

УДК 629.423.32

Система регулирования асинхронного тягового двигателя скоростного поезда

Т. С. Титова, П. Г. Колпахчян, А. С. Володина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Титова Т. С., Колпахчян П. Г., Володина А. С. Система регулирования асинхронного тягового двигателя высокоскоростного поезда // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 128–141. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-128-141

Аннотация

Цель: определение подхода к построению системы автоматического регулирования (САР) и наблюдателя состояния асинхронного тягового двигателя для обеспечения регулирования момента с высоким качеством, без перерегулирования, с заданной точностью и быстродействием. **Методы:** выбор способа управления асинхронным тяговым двигателем (АТД) для обеспечения заданных характеристик является главным при дальнейшем определении методов для достижения поставленной цели. Поэтому в статье рассмотрены вопросы, касающиеся принципа управления и структуры САР для машины. Благодаря применению метода прямого управления моментом с регуляцией вектора потокосцепления через вектор напряжения имеется возможность получения предсказуемого гармонического состава напряжения и токов, а также обеспечение заданного быстродействия. Для устранения влияния накопления ошибок интегрирования и корректной работы наблюдателя состояния предлагается рассмотреть методы Эйлера и Адамса — Моултона для решения дифференциальных уравнений. **Результаты:** для оценки правильности выбранного подхода к построению САР и наблюдателя состояния АТД выполняется математическое моделирование процессов в тяговом электроприводе. Результаты моделирования демонстрируют, что применение САР, использующей принципы прямого управления моментом и управления по напряжению, обеспечивает хорошие динамические показатели регулирования. Высокое быстродействие регулирования момента при сравнительно низкой частоте переключений силовых полупроводниковых приборов инвертора реализуется при исключении контуров регулирования тока статора. Таким образом, появляется возможность эффективного использования условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс». **Практическая значимость:** показана важность выбора способа управления АТД для обеспечения высокой точности, быстродействия и качества регулирования. Применение метода Адамса — Моултона второго порядка позволяет практически полностью устранить накопление погрешности при незначительном увеличении объема вычислений. Это обеспечивает эффективную работу наблюдателя состояния.

Ключевые слова: система автоматического регулирования асинхронного двигателя, обеспечение высокого качества регулирования, быстродействие регулирования, наблюдатель состояния, фильтр Люенберкера, метод Адамса — Моултона

Введение

В настоящее время на электроподвижном составе перспективным является применение бесколлекторных тяговых двигателей — асинхронных и синхронных с постоянными магнитами на роторе. Высокая цена постоянных магнитов и технологические трудности изготовления электрических машин и их использования

являются причиной того, что на современном подвижном составе наибольшее распространение получили асинхронные тяговые двигатели (АТД). Помимо относительно простой конструкции, технологичности изготовления и надежности, их преимуществом является хорошее, близкое к предельному использование сцепного веса [1].

Коллекторные машины не позволяют так эффективно бороться с боксованием, и единственным решением остается подача песка под движущиеся колесные пары для увеличения сцепления с рельсом. С АТД есть возможность быстрого регулирования и сбрасывания момента для увеличения сцепного веса, что делает данный тип привода более перспективным.

Использование АТД требует реализации управления моментом с высокой точностью и быстродействием. Постоянная времени регулирования момента определяется исходя из условия подавления избыточного скольжения колесных пар и не должна превышать 3–5 мс как для локомотивов, так и для моторвагонного подвижного состава [1]. Достижение такого быстрого регулирования момента возможно только с использованием способов управления со стабилизацией потокосцепления АТД.

На современном электроподвижном составе тяговые двигатели имеют номинальную частоту токов статора, превышающую 70–80 Гц. На высокоскоростных поездах она может составлять 120–150 Гц, а максимальная частота достигает 200 Гц [2]. Тяговый инвертор выполняется на IGBT-модулях с допустимой частотой переключений около 1 кГц. При такой частоте переключений пульсации тока статора АТД могут возникнуть трудности для реализации системы векторного регулирования с контурами составляющих тока статора.

Формулировка проблемы

Выбор способа управления тяговым двигателем является главным для дальнейшей реализации поставленных целей. При выборе необходимо учитывать возможность выполнения следующих задач: регулирование момента с высоким качеством, без перерегулирования, точно и быстродействием, как было указано выше, не ниже 3–5 мс. В этом случае возможно эффективно бороться с боксованием и обеспечить близкое к предельному использование сцепного веса.

Системы автоматического регулирования АТД, использующие принципы векторного регулирования, строятся в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора и предполагают использование контуров регулирования проекций тока статора [3]. Для реализации систем векторного управления оптимальным подходом является выбор системы координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора. Это позволяет создать систему автоматического регулирования со стабилизацией потокосцепления и осуществлять управление по напряжению с использованием контуров регулирования проекций

тока статора на оси выбранной системы координат. Достижение минимума потерь достигается за счет равенства постоянных и переменных потерь при постоянстве потокосцепления [5].

Однако использование контуров регулирования тока затруднено наличием больших пульсаций на высокоскоростных поездах, где частота модуляции тягового инвертора достаточно низкая по отношению к частоте выходного напряжения. Поэтому возникает проблема фильтрации сигналов тока. Для этого необходимо использовать фильтры со значительным сглаживанием, применение которых ведет к запаздыванию сигналов по фазе. Данное запаздывание приводит к снижению быстродействия регулирования, поэтому целесообразно использовать подход, исключающий наличие контуров регулирования составляющих тока статора.

При отказе от контуров тока и переходе к методу прямого управления моментом частота переключения силовых полупроводниковых приборов может достигать значительной величины и приводить к перегреву приборов, что является недопустимым. Кроме того, моменты переключения не имеют строго определенной последовательности. В результате гармонический состав тока системы тягового электроснабжения в контактной сети и рельсах будет иметь непредсказуемый спектральный состав, что отрицательно влияет на работу систем автоматической блокировки и связи, таких как АЛСН и СЦБ.

Подход, заключающийся в регулировании вектора потокосцепления через вектор напряжения, позволит получить предсказуемый гармонический состав напряжения и токов. Применение модуляции с контролируемым гармоническим составом даст возможность выполнить данную задачу, избавив низкочастотную часть спектра от нежелательных гармоник.

По указанным выше причинам для создания системы автоматического регулирования момента АД высокоскоростного поезда целесообразно использовать систему автоматического регулирования без контуров регулирования тока, основанную на применении способа прямого управления моментом. Далее будут рассмотрены вопросы построения системы управления и наблюдателя состояния, которые позволят реализовать поставленные задачи.

Принцип управления и структура системы автоматического регулирования момента асинхронной электрической машины

В рассматриваемом случае питание АД реализуется по схеме с явно выраженным звеном постоянного тока и использованием двухуровневого автономного инвертора напряжения (АИН) [4]. На рис. 1 представлена упрощенная схема силовых цепей. АИН функционирует в качестве источника напряжения, параметры которого (величина и частота) регулируются. Система управления АИН в качестве исходных данных принимает значения амплитуды и углового положения вектора

напряжения статора. Для этого могут быть задействованы методы синусоидальной ШИМ, пространственно-векторной ШИМ или ШИМ с подавлением выбранных гармоник (Selective Harmonic Elimination) [4].

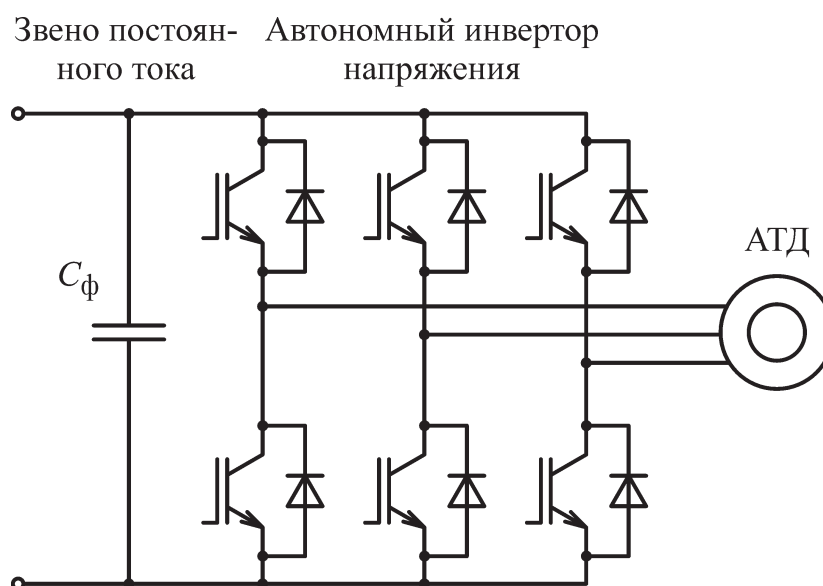


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей тягового электропривода с АТД

В представленной системе автоматического регулирования (САР) для асинхронного тягового двигателя (АТД) применяется метод прямого управления моментом (DTC) [3]. Традиционная реализация DTC имеет существенный недостаток, заключающийся в невозможности контроля за гармоническим составом момента и тока в звене постоянного тока, а также за частотой переключения силовых полупроводниковых приборов. Для устранения данного ограничения рассматриваемая САР предполагает формирование вектора напряжения обмоток статора. Архитектура САР основана на математической модели асинхронной электрической машины, описываемой с использованием Г-образной схемы замещения, представленной на рис. 2.

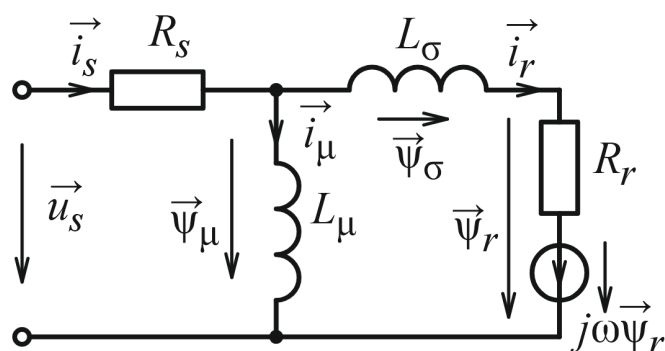


Рис. 2. Схема замещения асинхронной электрической машины с контуром намагничивания, вынесенным на зажимы статора

Электромагнитные процессы в АД, представленном схемой замещения с выведенным на зажимы статора контуром намагничивания (рис. 2), описываются уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\Psi}_\mu}{dt} = \vec{u}_s - R_s \vec{i}_s; \\ \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} = R_r \vec{i}_r + j\omega \vec{\Psi}_r, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{u}_s, \vec{\Psi}_\mu, \vec{\Psi}_r, \vec{i}_s, \vec{i}_r$ — пространственные векторы напряжения статора, потокосцепления и токов статора и ротора;

R_s — активное сопротивление цепи статора;

$L_\mu = \sigma_{12} L_m$ — индуктивность контура намагничивания;

$L_\sigma = \sigma_{12} L_{\sigma s} + \sigma_{12}' L_{\sigma r}$ — индуктивность рассеяния;

$R_r = \sigma_{12}' r_r'$ — активное сопротивление ротора;

$\sigma_{12} = 1 + L_{\sigma s} / L_m$ — коэффициент рассеяния;

$L_m, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}, r_r'$ — параметры Т-образной схемы замещения АД [6].

Ток статора определяется из уравнений магнитной связи:

$$\vec{i}_s = \vec{i}_\mu + \vec{i}_r = \left[\frac{1}{L_\sigma} + \frac{1}{L_\mu} \right] \vec{\Psi}_\mu - \frac{1}{L_\sigma} \vec{\Psi}_r \quad (2)$$

С учетом (2) система уравнений (1) может быть записана в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\vec{\Psi}_\mu}{dt} \\ \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s \left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma} \right) - jw_B & \frac{R_s}{L_\sigma} \\ \frac{R_r}{L_\sigma} & -\frac{R_r}{L_\sigma} + j(w - w_B) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\Psi}_\mu \\ \vec{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{u}_s \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Электромагнитный момент может быть найден с использованием выражения:

$$M_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{1}{L_\sigma} |\vec{\Psi}_\mu| \cdot |\vec{\Psi}_r| \cdot \sin(\theta). \quad (4)$$

Задачей регулирования АД является управление процессом электромеханического преобразования (создания требуемого электромагнитного момента) с заданным быстродействием. Во избежание чрезмерных отклонений от заданного значения и нежелательных низкочастотных колебаний при изменении рабочего режима двигателя важно обеспечить стабилизацию магнитного потока АД. Когда САР моментом строится на основе выражения (2), стабилизируется потокосцепление статора. Величина этого потокосцепления поддерживается на требуемом

уровне посредством управляющих воздействий, а угол между векторами потоко- сцепления статора и ротора используется для регулирования момента.

Графическое представление конечной точки вектора магнитного потока ста- тора является многоугольником, отображающим его траекторию (годограф), как это показано на рис. 3. При повышении частоты модуляции выходного напряже- ния АИН форма траектории вектора потоко-сцепления статора стремится к форме окружности. Радиус данного круга задается посредством управления величиной потоко-сцепления статора. Скорость перемещения вектора, или угловой шаг в дис- кретной системе, устанавливается регулятором момента. В рамках дискретной системы управления предполагается, что интервал модуляции ΔT_m , составляющий половину периода модуляции АИН, значительно меньше как постоянной времени рассеяния ротора $T_\sigma = L_\sigma/R_r$, так и периода основной гармоники T_s .

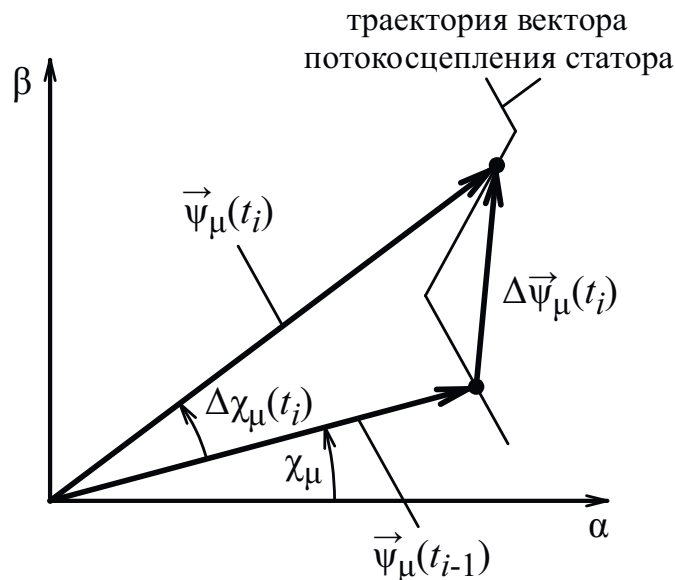


Рис. 3. Пространственное расположение векторов АД

На рис. 3 указано расположение вектора потоко-сцепления статора в началь- ный и конечный момент временного интервала модуляции ΔT_m , который соответ- ствует длительности цикла работы дискретной системы управления. В общем случае вектор потоко-сцепления ротора изменяет свою длину на величину $\Delta\Psi_\mu(t_j)$ и поворачивается на угол $\Delta\chi_\mu(t_j)$:

$$\vec{\Psi}_\mu(t_j) = \left[(1 + k_\psi) \cdot e^{j\Delta\chi_\mu(t_j)} \right] \cdot \vec{\Psi}_\mu(t_{j-1}),$$

а его изменение оказывается равным:

$$\Delta\vec{\Psi}_\mu(t_j) = \vec{\Psi}_\mu(t_j) - \vec{\Psi}_\mu(t_{j-1}) = \left[(1 + k_\psi) \cdot e^{j\Delta\chi_\mu(t_j)} - 1 \right] \cdot \vec{\Psi}_\mu(t_{j-1}).$$

В данном случае вектор напряжения статора на текущем шаге работы дискретной системы регулирования равен:

$$\vec{u}_s(t_j) = \frac{\Delta \vec{\Psi}_s(t_j)}{\Delta T_m}.$$

Наблюдатель состояния тягового асинхронного двигателя на основе фильтра Люенбергера

Наблюдатель состояния играет важную роль в системе управления АТД, обеспечивая определение положения вектора потокосцепления. Его показатели напрямую влияют на критически важные параметры регулирования, включая быстродействие и точность, так как расчет ведется в режиме реального времени. Точность параметров асинхронной машины способна влиять на работу наблюдателя. Так, в случае значительных отклонений параметров двигателя от действительных работа фильтра затрудняется ввиду больших отклонений величин и возможности появления неустойчивости [7].

Наблюдатель состояния — это модель, которая интегрируется с объектом управления и отслеживает динамику регулирующих параметров, предоставляя информацию об их изменениях [8]. При оперировании данными о входных и выходных сигналах, а также при использовании известных данных структурных особенностей и параметров самой системы становится возможным определение ее внутреннего состояния. Синтез наблюдателя базируется на представлении динамики системы в виде дифференциального уравнения, сформулированного в матричной форме [5]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[x] = [A][x] + [B][u]; \\ [y] = [C][x], \end{cases} \quad (5)$$

где $[x]$ — вектор переменных состояния системы;

$[u]$ — вектор управляющих воздействий;

$[A]$, $[B]$ — матрицы коэффициентов перед векторами состояния и управляющих воздействий, описывающие динамику системы и ее реакцию на внешние воздействия;

$[y]$ — вектор измеряемых величин;

$[C]$ — матрица преобразования для перехода от переменных состояния к измеряемым величинам.

Для определения матриц, входящих в систему уравнений (1), используется описание асинхронного двигателя с помощью теории обобщенной электрической машины (1) и (4), приведенное выше:

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\left(\frac{r_s + K_p}{L_\mu} + \frac{r_s + K_p}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{r_s + K_p}{L_\sigma} & 0 & K_i & 0 \\ 0 & -\left(\frac{r_s + K_p}{L_\mu} + \frac{r_s + K_p}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{r_s + K_p}{L_\sigma} & 0 & K_i \\ \frac{R'r}{L_\sigma} & 0 & -\frac{R'r}{L_\sigma} & p \cdot \omega & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R'r}{L_\sigma} & -p \cdot \omega & -\frac{R'r}{L_\sigma} & 0 & 0 \\ -\left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & -\frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & -\frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & K_p & 0 \\ 0 & 1 & 0 & K_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Выражение, записанное в пространстве состояний для наблюдателя состояния, представляет собой систему дифференциальных уравнений. Ее можно решить с помощью метода Эйлера:

$$[x]_{n+1} = [x]_n + \Delta t \cdot \frac{d}{dt}[x]_n = [x]_n + \Delta t \cdot ([A][x]_n + [B][u]_n).$$

Результаты предварительных расчетов показали, что применение метода Эйлера с шагом интегрирования по времени, соответствующему периоду работы САР, не позволяет обеспечить необходимой точности определения наблюдаемых величин. Так как переменные интегрирования являются периодическими сигналами, накопление ошибки интегрирования приводит к отклонению наблюдаемых векторов потокосцепления статора и ротора по амплитуде и фазе от реальных значений. Это приводит к ухудшению качества регулирования момента и может вызывать неустойчивость САР.

Для устранения влияния накопления ошибок интегрирования целесообразно использовать неявные методы решения дифференциальных уравнений. Одним из наиболее простых и эффективных с точки зрения реализации в микропроцессорной системе управления является метод Адамса — Моултона второго порядка [10, 11]. Решение уравнений наблюдателя состояния выполняется в два этапа. Сначала выполняется прогноз методом Эйлера:

$$[x]_{n+1}^p = [x]_n + \Delta t \cdot \frac{d}{dt}[x]_n = [x]_n + \Delta t \cdot ([A][x]_n + [B][u]_n).$$

Затем проводится коррекция:

$$[x]_{n+1} = [x]_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot ([A][x]_n + [A][x]_{n+1}^p + 2[B][u]_n).$$

Анализ результатов работы наблюдателя состояния АД в составе САР показал, что применение метода Адамса — Моултона второго порядка позволяет практически полностью устранить накопление погрешности при незначительном увеличении объема вычислений.

Моделирование процессов в тяговом электроприводе с САР на основе принципов ДТС и наблюдателем на основе фильтра Люенбергера

Для оценки правильности выбранного подхода к построению САР и наблюдателя состояния АД было выполнено математическое моделирование процессов в тяговом электроприводе высокоскоростного поезда с АД. В расчетах использовались параметры тягового двигателя, аналогичные применяемому на поездах «Сапсан»:

$P_n = 500$ кВт — номинальная мощность;

$f_{сн} = 60$ Гц — номинальная частота тока статора;

$m = 3$ — количество фаз статора;

$p = 2$ — число пар полюсов;

$L_m = 0,0341$ Гн — индуктивность контура намагничивания;

$L_{\sigma s} = 0,0015$ Гн — индуктивность рассеяния статора;

$L'_{\sigma r} = 0,0031$ Гн — индуктивность рассеяния ротора, приведенная к статору;

$r_s = 0,098 \text{ Ом}$ — активное сопротивление статора;

$r'_r = 0,069 \text{ Ом}$ — активное сопротивление ротора, приведенное к статору.

Моделирование выполнялось для следующих условий. Напряжение в звене постоянного тока равно 2800 В, модуляция выходного напряжения АИН выполняется с использованием ШИМ с подавлением выбранных гармоник с тремя контролируруемыми гармониками. При номинальной частоте вращения АД частота переключения силовых полупроводниковых приборов АИН составляет около 800 Гц. В начале расчета АД вращается с номинальной скоростью, задание момента равно нулю. В момент времени 10 мс на вход САР подается задание момента, равное номинальному значению. Результаты расчетов приведены на рис. 4. Показаны зависимости линейного напряжения и фазного тока, потокосцеплений статора и ротора, электромагнитного момента.

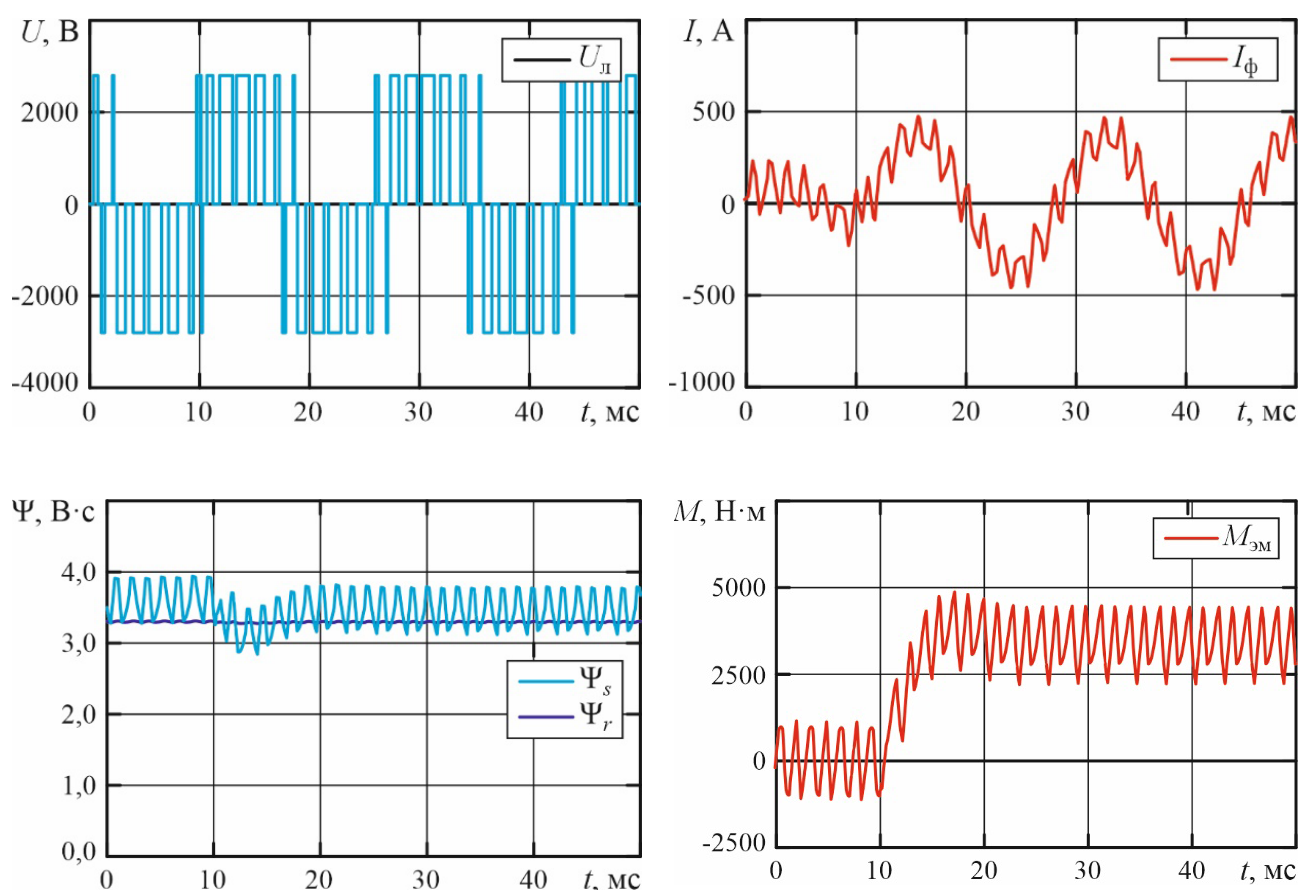


Рис. 4. Результаты расчета процессов в ТЭП высокоскоростного поезда с АД: $U_{л}$, I_{ϕ} — линейное напряжение и фазный ток АД; ψ_s , ψ_r — потокосцепления статора и ротора АД; $M_{эм}$ — электромагнитный момент АД

Анализ результатов моделирования показывает, что применение САР, использующей принципы прямого управления моментом и управления по напряжению, обеспечивает хорошие динамические показатели регулирования. Исключение

контуров регулирования составляющих тока статора позволяет получить высокое быстродействие регулирования момента при сравнительно низкой частоте переключений силовых полупроводниковых приборов АИН. Полученные показатели регулирования позволяют обеспечить эффективное использование условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс».

Выводы

Определение оптимального метода управления тяговым двигателем играет ключевую роль в реализации системы управления тяговыми двигателями высокоскоростных поездов. Использование АТД требует реализации управления моментом с высокой точностью и быстродействием. Быстродействие регулирования момента становится возможным благодаря применению системы автоматического регулирования без контуров регулирования тока, основанной на способе прямого управления моментом, который заключается в регулировании вектора потокосцепления через вектор напряжения.

В системе управления АТД важную роль играет наблюдатель состояния. Точное определение положения и величины наблюдаемых величин, таких как потокосцепление статора и электромагнитный момент, во многом определяют точность и динамические показатели системы автоматического регулирования. Для рассматриваемой системы управления рациональным является применение наблюдателя состояния на основе фильтра Люенбергера. Использование метода Адамса — Моултона позволяет обеспечить работу наблюдателя с необходимой точностью.

Результаты математического моделирования процессов в тяговом электроприводе высокоскоростного поезда с АТД показали, что рассмотренный подход к построению системы автоматического регулирования позволяет обеспечить быстродействие регулирования момента, обеспечивающее эффективное использование условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс».

Список источников

1. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андрющенко [и др.]. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. 412 с.
2. Назаров А. С. Опыт запуска в России высокоскоростных поездов «Сапсан» и «Аллегро» // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2013. № 3 (23). С. 62–68.
3. Усольцев А. А. Векторное управление асинхронными двигателями. СПб.: СПбГИТ-МО (ТУ), 2002. 42 с.
4. Speed-sensorless stator flux-oriented control of induction motor drives in traction / M. Depenbrock [et al.] // Communications — Scientific Letters of the University of Zilina. 2001. Vol. 3, no. 2. Pp. 68–75. DOI: 10.26552/com.C.2001.2-3.68-75.

5. Исаков А. С., Ушаков А. В. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 38. С. 280–286. EDN JVJXXJ.

6. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. М.-Л.: Госэнергоиздательство, 1949. 712 с.

7. Traction induction motor state observer based on an luenberger filter / P. Kolpakhchyan, [et al.] // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-43792-2_25.

8. Попов С. А., Фальков Г. А. Особенности построения имитационной модели наблюдателя состояния для систем векторного управления асинхронным электроприводом // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 7. С. 40–47. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40083> (дата обращения: 08.02.2026).

9. Jnayah S., Moussa I., Khedher A. IM fed by three-level inverter under DTC strategy combined with sliding mode theory // Electronics. 2022.

10. Garrappa R. Numerical solution of fractional differential equations: a survey and a software tutorial // Mathematics. 2018. Vol. 6 (2). Pp. 30–53.

11. Ким В. А. Методы Адамса — Башфорта — Моултона и Ньютона — Рафсона для численного анализа осциллятора дuffинга с производной переменного дробного порядка римана-лиувилля // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. № 3 (33). С. 82–97. EDN TNWNML.

Дата поступления: 05.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

ТИТОВА Тамила Семеновна — д-р техн. наук, профессор; titova@pgups.ru

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая тяга»; kolpakhchyan@pgups.ru

ВОЛОДИНА Алена Сергеевна — студент; volodinaalena2016.volodina@yandex.ru

Control system for an induction traction motor in high-speed trains

T. S. Titova, P. G. Kolpakhch'yan, A. S. Volodina

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Titova T. S., Kolpakhch'yan P. G., Volodina A. S. Control system for an induction traction motor in high-speed trains // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 128–141. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-128-141. (In Russian)*

Abstract

Objective: to establish a methodology for designing an automatic control system (ACS) and a corresponding state observer for induction traction motors (ITM), specifically to guarantee high-precision torque regulation characterized by defined accuracy, rapid dynamic response, and the absence of overshoot. **Methods:** the foundational step in achieving the stated objective lies in selecting an optimal control strategy for the ITM that guarantees the necessary performance metrics. Consequently, this paper investigates the core principles of control and structural configuration of the motor's ACS. This study advocates for the implementation of Direct Torque Control (DTC). By regulating the flux-linkage vector via the voltage vector, this method offers distinct advantages, including a predictable harmonic spectrum for both currents and voltages, alongside the requisite dynamic behavior. Furthermore, to mitigate the accumulation of integration errors and ensure the robust functionality of the state observer, the research proposes utilizing numerical solutions for differential equations based on the Euler and Adams — Moulton methods. **Results:** to validate the proposed design methodology for the ACS and the ITM state observer, comprehensive mathematical modelling of the traction electric drive system has been conducted. The simulation data confirms that an ACS based on the principles of direct torque and voltage control delivers superior dynamic regulation capabilities. Notably, the system achieves rapid torque control while maintaining a comparatively low switching frequency for the inverter's power semiconductor components. This efficiency is largely attributed to the removal of stator current control loops, which subsequently allows for optimal utilization of wheel-rail adhesion conditions. **Practical significance:** the study underscores the critical importance of selecting a suitable ITM control strategy to secure high precision, speed, and the overall control quality. Employing the second-order Adams-Moulton method effectively neutralizes error accumulation with minimal additional computational load. This mathematical adjustment is instrumental in ensuring the efficient and reliable operation of the state observer in practical applications.

Keywords: automatic control system of an induction motor, ensuring high-quality control, rapid response, state observer, Luenberger filter, Adams-Moulton method

References

1. Asinkhronnyj tyagovyy privod lokomotivov / A.A. Andryushchenko [i dr.]. M.: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2014. 412 s. (In Russian)
2. Nazarov A. S. Opyt zapuska v Rossii vysokoskorostnykh poezdov “Sapsan” i “Allegro” // Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolij: Tekhnika zheleznykh dorog. 2013. No. 3 (23). S. 62–68. (In Russian)
3. Usol'tsev A. A. Vektornoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami. SPb.: SPbGIT-MO (TU), 2002. 42 s. (In Russian)
4. Speed-sensorless stator flux-oriented control of induction motor drives in traction / M. Depenbrock [et al.] // Communications — Scientific Letters of the University of Zilina. 2001. Vol. 3, no. 2. Pp. 68–75. DOI: 10.26552/com.C.2001.2-3.68-75.

5. Isakov A. S., Ushakov A. V. Realizatsiya nablyudatelya sostoyanij asinkhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom v bezdatchikovoj sisteme vektornogo upravleniya // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2007. No. 38. S. 280–286. EDN JVJXXJ. (In Russian)
6. Kostenko M. P. Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast'. M.-L.: Gosenergoizdatel'stvo, 1949. 712 s. (In Russian)
7. Traction induction motor state observer based on an luenberger filter / P. Kolpakhchyan, [et al.] // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-43792-2_25.
8. Popov S. A., Fal'kov G. A. Osobennosti postroeniya imitatsionnoj modeli nablyudatelya sostoyaniya dlya sistem vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2024. No. 7. S. 40–47. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40083> (data obrashcheniya: 08.02.2026). (In Russian)
9. Jnayah S., Moussa I., Khedher A. IM fed by three-level inverter under DTC strategy combined with sliding mode theory // Electronics. 2022.
10. Garrappa R. Numerical solution of fractional differential equations: a survey and a software tutorial // Mathematics. 2018. Vol. 6 (2). Pp. 30–53.
11. Kim V. A. Metody Adamsa — Bashforta — Moultona i N'yutona — Rafsona dlya chislennogo analiza ostsillyatora duffinga s proizvodnoj peremennogo drobnogo poryadka rimana-liuvillya // Problemy vychislitel'noj i prikladnoj matematiki. 2021. No. 3 (33). S. 82–97. EDN TNWNML. (In Russian)

Received: 05.02.2026

Accepted: 04.03.2026

Author's information:

Tamila S. TITOVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; titova@pgups.ru

Pavel G. KOLPAKHCH'YAN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of “Electric Traction”; kolpakhchyan@pgups.ru

A. S. VOLODINA — Student; volodinaalena2016.volodina@yandex.ru