

Е. В. САКУН**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ синхронизации скоростей в электроприводе электромобиля с упрощённой коробкой передач**

Ограниченность мировых запасов нефти и газа, а также постоянно ухудшающаяся экологическая обстановка в крупных городах обуславливают необходимость перехода человечества на электрический транспорт. В связи с тем, что используемые в электромобилях аккумуляторные батареи имеют высокую стоимость, вес, габариты и обеспечивают ограниченную дальность пробега без подзарядки, актуальной задачей является повышение энергоэффективности всех компонентов тягового электропривода. В статье рассмотрена возможность создания системы электропривода для электромобиля с упрощённой двухскоростной коробкой передач, которая не только повышает энергоэффективность электропривода, но и устраняет необходимость в механических фрикционных синхронизаторах за счёт выполнения синхронизации скоростей валов средствами программного управления электрическим преобразователем. Предложена система управления процессом синхронизации, построенная по принципу подчинённого регулирования с двумя контурами: контуром регулирования тока и контуром регулирования скорости вала двигателя с изменением структуры электромеханической системы при движении электромобиля. Разработана компьютерная модель системы, включающая в себя модель электродвигателя и трансмиссии, модель полупроводникового силового преобразователя, блок регулятора тока, блок регулятора скорости, блок расчёта сигнала задания скорости, блок программного управления переключением передач и блок модели водителя. В качестве параметров моделирования были использованы реальные данные созданного на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» электромобиля на базе автомобиля «Ланос». Приведены и проанализированы графики переходных процессов при разгоне и торможении электромобиля с переключением передач. Полученные результаты моделирования подтверждают реализуемость предложенной идеи.

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

Є. В. САКУН**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ синхронізації швидкостей в електроприводі електромобіля зі спрощеною коробкою передач**

Обмеженість світових запасів нафти і газу, а також погіршення екологічної ситуації у великих містах обумовлюють необхідність переходу людства на електричний транспорт. У зв'язку з тим, що використовувані в електромобілях акумуляторні батареї мають високу вартість, вагу, габарити і забезпечують обмежену дальність пробігу без підзарядки, актуальним завданням є підвищення енергоефективності всіх компонентів тягового електроприводу. У статті розглянута можливість створення системи електроприводу для електромобіля зі спрощеною двохшвидкісною коробкою передач, що не тільки підвищує енергоефективність електроприводу, а й усуває необхідність в механічних фрикційних синхронізаторах за рахунок синхронізації швидкостей валів шляхом програмного керування електричним перетворювачем. Запропоновано систему керування процесом синхронізації, побудовану за принципом системи підлеглого регулювання з двома контурами: контуром регулювання струму і контуром регулювання швидкості вала двигуна зі зміною структури електро механічної системи під час руху електромобіля. Розроблено комп'ютерну модель системи, що включає в себе модель електродвигуна і трансмісії, модель напівпровідникового силового перетворювача, блок регулятора струму, блок регулятора швидкості, блок розрахунку сигналу завдання швидкості, блок програмного керування перемиканням передач і блок моделі водія. В якості параметрів моделювання були використані дані створеного на кафедрі «Автоматизовані електро механічні системи» електромобіля на базі автомобіля «Ланос». Наведено і проаналізовано графіки перехідних процесів при розгоні і гальмуванні електромобіля з перемиканням передач. Отримані результати моделювання підтверджують можливість реалізації запропонованої ідеї.

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

Y. V. SAKUN**COMPUTER SIMULATION OF SPEED SYNCHRONIZATION PROCESS IN ELECTRIC VEHICLE DRIVE WITH SIMPLIFIED 2-SPEED GEARBOX**

The limited global oil and gas reserves, as well as the constantly deteriorating environmental situation in large cities, necessitate the transition of mankind to electric transport. Due to the fact that the used batteries have a high cost, weight, and dimensions and provide a limited range without recharging, an urgent task is to increase the energy efficiency of all components of the traction electric drive. The article considers the possibility of creating an electric drive system for an electric car with a simplified two-speed gearbox, which not only increases the energy efficiency of the electric drive but also eliminates the need for mechanical friction synchronizers by synchronizing shaft speeds by software control of the power converter. A synchronization process control system based on the principle of cascade control with two loops is proposed: a current control loop and a motor shaft speed control loop with a change in the structure of the electromechanical system while the electric vehicle is moving. A computer model of the system has been developed, which includes a model of an electric motor and transmission, a model of a semiconductor power converter, a current regulator block, a speed regulator block, a speed reference signal calculation block, a gear shift program control block, and a driver model block. As the modeling parameters, we used real data from an electric vehicle created at the Automated Electromechanical Systems Department of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" based on the "Lanos" car. The transients during acceleration and braking of an electric vehicle with gear shifting are presented and analyzed. The obtained simulation results confirm the feasibility of the proposed idea.

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

Введение. Ограниченность мировых запасов нефти и газа, а также постоянно ухудшающаяся экологическая обстановка в крупных городах обуславливают необходимость перехода человечества на альтернативные виды транспорта. По мнению экспертов, в бли-

жайшем будущем автомобили с двигателями внутреннего сгорания будут заменены на электромобили [3]. 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 [4].

© Е. В. Сакун, 2020

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 и обеспечивают ограниченную дальность пробега без подзарядки, актуальной задачей является повышение энергоэффективности всех компонентов тягового электропривода, включая аккумуляторную батарею, силовой преобразователь, двигатель и трансмиссию.

Один из способов повышения энергоэффективности – поддержание рабочего режима электродвигателя в зоне рационального коэффициента полезного действия, который, при отклонениях от номинального режима работы электродвигателя, существенно снижается. Как известно, коэффициент полезного действия зависит от развиваемого электродвигателем момента и скорости вращения. Снижение потерь в электроприводе электромобиля возможно за счёт применения коробки передач и переключения передач таким образом, чтобы электродвигатель находился в области с более высоким КПД [9-12]. На рис. 1 представлена типовая диаграмма областей в осях момент-скорость с указанием КПД электродвигателя электромобиля, характерного для каждой из этих областей [9].

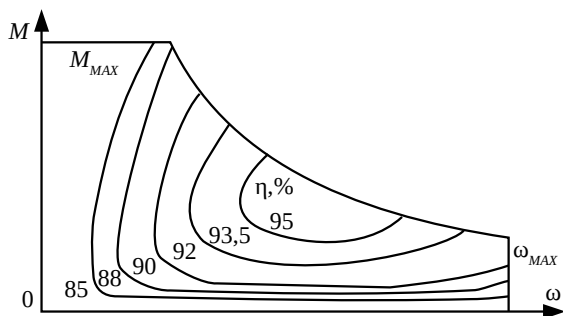


Рис. 1. Диаграмма КПД двигателя электромобиля

Переключение коробки передач приводит к одновременному изменению как момента на колесе, так и скорости двигателя и поэтому, переключение должно быть произведено таким образом, чтоб рабочая точка оказалась в зоне повышенных значений КПД. В [12] утверждается, что в отличие от автомобилей, коробка передач может быть не столь сложной и достаточно ограничиться двумя передачами. В [9] показано, что эффект экономии электрической энергии зависит от цикла движения и типа коробки передач и может составлять для легкового транспорта более 10%. Эффект для грузового и внедорожного транспорта может быть ещё выше.

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, что большинство выпускаемых легковых электромобилей производится с односкоростной трансмиссией [13].

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 [14-16] 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 [1, 2].

Цель статьи – пояснить сущность функционирования двухскоростной коробки передач, обосновать компьютерным моделированием возможность её технической реализации и определить принципы построения стенда для экспериментального исследования.

Материал и результаты исследований. На рисунке 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 шестерен, 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 числа 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, соответствует нейтральной передаче. В этом режиме вращающий момент двигателя не передаётся на вторичный вал коробки передач.

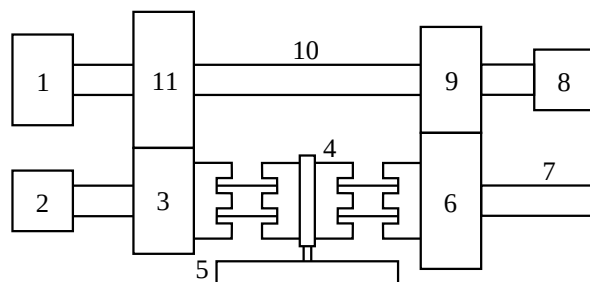


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода электромобиля с двухскоростной коробкой передач

Для передачи вращающего момента на вторичный вал нужно 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 ЭП электромобиля.

Очевидно, что для соединения вторичного вала с вторичной шестерней передачи без возникновения удара их угловые скорости должны быть равны. В [1, 2] для синхронизации скоростей вала и вторичной шестерни передачи предлагается применение программного управления электроприводом. Реализация обратной связи по скоростям первичного и вторичного валов в коробке передач осуществляется с помощью энкодеров (8 и 2 на рис. 2).

Для исследований процессов синхронизации был выбран электропривод на базе двигателя постоянного тока, установленный на электроприводе электромобиля, созданного на базе автомобиля «Ланос» для учебных и научных целей кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ». Функциональная схема электропривода показана на рис. 3.

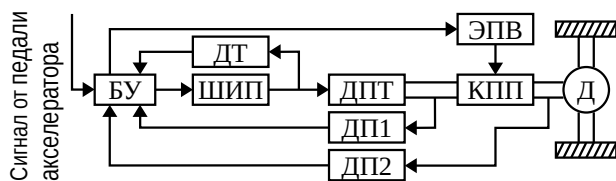


Рис. 3. Функциональная схема электропривода

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, 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.

Математическая модель ДПТ с учётом индуктивности якоря имеет вид:

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

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.

При движении электромобиля момент электропривода (M_3) задаётся водителем с помощью педали акселератора. 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. 4. В данной системе ШИП представлен в виде апериодического звена с постоянной времени T_p , а приведенный момент инерции J_Σ равен суммарному моменту инерции ротора двигателя и приведенных к скорости двигателя массы электромобиля и вращающихся частей механической части.

Применение ПИ-регулятора тока (РТ) с коэффициентами $K_{ПРТ}$ и $K_{ИРТ}$ позволяет настроить контур на модульный оптимум.

Для синхронизации скоростей валов может быть использована классическая двухконтурная система подчинённого регулирования скоростью двигателя с внутренним контуром тока (СПР), приведенная на рис. 5. Применение П-регулятора скорости (РС) с коэффициентом $K_{РС}$ позволяет настроить контур скорости на модульный оптимум.

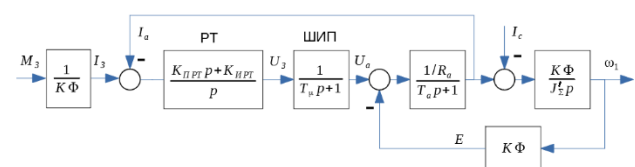


Рис. 4. Система управления моментом двигателя

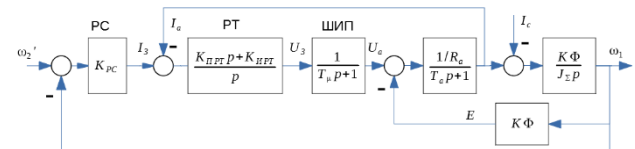


Рис. 5. Система управления синхронизацией скоростей валов

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.

Использование микропроцессора в качестве управляющего устройства измеряет скорости вала двигателя и выходного вала коробки передач в процессе движения одновременно.

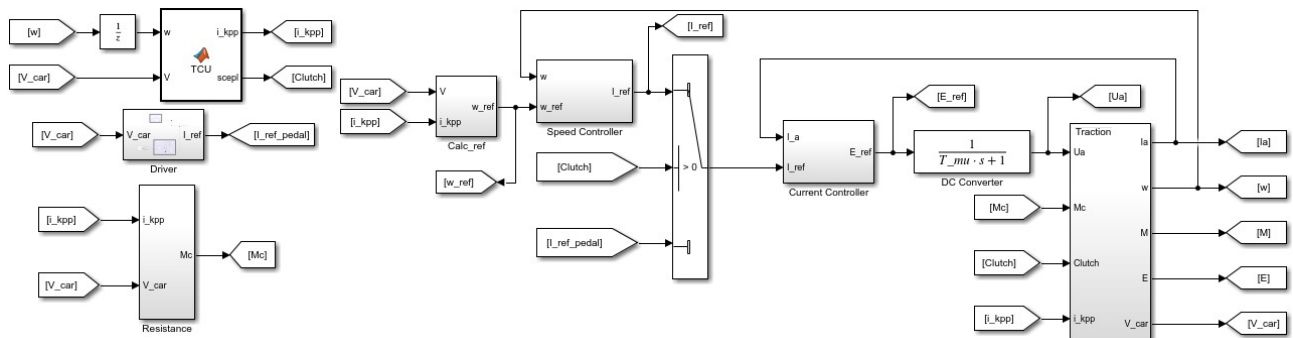


Рис. 6. Компьютерная модель электропривода в блочном виде

В тоже время микропроцессор анализирует значения сигналов момента (тока) и скорости двигателя и, при определении целесообразности перехода на другую скорость, изменяет структуру регулятора, представленную на рис. 4, дополняя её пропорциональным регулятором, на вход которого подаётся разность сигналов $\omega_2' - \omega_1$. Проверим компьютерным моделированием реализуемость согласования скоростей валов при переходе с одной структуры на другую, рассмотрим процесс оптимального разгона по быстрдействию до номинальной скорости на первой передаче и последующего переключения на вторую.

Компьютерная модель электропривода с двухскоростной энергоэффективной коробкой передач была построена в программном пакете Matlab/Simulink и представлена в блочном виде на рис. 6. Модель состоит из следующих блоков: модель электродвигателя и трансмиссии (Traction), модель полупроводникового силового преобразователя (DC Converter), блок регулятора тока (Current Controller), блок регулятора скорости (Speed Controller), блок расчёта сигнала задания скорости (Calc_ref), блока программного управления переключением передач (TCU), блока модели водителя (Driver). Блок модели электродвигателя и трансмиссии, в свою очередь, состоит из модели электромеханического преобразования энергии, блоков расчёта скоростей электро Автомобиля и электродвигателя.

На рис. 7 показана модель блока регулятора скорости, включающая в себя сумматор для вычисления ошибки по скорости, П-регулятор скорости и блок ограничения выходного сигнала. Значение коэффициента регулятора было рассчитано для настройки контура скорости на модульный оптимум. На рис. 8 показан блок расчёта скорости задания для режима синхронизации скоростей, выходной сигнал которого пропорционален скорости движения электро Автомобиля и передаточному числу включаемой передачи. На рис. 9 показан блок регулятора тока с ПИ-регулятором и блоками ограничения входного и выходного сигналов. Коэффициенты ПИ-регулятора рассчитаны для настройки контура тока на модульный оптимум.

На рис. 10 показана модель электромеханического преобразования энергии, входным сигналом которой является напряжение якоря U_a , а выходными – ток двигателя I_a , вращающий момент M и противо-ЭДС E . На рис. 11 показана модель блока расчёта скорости электро Автомобиля. Входными сигналами являются мо-

мент двигателя M , момент сопротивления M_c , приведенный момент инерции автомобиля J_{car} , суммарный момент инерции нейтральной передачи J_{full} и сигнал включения синхронизации скоростей Clutch. Для расчёта скорости электро Автомобиля использован интегратор, на вход которого поступает ускорение, рассчитанное как отношение суммы приведенных сил, действующих на электро Автомобиль, к его приведенной массе. Когда сигнал Clutch активен, на электро Автомобиль действуют только сила аэродинамического сопротивления воздуха и трение качения колес, а в приведенную массу не входят составляющие моментов инерции ротора двигателя и валов коробки передач.

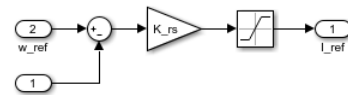


Рис. 7. Блок регулятора скорости

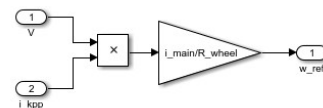


Рис. 8. Блок расчёта скорости задания

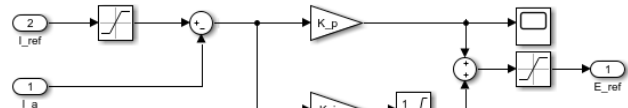


Рис. 9. Блок регулятора тока

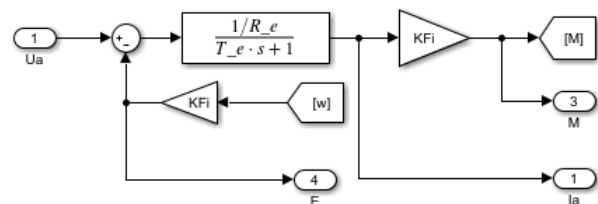


Рис. 10. Модель электромеханического преобразования энергии

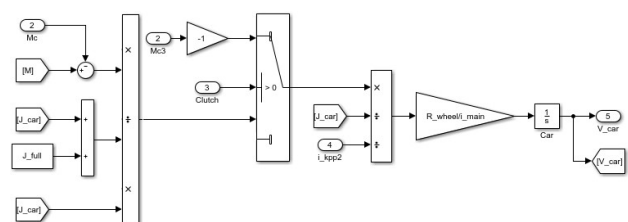


Рис. 11. Блок расчёта скорости электро Автомобиля

На рис. 12 показана модель блока расчёта скорости электродвигателя. Входными сигналами блока являются момент двигателя M , сопротивление M_c , приведенный момент инерции автомобиля J_{car} , суммарный момент инерции нейтральной передачи J_{full} и сигнал включения синхронизации скоростей $Clutch$. Когда $Clutch$ активен, на вал электродвигателя действуют только его собственный момент, а в приведенный момент инерции не входит составляющая при введенной массы электромобиля. На рис. 13 показана модель блока расчёта момента сопротивления, состоящего из постоянной составляющей силы трения качения и силы аэродинамического сопротивления, пропорциональной квадрату скорости электромобиля. При моделировании использовались параметры электромобиля (табл. 1), созданного в НТУ «ХПИ» на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» на основе автомобиля «Ланос» для учебно-научных целей.

На рис. 14 показаны зависимости скорости двигателя от скорости электромобиля для двух передаточных чисел упрощённой коробки передач. Жирная кривая показывает оптимальную траекторию для наиболее быстрого разгона и торможения. При принятых допущениях скорость электромобиля для переключения передачи при разгоне или торможении составляет 28 км/ч. Она будет достигнута при разгоне тогда, когда скорость двигателя достигнет номинального значения – 350 рад/с. Дальнейшее повышение скорости электромобиля возможно только на следующей передаче, для чего необходимо разомкнуть текущую передачу, снизить скорость двигателя до приведенной скорости второго вала на 2-й передаче и перемещением муфты включить 2-ю передачу.

На рис. 15 показана временная диаграмма разгона электромобиля с двухскоростной коробкой передач до 60 км/ч и торможения до полного останова. В интервале $0 \div t_1$ происходит разгон электромобиля на первой передаче с номинальным моментом двигателя. В интервале $t_1 \div t_2$ происходит размыкание первой передачи, снижение скорости двигателя для синхронизации шестерни вторичной передачи с муфтой переключе-

ния передач и включение второй передачи. Видно, что при синхронизации скоростей момент двигателя меняет знак и достигает максимального отрицательного значения. В интервале $t_2 \div t_3$ происходит разгон электромобиля на второй передаче с номинальным значением момента двигателя. В интервале $t_3 \div t_4$ момент двигателя меняет знак и происходит торможение электромобиля на второй передаче. В интервале $t_4 \div t_5$ происходит размыкание второй передачи, повышение скорости двигателя для синхронизации шестерни первичной передачи с муфтой переключения передач и включение первой передачи. Видно, что для синхронизации скоростей момент двигателя меняет знак и достигает максимального положительного значения. На интервале $t_5 \div t_6$ происходит торможение электромобиля на первой передаче с отрицательным номинальным моментом двигателя до полной остановки.

На рис. 16 показан процесс синхронизации скоростей на интервале $t_1 \div t_2$ при переключении с первой передачи на вторую. Видно, что момент двигателя меняет знак и достигает максимального отрицательного значения, обеспечивая минимальное время синхронизации. Как только скорость двигателя снижается до значения приведенной скорости вращения муфты переключения передач, момент двигателя возвращается к номинальному положительному значению и электромобель продолжает ускорение.

На рис. 17 показан процесс синхронизации скоростей на интервале $t_4 \div t_5$ при торможении и переключении со второй передачи на первую. Видно, что момент двигателя меняет знак и достигает максимального положительного значения, обеспечивая минимальное время синхронизации. Как только скорость двигателя повышается до значения приведенной скорости вращения муфты переключения передач, момент двигателя возвращается к номинальному отрицательному значению и электромобель продолжает торможение.

Из граф. 16, 17 видно, что время синхронизации скоростей валов при переключении передачи составляет не более 70 мс, что меньше среднего времени синхронизации для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания и фрикционными синхронизаторами. Такое быстродействие повышает управляемость электромобиля и плавность движения.

Таблица 1 – Параметры моделирования

Номинальное напряжение двигателя U_n , В	72
Номинальный ток двигателя $I_{ном}$, А	200
Максимальный ток двигателя $I_{макс}$, А	500
Сопротивление обмотки якоря R_a , Ом	0,01
Индуктивность обмотки якоря L_a , мГн	0,093
Конструктивный коэффициент машины КФ	0,2
Момент инерции ротора J , кгм	0,0268
Масса автомобиля m_{car} , кг	1595
Передаточное число первой передачи i_1	3,545
Передаточное число второй передачи i_2	1,478
Передаточное число главной передачи i_{main}	3,722
Коэффициент трения качения f_c	0,013
Коэфф-т аэродинамического сопротивления C_x	0,377

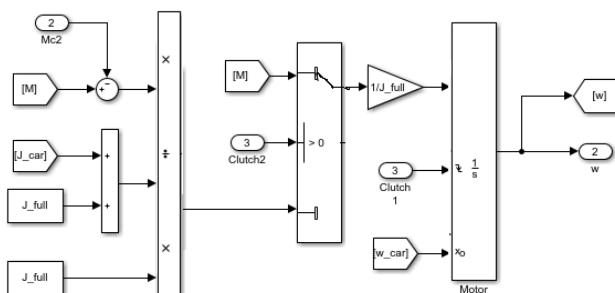


Рис. 12. Блок расчёта скорости электродвигателя

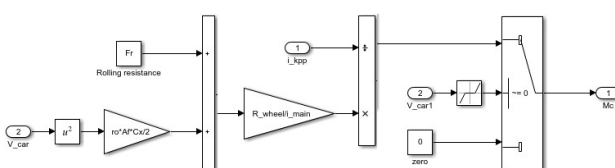


Рис. 13. Блок расчёта момента сопротивления

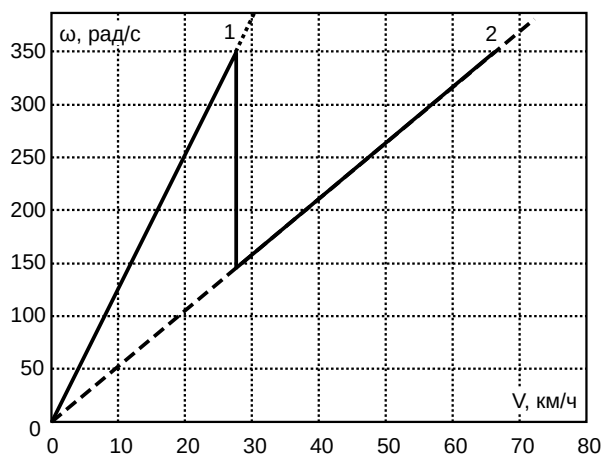


Рис. 14. Зависимость скорости двигателя от скорости электромобиля для 2-скоростной коробки передач

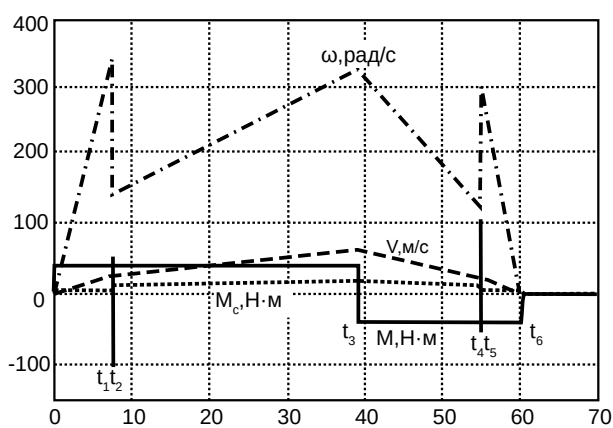


Рис. 15. Разгон электромобиля до 60 км/ч и торможение

Проведённый эксперимент подтверждает предложенный принцип согласования скоростей валов переходом от одной структуры управления (по моменту/току) к другой по разности скоростей валов коробки передач. Очевидно, что для обеспечения согласования по фазе кулачков муфты переключения и шестерни передачи используя промоделированный выше принцип перехода от одной структуры к другой следует дополнить структуру управления контуром регулирования по положению. При этом, в качестве входного сигнала регулятора положения следует использовать рассчитанное микропроцессором рассогласование положений кулачков шестерни и муфты, с учётом их числа.

Выводы. Выполненное компьютерное моделирование подтверждает возможность реализации упрощённой двухскоростной энергоэффективной коробки передач, исключающей механические синхронизаторы. Реализация достигается с помощью микропроцессорного электропривода программным управлением с изменением структуры электромеханической системы при движении электромобиля.

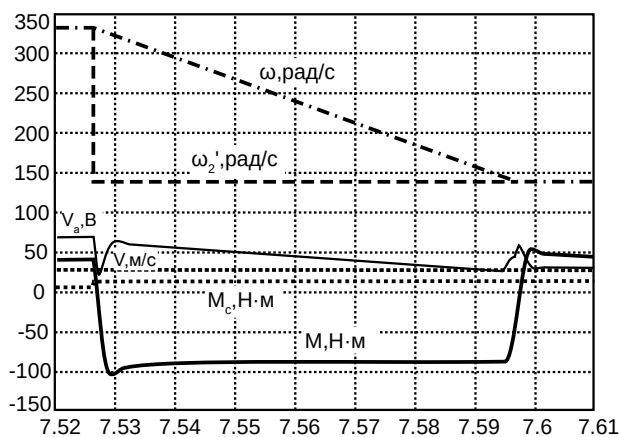


Рис. 16. Синхронизация скоростей при переключении с первой передачи на вторую

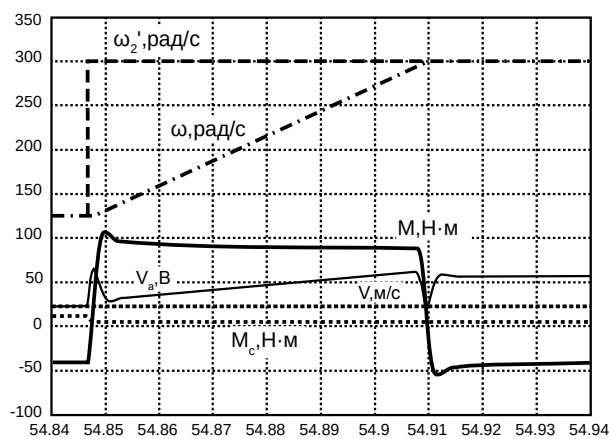


Рис. 17. Синхронизация скоростей при переключении со второй передачи на первую

Список литературы

1. Клепиков В.Б., Сакун Є.В., Курочкин Д.А. Керування електроприводом електромобіля з енергоефективною коробкою передач. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* Харків: НТУ «ХПІ», 2019, №9(1334). С. 94 – 98. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.18.
2. Клепиков В.Б., Сакун Є.В., Моїсєєв О.М., Семіков О.В., Курочкин Д.А. *Електропривод електромобіля з коробкою перемикачів передач.* Патент UA, № U201906000, 2019.
3. 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.
4. *Electric car use by country.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country. (дата обращения 15.06.2019).
5. Клепиков В.Б., Гончар А.С. Рекуперативные режимы электропривода электромобиля с суперконденсаторами. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Темат. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* Кременчук: КрНУ. 2012, №3(19). С. 216 – 218.
6. Клепиков В.Б., Сакун Е.В. Программная синхронизация положений валов коробки передач электропривода электромобиля. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Темат. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силовая электроника та енергоефективність.* Харків: НТУ «ХПІ». 2017, Вип. 27(1249). С. 445 – 448.
7. 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, Issue 6. pp. 2806 – 2811. doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.

8. 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, Issue 3. pp. 223 – 231. doi: 10.1109/TTE.2015.2464690.
9. Ren Q., Crolla D.A., Morris A. Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Dearborn, Michigan, USA, 7-10 September, 2009. pp. 1260 – 1265. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289707.
10. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*. 2014, Vol. 7, Issue 12. pp. 8317 – 8337. doi:10.3390/en7128317.
11. Hofman T., Dai C. H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, France, 1-3 September, 2010. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729082.
12. Spanoudakis P., Tsourveloudis N.C., Koumartzakis G., Krahtoudis A., Karpouzis T., Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption. *Proceedings of the IEEE International Electric Vehicle Conference*. Florence, Italy, 17-19 December, 2014. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056116.
13. Grunditz E., Thiringer T. Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016, Vol. 2, Issue 3. pp. 270 – 289. doi: 10.1109/TTE.2016.2571783.
14. Jun-Qiang Xi, Xiong Guang-Ming, Zhang Yan. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Hardin, China, 3-5 September, 2008. pp. 1 – 5. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677583.
15. 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, Issue 10. pp. 1446 – 1458. doi: 10.1177/0954407013482676.
16. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng, Chin-Ping Wang. Smooth gearchange control for EV Clutchless Automatic Manual Transmission. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Kachsiung, Taiwan, 11-14 July, 2012. pp. 971 – 976. doi: 10.1109/AIM.2012.6266016.
- hanichni i enerhozberihaiuchi systemy. Temat. vyp.: *Problemy avtomatyzovanoho elektropriyvoda. Teoriia i praktyka* [Electromechanical and Energy Saving Systems. Thematic issue: Problems of automatic electric drive. Theory and applications]. Kremenichuk: KrNU. 2012, №3(19). pp. 216 – 218.
6. Klepikov V.B., Sakun E.V. Programnaya sinhronizatsiya polozhenij valov korobki peredach elektropriyvoda elektromobilya [Position synchronization of gearbox shafts of electric vehicle]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. Temat. vyp.: *Problemy avtomatyzovanoho elektropriyvoda. Teoriia i praktyka. Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Thematic issue: Problems of automated electrodrives. Theory and practice. Power Electronics and Energy Efficiency]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. Vyp. 27(1249). pp. 445 – 448.
7. 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, Issue 6. pp. 2806 – 2811. doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
8. 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, Issue 3. pp. 223 – 231. doi: 10.1109/TTE.2015.2464690.
9. Ren Q., Crolla D.A., Morris A. Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Dearborn, Michigan, USA, 7-10 September, 2009. pp. 1260 – 1265. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289707.
10. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*. 2014, Vol. 7, Issue 12. pp. 8317 – 8337. doi:10.3390/en7128317.
11. Hofman T., Dai C. H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, France, 1-3 September, 2010. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729082.
12. Spanoudakis P., Tsourveloudis N.C., Koumartzakis G., Krahtoudis A., Karpouzis T., Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption. *Proceedings of the IEEE International Electric Vehicle Conference*. Florence, Italy, 17-19 December, 2014. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056116.
13. Grunditz E., Thiringer T. Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016, Vol. 2, Issue 3. pp. 270 – 289. doi: 10.1109/TTE.2016.2571783.
14. Jun-Qiang Xi, Xiong Guang-Ming, Zhang Yan. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Hardin, China, 3-5 September, 2008. pp. 1 – 5. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677583.
15. 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, Issue 10. pp. 1446 – 1458. doi: 10.1177/0954407013482676.
16. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng, Chin-Ping Wang. Smooth gearchange control for EV Clutchless Automatic Manual Transmission. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Kachsiung, Taiwan, 11-14 July, 2012. pp. 971 – 976. doi: 10.1109/AIM.2012.6266016.

References (transliterated)

Посмунула 05.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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