

УДК 629.3.064

Сергиенко А.Н., канд. техн. наук; Любарский Б.Г., д-р. техн. наук; Медведев Н.Г, канд. техн. наук; Сергиенко Н.Е., канд. техн. наук; Перевозник А.С., Соболев Е.Ф.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

1. Введение

Вектор развития современных автомобилей в настоящее время направлен на создание гибридных конструкций, основной составляющей частью которых является электрический тяговый привод (ЭП).

В первых конструкциях гибридных автомобилей таких фирм как Honda [1], General Motors [2] и др. были реализованы тяговые передачи мощности, в которых электрическая часть была выполнена на основе асинхронных электромеханических преобразователей энергии, а на автомобилях Тойота Prius [2] – синхронных переменного тока, Nissan Neo Hybrid [3], Toyota Estima и Highlander Hybrid, Honda Insight, Mercedes-Benz S-400 Hybrid [4] и др. – синхронных с возбуждением от постоянных магнитов.

Однако вопрос по однозначному выбору типа тягового привода для автомобиля в настоящее время остается открытым и для его решения необходим анализ динамических и энергетических показателей транспортного средства в целом.

Решение указанной задачи целесообразно производить по результатам моделирования движения автомобиля с гибридной силовой установкой (ГСУ).

2. Постановка задачи и основные уравнения, подсистемы модели

В работе поставлена цель: разработать имитационную модель тягового электропривода гибридного автомобиля на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов.

Имитационная модель гибридного автомобиля может быть разработана в универсальной интегрированной среде MATLAB/Simulink [5], которая позволяет моделирование его систем, визуализацию результатов исследований [6 – 8]. На рис. 1 представлена разработанная комплексная модель электромеханическая модель автомобиля с ГСУ. Основными ее компонентами являются следующие подсистемы: ДВС, электрической части, планетарного механизма, регулирования потребления энергии и динамики автомобиля.

В подсистеме ДВС (Internal Combustion Engine) построена модель бензинового двигателя с ограничителем скорости без учета динамики сгорания топливно-воздушной смеси.

Электрическая подсистема (Electrical Subsystem) состоит из 4 частей: электродвигатель (ЭД), генератора, никель-металлогидридной АКБ и преобразователя напряжения.

Подсистема планетарного механизма (Planetary Gear Subsystem) моделирует распределитель мощности, который регулирует направление её потоков и согласовывает работу ДВС, генератора и ЭД на разных режимах работы ГСУ.

Подсистема динамики автомобиля (Vehicle Dynamics) моделирует механическую часть автомобиля.

Современный ЭП представляет собой конструктивное единство устройства управления, электродвигателя и силового преобразователя. Как правило, управление ЭП переменного тока осуществляется за счет изменения выходных параметров силового

© А.Н. Сергиенко, 2015

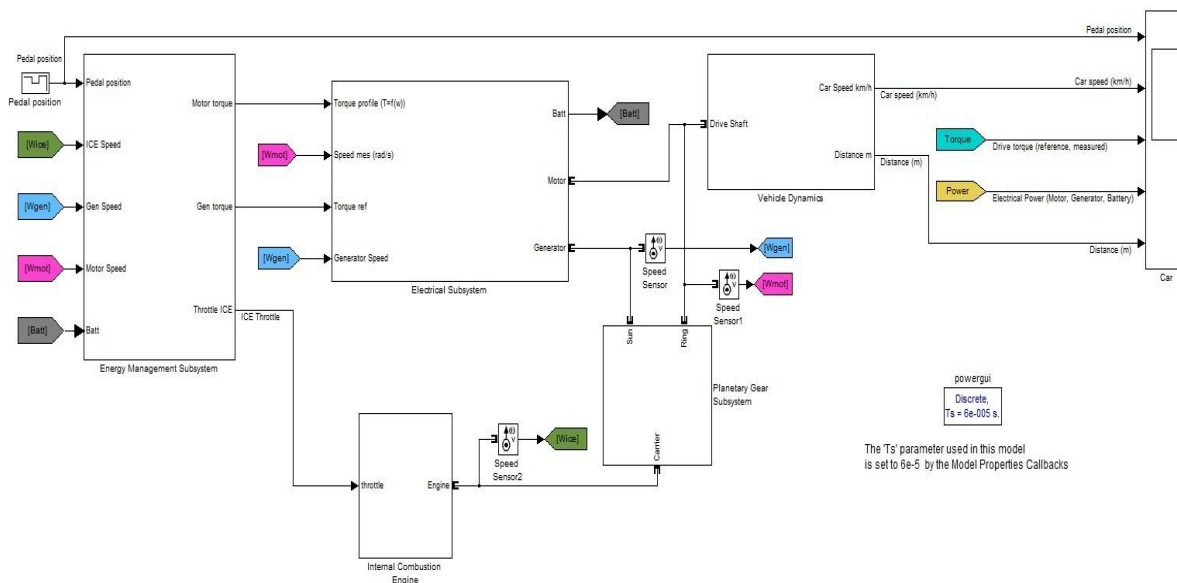


Рис. 1. Simulink-модель автомобиля с гибридной силовой установкой

преобразователя (частота, напряжение и т.д.) [9].

Для случаев, когда в процессе эксплуатации нагрузка может меняться на одной и той же частоте, т.е. нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а также в случаях, когда необходимо получить расширенный диапазон регулирования частоты при номинальных моментах, применяется векторный метод управления ЭД [9, 10].

Для регулирования частоты вращения в приводе предусмотрены обратные связи:

- по углу поворота ротора, которая определяет положение ротора относительно статора (угловая координата ротора). Связь формирует вектор напряжения статора с использованием пространственно-векторной ШИМ;

- по току статора, обратная связь, которая позволяет установить режим управления привода при ограничении тока статора (режим пуска), также обратная связь по току корректирует положение вектора напряжения статора сформированного пространственно-векторной ШИМ с использованием информации от обратной связи по углу положения ротора;

- обратная связь по угловой скорости (производная угловой координаты), позволяет создать привод с заранее заданной скоростью движения. Связь отвечает за поддержание заданной скорости движения.

Модель генератора построена по такому же принципу, как и ЭД.

Применение PI-регулятора частоты вращения ЭД с обратной связью (рис. 2) позволяет стабилизировать частоту вращения ЭД. Одно из преимуществ системы с обратной связью – быстроедействие [9–11].

Модель регулятора частоты вращения (рис. 3) построена на основе PI-регулятора [10]. Выходной сигнал PI-регулятора – заданный крутящий момент, используемый в блоке регулятора тока.

Схема векторного контроля синхронного двигателя с постоянными магнитами представлена на рис. 4. Блок $dq - abc$ выполняет преобразование dq составляющих то-

ка в фазовые переменные abc . Регулятор тока – это двухпозиционный автоматический регулятор с регулируемым диапазоном частот.

Блок преобразования углов используется для получения связи между электрическими и механическими параметрами ротора при различных его положениях. Блок

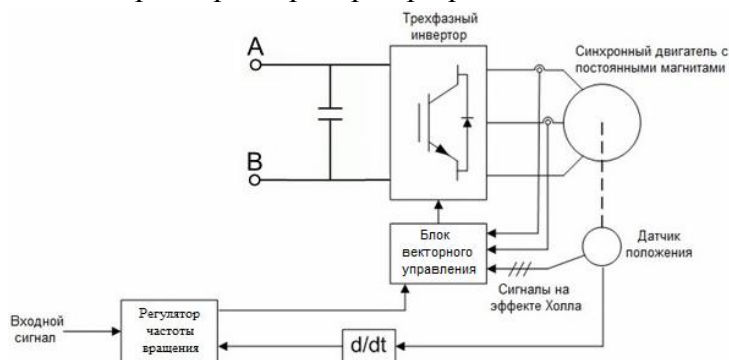


Рис. 2. Структурная схема электропривода с СДПМ

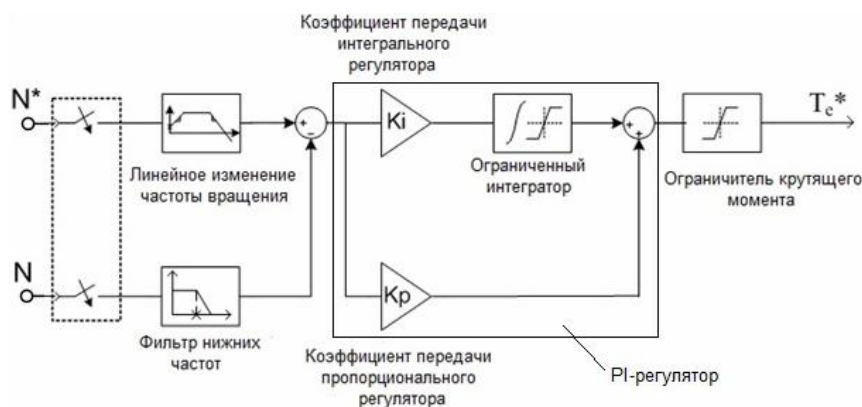


Рис. 3. Структурная схема регулятора частоты вращения ЭД

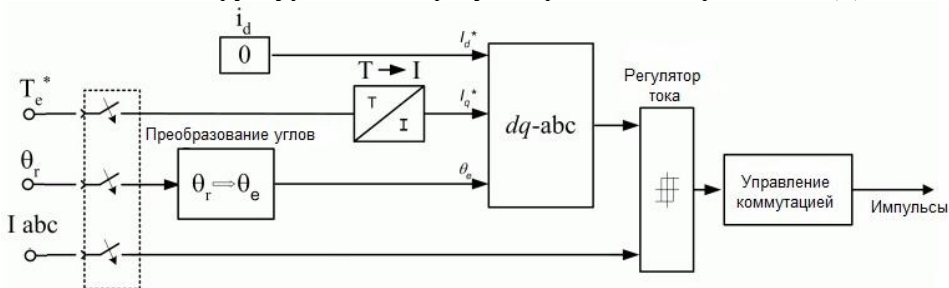


Рис. 4. Структурная схема векторного контроля

управления коммутацией применяется для ограничения частоты преобразователя. Блок $T \rightarrow I$ выполняет преобразование данных о крутящем моменте в максимальный ток. Зависимость, используемая для преобразования, предполагает П-образную синусоидальную форму кривой тока. На практике вследствие индуктивности ЭД невозможно получить такой ток. По этой причине электромагнитный момент должен быть ниже, чем эталонный, особенно при высокой частоте вращения [11].

Блок трехфазного инвертора состоит из регулируемого источника тока расположенного в цепи постоянного тока, двух регулируемых источников напряжения и двух регулируемых источников тока в цепи переменного тока (рис. 5).

Величина тока регулируемого источника равна:

$$I_{dc} = \frac{(P_{out} + P_{losses})}{V_{in}}, \quad (1)$$

где I_{dc} – постоянный ток; P_{out} – мощность источников переменного тока; P_{losses} –

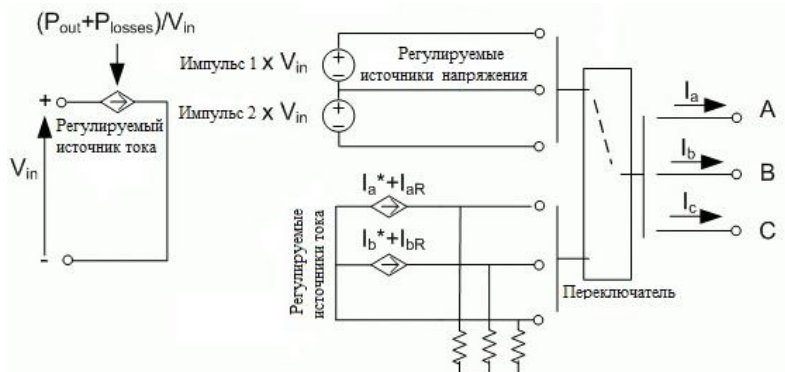


Рис. 5. Структурная схема трехфазного инвертора

потери в электронном устройстве; V_{in} – постоянное напряжение магистрали.

Ограничитель тока не допускает превышение заданного значения после трансформации.

Там где протекает переменный ток, источники тока представляют собой средние токи фаз. Блоки источника напряжения задают прямоугольную форму его колебаний и соответствующее изменение фазного тока. Выходной сигнал источника напряжения зависит от значения импульса (1 или 0) посылаемого от регулятора тока [11, 12].

Подсистема, описывающая работу пространственно-векторной модуляция (ПВМ), включает семь блоков, представленных на рис. 6. Трехфазный генератор используется для того чтобы вырабатывать синусоидальные фазные напряжения с различной частотой и амплитудой [12]. Эти три сигнала сдвинуты относительно друга на углы $2\pi/3$ радиан. Трансформация $\alpha\beta$ преобразовывает переменные значения напряжений из трехфазной системы в двухфазную $\alpha\beta$ систему. Векторный сектор $\alpha\beta$ ищет сектор плоскости $\alpha\beta$, в которой находится вектор напряжения. Плоскость $\alpha\beta$ разделена на 6 различных секторов. Векторы напряжений образуют между собой угол $\pi/3$ радиан.

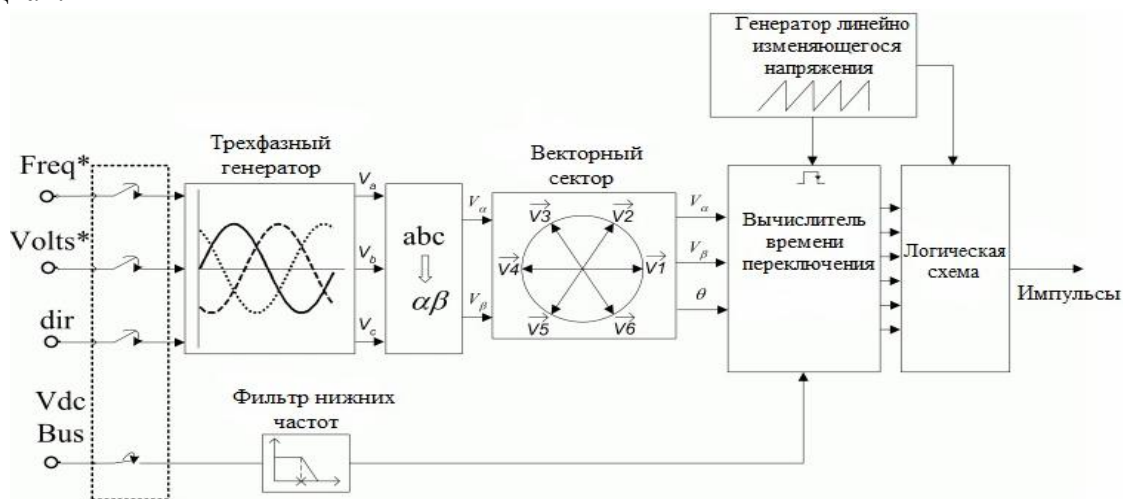


Рис. 6. Пространственная векторная модуляция

Подсистема генератора линейно изменяющегося напряжения применяется для создания единичного сигнала с частотой переключений ПВМ. Вычислитель времени переключения определяет время переключения между векторами напряжений. Входной сигнал данного блока определяется сектором, в котором лежит вектор напряжения. Логическая схема получает сигналы от вычислителя времени переключения и от генератора линейно изменяющегося напряжения и сравнивает сигнал генератора и время срабатывания для того, чтобы привести в действие переключатели инвертора в нужное время [6, 10].

Подсистема, описывающая работу трехфазного инвертора, состоит из регулируемого источника тока расположенного в цепи постоянного тока и трех регулируемых источников напряжения расположенных в цепях переменного тока (см. рис. 7).

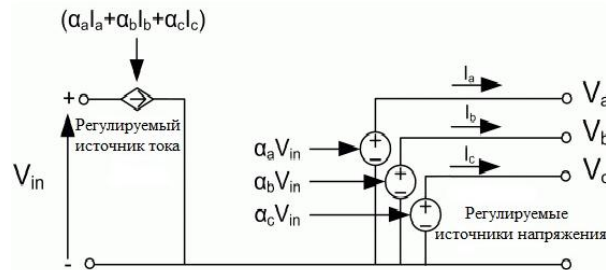


Рис. 7. Структурная схема трехфазного инвертора

Постоянный ток I_{dc} равен:

$$I_{dc} = \alpha_a \cdot I_a + \alpha_b \cdot I_b + \alpha_c \cdot I_c, \quad (2)$$

где $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ – коэффициенты заполнения фаз инвертора A, B и C ; I_a, I_b, I_c – трехфазные токи.

Напряжение трехфазного инвертора:

$$V_a = \alpha_a \cdot V_{in}, \quad V_b = \alpha_b \cdot V_{in}, \quad V_c = \alpha_c \cdot V_{in}, \quad (3)$$

где V_{in} – напряжение на шине постоянного тока.

Блок прерывателя включает в себя конденсатор и динамический прерыватель, который используется для поглощения энергии, вырабатываемой при замедлении ЭД.

Для обеспечения взаимодействия источников энергии необходима система регулирования потребления энергии, которая включает в себя следующие подсистемы:

- вычисления необходимой величины крутящего момента ДВС (в гибридном режиме и при его отключении) (рис. 8);
- контроля состояния АКБ (рис. 9);
- контроля мощности, потребляемой от АКБ (рис. 10).

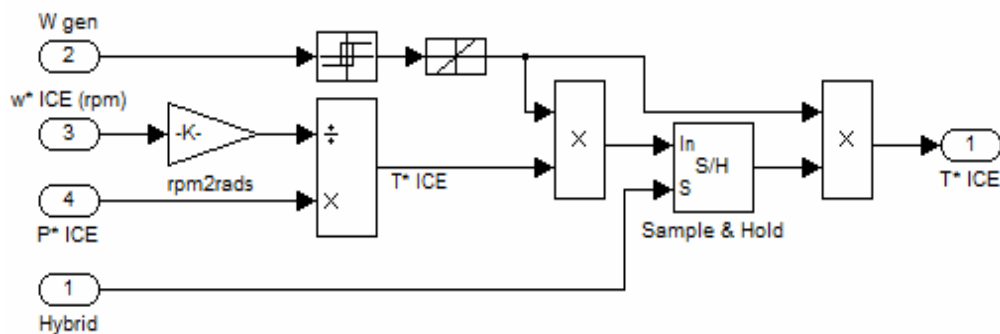


Рис. 8. Подсистема, вычисляющая требуемый крутящий момент ДВС

Система энергетического контроля устанавливает базовый сигнал для ЭД, генератора и ДВС для того, чтобы точно распределить энергию от этих 3-х источников. Энергетический контроль осуществляется в соответствии с данными о режиме движения и ходе педали акселератора.

Подсистема контроля состояния АКБ поддерживает её в заряженном состоянии между 40% и 80% во избежание перезарядки или недостаточного заряда. Энергия запасается путем рекуперативного торможения. Это означает, что избыточная мощность

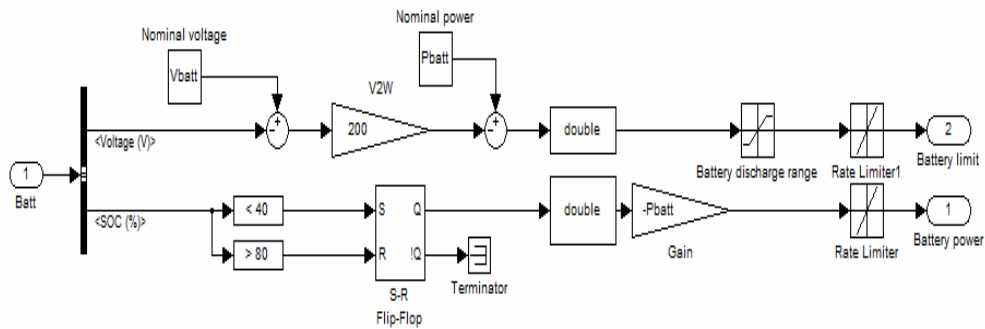


Рис. 9. Подсистема контроля состояния АКБ

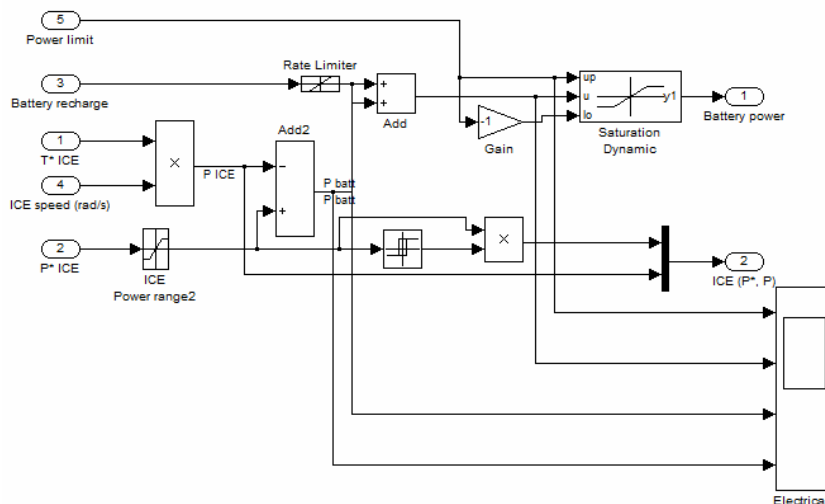


Рис. 10. Подсистема вычисления заряда АКБ

ДВС используется генератором только для снабжения энергией ЭД. Когда заряд батареи ниже 40%, но выше 10% прекращается бесшумный режим движения. Избыточная мощность используется генератором для зарядки между 40% и 60% состояние заряда батареи считается на достаточном уровне. При этом автомобиль движется за счет энергии АКБ в бесшумном режиме со скоростью ниже 40 км/ч, ДВС работает в оптимальном режиме и избыточная мощность используется генератором для зарядки АКБ. Когда заряд батареи увеличивается с 60% до 80%, продолжает работать режим потребления энергии, но АКБ. Это происходит при малых скоростях и при остановках. Заряд АКБ ниже 10% считается критическим. На этом уровне система энергетического контроля сконцентрирована на восстановлении требуемого заряда [13].

Для предотвращения падения напряжения АКБ предусмотрена также подсистема контроля потребляемой мощности (рис. 11).

Система регулювання потрєблення енергії управляє режимами роботи ЕД, генератора и ДВС, и при необходимости принимає решение, когда нужно включить гибридный режим движения, а когда отключить. Общая схема этой системы представлена на рис. 12.

Подсистема регулювання потрєблення енергії (Energy Management Subsystem) (см. рис. 11) устанавливает базовый сигнал для ЭД, генератора и ДВС для того, чтобы точно распределить энергию от этих 3-х источников.

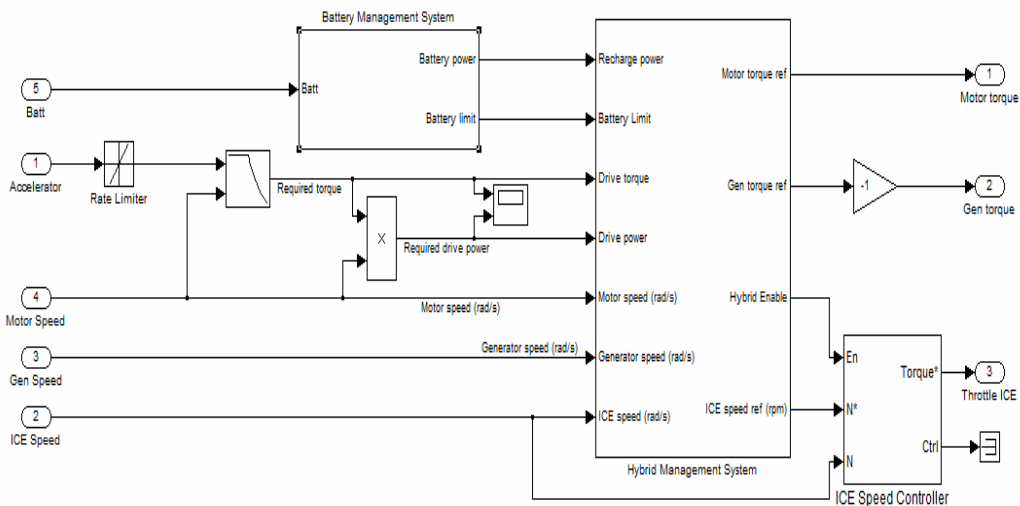


Рис. 11. Модель энергетического контроля

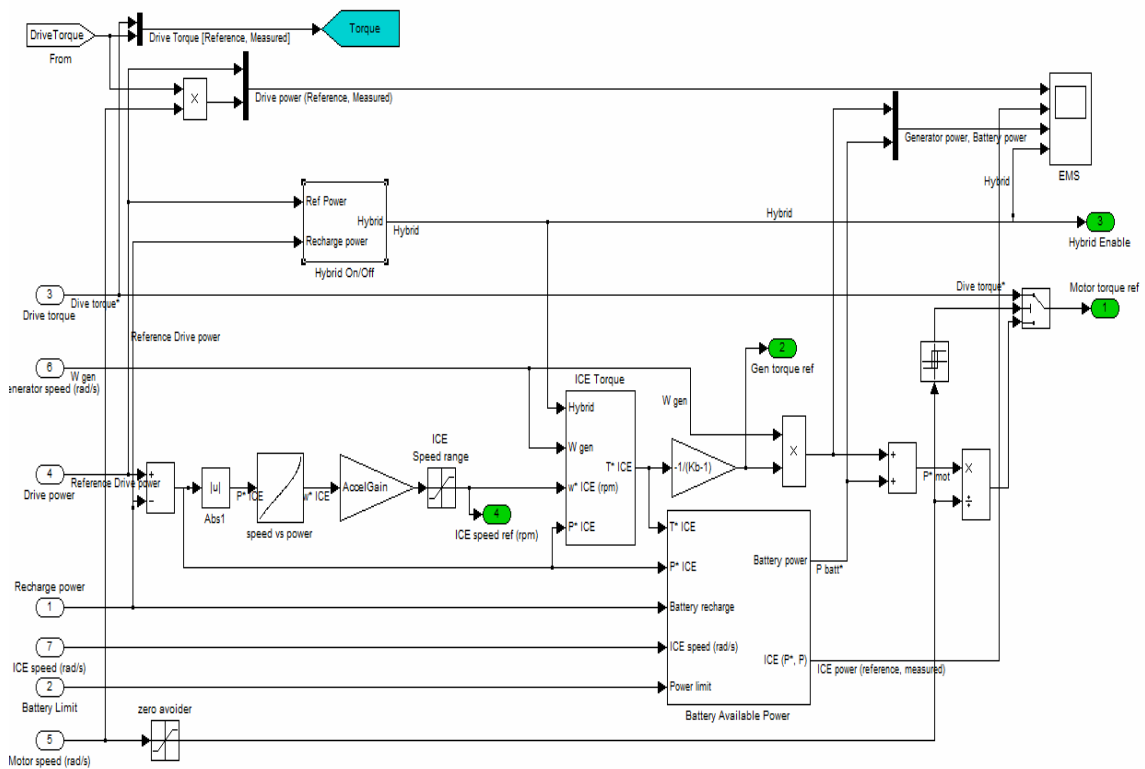


Рис. 12. Система управления режимами движения

Система управління забезпечує в відповідності з положенням педалі управління швидкістю і режимами руху ступенчасте регулювання зміни потужності на кожному з джерел енергії автомобіля. Задаваний системою управління закон зміни моменту в приводі колес і отриманий в результаті моделювання декілька відрізняється в режимі рекупераційного гальмування.

Результаты имитационного моделирования

Результаты моделирования движения автомобиля 2 класса с ГСУ – изменение мощности ЭД, генератора и АКБ в процессе движения приведены на рис 13. Изменение крутящего момента в приводе в процессе движения автомобиля показано на рис. 14. Система управления обеспечивает в соответствии с положением педали управления скоростью и режимами движения ступенчатое регулирование изменения мощности на каждом из источников энергии автомобиля. На гибридном режиме разгона момент привода возрастает до максимального значения, хотя изменение момента ДВС происходит в соответствии с его внешней характеристикой. В режиме установившегося движения двигатель

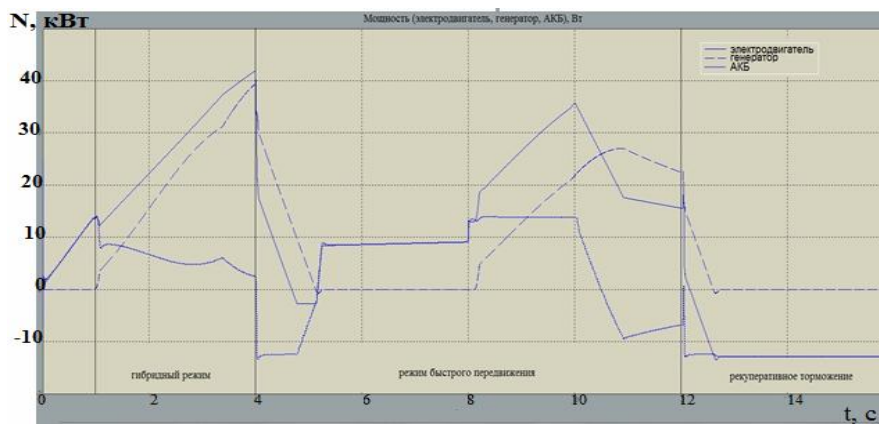


Рис. 13. Изменение мощности электродвигателя, генератора и АКБ

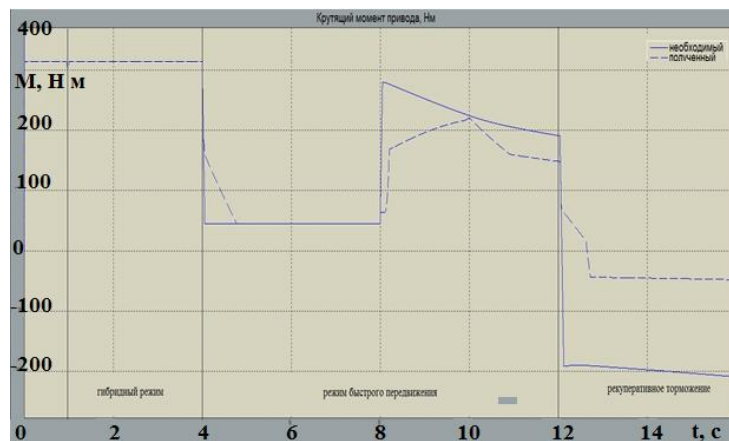


Рис. 14. Изменение крутящего момента привода

роботає на оборотах холостого ходу – 800 об/мин. При рекупераційному гальмуванні система управління встановлює частоту обертання 2000 об/мин для підзарядки АКБ. Характер зміни отриманих параметрів в процесі руху автомобіля відповідає реальним значенням.

Заклучение.

1. Разработанная имитационная модель тягового электропривода гибридного автомобиля на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов позволяет моделировать различные режимы движения автомобиля и проводить количественную оценку энергетических параметров работы его элементов таких как: тяговый электродвигатель, генератор, аккумуляторная батарея и др.

2. Имитационная модель создана на основе стандартных элементов среды моделирования MATLAB/Simulink и позволяет легко изменять параметры отдельных элементов в зависимости от их физических характеристик.

3. Предложенная имитационная модель тягового электропривода гибридного автомобиля позволит проводить сравнительный анализ различных технических решений и элементов привода для поиска рациональных конструкций транспортных средств.

Литература 1. Дэниэлс Д. Современные автомобильные технологии. – М.: АСТ, 2003. – 224 с. 2. Скворцов В.А, Берестов А.П. Тенденции в развитии транспортных средств с использованием электропривода // Автомобильная электроника.– 2004. – №1 – С. 85-87. 3. Гібридні автомобілі / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В.]. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 с. 4. Раков В.А. Развитие парка гибридных автомобилей. / В.А. Раков // Мир транспорта. – 2013. – №1. – С. 52-59. 5. Ch. Lin, Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis, J. Stein. Integrated, feed-forward hybrid electric vehicle simulation in SIMULINK and its use for power management studies. Automotive research center. The University of Michigan, 2001. 6. Смирнов О.П. Аналіз схемних рішень побудови автомобілів з гібридною енергетичною установкою / О.П. Смирнов // Вестник ХНАДУ/Сб. науч. тр. – Х.: РИО ХНАДУ, 2006. – Вып. №32. – С. 41-43. 7. Автомобиль. Особенности конструкции / [Скляр В.Н., Волков В.П., Скляр Н.В., Руденко И.Д., Сергиенко Н.Е.]. – Х.: ЧП Озеров, 2013. – 927 с. 8. E. Grunditz, E. Jansson. Modelling and simulation of a hybrid electric vehicle for shell eco-marathon and an electric go-kart. Department of energy and environment. Chalmers University of technology, 2009. 9. Рябов Е.С. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // Локомотив-інформ. – 2008. – №1. – С. 16-19. 10. Pat. WO 2012/015488 США, F16F15/03, F16F6/00. Electricity generating shock absorbers / Zuo Lei; Tang Xiudong; Zhang Pei Sheng. – № US2011/024699; st. 02.12.11; pub. 02.02.12. – 28 p. 11. Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani and Yu Zhou. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions // Smart Materials and Structures. – 2010. – №19. – P. 1-11. 12. S-B Choi, M-S Seong and K-S Kim. Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism // Journal of Automobile Engineering. – 2009. – april, vol. 233. – P. 459-470. 13. Bose suspension system-white paper, Bose Company 2004. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.bose.com/>

1. Dehniehls D. Sovremennye avtomobil'nye tekhnologii. – М.: АСТ, 2003. – 224 с. 2. Скворцов В.А, Берестов А.П. Tendencii v razvitii transportnyh sredstv s ispol'zovaniem ehlektroprivoda // Avtomobil'naya ehlektronika.– 2004. – №1 – С. 85-87. 3. Gibridni avtomobili /

- [Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A., Gnatov A.V., Kolesnikov A.V.]. – H.: HNADU, 2008. – 327 s. 4. Rakov V.A. Razvitie parka gibridnyh avtomobilej. / V.A. Rakov // Mir transporta. – 2013. – №1. – S. 52-59. 5. Ch. Lin, Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis, J. Stein. Integrated, feed-forward hybrid electric vehicle simulation in SIMULINK and its use for power management studies. Automotive research center. The University of Michigan, 2001. 6. Smirnov O.P. Analiz skhemnih rishen' pobudovi avtomobiliv z gibridnoyu energetichnoyu ustanovkoyu / O.P. Smirnov // Vestnik HNADU/Sb. nauch. tr. – H.: RIO HNADU, 2006. – Vyp. №32. – S. 41-43. 7. Avtomobil'. Osobennosti konstrukcii / [Sklyarov V.N., Volkov V.P., Sklyarov N.V., Rudenko I.D., Sergienko N.E.]. – H.: CHP Ozerov, 2013. – 927 s. 8. E. Grunditz, E. Jansson. Modelling and simulation of a hybrid electric vehicle for shell eco-marathon and an electric go-kart. Department of energy and environment. Chalmers University of technology, 2009. 9. Ryabov E.S. EHlektroprivod dlya perspektivnogo ehlektropodvizhnogo sostava / V.I. Omel'yanenko, B.G. Lyubarskij, E.S. Ryabov, A.V. De-midov, T.V. Glebova // Lokomotiv-inform. – 2008. – №1. – S. 16-19. 10. Pat. WO 2012/015488 SSHA, F16F15/03, F16F6/00. Electricity generating shock absorbers / Zuo Lei; Tang Xiudong; Zhang Pei Sheng. – № US2011/024699; st. 02.12.11; pub. 02.02.12. – 28 p. 11. Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani and Yu Zhou. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions // Smart Materials and Structures. – 2010. – №19. – R. 1-11. 12. S-B Choi, M-S Seong and K-S Kim. Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism // Journal of Automobile Engineering. – 2009. – april, vol. 233. – R. 459-470. 13. Bose suspension system-white paper, Bose Company 2004. [EHlektronnyj resurs]: – Rezhim dostupa: <http://www.bose.com/>

Сергієнко А.М., Любарський Б.Г., Медведєв М.Г., Сергієнко М.Є., Перевозник А.С., Соболев Є.Ф.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Розроблено імітаційну модель приводу гібридного автомобіля з використанням синхронного електричного двигуна з постійними магнітами, яка дозволяє досліджувати зміну показників приводу і автомобіля при управлінні потоками потужності від джерел енергії. Комплексна модель включає пристрої приводу коліс від ДВС і електроприводу та управління їх роботою.

Sergienko A.N., Lyubarskii B.G., Medvedev N.G., Sergienko N.E., Perevoznik A.S., Sobolev E.F.

MODELING TRACTION DRIVEHYBRID VEHICLES BASED ON SYNCHRONOUS ENGINE PERMANENT MAGNET

A simulation model of hybrid car drive with a synchronous electric motor with permanent magnets, which allows you to explore the changes in performance and drive the car in the management of power flows from the power sources. Integrated device model includes wheel drive from the engine and the electric drive and control of their work.