

**Д. А. ПШЕНИЧНИКОВ**, к.т.н., доцент, НТУ «ХПИ»;

**Б. В. ВОРОБЬЁВ**, аспирант, НТУ «ХПИ».

## СТЕНД АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

**Введение.** Из года в год объем выпуска электромобилей существенно возрастает и, по мнению мировых экспертов, к 2025 году массовая доля электрического транспорта составит более 25%. В современных серийно выпускаемых электромобилях, как правило, в качестве приводного двигателя используются синхронные машины с постоянными магнитами, основным преимуществом которых является высокий максимальный момент, что позволяет использовать редуктор с фиксированным передаточным числом [1]. Это упрощает конструкцию, снижает число механических элементов, что увеличивает суммарный КПД. Тенденция к росту количества электромобилей ведет к неизбежному увеличению объема добычи редкоземельных материалов, из которых производятся постоянные магниты. Количество этих материалов весьма ограничено и, учитывая темпы роста, гораздо более предпочтительно использование асинхронного электродвигателя, который, хоть и обладает меньшим пусковым моментом, имеет ряд преимуществ, таких как: низкая стоимость, высокая надежность и минимальные требования к техобслуживанию. На сегодняшний день среди серийно выпускаемых электромобилей только TESLA использует асинхронный двигатель в качестве приводного.

**Постановка задачи исследования.** Ставится задача разработки структуры испытательного стенда на базе асинхронного двигателя, который позволил бы моделировать движение электромобиля в различных режимах работы, включая рекуперативное торможение, и с различными характеристиками нагрузки, например, с характеристикой отрицательного вязкого трения с падающим участком. Для проверки адекватности предлагаемой структуры выполняется ее математическое моделирование.

**Материалы исследований. Функциональная схема.** Испытательный стенд (рис 1) представляет собой установку для получения динамических характеристик с возможностью моделирования любой нагрузочной характеристики, исследования режима рекуперативного торможения, а также осуществления моделирования любого цикла движения. На схеме: АКБ – аккумуляторная батарея, АИН – автономный инвертор напряжения, ПЧ – преобразователь частоты, СУ – система управления, ДТ – датчики тока, QF – контактор, РТП – реверсивный тиристорный преобразователь, М – нагрузочная машина, АД – асинхронный двигатель, BR – тахогенератор, КПП – коробка переключения передач.

Стенд выполнен на базе асинхронного двигателя. Система его управления может быть построена двумя способами: 1) При питании от сети с использованием преобразователя частоты.

2) При питании от батареи аккумуляторов с использованием автономного инвертора напряжения.

Первая система, в сравнении со второй, обладает основным преимуществом – дешевизной, однако, при моделировании весомым допущением будет падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника и, как следствие, невозможность моделирования динамических процессов с учетом разряда АКБ.

Изменение внутреннего сопротивления аккумуляторов на примере свинцово-кислотных АКБ показано на рисунке 2 [2]. Использование системы с АКБ позволит моделировать работу электромобиля в условиях, максимально приближенных к реальным.

В свою очередь, структура может измениться при выборе того или иного типа аккумуляторов. При выборе свинцово-кислотных аккумуляторов для реализации рекуперативных режимов необходимо использование суперконденсаторной батареи и запирающего диода, так как свинцово-кислотные аккумуляторы неспособны принимать большие токи в течение короткого промежутка времени. Использование литий-ионных аккумуляторов позволяет исключить запирающий диод и суперконденсаторную батарею, однако, они обладают гораздо большей стоимостью. Например, при разряде пусковым током 100 А, внутреннему сопротивлению 4 мОм соответствует падение напряжения 0,8 В, сопротивление поляризации добавляет еще около 0,5 В – и это в самом начале разряда.

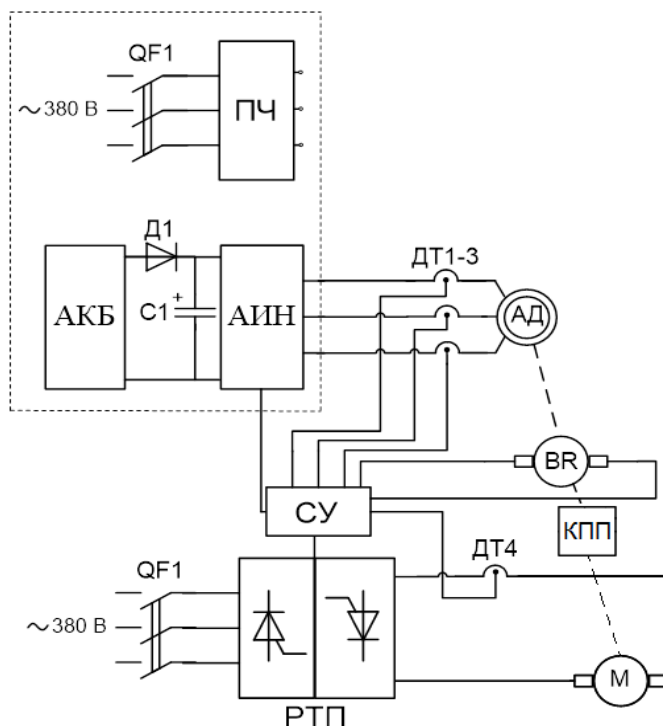


Рисунок 1 – функциональная схема испытательного стенда

Приведенные данные соответствуют новым АКБ емкостью порядка 100 А·ч. Для старых батарей или батарей меньшей емкости потери будут больше. Для батареи в 50 А·ч того же типа потери приблизительно вдвое больше. Следовательно, падение напряжения на одном элементе составит около 10%, а при разряде глубже 80% – около 18%. Известно, что момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, а это значит, что максимальный момент снизится в 0,672 раза, что приведёт к значительным ухудшения динамических характеристик электромобиля.

Система управления асинхронным двигателем представляет собой систему стабилизации тока. В качестве датчиков используются трансформаторы тока. Нагрузочная машина выполнена в виде двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, который запитан от реверсивного тиристорного преобразователя с возможностью рекуперации энергии торможения в сеть.

**Описание системы управления.** Обобщенная функциональная схема системы управления стендом показана на рисунке 3. На схеме: БП – блок питания, МК – микроконтроллер, БВИД – блок вывода измеренных данных, БСН – блок согласования напряжений, ОС ДТ1-4, BR – обратные связи от датчиков тока и тахогенератора, ЗВ ПЧ/АИН, ЗВ РТП – задающие воздействия.

БСН служит для обеспечения гальванической развязки, а также согласования напряжения сигналов обратных связей и выходных напряжений ЦАП микроконтроллера со стандартными входными напряжениями ПЧ и РТП. Микроконтроллер содержит управляющую программу для формирования задающих воздействий на ПЧ и РТП с возможностью обеспечения различных характеристик нагрузки, а также моделирования движения электромобиля в различных циклах движения. Блок питания согласует питающее напряжение стенда (фазное 220 В от сети или напряжение АКБ) с напряжением питания микроконтроллера. БВИД обеспечивает вывод данных на дисплей и в файл.

**Формирование нагрузки.** Функциональная схема системы управления нагрузочной машиной показана на рисунке 4. На схеме: БВ – блок питания обмотки возбуждения двигателя, ОВ – обмотка возбуждения, L – токоограничивающий реактор, QF – автоматический выключатель, ТТ – трансформатор тока, БТ «В» и БТ «Н» – блоки тиристорные (комплект «Вперед» и «Назад»), Д – двигатель, ТГ – тахогенератор, ДТ – датчик тока, УЗ – узел защиты, РТ – регулятор тока, НЗ – нелинейное звено, ПХ – переключатель характеристик, СИФУ – система импульсно-фазового управления, ДН – датчик напряжения, УЛ – устройство логическое, БВХН – блок выбора характеристики нагрузки, ЗСХ – задание селектора характеристик.

На БВХН поступает программное задание величины нагрузки, которое зависит от силы сопротивления воздуха, динамической составляющей, силы трения, а также дополнительной составляющей при движении по наклонной поверхности. Также задается вид характеристики коэффициента трения. Задание с блока поступает на регулятор тока, а затем – на СИФУ, которое подает управляющие импульсы на тиристорный преобразователь. Контур тока обеспечивает стабилизацию тока для формирования корректной нагрузки на асинхронный двигатель, а обратная связь по скорости необходима для формирования коэффициента трения при использовании характеристики отрицательного вязкого трения.

**Компьютерная модель.** Для построения компьютерной модели были использованы библиотеки Simulink и SimPowerSystems пакета MATLAB. Модель системы электропитания (рис. 5) представлена в виде источника постоянного тока с учетом внутреннего сопротивления, а также параллельно подключенной через разделительный диод батареи суперконденсаторов.

Система формирования нагрузки включает в себя четыре составляющих [3]:

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{кач}} + F_{\text{под}} + F_{\text{возд}} + F_{\text{ин}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{тяги}}$  – сила тяги на ведущих колесах, Н;

$F_{\text{кач}}$  – сила трения качения колес, Н;

$F_{\text{под}}$  – сила сопротивления подъему, Н;

$F_{\text{возд}}$  – сила сопротивления воздуха, Н;

$F_{\text{ин}}$  – сила сопротивления разгону (сила инерции), Н.

Сила сопротивления качению:

$$F_{\text{кач}} = f \cdot m \cdot g, \quad (2)$$

где  $F_{\text{кач}}$  – сила сопротивления качению, Н;

$f$  – коэффициент трения качения;

$m$  – масса электромобиля, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

Коэффициент трения качения принимаем 0,017.

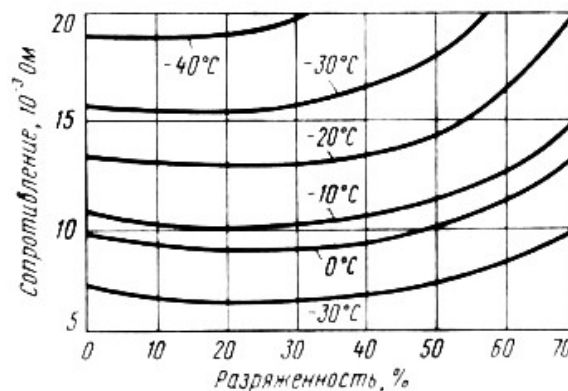


Рисунок 2 – зависимость внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора ёмкостью 90 А·ч и напряжением 12В.

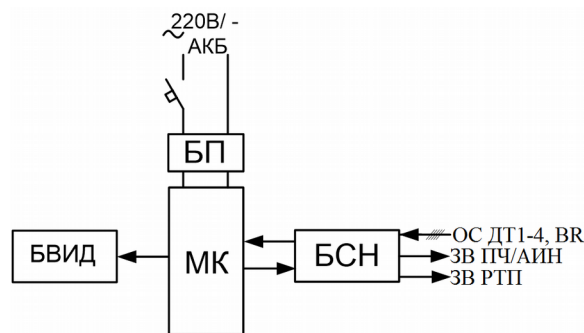


Рисунок 3 – обобщенная функциональная схема системы управления

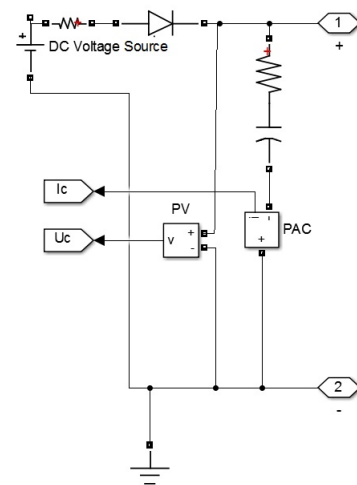
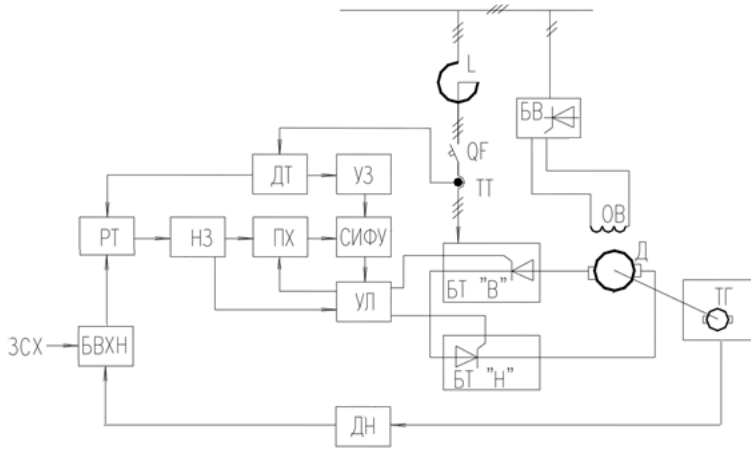


Рисунок 4 – функциональная схема системы управления нагрузкой Рисунок 5 модель системы электропитания

Считаем, что сила трения качения не зависит от скорости электромобиля и является постоянной на любой передаче:

Также, в качестве нагрузки трения, в модели предусмотрена характеристика отрицательного вязкого трения [4]. Зависимость коэффициента трения от скорости показана на рис. 6. При скоростях более 20 км/ч заметное влияние оказывает сила сопротивления воздуха. Для расчета силы сопротивления воздуха используем формулу [5]:

$$F_{\text{возд}} = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

где  $F_{\text{возд}}$  – сила сопротивления воздуха, Н;  $C_x$  – коэффициент сопротивления воздуха (коэффициент обтекаемости),  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / (\text{м} \cdot \text{кг})$ ;  $\rho$  – плотность воздуха ( $1,29 \text{ кг/м}^3$  при нормальных условиях);  $S$  – лобовая площадь электромобиля,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость электромобиля,  $\text{м/с}$ .

$C_x$  определяется экспериментально для каждого кузова. Примем его равным 0,36.  $S$  является площадью проекции кузова на плоскость, перпендикулярную продольной оси.

Лобовая площадь

$$S = l \cdot h \cdot 0,8 \quad (4)$$

где  $l$  – ширина электромобиля, м;  $h$  – высота электромобиля, м.

$$S = 1,678 \cdot 1,432 \cdot 0,8 = 1,92 \text{ м}^2 .$$

Для расчета динамических характеристик электромобиля (автомобиля) следует учитывать динамический момент (силу инерции). Причем, нужно учитывать не только инерцию самого электромобиля, но и влияние момента инерции вращающихся масс внутри электромобиля (ротор, коробка передач, кардан, колеса). Формула расчета силы сопротивления разгону [3]:

$$F_{\text{ин}} = m \cdot a \cdot \sigma_{\text{вр}} , \quad (5)$$

где  $F_{\text{ин}}$  – сила сопротивления разгону, Н;  $m$  – масса электромобиля, кг ;  $a$  – ускорение электромобиля,  $\text{м/с}^2$ ;  $\sigma_{\text{вр}}$  – коэффициент учета вращающихся масс.

Приблизительно коэффициент учета вращающихся масс  $\sigma_{\text{вр}}$  рассчитаем по формуле:

$$\sigma_{\text{вр}} = 1,05 + 0,05 \cdot u_{\text{кп}}^2 \quad (6)$$

где  $u_{\text{кп}}$  – передаточное число коробки передач.

Модель, составленная по соотношениям (1) ÷ (6), показана на рис. 7, 8. Рис. 8, а – сила трения, б – нагрузка при движении под уклон, в – динамическая нагрузка, г – сила сопротивления воздуха.

Моделирование движения осуществляется с учетом переключения передач. Модель КПП показана на рис. 9. При достижении транспортным средством необходимой линейной скорости движения происходит переключение на следующую передачу, что приводит к изменению передаточного числа. Также рассчитывается мгновенное ускорение для формирования динамической составляющей нагрузки по соотношению 6.

$$a = (V_{\text{тек}} - V_{\text{тек-1}}) / t_{\text{ш}} . \quad (7)$$

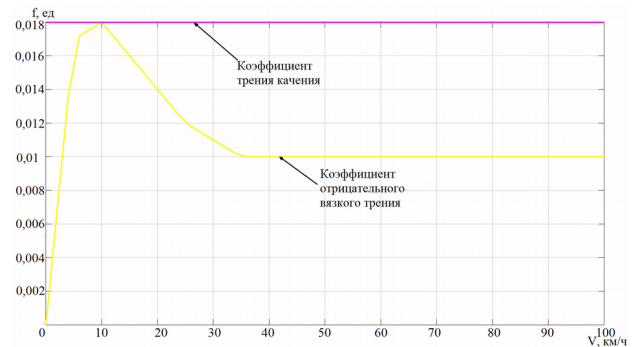


Рисунок 6 – Характеристики отрицательного вязкого трения и трения качения

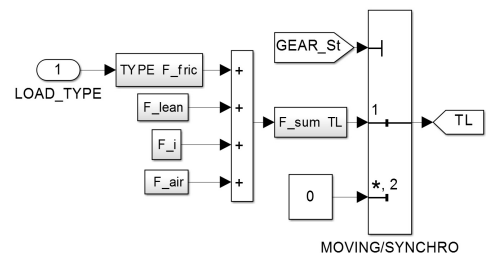


Рисунок 7 – Модель формирователя нагрузки

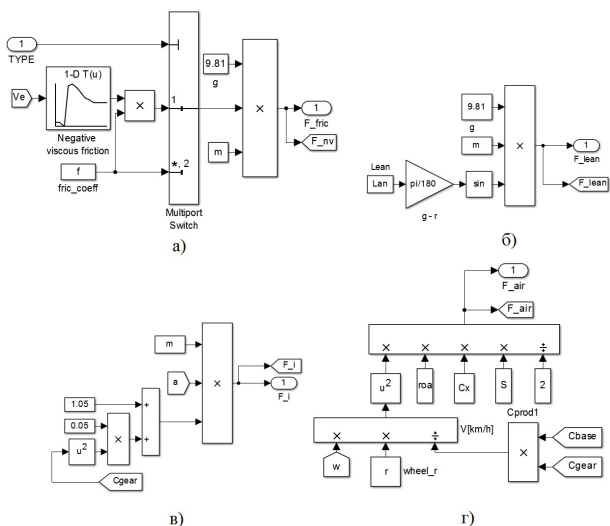


Рисунок 8 – Составляющие нагрузки

возрастает и амплитуда. Этот сигнал поступает на вход генератора, где сравнивается с опорным пилообразным напряжением и формируются управляющие импульсы, т.е. длительности проводящих состояний силовых ключей. Длительность импульса зависит от фазы синусоиды в данный момент времени. Если сигнал сравнивается с опорным напряжением в момент, когда его амплитуда максимальна, то будет сформирован импульс максимальной длительности, и наоборот.

Блок синхронизации (рис. 12) обеспечивает снятие нагрузки с двигателя на время синхронизации при переключении передачи, формирует задающее воздействие для изменения скорости двигателя до необходимой, которая рассчитывается исходя из изменения передаточного числа.

Во время синхронизации задающее воздействие рассчитывается исходя из текущей скорости и нового передаточного числа. Вне режима синхронизации задающее воздействие, которое является входом регулятора скорости, соответствует текущей скорости, что обеспечивает корректные начальные условия для интегрирующей составляющей регулятора. Также в блоке формируется управляющий импульс для перехода в режим синхронизации и управления скоростью (Gear\_St), длительность которого формируется блоком delay\_switch. Время формирования скорости задается блоком delay\_speed. За это время скорость двигателя должна установиться на уровне, заданном синхронизатором.

Общая модель системы управления показана на рисунке 13. Общий вид компьютерной модели показан на рисунке 14. Для моделирования АД и инвертора использовались стандартные модели из библиотеки SimPowerSystems.

**Результаты моделирования.** На рис. 15 показана зависимость момента нагрузки от времени при моделировании разгона. На графике видны участки переключения передач. Во время синхронизации момент нагрузки равен нулю.

На рис. 16 показаны переходные процессы скорости и момента АД при разгоне. Для выбранных стандартных передаточных чисел 2-х ступенчатой коробки передач скорость двигателя превышает скорость холостого хода для обеспечения необходимой скорости переключения.

На рис. 17 показан переходный процесс линейной скорости движения электромобиля при разгоне.

где  $V_{\text{тек}}$  – текущая скорость на данной передаче, м/с;  
 $V_{\text{тек-1}}$  – скорость на предыдущем шаге расчета, м/с;  
 $t_{\text{ш}}$  – время одного шага расчета, с.

Система управления представляет собой СПР с контуром момента, который работает во время разгона, торможения или движения с постоянной скоростью, а также контуром скорости, который включается только во время переключения передачи. Контур скорости обеспечивает синхронизацию скорости двигателя при переключении передач с линейной скоростью движения автомобиля.

Система управления инвертором (рис. 10) обеспечивает генерацию 3-х синусоидальных сигналов со сдвигом  $120^\circ$  относительно друг друга.

На рис. 11 показан суммарный сигнал, поступающий на вход ШИМ-генератора. Из рисунка видно, что обработка задания частоты происходит с соблюдением закона  $U / f = \text{const}$ . При росте частоты сигнала также

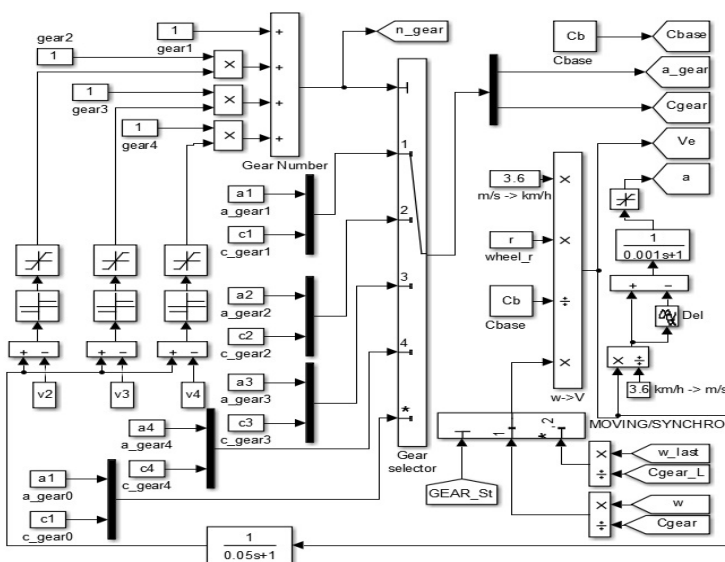


Рисунок 9 – Модель коробки переключения передач

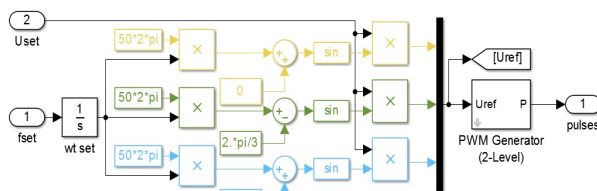


Рисунок 10 – Система управления инвертором

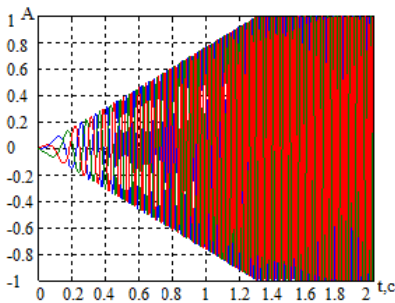


Рисунок 11 – 3-х фазный синусоидальный сигнал на входе ШИМ-генератора

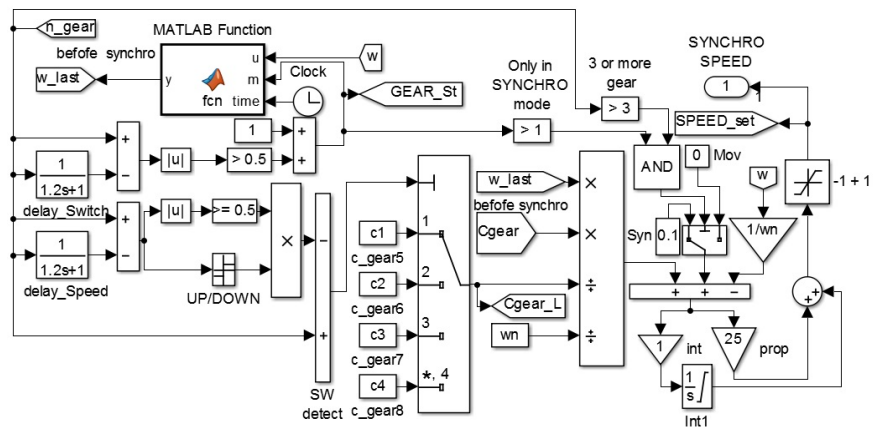


Рисунок 12 – Блок синхронизации

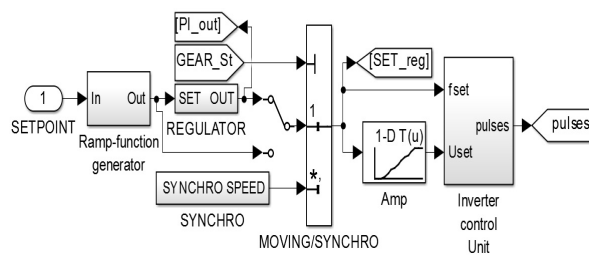


Рисунок 13 – Система управления

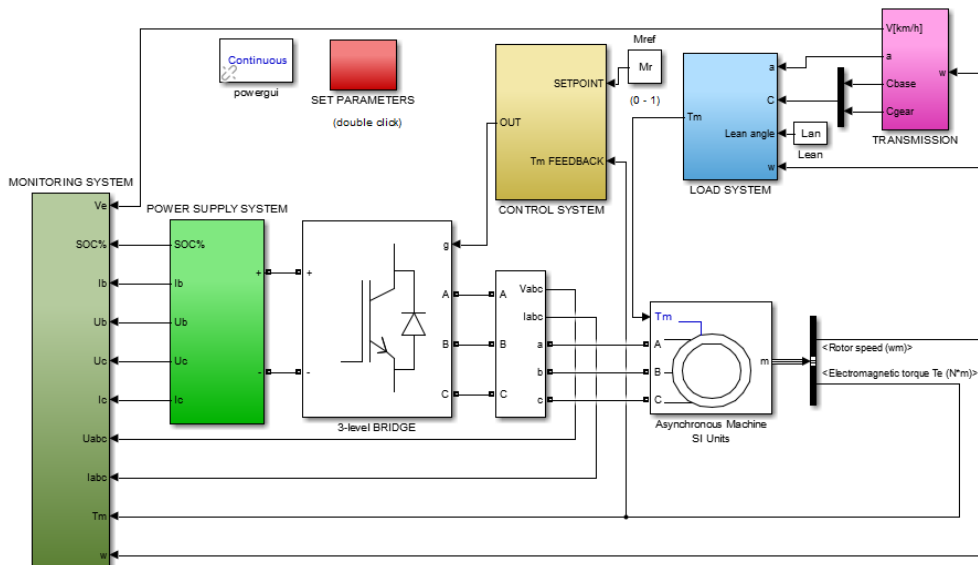


Рисунок 14 – Компьютерная модель стенда асинхронного электропривода электромобиля

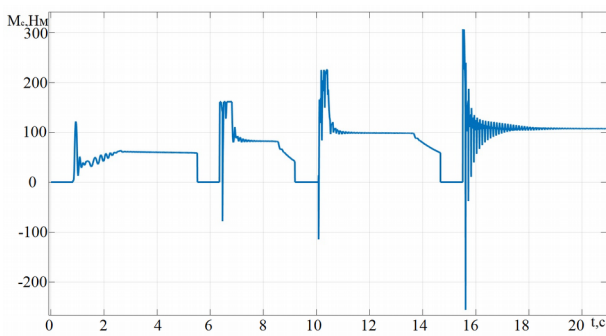


Рисунок 15 – Переходный процесс момента нагрузки

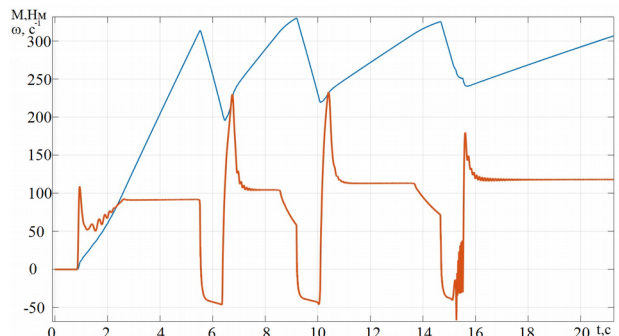


Рисунок 16 – Переходные процессы скорости и момента АД

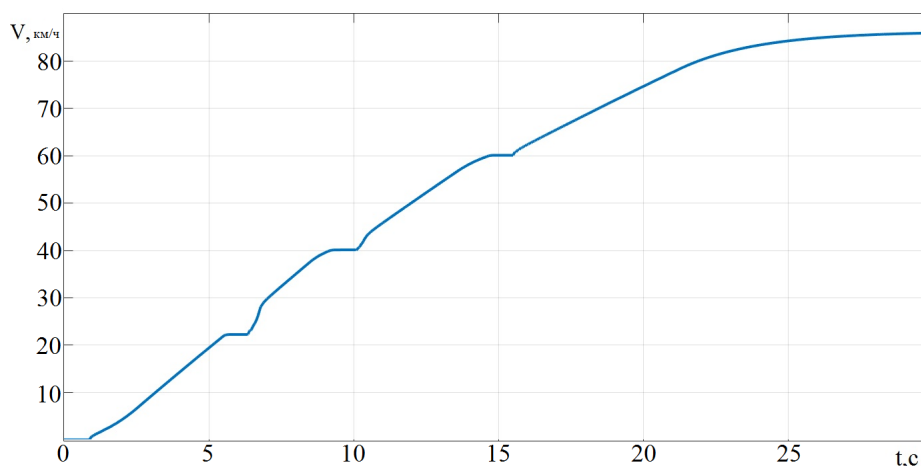


Рисунок 17 – Переходный процесс линейной скорости движения электромобиля

Из графика видно, что синхронизация произведена верно – при начале разгона на каждой новой передаче нет броска скорости.

**Выводы.** Разработана функциональная схема стенда для исследования асинхронного электропривода электромобиля с использованием суперконденсаторной батареи в качестве буферного накопителя энергии, а также с использованием коробки переключения передач. Полученные результаты моделирования наглядно подтверждают работоспособность выбранной структуры стенда и ее адекватность, а также необходимость дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. Larminie J., Lowry J.. Electric Vehicle Technology Explained.- John Wiley & Sons Ltd, 2003, – 296 p. 2. Электрооборудование автомобилей, Основные характеристики стартерной батареи, - <http://stroy-technics.ru/article/osnovnyye-kharakteristiki-starterno-batarei> 3. Спицын Д., Субъективный взгляд на электромобиль, <http://sdisle.com/ev/calc/engine.html>, 2007. 4. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей - «Транспорт» Москва, 1965, – 265с. 5. Пат. 85585 Украина, МПК H02J 7/00. Электропривод электромобиля / Клепиков В.Б., Гончар О.С., Касторний П.М., Моисеев А.Н., Тимошенко А.В., Банев Є.Ф., Пшеничников Д.О; власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – №u201306550; заявл. 27.05.2013; опубл. 25.11.2013, Бюл. №22.

**Bibliography (transliterated):** 1. Larminie J., Lowry J.. Electric Vehicle Technology Explained.- John Wiley & Sons Ltd, 2003, – 296 p. 2. Elektrooborudovanie avtomobiley, Osnovnie harakteristiki starterno batarei [Electrical equipment of cars, Main characteristics of starter batteries], - <http://stroy-technics.ru/article/osnovnyye-kharakteristiki-starterno-batarei> 3. Spitsyn D., Subjectivnii vzglyad na elektromobil'[A subjective view of an electric vehicle], <http://sdisle.com/ev/calc/engine.html>, 2007. 4. Minov D. Povishenie tyagovih svoystv elektrovov I teplovovov s elektricheskoi peredachei [Increase of traction properties of electric locomotives and locomotives with electrical farts] «Transport», Moscow 1065,-265p. 5. Pat. UKRAINE 85585, IPC N02J 7/00. The electric drive of the electric car / Klepikov VB, Gonchar OS, Kastorniy PM, Moiseev AN, Timoshchenko AV, Banyev Є.F., Pshenichnikov D.O; Власник Національний технічний університет "Kharkiv Polytechnic Institute". - No.u201306550; Claimed. May 27, 2013; Publ. 11/25/2013, Bul. №22.

Поступила 30.05.2017