

УДК 621.313.333.2

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА СИСТЕМЫ
ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ****Альмохамад Али,**

магистрант,

e-mail: almohamad1994@yandex.ru

Юшкевич Устинья Кирилловна,

аспирант,

e-mail: uyk567@gmail.com

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), РФ, г. Москва**Аннотация**

Данная работа представляет собой научную статью, посвященную математическому моделированию алгоритма системы прямого управления моментом в составе электромобиля. Авторы разрабатывают математическую модель тягового инвертора напряжения с применением прямого управления моментом. Основные блоки модели включают модель аккумуляторной батареи, модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, блок задания цикла движения, блок расчета момента сопротивления, блок автономного инвертора напряжения и другие. Авторы также проводят расчетное исследование основных параметров, характеризующих работу описанных моделей при движении электромобиля в типовом цикле городского движения.

Ключевые слова: математическое моделирование, прямое управление моментом, электромобиль, тяговый инвертор напряжения, асинхронный электродвигатель, аккумуляторная батарея, автономный инвертор напряжения.

**MATHEMATICAL MODELLING OF THE ALGORITHM OF THE
DIRECTTORQUE CONTROL SYSTEM IN AN ELECTRIC VEHICLE****Almohamad Ali,**

Master's student,

e-mail: almohamad1994@yandex.ru

Yushkevich Ustinya Kirillovna,

postgraduate student,

e-mail: uyk567@gmail.com

Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Russian Federation, Moscow

ABSTRACT

This paper is a research paper devoted to the mathematical modelling of the algorithm of direct torque control system as part of an electric vehicle. The authors develop a mathematical model of a traction voltage inverter using direct torque control. The main blocks of the model include the battery model, squirrel cage induction motor model, motion cycle setting block, resistance torque calculation block, autonomous voltage inverter block and others. The authors also carry out a computational study of the main parameters characterising the operation of the described models when an electric vehicle is moving in a typical urban traffic cycle.

Keywords: mathematical modeling, direct torque control, electric vehicle, traction inverter, asynchronous motor, battery, autonomous inverter.

Введение

Моделирование электрического оборудования играет ключевую роль в анализе производительности устройств в электромобилях (ЭМ). Оно позволяет инженерам тестировать различные конфигурации и компоненты без создания физических прототипов, что оптимизирует работу электрических систем, обеспечивая их эффективность и надежность.

Моделирование значительно экономит время и деньги, предоставляя быстрые и точные данные о работе конструкций. Оно также помогает выявлять потенциальные проблемы до их возникновения, что особенно важно для безопасности и надежности ЭМ.

Кроме того, моделирование автоматического управления электроприводом позволяет анализировать его работоспособность. Современные средства моделирования позволяют математически воспроизводить объекты, представляя их в виде системы уравнений, и изучать их виртуально, повторяя их поведение и характеристики.

В этой статье рассмотрим математическое моделирование прямого управления моментом асинхронных электродвигателей

Формирование математической модели системы прямого управления моментом асинхронных тяговых электродвигателей

В рамках выполненной работы была разработана математическая модель тягового инвертора напряжения с применением прямого управления моментом в составе электропривода легкового электромобиля. Математическая модель представлена на рисунке 1 и включает следующие основные блоки:

модель аккумуляторной батареи, математически основанной на уравнении Шеферда: Блок «Тяговая АБ» используется для моделирования тяговой аккумуляторной батареи и имитации динамических процессов заряда и разряда литий-ионного аккумулятора. Модель Шеферда, на которой основан этот блок, наиболее точно описывает процессы, происходящие в аккумуляторе при изменении зарядно-разрядного тока [1];

модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, математически основанная на системе дифференциальных уравнений, описывающих преобразование электрической энергии в механическую и наоборот; В таблице 1 приведены характеристики аккумуляторных батарей, которые были использованы в математической модели [1];

Таблица 1.

Параметры аккумуляторной батареи

Номинальное напряжение (В)	400
----------------------------	-----

Номинальная емкость (Ач)	80
Начальный уровень заряда (%)	90
Максимальная емкость (Ач)	84
Напряжение отключения (В)	300
Напряжение при полной зарядке (В)	461,44
Номинальный ток разряда (А)	40
Внутреннее сопротивление (Ом)	0,05

блок задания цикла движения: Этот блок необходим для определения скорости электромобиля в каждую секунду времени в выбранном цикле [1];

блок расчёта момента сопротивления, приведённого к валу двигателя, и частоты вращения ротора в зависимости от требуемой скорости движения по циклу и базовых параметров транспортного средства [1];

блок автономного инвертора напряжения, включая силовую часть и систему прямого управления моментом с регулятором с частотой вращения [1];

блок, отвечающий за сбор и обработку данных, полученных расчетным путем [1];

блок, системы управления асинхронным электродвигателем [1].

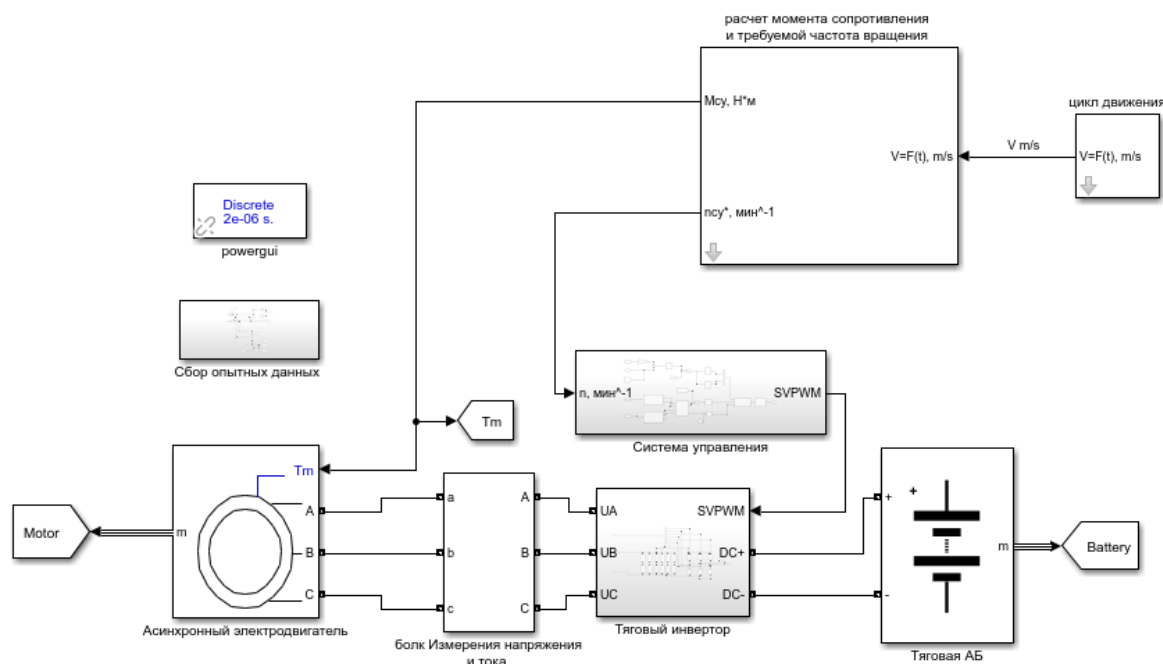


Рис. 1. Структурная схема модели тягового электрического привода электромобиля с применением прямого управления моментом

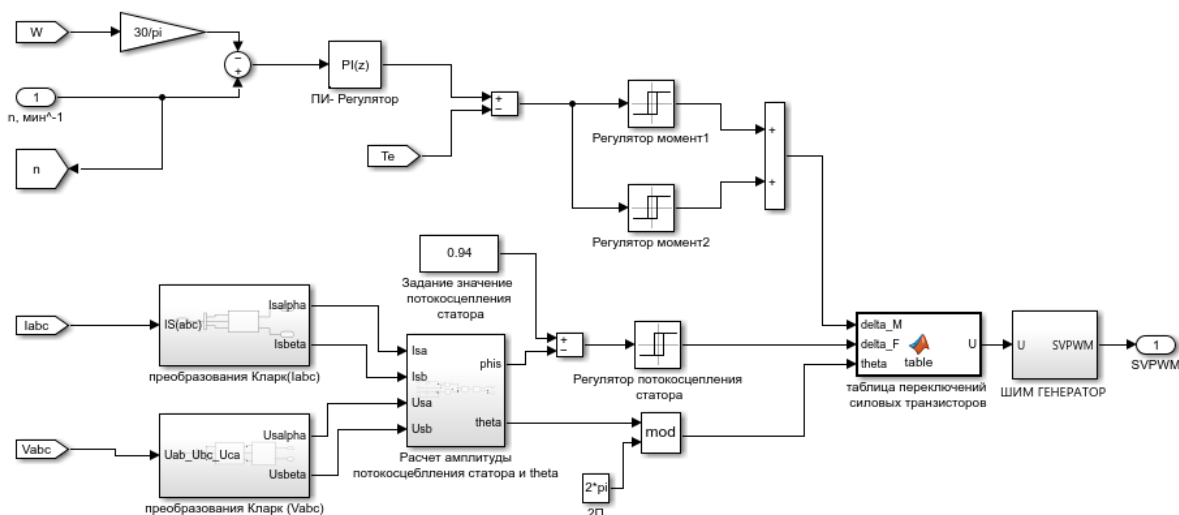


Рис. 2. Система управления асинхронным электродвигателем

Блок тягового инвертора

Автономный инвертор (АИ) преобразует постоянное напряжение аккумуляторной батареи в трехфазное переменное напряжение, которое регулируется по частоте и амплитуде для управления частотой вращения и крутящим моментом электродвигателя [1]. Инвертор выполнен по мостовой схеме и состоит из шести транзисторно-диодных модулей (VT1-VT6), где в качестве транзисторов используются IGBT. Входная силовая цепь содержит батарею фильтрующих конденсаторов общей ёмкостью 660 мкФ. На структуре силовой части инвертора (рисунок 3), реализованной в среде компьютерного моделирования, установлено измерительное оборудование, включающее датчик тока на входе в инвертор, датчик линейного напряжения между двумя фазами АД, а также датчик фазного тока АД.

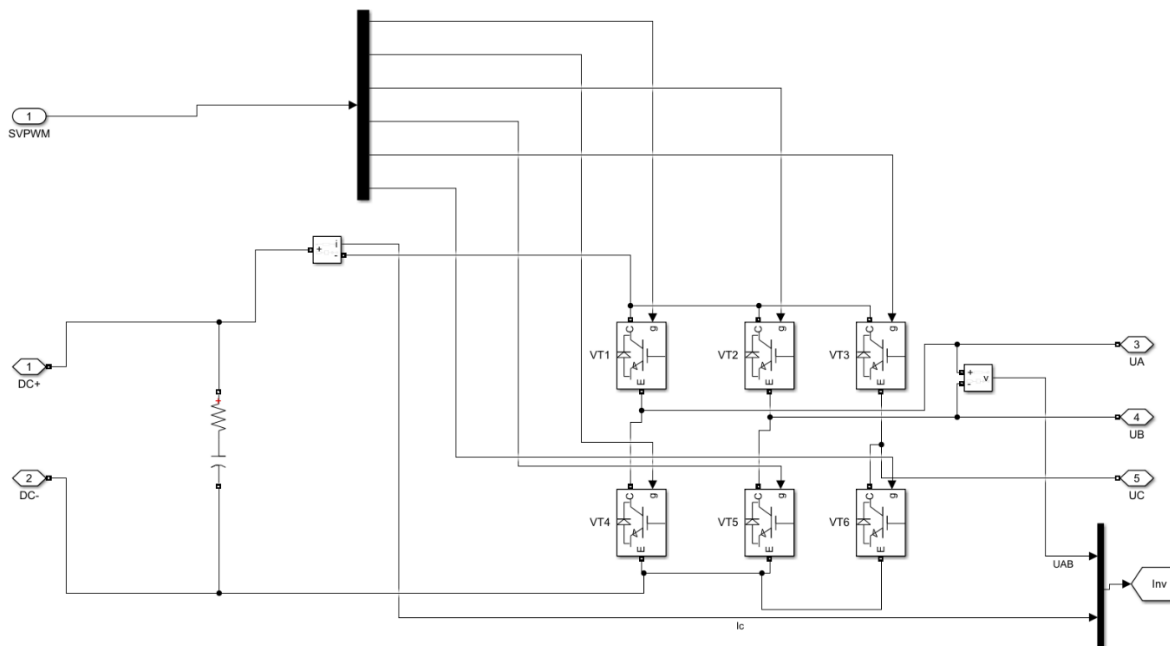


Рис. 3. Структура силовой части автономного инвертора в компьютерной среде математического моделирования

Блок асинхронной электрической машины

Математическая модель АД с короткозамкнутым ротором построена на системе дифференциальных уравнений преобразования электрической энергии в механическую и

наоборот. Исходными данными для модели являются параметры Т-образной схемы замещения, представленной на рисунке 4.

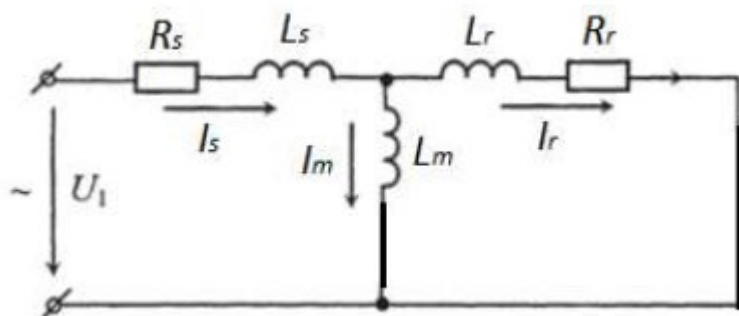


Рис. 4. Т-образная схема замещения АД [2]

На схеме (рисунок 4) обозначены:

L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора

L_r – полная индуктивность обмоток ротора

L_s – полная индуктивность фазных обмоток статора

R_s – активное сопротивление фазных обмоток статора

R_r – активное сопротивление обмоток ротора

Параметрами модели АД, вводимыми в диалоговое окно, являются: J – момент инерции подвижной системы, приведенный к валу электрической машины; P – число пар полюсов коэффициент трения в подшипниках; номинальная мощность, номинальное линейное напряжение; номинальная частота тока [2]. Входным параметром является момент сопротивления, приведенный к валу, а выходными могут быть: угловая скорость и угловое перемещение ротора; электромагнитный момент; фазные токи статора; ток ротора; потокосцепление и т. д. Параметры двигателя приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры электродвигателя IM

Номинальная мощность	160 кВт
Напряжение (линейное)	400 В
Частота, f	50 Гц
Сопротивление статора R_s	0,01379 Ом
Индуктивность статора L_s	0,000152 Н
Сопротивление ротора, R_r'	0,007728 Ом
Взаимная индуктивность, L_m	0,00769 Н
Пары полюсов, P	2

Структура математической модели Системы прямого управления моментом

На рисунке 2 показана математической модели Системы прямого управления моментом, данная модель включает в себя:

- блок, осуществляющий преобразование Кларка;
- блок расчета амплитуды потокосцепления статора и его угловое перемещение;
- блок регулятора потокосцепления статора;
- два блока регулятора момента;
- ПИ-регулятор;
- таблица переключений силовых транзисторов;
- блок формирования пространственно-векторной модели управления.

Блок, осуществляющий преобразование Кларк

Уравнения (1) используется для преобразования тока статора в неподвижной системе с осями (α-β) таким образом [2]

$$\begin{cases} I_{alpha} = I_a ; \\ I_{beta} = \frac{I_b - I_c}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (1)$$

Фазное напряжения

$$\begin{cases} U_a = \frac{2 \cdot U_{ab} + U_{bc}}{3} \\ U_b = \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} ; \\ U_c = \frac{-U_{ab} - U_{bc}}{3} \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (3) используется для преобразования напряжения статора в неподвижной системе с осями (α-β) таким образом

$$\begin{cases} U_{alpha} = U_a \\ U_{beta} = \frac{U_b - U_c}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (3)$$

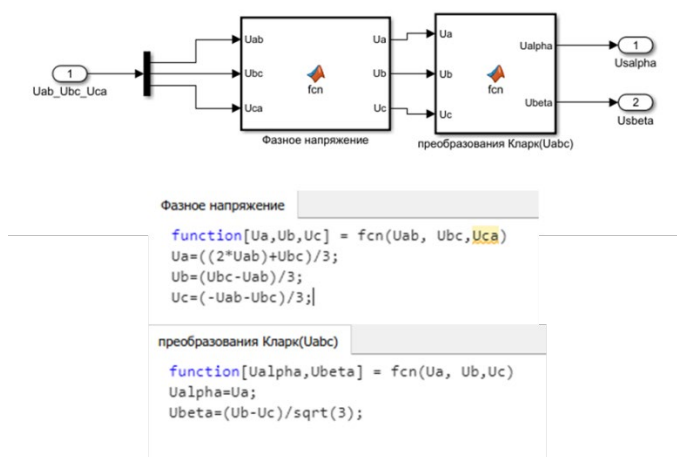


Рис 5 Блок MATLAB Function, для преобразования ток статора в неподвижной системе с осями (α-β).

Расчет амплитуды потокосцепления статора и его угловое перемещение

После преобразования тока и напряжения статора в неподвижной системе можно реализовать определение модуля и фазы вектора потокосцепления статора с помощью уравнениями (4), (5) и блок «Real-Imag to Complex» и блок «Complex to Magnitude-Angle » таким образом

$$\psi_{as} = \int (v_{as} - R_s i_{as}) dt, \quad (4)$$

$$\psi_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt, \quad (5)$$

Реализация уравнений представлена на рисунке 6.

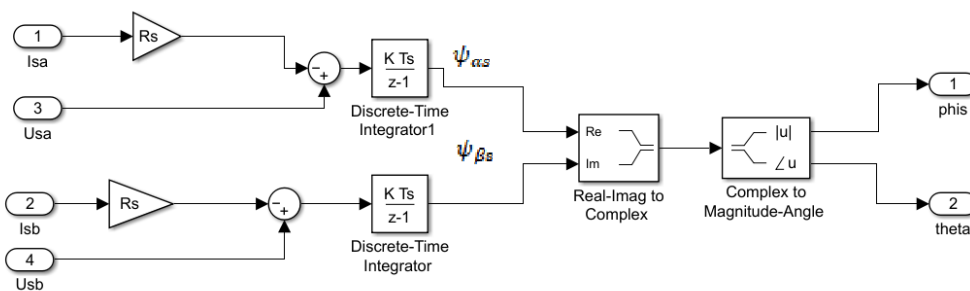


Рис. 6. Блок Расчет амплитуды потокосцепления статора и его угловое перемещение

Регулятор потокосцепления статора и два блока регулятора момента

После того как поступают ошибки в блоках момента и потокосцепления статора (рисунок 7), эти ошибки изменяют выходные сигналы регуляторов электромагнитного момента и потокосцепления статора соответственно. Вследствие чего ошибки определяют строки таблицы переключений, а столбцы в таблице - номера секторов фазовой плоскости. как показано на рисунке 9.

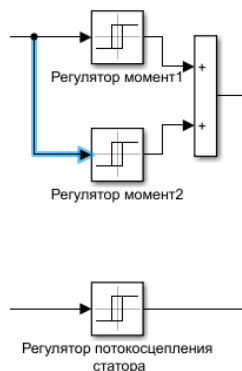


Рис. 7. Регулятор потокосцепления статора и два блока регулятора момента

Блок определения требуемого электромагнитного момента

На вход данного блока поступают заданная по циклу и реальная (измеренная датчиком) частоты вращения. Разность между ними – ошибка, устраняемая изменением электромагнитного момента посредством ПИ-регулятора (рисунок 8).

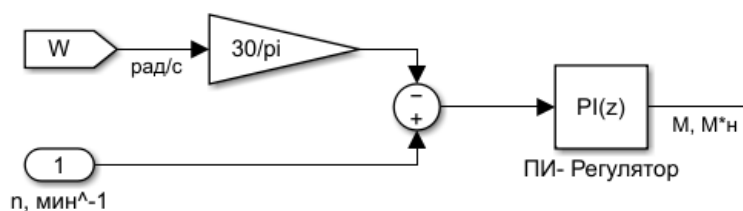


Рис.8 Структурная схема блока определения требуемого электромагнитного момента

Таблица переключений силовых транзисторов

На рисунке 9 показаны приращения потокосцепления статора, соответствующие каждому из шести векторных напряжений инвертора с широтно-импульсной модуляцией пространственного вектора.

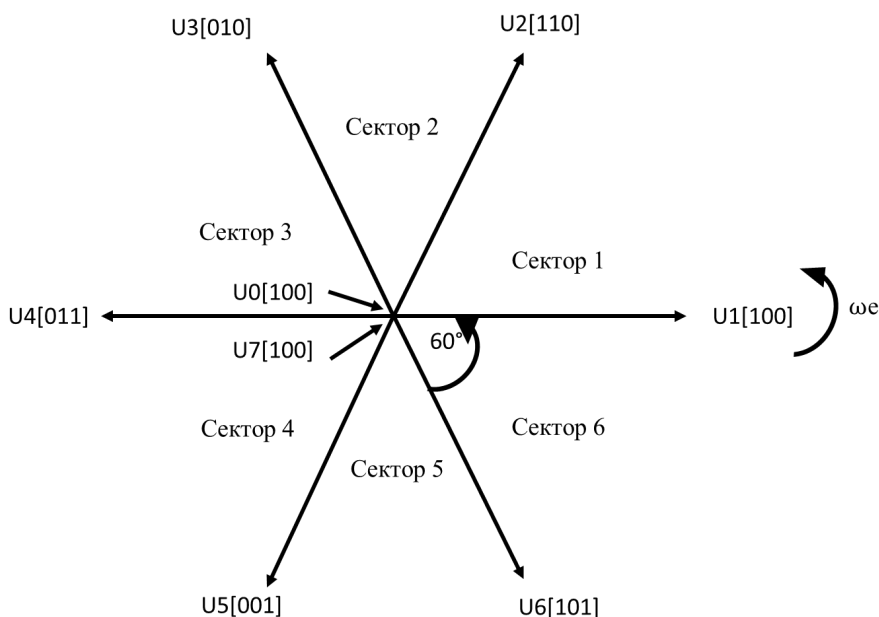


Рис. 9. Расположение системы векторов напряжения АИН на фазовой плоскости

В системах управления тяговыми электроприводами с прямым управлением моментом или векторным управлением процесс коммутации ключей автономного инвертора осуществляется выборочно между несколькими заранее определёнными комбинациями ключей. Для типовой схемы двухуровневого автономного инвертора имеется определённое число базовых векторов напряжения, которые соответствуют необходимым состояниям инвертора [3].

Преобразователь частоты, работающий на статорную обмотку асинхронного двигателя показан на рисунке 10.

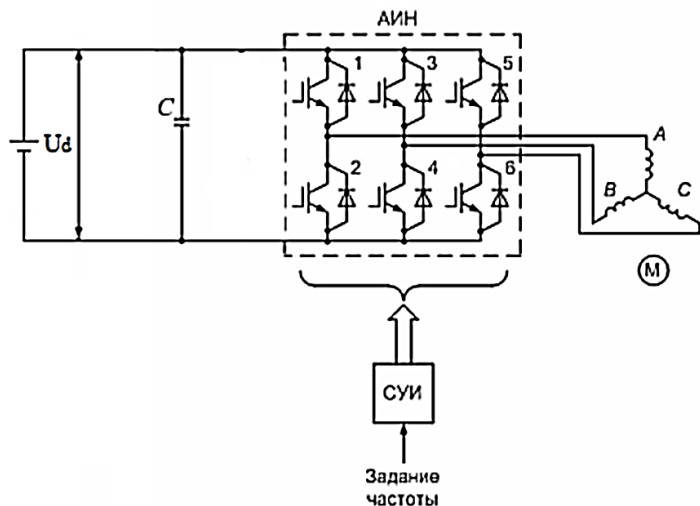


Рис.10. Структура преобразователя напряжения с источником постоянного тока и управляемым выпрямителем [3]

Таблица переключений силовых транзисторов АИН является Основой алгоритма функционирования системы прямого управления моментом которая приведена ниже (таблица 3).

В таблице приведены результирующие вектора напряжения автономного инвертора на фазовой плоскости, в зависимости от комбинации ошибок по потокосцеплению статора $\Delta\psi_s$ и электромагнитному моменту ΔM асинхронного двигателя. Фазовая плоскость

разделяется на шесть секторов, где каждому сектору соответствует определенный вектор напряжения для коррекции ошибок.

Ошибки по моменту и потокосцеплению статора влияют на выходные сигналы релейных регуляторов электромагнитного момента и потокосцепления статора соответственно. Эти значения определяют строки таблицы переключений. Номера секторов фазовой плоскости являются столбцами таблицы переключений.

Данная методика используется для формирования коммутационных функций, которые являются управляющими сигналами для драйверов силовых ключей автономного инвертора напряжения. Путём использования таблицы переключений возможно подобрать оптимальную комбинацию ключей АИН на каждом цикле его работы, что позволяет осуществлять желаемое регулирование момента асинхронного двигателя, а также величины его статорного потокосцепления. Этот процесс обеспечивает вращение вектора потокосцепления статора с необходимой частотой в соответствии с заданными значениями момента и потокосцепления асинхронного двигателя.

Таблица 3

Таблица переключений ключей АИН в зависимости от комбинации значений ошибок по моменту (ΔM), потокосцеплению статора $\Delta\psi_s$ и требуемого сектора фазовой плоскости [2]

$\Delta\psi_s$	ΔM	Сектор					
		I	II	III	IV	V	VI
↑	↑	\overline{U}_2	\overline{U}_3	\overline{U}_4	\overline{U}_5	\overline{U}_6	\overline{U}_1
	0	\overline{U}_7	\overline{U}_0	\overline{U}_7	\overline{U}_0	\overline{U}_7	\overline{U}_0
	↓	\overline{U}_6	\overline{U}_1	\overline{U}_2	\overline{U}_3	\overline{U}_4	\overline{U}_5
↓	↑	\overline{U}_3	\overline{U}_4	\overline{U}_5	\overline{U}_6	\overline{U}_1	\overline{U}_2
	0	\overline{U}_0	\overline{U}_7	\overline{U}_0	\overline{U}_7	\overline{U}_0	\overline{U}_7
	↓	\overline{U}_5	\overline{U}_6	\overline{U}_1	\overline{U}_2	\overline{U}_3	\overline{U}_4

Для реализации функции блока таблицы переключений (рисунок 11), чтобы определить результирующий вектор напряжения и его направление необходимо использовать matlab function и написать код по этому алгоритму соответственно таблица переключения:

когда два релейных регулятора на выходе дают положительное значение необходимо результирующий вектор напряжения переместить по направлению вращения вектора потокосцепления статора на один шаг по фазовой плоскости [2];

когда регулятор момента двигателя на выходе выдает отрицательное значение, а регулятор потокосцепления статора – положительное необходимо результирующий вектор напряжения переместить против направления вращения вектора потокосцепления статора на один шаг по фазовой плоскости [2];

когда регулятор момента двигателя на выходе выдает положительное значение, а регулятор потокосцепления статора – отрицательное необходимо результирующий вектор напряжения переместить по направлению вращения вектора потокосцепления статора на два шага по фазовой плоскости [2];

когда два релейных регулятора на выходе дают отрицательное значение необходимо результирующий вектор напряжения переместить против направления вращения вектора потокосцепления статора на два шага по фазовой плоскости [2];

когда регулятор момента электродвигателя на выходе дает нулевое значение результирующий вектор автономного инвертора напряжения примет какое-либо из двух нулевых значений U_0 или U_7 [2];

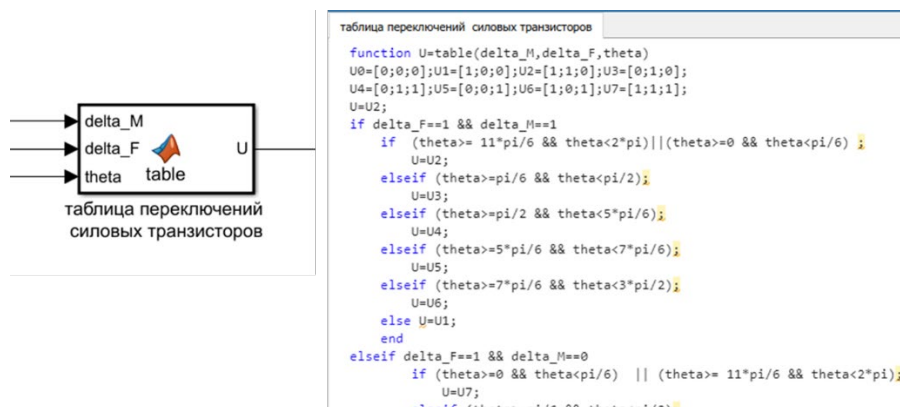


Рис.11. Таблица переключений силовых транзисторов

Исходные данные для компьютерного моделирования

Для оценки соответствия сформированных моделей систем управления АД тяговому назначению необходимо провести их испытание, задавшись участком реального типового цикла городского движения ЕСЕ15 зависимость скорости от времени которого приведена на рисунке 12 [4]

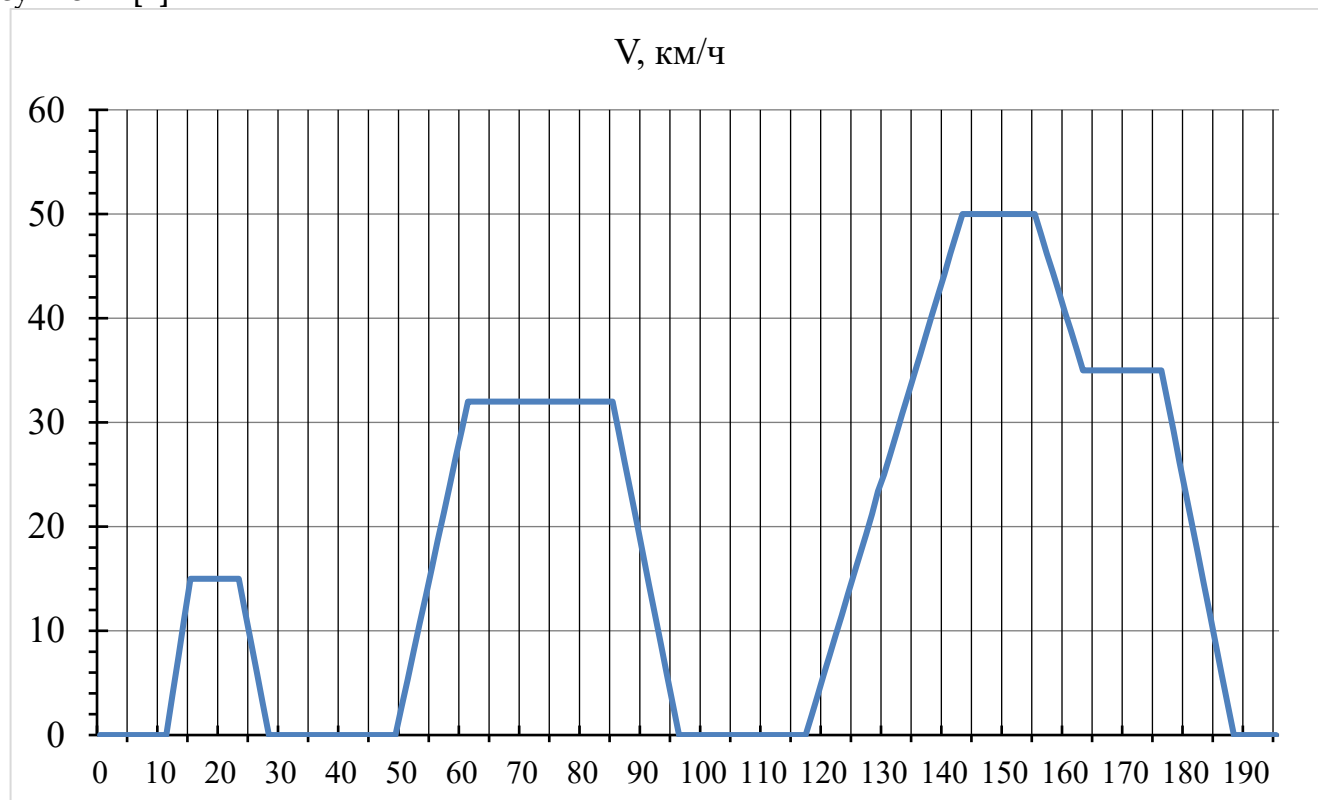


Рис. 12. Исходный реальный цикл движения ЕСЕ 15

4. Характеристики электромобиля, необходимые для расчета, представлены в таблице

Момент инерции транспортного средства, приведенный к валу электродвигателя и компонентам механической трансмиссии

В общем случае момент инерции, приведенный к тяговому двигателю, может быть определен следующим образом:

$$J = J_{AC} + \frac{J_{EV} + J_{TR}}{i_{TR}^2 \cdot \eta_{TR}};$$

Где:

J_{AC}, J_{EV}, J_{TR} – это, соответственно, моменты инерции двигателя переменного тока, транспортного средства, узлов механической трансмиссии, кг·м².

η_{TR}, i_{TR} – это, соответственно, КПД и передаточное число трансмиссии (общее передаточное отношение двигателя переменного тока к колесам, которое при необходимости может быть указан номер главной и промежуточной передач).

В результате расчета конечный момент инерции обоих двигателей составил 10,563 кг·м².

Таблица 4

Характеристики базового транспортного средства, а также условий движения

Наименование параметра	Значение
Снаряжённая масса (m_a), кг	1748
Площадь фронтальной проекции (S_a), м ²	2,2
Коэффициент аэродинамического сопротивления (c_x)	0,3
Динамический радиус колеса (r_k), м	0,323
КПД механической трансмиссии ($\eta_{мт}$)	0,96
Передаточное число главной передачи (i)	4,3
Коэффициент сопротивления качению (f)	0,014
Скорость движения (по ездовому циклу) (V), км/ч	См. рис. 12
Момент инерции приведённый к валу АД (J_d), кг·м ²	10.563

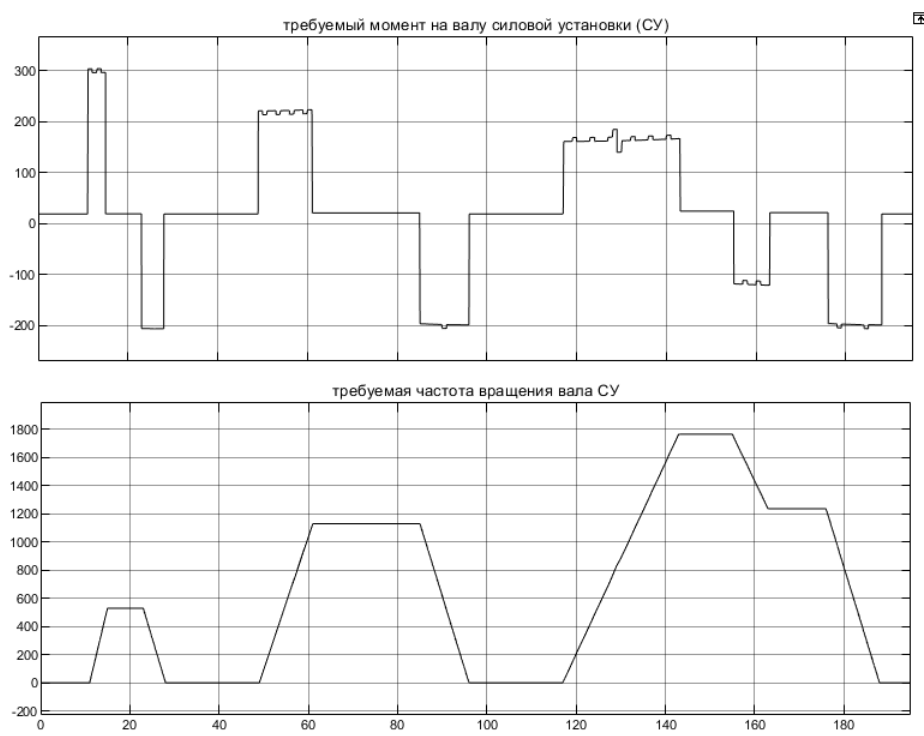


Рис. 13 Графики требуемого момента и требуемой частоты вращения на валу силовой установки (СУ) для цикла ECE15

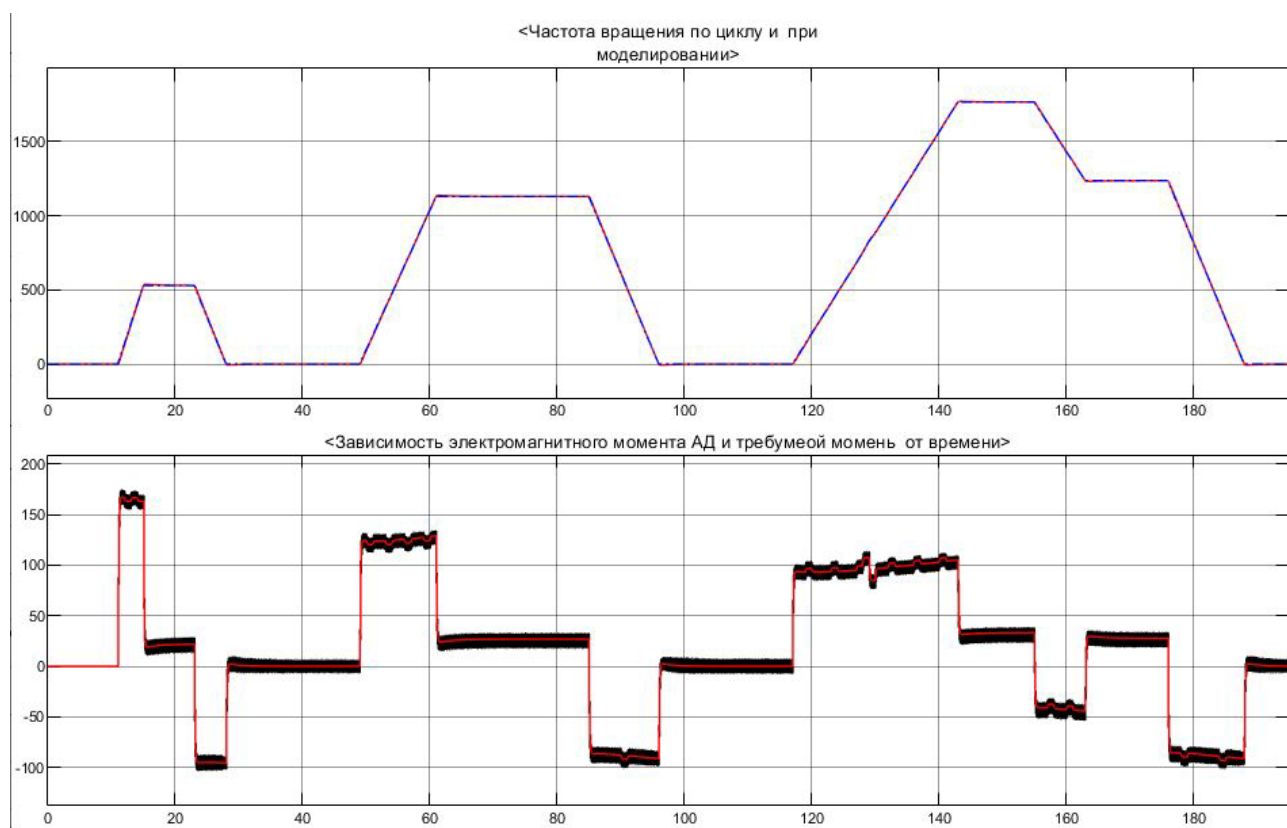


Рис. 14. Графики частота вращения и электромагнитный момент асинхронного двигателя (АД)



Рис. 15. График потоксцепления статора заданный (красный график) и фактический (черный график)

Результаты

В результате работы получены следующие основные выводы:

Сформированы и математические (компьютерные) модели автономного инвертора напряжения с реализацией прямого управления моментом в составе тягового электропривода легкового автомобиля, а также взаимосвязь между ними. Данные модели позволяют оценить возможности тягового электрооборудования автомобиля, а также проверить его на способность преодоления выбранных циклов движения [5].

Произведено расчетное исследование основных параметров, характеризующих работу описанных моделей при движении электромобиля с реальными базовыми характеристиками в типовом цикле городского движения. По результатам исследования были получены эксплуатационных показателей. Так, пройденное по циклу расстояния – 994,1 м; удельный расход энергии составил 84,13 Вт·ч/км ; запас хода ρ – 407,6 км

Созданные модели будут служить основой для построения модели для оптимизации работы транспортного средства. Результаты моделирования будут сравниваться с результатами, полученными в разделе [5].

Прямое управление моментом обеспечивает мгновенное управление моментом и потоком, улучшая ускорение и общую отзывчивость автомобиля. Минимизация пульсаций момента приводит к более плавной работе и повышенному комфорту при вождении. Оптимизация работы двигателя повышает его эффективность и улучшает использование энергии. не требует сложных преобразований или широтно-импульсной модуляции, что упрощает реализацию. Точное управление моментом улучшает управляемость и устойчивость автомобиля, особенно при ускорении и рекуперативном торможении.

Заключение

Прямое управление моментом (ПУМ) обладает множеством преимуществ, которые делают его идеальным для использования в асинхронных двигателях электромобилей. Так как обеспечивает мгновенное управление моментом и потоком, что значительно улучшает ускорение и общую отзывчивость автомобиля. Это означает, что водитель может быстрее реагировать на изменения дорожных условий и маневрировать с большей точностью.

Кроме того, минимизация пульсаций момента, достигаемая с помощью ПУМ, приводит к более плавной работе двигателя. Это не только повышает комфорт при вождении, но и снижает износ механических компонентов, что продлевает срок службы автомобиля.

Оптимизация работы двигателя с использованием ПУМ также способствует повышению его эффективности. Это позволяет лучше использовать энергию, что особенно важно для электромобилей, где экономия заряда батареи напрямую влияет на дальность поездки.

Еще одним важным преимуществом ПУМ является его простота реализации. В отличие от других методов управления, ПУМ не требует сложных преобразований координат или широтно-импульсной модуляции. Это упрощает процесс внедрения и снижает затраты на разработку и обслуживание системы.

Наконец, точное управление моментом, обеспечиваемое ПУМ, улучшает управляемость и устойчивость автомобиля. Это особенно заметно при ускорении и рекуперативном торможении, когда требуется высокая точность и стабильность.

Таким образом, прямое управление моментом не только улучшает производительность и эффективность асинхронных двигателей, но и делает вождение более комфортным и безопасным.

Список литературы:

1. Афанасьев, К. М. Математическая (компьютерная) модель тягового электрического привода электромобиля / К. М. Афанасьев, К. М. Сидоров // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2022. – Т. 13, № 5. – С. 35-39. – EDN VUGYYS.
2. Конохов Д.В, Энергоэффективное прямое управление моментом асинхронных тяговых электродвигателей: дис. кандидата 05.09.03. - Брянск, 2018. - 138 с.
3. Оспанбеков Б.К Повышение энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электромобилей: дис. кандидата 05.09.03. - Москва, 2017. - 160 с.

4. Математическое моделирование основных компонентов силовых установок электромобилей и автомобилей с КЭУ: учеб. пособие / В.И. Строганов, К.М. Сидоров. – М.: МАДИ, 2015. – 100 с.
5. Грищенко А.Г. Тяговый инвертор с интегрированным зарядным устройством для электромобильного транспорта: дис. кандидата 05.09.03. - Москва, 2022. - 190 с.

References:

1. Afanasyev, K. M. Mathematical (computer) model of the traction electric drive of an electric vehicle / K. M. Afanasyev, K. M. Sidorov // Systems of synchronisation, formation and processing of signals. - 2022. - Т. 13, № 5. - С. 35-39. - EDN VUGYYS.
2. Konokhov D.V., Energy-efficient direct torque control of asynchronous traction motors: Ph.D. thesis 05.09.03. - Bryansk, 2018. - 138 с.
3. Ospanbekov B.K, Increase of energy efficiency and operational indicators of electric vehicles: Ph.D. thesis 05.09.03. - Moscow, 2017. - 160 с.
4. Mathematical modelling of the main components of power plants of electric vehicles and cars with CEU: textbook / V.I. Stroganov, K.M. Sidorov. - M.: MADI, 2015. - 100 с.
5. Grishchenko, A.G. Traction inverter with an integrated charger for electric vehicle transport: Cand. thesis 05.09.03. - Moscow, 2022. - 190 с.