

В. Б. КЛЕПИКОВ, Е. В. САКУН, Д. А. КУРОЧКИН

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ КОРОБКОЙ ПЕРЕДАЧ

Рассмотрена возможность создания системы электропривода электромобиля с упрощённой двухскоростной коробкой передач, которая не только повышает энергоэффективность электропривода, устраняет в коробке передач механические фрикционные синхронизаторы, но и упрощает муфту переключения за счет исполнения прямоугольной формы кулачков. Показано, что это может быть достигнуто системой управления электропривода, осуществляющей синхронизацию скоростей валов коробки передач и положения кулачков муфты и шестерни. Компьютерным моделированием подтверждена реализуемость данной идеи.

Ключевые слова: электропривод, электромобиль, коробка передач, синхронизация.

В. Б. КЛЕПИКОВ, Є. В. САКУН, Д. А. КУРОЧКІН

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЮ КОРОБКОЮ ПЕРЕДАЧ

Розглянута можливість створення системи керування електроприводом електромобіля зі спрощеною двошвидкісною коробкою передач, яка не тільки підвищує енергоефективність електропривода, усуває в коробці передач механічні фрикційні синхронізатори, а й спрощує муфту перемикачів за рахунок виконання прямокутної форми її кулачків. Показано, що це може бути досягнуто системою керування електропривода, що здійснює синхронізацію швидкостей валів коробки передач і положення кулачків муфти і шестерні. Комп'ютерним моделюванням підтверджена здійсненність цієї ідеї.

Ключові слова: електропривод, електромобіль, коробка передач, синхронізація.

V. B. KLEPIKOV, Y. V. SAKUN, D. A. KUROCHKIN

MOTOR CONTROL IN ELECTRIC VEHICLE WITH ENERGY EFFICIENT TRANSMISSION

The paper is concerned with the possibility of creating a motor control system for an electric vehicle with a simplified 2-speed gearbox that improves energy efficiency, eliminates the need for the frictional synchronizer rings, and simplifies the design of the dog clutch. It is shown that these results may be achieved by using the control system that synchronizes the gearbox shaft speeds and the positions of the dogs by control of the traction motor. The system is designed with using of cascade control approach and consists of 3 loops: torque control loop, speed control loop, and phase control loop. Two incremental encoders are used to measure gearbox shaft speeds and angles. The idea has been proven by computer simulation. It is shown that further research is needed to decrease the gearshift time.

Keywords: motor control, electric vehicle, gearbox, synchronization.

Введение. Ограниченность мировых запасов нефти и газа, а также постоянно ухудшающаяся экологическая обстановка в крупных городах создают необходимость перехода человечества на альтернативные виды транспорта. По мнению экспертов, в ближайшем будущем автомобили с двигателями внутреннего сгорания будут заменены на электромобили [1]. По состоянию на 2018 г. в мире было продано более 5 млн электромобилей, из которых 2,2 млн. в Китае, 1,3 млн. в Европе и 1,1 млн. в США [2].

Источником энергии в электромобиле является аккумуляторная батарея, от ёмкости которой зависит дальность пробега без подзарядки. В связи с тем, что используемые аккумуляторные батареи имеют высокую стоимость, вес и габариты, актуальной задачей является повышение энергоэффективности всех компонентов тягового электропривода, включая аккумуляторную батарею, силовой преобразователь, двигатель и трансмиссию.

Снижение потерь в электроприводе электромобиля возможно за счёт применения коробки передач и переключения передач таким образом, чтобы система преобразователь-двигатель всегда находилась в области с большим КПД [7-10]. На рис. 1 представлена типовая диаграмма областей в осях момент-скорость с указанием КПД электропривода электромобиля, ха-

рактерного для каждой из этих областей. Как известно, переключение коробки передач приводит к одновременному изменению как момента на колесе, так и скорости движения и поэтому, переключение может способствовать поддержанию рабочей точки электропривода в зоне повышенных значений КПД. В [10] утверждается, что в отличие от автомобилей, коробка передач может быть не столь сложной и достаточно ограничиться двумя передачами. В [7] показано, что эффект экономии электрической энергии зависит от цикла движения и типа коробки передач и может составлять более 10% для легкового транспорта. Эффект для грузового и внедорожного транспорта может быть существенно выше.

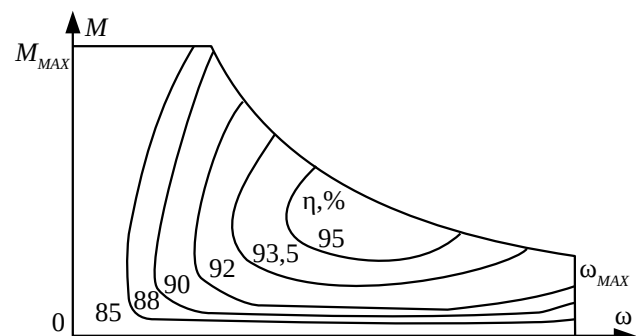


Рисунок 1 – Диаграмма КПД двигателя электромобиля

© В. Б. Клепиков, Е. В. Сакун, Д. А. Курочкин, 2019

Однако, применение традиционных коробок передач в электромобилях имеет и существенные недостатки: увеличивается сложность конструкции, вес, стоимость, снижается её надёжность по сравнению с односкоростной передачей. Этим объясняется то, что большинство выпускаемых легковых электромобилей производится с односкоростной трансмиссией [11].

В настоящее время ведутся работы по созданию специализированных коробок передач для применения в электрическом транспорте, которые отличаются меньшим числом передач, более высоким КПД и лучшими массогабаритными показателями. В [12-14] предлагается упрощение конструкции механической коробки передач за счёт выполнения функции синхронизации скоростей валов программным управлением полупроводниковым преобразователем, а не с помощью фрикционных механизмов, как в автомобилях. Такое решение позволяет исключить сцепление из трансмиссии электромобиля.

В настоящей работе рассматривается исполнение двухскоростной коробки передач, в которой, при переключении скоростей, обеспечивается не только синхронизация скоростей валов, но и синхронизация по положению кулачков муфты и шестерни, входящих в зацепление при переключении передачи. Такое решение позволяет повысить надёжность переключения, исключить из коробки передач фрикционные синхронизаторы, упростить форму кулачков и уменьшить ударные нагрузки в момент соединения. Сущность технической реализации вышеуказанного предложения описана в [4].

Цель настоящей работы – разработать законы управления электроприводом при переключении скоростей, проанализировать динамику процесса переключения, а также выполнить компьютерное моделирование данных процессов.

Материал и результаты исследований.

На рис. 2 показана кинематическая схема механической части электропривода электромобиля с упрощённой двухскоростной коробкой передач. Вращающий момент двигателя (1) передаётся на первичный вал коробки передач (10), на котором жёстко закреплены первичные шестерни передач (11 и 9). На вторичном валу (7) находятся вторичные шестерни (3 и 6), но, в отличие от первичных шестерён, они установлены на подшипниках и могут вращаться независимо от вторичного вала.

Первичные и вторичные шестерни передач всегда находятся в зацеплении и вращаются с пропорциональными скоростями. Коэффициент пропорциональности зависит от соотношения количества зубьев на первичной и вторичной шестернях каждой передачи. В общем случае обе вторичные шестерни имеют разные угловые скорости вращения.

Режим, когда вторичный вал вращается независимо от обеих вторичных шестерен, называется нейтральной передачей. В этом режиме вращающий момент двигателя не передаётся на вторичный вал коробки передач.

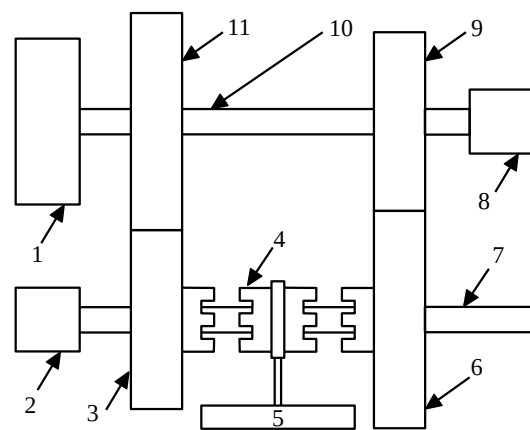


Рисунок 2 – Кинематическая схема электропривода электромобиля с двухскоростной коробкой передач

Для передачи вращающего момента на вторичный вал необходимо жёсткое соединение одной из вторичных шестерен с этим валом. Такое соединение осуществляется с помощью подвижной муфты (4).

Она всегда вращается со скоростью вторичного вала, и, благодаря подвижному шлицевому соединению, может перемещаться вдоль него. Перемещаясь вдоль вала, муфта может соединяться со вторичной шестерней передачи с помощью кулачков, имеющих на муфте и на шестерне. При этом происходит жёсткое соединение одной из вторичных шестерен передачи со вторичным валом коробки передач.

Перемещение муфты выполняется маломощным электроприводом (5) по сигналу системы управления электроприводом электромобиля.

Очевидно, что для соединения вторичного вала с вторичной шестерней передачи без возникновения удара их угловые скорости должны быть равны. Кроме того, при использовании упрощённой прямоугольной формы кулачков должно быть также обеспечено согласование их положений. На рис. 3 показаны развёртки кулачков муфты и шестерни в синхронизированном положении (рис. 3,а) и несинхронизированном (рис. 3,б), в котором шестерня отстаёт от муфты на угол $\Delta\phi$, в синхронизированном положении равный нулю.

Задачу синхронизации положений кулачков муфты и шестерни предполагается решить путём программного управления электроприводом электромобиля. Реализация обратной связи по положениям первичного и вторичного валов в коробке передач осуществляется с помощью энкодеров (8 и 2 на рис. 2).

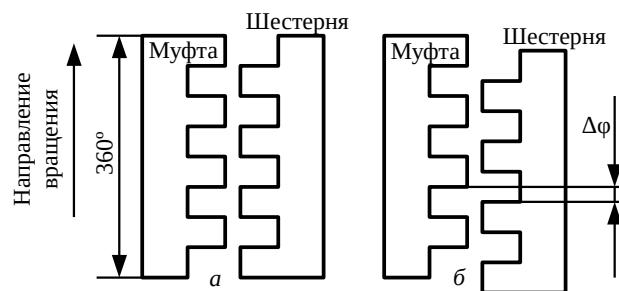


Рисунок 3 – Развёртки кулачков муфты и шестерни

Для исследований процессов синхронизации был выбран электропривод на базе двигателя постоянного тока, что обусловлено его простотой. Предлагаемая функциональная схема электропривода показана на рис. 4. Двигатель постоянного тока (ДПТ) питается от широтно-импульсного преобразователя напряжения (ШИП). Ротор двигателя соединён с первичным валом коробки переключения передач (КПП). Вторичный вал коробки передач соединён с дифференциалом (Д), который распределяет вращающий момент между колёсами электромобиля. Блок управления (БУ), получая сигнал задания момента от водителя, сигналы обратных связей от датчика тока (ДТ) и датчиков положения первичного и вторичного валов коробки передач (ДП1 и ДП2), рассчитывает напряжение задания для ШИП, а также передаёт команду управления переключением передач на электропривод вилки (ЭПВ), перемещающий муфту и вводящий её в зацепление с шестерней.

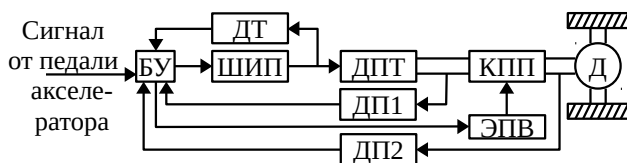


Рисунок 4 – Функциональная схема электропривода

Для синтеза системы управления электроприводом была использована математическая модель ДПТ с учётом индуктивности якоря в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ M &= K \Phi I_a \\ E &= K \Phi \omega \\ M - M_c &= J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где R_a – активное сопротивление цепи якоря; L_a – индуктивность цепи якоря; U_a – напряжение на якоре; I_a – ток якоря; E – ЭДС двигателя; K – конструктивный коэффициент машины постоянного тока; Φ – магнитный поток возбуждения; ω – угловая скорость ротора; M – вращающий момент двигателя; M_c – момент сопротивления; J_Σ – суммарный момент инерции ротора и первичного вала.

В нормальном режиме движения электропривод электромобиля работает в режиме регулирования момента, величина которого задаётся водителем через педаль акселератора (M_3). В двигателе постоянного тока вращающий момент пропорционален току якоря, что позволяет заменить систему регулирования момента на систему регулирования тока якоря, структурная схема которой показана на рис. 5. В данной системе ШИП представлен в виде апериодического звена с постоянной времени T_p , а суммарный момент инерции J_Σ равен суммарному моменту инерции ротора двигателя, валов коробки передач, и массы электромобиля, приведенных к скорости ротора.

Применение ПИ-регулятора тока (РТ) с коэффициентами $K_{РТ}$ и $K_{ИРТ}$ позволяет настроить контур на модульный оптимум. Для синхронизации скоростей валов может быть использована классическая двухконтурная система подчинённого регулирования (СПР) скоростью двигателя с внутренним контуром тока, приведенная на рис. 6. Применение П-регулятора скорости (РС) с коэффициентом $K_{РС}$ позволяет настроить контур скорости на модульный оптимум.

В качестве сигнала задания на вход системы поступает скорость вращения вторичного вала, приведенная к скорости первичного вала, которая рассчитывается как:

$$\omega_2' = \frac{N_2 \omega_2}{N_1}, \quad (2)$$

где ω_2 – скорость вращения вторичного вала;

N_1 и N_2 – количество зубьев первичной и вторичной шестерен требуемой передачи.

Один из вариантов реализации системы синхронизации положений – трехконтурная система регулирования положения с астатизмом второго порядка по сигналу задания ϕ_2' . Такая система обеспечит нулевую динамическую ошибку $\Delta\phi$ при линейно возрастающем угловом положении вторичного вала ϕ_2 , что справедливо для движущегося по инерции электромобиля на коротком промежутке времени, когда его скорость движения можно принять неизменной.

В данной работе рассматривается второй вариант реализации, в котором синхронизация положений валов КПП осуществляется добавлением в систему синхронизации скоростей (рис. 6) ещё одного контура регулирования с П-регулятором фазы вращения (РФ) (рис. 7). На вход регулятора фазы подаётся угловое смещение кулачков муфты и шестерни, приведенное к первичному валу КПП, получаемое как разность приведенного положения вторичного вала и положения первичного вала. Выходной сигнал с регулятора фазы прибавляется к приведенной скорости вторичного вала, а полученный сигнал используется как сигнал задания скорости первичного вала.

Практически сигнал углового смещения кулачков может быть получен путём подсчёта количества импульсов энкодеров с некоторого начального положения, в котором смещение было известно. Определение этого начального смещения предлагается назвать инициализацией системы. Инициализация должна производиться каждый раз после отключения питания блока управления и может быть осуществлена, например, медленным поворотом первичного вала при небольшом прижимающем усилии муфты до тех пор, пока кулачки муфты и вторичной шестерни не войдут в зацепление. Вошедшие в зацепление кулачки свидетельствуют о том, что смещение между ними является нулевым и это положение может быть принято точкой отсчёта.

Если положения валов измеряются инкрементальными энкодерами, то углы поворота валов можно рассчитать исходя из количества отсчитанных импульсов:

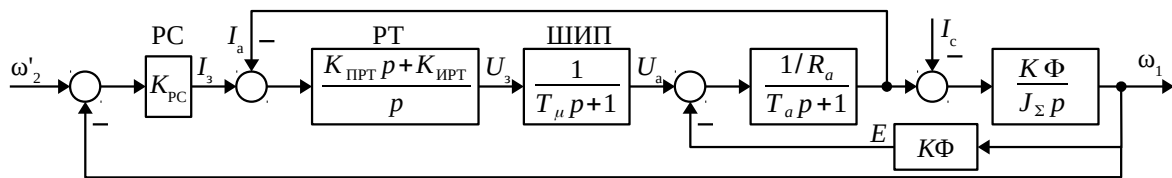


Рисунок 5 – Система управления моментом двигателя

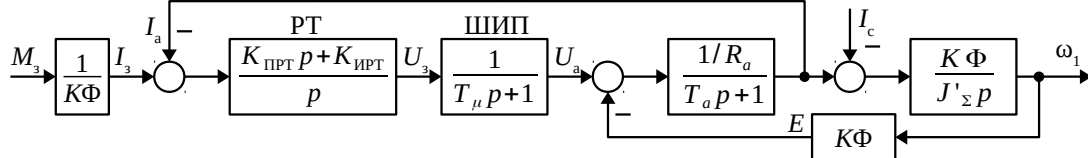


Рисунок 6 – Система управления синхронизацией скоростей валов

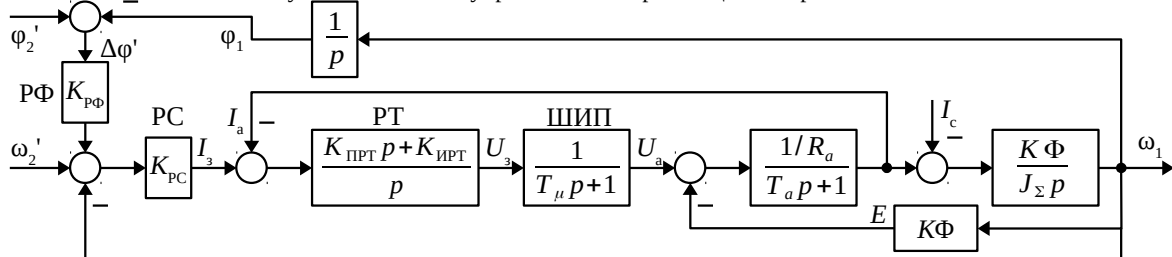


Рисунок 7 – Система управления синхронизацией фаз вращения валов

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{p_1}{P_1}, \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{p_2}{P_2}, \quad (3)$$

где p_1 и p_2 – количества импульсов первого и второго энкодеров отсчитанных с нулевого положения;

P_1 и P_2 – количество импульсов на оборот первого и второго энкодеров соответственно.

Приведенное к первичному валу угловое положение вторичного вала рассчитывается как:

$$\varphi_2' = \frac{N_2 \varphi_2}{N_1}. \quad (4)$$

Проверка работы предложенной системы осуществлялась компьютерным моделированием при следующих входных данных электропривода электромобиля, созданного на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ»: номинальное напряжение двигателя 72 В, номинальный ток двигателя 200 А, максимальный ток двигателя 500 А, сопротивление якоря 0,01 Ом, индуктивность якоря 0,093 мГн, $K\Phi = 0,2$ В·с/рад, суммарный момент инерции ротора и первичного вала 0,0268 кг·м².

На рис. 8 представлены временные диаграммы момента, скорости двигателя, положений муфты и шестерни в системе при выполнении синхронизации. Скорость вращения муфты, равная скорости вторичного вала, была принята неизменной, так как процесс переключения передачи происходит достаточно быстро, а инерционность электромобиля достаточно велика. Для компьютерного моделирования скорость вторичной шестерни в начальный момент времени была принята равной нулю.

На временном интервале $0 \div t_1$ выполнена синхронизация скоростей шестерни и муфты. Её завершение подтверждается равенством наклонов линейно возрастающих сигналов скоростей муфты и шестерни в момент времени t_1 . Следующим этапом, на интервале $t_1 \div t_2$, является синхронизация положений, в резуль-

тате которой положения муфты и шестерни выравниваются, что подтверждает наложение соответствующих величин временных диаграмм положений.

Из графика видно, что полное время синхронизации составляет около 160 мс, из которых 60 мс длится синхронизация скоростей валов и около 100 мс – синхронизация их положений. С учётом того, что время переключения передачи влияет на скоростные характеристики и плавность движения электромобиля, целесообразно продолжить дальнейшие исследования возможностей его минимизации.

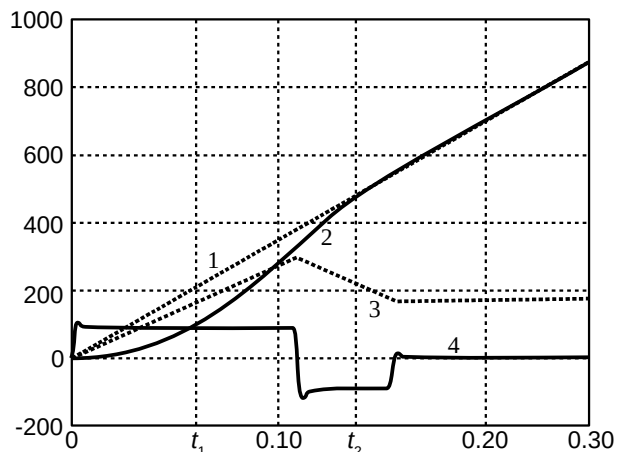


Рисунок 8 – Результаты моделирования:
положение 1 – муфты, 20·рад; 2 – шестерни, 20·рад;
3 – скорость двигателя, рад/с; 4 – момент двигателя, Н·м

Выводы. Использование коробки передач в электромобиле повышает его энергоэффективность. Возможность синхронизации скоростей и фаз вращений валов коробки передач путём программного управления преобразователем позволяет исключить из традиционной коробки передач фрикционные синхронизаторы, а также упростить форму кулачков, что повышает надёжность и снижает стоимость.

В работе предложены варианты систем управления синхронизацией фаз вращений валов, а также приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие возможность практической реализации.

Список литературы

1. Шидловский А. К., Павлов В. Б., Попов А. В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте. *Технічна електродинаміка*. Київ: ІЕД НАНУ. 2008, №4. С.43-47.
2. Electric car use by country. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country. (дата обращения 15.06.2019).
3. Клепиков В. Б., Гончар А. С. Рекуперативные режимы электропривода электромобиля с суперконденсаторами. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. Кременчук: КрНУ. 2012, Вип. 3(19). С. 216-218.
4. Клепиков В. Б., Сакун Е. В. Программная синхронизация положений валов коробки передач электропривода электромобиля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, Вип. 27(1249). С. 445-448.
5. Khaligh A., Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2010. Vol. 59(6). pp. 2806-2811.
6. Shen J., Khaligh A. A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/ Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System, *IEEE Transactions on transportation electrification*. 2015. Vol. 1. pp. 223-231.
7. Ren Q., Crolla D. A., Morris A. Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. USA, 2009. pp. 1260 – 1265.
8. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*. 2014, Vol. 7(12). pp. 8317-8337.
9. Hofman T., Dai C. H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, France, 2010. pp. 1 – 6.
10. Spanoudakis P., Tsourveloudis N. C., Koumartzakis G., Krah-toudis A., Karpouzis T., Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption. *Electric Vehicle Conference*, Italy, 2014. pp. 1 – 6.
11. Grunditz E., Thiringer T. Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016. Vol. 2. pp. 270-289.
12. Jun-Qiang Xi, Xiong Guang-Ming, Zhang Yan. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, China, 2008. pp. 1 – 5.
13. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng. Research on gear-change control technology for the clutchless automatic-manual transmission of an electric vehicle. *Journal of Automobile Engineering. Part D: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2013. Vol. 227. pp. 1446-1458.
14. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng, Chin-Ping Wang. Smooth gear-change control for EV Clutchless Automatic Manual Transmission. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Taiwan, 2012. pp. 971 – 976.

References (transliterated)

1. Shidlovskiy A. K., Pavlov V. B., Popov A. V. Primenenie superkondensatorov v avtonomnom akkumulyatornom elektrottransporte [Supercapacitors usage in autonomous battery electric vehicle]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamics]. Kyiv: IED NANU. 2008. № 4. pp.43-47.
2. Electric car use by country. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country. (accessed 15.06.2019).
3. Klepikov V. B. Gonchar A. S. Rekuperativnyie rezhimy elektropriroda elektromobilya s superkondensatorami [Recuperative modes of electric vehicle with supercapacitors]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektropriroda. Teoriia i praktyka* [Electromechanical and energy saving systems. Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kremenchuk: KrNU, 2012, vyp 3. pp. 216-2018.
4. Klepikov V. B., Sakun E. V. Programmnaya sinhronizatsiya polozheniy valov korobki peredach elektropriroda elektromobilya [Position synchronization of gearbox shafts of electric vehicle]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, Vyp. 27(1249). pp. 445-448.
5. Khaligh A., Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2010. vol. 59(6). pp. 2806-2811.
6. Shen J., Khaligh A. A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/ Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System, *IEEE Transactions on transportation electrification*. 2015. vol. 1. pp. 223-231.
7. Ren Q., Crolla D. A., Morris A. Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. USA, 2009. pp. 1260 – 1265.
8. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*. 2014. vol. 7(12). pp. 8317-8337.
9. Hofman T., Dai C. H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, France, 2010. pp. 1 – 6.
10. Spanoudakis P., Tsourveloudis N. C., Koumartzakis G., Krah-toudis A., Karpouzis T., Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption. *Electric Vehicle Conference*, Italy, 2014. pp. 1 – 6.
11. Grunditz E., Thiringer T. Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016. vol. 2. pp. 270-289.
12. Jun-Qiang Xi, Xiong Guang-Ming, Zhang Yan. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, China, 2008. pp. 1 – 5.
13. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng. Research on gear-change control technology for the clutchless automatic-manual transmission of an electric vehicle. *Journal of Automobile Engineering. Part D: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2013. vol. 227. pp. 1446-1458.
14. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng, Chin-Ping Wang. Smooth gear-change control for EV Clutchless Automatic Manual Transmission. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Taiwan, 2012. pp. 971 – 976.

Поступила 14.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клепиков Володимир Борисович (Клепиков Владимир Борисович, Klepikov Vladimir Borisovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

Сакун Євген Владиславович (Сакун Евгений Владиславович, Sakun Yevhenii Vladislavovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: eugene.sakun@gmail.com

Курочкін Дмитро Андрійович (Курочкин Дмитрий Андреевич, Kurochkin Dmitriy Andreevich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: kurochkin@gmail.com