.

В работе [12] проводится моделирование движения по ездовому циклу NEDC, описанному выше, и WLTP (или WLTC) (Worldwide Light vehicles Test Cycles). Последний является более современным и применимым для легковых автомобилей и гибридных или электромобилей, а также заменяет цикл NEDC.

Параметры данного цикла (WLTC) выбираются, исходя из отношения номинальной мощности двигателя к снаряженной массе автомобиля без учета водителя и из значения максимальной скорости движения. Для конкретного автомобиля в данном исследовании подходит ездовой цикл WLTC Class 3b, график которого приведен на рис. 8. Такой же цикл используется в исследовании [13].

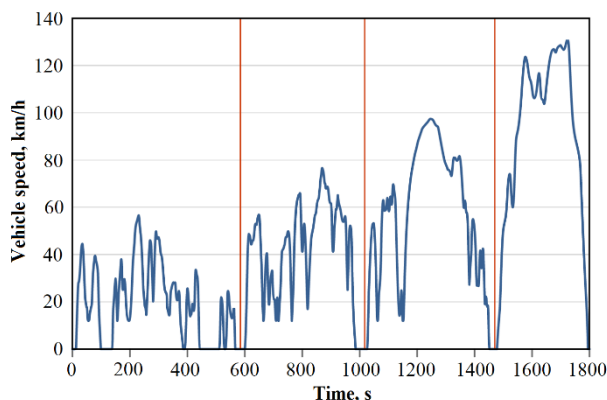


Рис. 8. График ездового цикла WLTC Class 3b

В исследовании [14] проводится моделирование движения гибридного транспортного средства по последовательной совокупности ездовых циклов FTP-75, HWFET и US06. График объединенного цикла приведен на рис. 9.

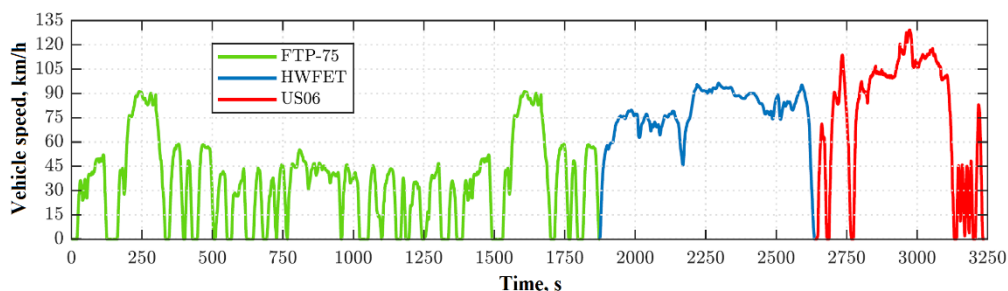


Рис. 9. График ездового цикла FTP-75 + HWFET + US06

Ездовой цикл US06 является более агрессивным по сравнению с ездовыми циклами FTP-75 и HWFET, так как максимальная скорость движения выше, а также увеличено число ускорений из состояния покоя до высоких скоростей. Таким образом, можно сделать вывод, что ездовой цикл US06 не подходит для моделирования движения в городской среде.

В исследованиях [15, 16] проводится математическое моделирование движения электромобиля по ездовому циклу UDDS. В работах [17, 18] – по ездовому циклу UDDS и HWFET.

Математическое моделирование движения гибридного городского автобуса проводится также по ездовому циклу ССВС (Chinese City Bus Cycle) [19]. График этого цикла приведен на рис. 10. Видно, что цикл состоит из двух повторяющихся фаз. Значение скорости движения не превышает 60 км/ч, а частые ускорения и замедления до нулевой скорости коррелируют с характером движения автобуса по городу.

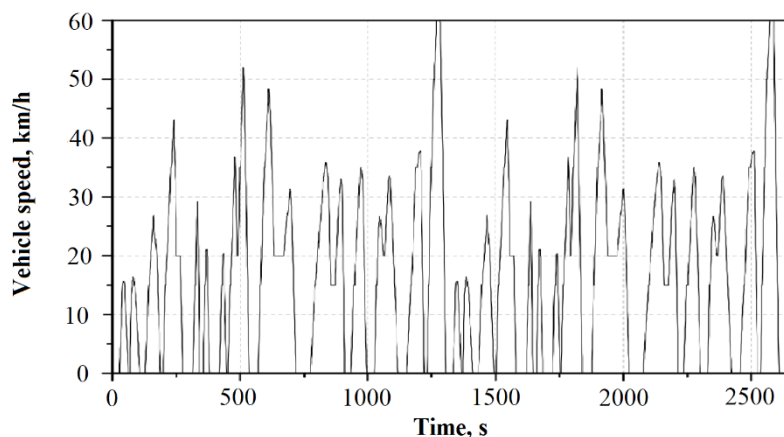


Рис. 10. График ездового цикла ССВС

В работе [20] авторами проводится разработка собственных ездовых циклов для транспортных средств разных категорий в округе города Торонто. За основу взяты картографические данные об округе, включающие ширину улиц, средние скорости движения, средняя загруженность другими водителями. В результате, для средних и тяжелых транспортных средств были получены ездовые циклы, приведенные на рис. 11.

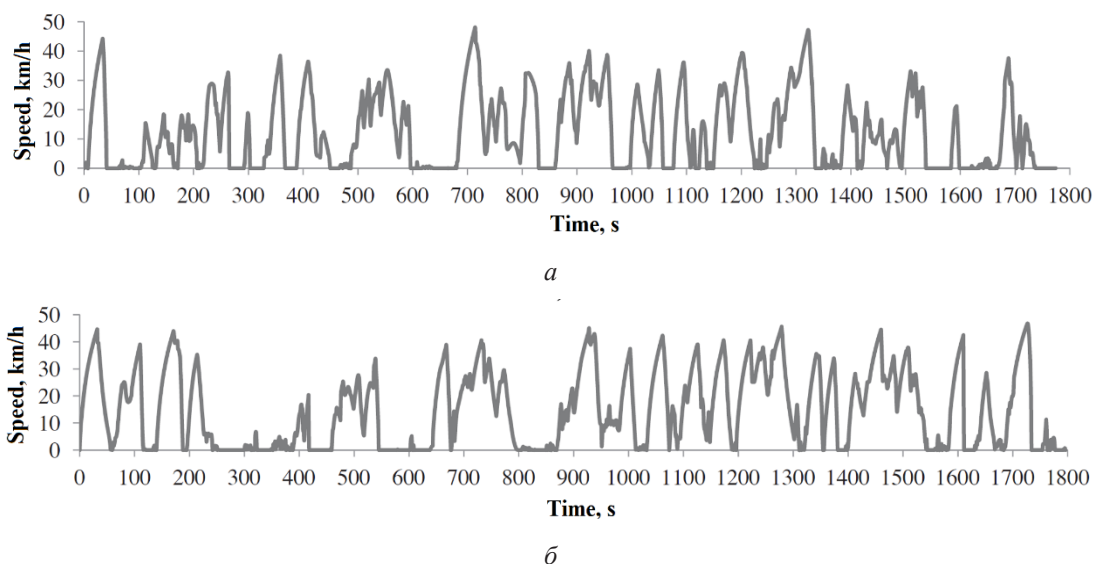


Рис. 11. Ездовые циклы для округа Торонто:
а – средние автомобили; б – тяжелые автомобили

В результатах исследования подчеркнуто, что полученные ездовые циклы схожи с международным ездовым циклом UDDS, однако обладают рядом особенностей, связанных с рассматриваемым городским округом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа ездовых циклов при математическом моделировании движения транспортных средств с тяговым электроприводом были выявлены наиболее часто применяющиеся. Диаграмма распределения ездовых циклов в зависимости от их повторения в различных источниках приведена на рис. 12.

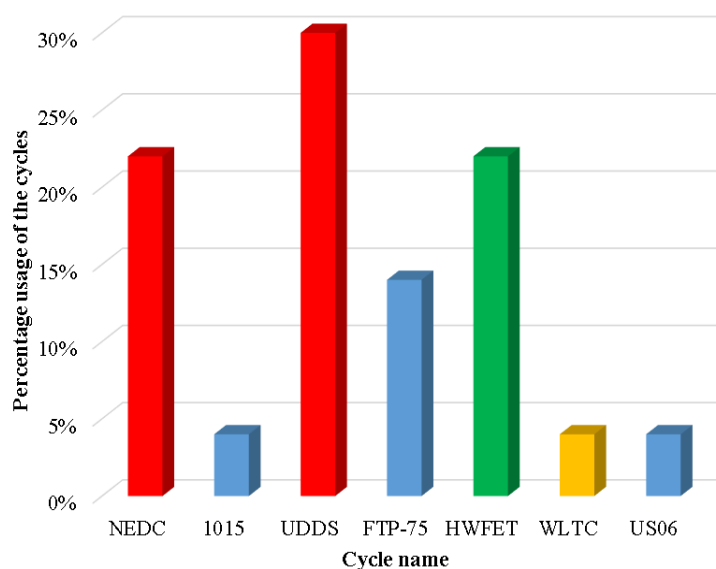


Рис. 12. Диаграмма распределения повторного использования циклов

Наиболее часто используемые ездовые циклы в городской среде – это NEDC и UDDS. Из них лидирует ездовой цикл UDDS. Также видно, что цикл FTP-75, являющийся усовершенствованной версией цикла UDDS, используется с достаточной частотой. Как было отмечено ранее, два этих цикла являются аналогичными.

Ездовой цикл HWFET, подходящий для моделирования движения по загородным трассам, близок к описанным выше циклам по частоте повторения в исследованных источниках. Это связано с тем, что зачастую он используется совместно с ездовыми циклами NEDC, UDDS или FTP-75.

Использование нескольких циклов при оптимизации одних и тех же параметров обусловлено следующим. Все приведенные стандартизированные циклы не являются универсальными. Обладая уникальными особенностями, каждый из циклов более или менее подходит для моделирования движения рассматриваемого транспортного средства. Поэтому для достижения наиболее достоверных результатов расчета применяют несколько циклов, а затем анализируют сходимость значений выбранных параметров с установленным диапазоном.

Ездовой цикл WLTC, в рассмотренных исследованиях встречается редко в виду его относительно недавнего появления. Однако он один из всех позволяет составить ездовой цикл как для гибридного автомобиля, так и для электромобиля.

Таким образом, для моделирования движения грузовых автомобилей и автобусов с электрическими накопителями энергии, оснащенных мехатронной трансмиссией, необходимо использовать ездовые циклы UDDS или FTP75 и WLTC, а затем провести анализ сходимости интересующих конструктора значений параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2022-015 от 07.04.2022 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Создание высокотехнологичного производства мехатронных трансмиссий перспективных грузовых автомобилей и автобусов КАМАЗ с электрическими накопителями энергии и водородными топливными элементами» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ensuring** Energy Efficiency and Safety of the Cyclic Operation of the Mining Dump Truck / A. Kartashov, et al. // Vth International Innovative Mining Symposium. 2020. Vol. 174. Article number 03009. DOI: 10.1051/e3sconf/202017403009.
2. **Research** of control algorithm of traction drive of a mining dump truck using simulation models of motion / A. S. Muravyev et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2052. Article number 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012028.
3. **Simulation** of operation of a sequential hybrid drive of a haul truck with a traction battery and a bilateral DC-to-DC converter / N V Buzunov, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 939. Article number 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012017.
4. **Kartashov A. B., Skotnikov G. I.** Simulation based feasibility confirmation of using hybrid powertrain system in unmanned dump trucks // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 819. Article number 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/819/1/012010.
5. **Butarovich D., Smirnov A., Skotnikov G.** Test bench for experimental research of hybrid powertrain algorithms based on rapid control prototyping unit // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 819. Article number 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/819/1/012023.
6. **Shift** schedule optimization of 2-speed electric vehicle using model predictive control / L. Guo, et al. // Proceedings of the 33-rd Chinese Control Conference. IEEE. 2014. Pp.156-161. DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896614.
7. **Parameters** optimization of two-speed powertrain of electric vehicle based on genetic algorithm / Y. Li, et al. // Advances in mechanical engineering. 2020. Vol. 12 (1). Pp. 1-16. DOI: 10.1177/1687814020901652.
8. **Tang Z. Q., Ma D. P., Gong X. W.** Transmission ratio optimization of two-speed pure electric vehicle // Applied Mechanics and materials. 2015. Vol. 722. Pp. 271-275. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.722.271.
9. **Ahssan M. R., Ektesabi M., Gorji S.** Gear ratio optimization along with a novel gearshift scheduling strategy for a two-speed transmission system in electric vehicle // Energies. 2020. Vol. 13, Iss. 19. Article number 5073. DOI: 10.3390/en13195073.
10. **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. Vol. 9 (4). Pp.268-275. DOI: 10.20485/jsaeijae.9.4_268.
11. **Kwon K., Seo M., Min S.** Efficient multi-objective optimization of gear ratios and motor torque distribution for electric vehicles with two motor and two-speed powertrain system // Appl Energy. 2020. Vol. 259. Article number 114190. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114190.
12. **Huang W., Huang J., Yin C.** Optimal Design and Control of a Two-Speed Planetary Gear Automatic Transmission for Electric Vehicle // Applied sciences. 2020. Vol. 10 (18). Article number 6612. DOI: 10.3390/app10186612.
13. **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. Article number 121419. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121419.
14. **Electric** hydraulic hybrid vehicle powertrain design and optimization-based power distribution control to extend driving range and battery life cycle / J. Eckert, et al. // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 252. Article number 115094. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115094.
15. **Genetic** algorithm based gear shift optimization for electric vehicles // V. Saini, et al. // SAE Int J Alternative Powertrains. 2016. Vol. 5 (2). Pp. 348-356. DOI: 10.4271/2016-01-9141.
16. **Guo L., Gao B., Chen H.** Online shift schedule optimization of 2-speed electric vehicle using moving horizon strategy // IEEE ASME Trans Mechatron. 2016. Vol. 21 (6). Pp.2858-2869. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2586503.
17. **Hierarchical** optimization of speed and gearshift control for battery electric vehicles using preview information // K. Han, et al. // American Control Conference (ACC), IEEE. 2020. Pp. 4913-4919. DOI: 10.23919/ACC45564.2020.9147841.
18. **Modelling**, simulations, and optimization of electric vehicles for analysis of transmission ratio selection / P. D. Walker, et al. // Adv Mech Eng. 2013. No. 5. Article number 340435. DOI: 10.1155/2013/340435.
19. **Mixed-integer** optimal design and energy management of hybrid electric vehicles with automated manual transmissions // Yu H., et al. // IEEE Trans Veh Technol. 2020. Vol. 69 (11). Pp. 12705-12715. DOI: 10.1109/TVT.2020.3018445.
20. **Amirjamshidi G., Roorda M. J.** Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area // Transportation Research. Part D: Transport and Environment. 2015. Vol. 34. Pp. 255-266. DOI: 10.1016/j.trd.2014.11.010.

ОБ АВТОРАХ

ЕМЕЛЬЯНОВ Максим Алексеевич, асп. каф. Колесные машины. Дипл. инж. в обл. транспортных ср-в специального назначения (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020). Готовит дис. о методах разработки управляющей системы для реализации криволинейного движения колесных шарнирно-сочлененных беспилотных транспортных средств.

ГАЗИЗУЛЛИН Руслан Ленарович, асп. каф. Колесные машины. Дипл. инж. в обл. наземных транспортно-технологических ср-в (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018). Готовит дис. о повышении энергоэффективности движения колесных машин путем применения адаптивного закона управления подводимой мощностью к движителю.

БУЗУНОВ Николай Викторович, ст. науч. сотр. НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН». Дипл. инж. в обл. проектирования и технологии радиоэлектронных средств (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013). Канд. техн. наук по специальности «Колесные и гусеничные машины» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017). Иссл. в обл. разработки бортовых систем управления объектами колесной и гусеничной техники.

КАРТАШОВ Александр Борисович, директор НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН». Дипл. инж. в обл. наземных транспортно-технологических ср-в (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007). Канд. техн. наук по специальности «Колесные и гусеничные машины» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010). Иссл. в обл. разработки крупногабаритных колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика.

EMELYANOV, Maxim Alekseevich, Postgrad. student, Dept. of Wheeled Vehicles. Dipl. eng. (MSTU named N. E. Bauman, 2020).

GAZIZULLIN, Ruslan Lenarovich, Postgrad. student, Dept. of Wheeled Vehicles. Dipl. eng. (MSTU named N. E. Bauman, 2018).

BUZUNOV, Nikolai Viktorovich, Senior researcher of REC "KAMAZ-BAUMAN". Dipl. eng. (MSTU named N. E. Bauman, 2013). Cand. of Tech. Sci. (MSTU named N. E. Bauman, 2017).

KARTASHOV, Alexander Borisovich, Director of REC "KAMAZ-BAUMAN". Dipl. eng. (MSTU named N. E. Bauman, 2007). Cand. of Tech. Sci. (MSTU named N. E. Bauman, 2010).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 4 (98), pp. 103-112, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).