

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С НЕЗАВИСИМЫМИ ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ**

**Голубчик Т.В., Ютт В.Е., Нгуен К.Т., Лазарев Д.Б.**

*ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва, Россия (125319, Москва, Ленинградский проспект, 64)*

---

К настоящему времени рациональный путь решения эколого-экономических проблем традиционных автомобилей определен – создание автотранспортных средств (АТС) с применением тягового электропривода (ТЭП), технологий управления приводными электродвигателями транспортных средств с механически независимыми движителями, которые могут самостоятельно или совместно приводить в движение автотранспорт. Под «тяговый электропривод» подразумевается электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение транспортного средства, состоящую из энергоустановки, электропривода ведущих колес и системы управления. В настоящее время, такими АТС признаны стать гибридные автомобили с комбинированной силовой энергоустановкой, состоящей из ДВС и ТЭП, и электромобили, в том числе с механически независимыми движителями, питанием от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) или от комбинированной электрической энергоустановки, состоящей из ТАБ и буферного накопителя электроэнергии.

---

Ключевые слова: автомобиль, комбинированная энергетическая установка, аккумуляторные батареи, двигатель внутреннего сгорания, генератор, силовой агрегат.

## **IMPROVE ENERGY EFFICIENCY TRACTION ELECTRIC VEHICLES WITH INDEPENDENT INDIVIDUAL TRACK MOVERS**

**Golubchik T.V., Yutt V.E., Nguen K.T., Lazarev D.B.**

*Federal state educational institution «Moscow state automobile and road technical University (MADI)», Moscow, Russia, 125319, Moscow, LeningradskyProspekt, 64)*

---

The paper considers the advanced propulsion systems for electric and hybrid vehicles, including mechanically independent drives, review. To date, the rational way to solve the ecological and economic problems of conventional vehicles defined - creating hybrid vehicles using traction drive, control technology drive motors vehicles with mechanically independent propulsion, which can independently or together to propel vehicles. Currently, such exchanges recognized hybrid cars become a hybrid power plant, consisting of the engine and traction drive and electric vehicles, including mechanically independent traction drive, powered by the battery or combined electric power plant, consisting of battery and buffer storage device.

---

Keywords: automobile, combined power plant, batteries, an internal combustion engine, the generator, the power unit.

### **Введение**

К настоящему времени рациональный путь решения эколого-экономических проблем традиционных автомобилей определен – создание автотранспортных средств (АТС) с применением тягового электропривода (ТЭП), технологий управления приводными электродвигателями транспортных средств с механически независимыми движителями, которые могут самостоятельно или совместно приводить в движение автотранспорт. Под «тяговый электропривод» подразумевается электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение транспортного средства, состоящую из энергоустановки, электропривода ведущих колес и системы управления. В настоящее время, такими АТС признаны стать гибридные автомобили с комбинированной силовой энергоустановкой,

состоящей из ДВС и ТЭП, и электромобили, в том числе с механически независимыми двигателями, питанием от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) или от комбинированной электрической энергоустановки, состоящей из ТАБ и буферного накопителя электроэнергии.

Основным фактором, сдерживающим широкомасштабное внедрение АТС с ТЭП, является высокая стоимость самого ТЭП, обусловленная в основном его дорогостоящими источниками/накопителями энергии с ограниченной энергоемкостью и мощностью. Следовательно, обеспечение высокой энергетической эффективности ТЭП, играет ключевую роль при построении электромобилей и гибридных автомобилей.

Несмотря на большое количество научно-исследовательских и практических работ по созданию АТС с ТЭП вопросы теоретических и практических исследований, направленных на разработку эффективных систем управления ТЭП, обеспечивающих их высокие технико-эксплуатационные показатели, не получили достаточного развития. Это связано с тем, что создание таких автотранспортных средств является основным современным направлением разработок всех мировых автомобилестроителей. Производители зачастую «закрывают» научную информацию о созданной продукции, что затрудняет дальнейшее развитие ТЭП для АТС. Таким образом, в настоящее время повышение эксплуатационных свойств ТЭП, в том числе и энергетической эффективности, является важной и актуальной научно-технической проблемой, которую необходимо решить для создания конкурентоспособных электромобилей и гибридных автомобилей.

Требуемые тягово-динамические характеристики АТС способны обеспечить как ТЭП постоянного, так и переменного тока. Однако в настоящее время на АТС ТЭП переменного тока фактически вытеснили ТЭП постоянного тока. Это обусловлено достижениями в области силовой электроники и микропроцессорной техники, которые позволяют создавать высококачественные бесконтактные ТЭП на основе трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД) и синхронного двигателя с возбуждением от высокоэффективных редкоземельных постоянных магнитов (СДПМ).

Фактически во всех модификациях гибридных автомобилях, разработанных японскими фирмами (Toyota, Honda, Nissan и т.д.) применяются СДПМ, обладающие высокими удельными энергетическими и массогабаритными показателями, высокой надежностью, большим рабочим ресурсом.

В зависимости от конструктивных особенностей различают два основных вида СДПМ:

- бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ), в которых фазные ЭДС имеют трапецеидальную форму;

- бесконтактные двигатели переменного тока, фазные ЭДС которых имеют синусоидальный характер.

СДПМ с синусоидальной формой ЭДС вращения превосходят БДПТ по массогабаритным, энергетическим показателям, поэтому широко используются на образцах западных ЭМ, гибридных автомобилей, ЭМ с ТЭ.

На АТС применены два типа СДПМ – с неявнополюсным и явнополюсным ротором, причем последний в последнее время получает широкое применение, благодаря более высоким значениям момента и КПД из-за целенаправленного комбинирования активной и реактивной составляющих момента. Однако СДПМ с неявнополюсным ротором отличается простотой изготовления. Эволюция применения СДПМ свидетельствуется в выпускаемых фирмой Toyota образцах ЭМ (ToyotaRAV4-EV) и гибридного автомобиля (ToyotaPrius). По сообщению специалистов фирмы Toyota КПД СДПМ, установленного на своих гибридных автомобилях достигает 96%, удельная мощность около 4 кВт/кг, удельный момент 10 Нм/кг. Однако стоимость ТЭП на базе СДПМ выше ТЭП на базе АД примерно на 20%...40% в зависимости от номинальной мощности.

Преимущества АД заключаются в простоте конструкции, высокой надежности, приемлемой стоимости, развитой технологии производства, малых затрат на обслуживание. ТЭП на базе АД характеризуется наилучшим соотношением цена/качество.

В настоящее время фактически во всех СТП гибридных автомобилей и электромобилей, разработанных различными автомобилестроителями, применяется структура системы ТЭП на базе трехфазного тягового электродвигателя (ТЭД) переменного тока, приведенная на рис. 1. К трансмиссии можно подключить поток мощности от ДВС. В качестве автономного инвертора напряжения (АИН) обычно используется трехфазная мостовая схема. Применяются также схемы многоуровневого инвертора или параллельного соединения инверторов в ТЭП гибридных грузовых автомобилей, в качестве силовых полупроводниковых ключей общепризнанные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Обычно при согласованных уровнях напряжения ТЭД и энергоустановкой (например, ТАБ с системой «ДВС – генератор») преобразователь постоянного тока (ППТ) отсутствует. В гибридной силовой установке THS-II (ToyotaHybridSystem) фирмы Toyota применена традиционная схема импульсного ППТ для повышения напряжения ТАБ с 274 В на 500 В.

В последнее время интенсивно ведутся исследования по применению вентильно-индукторной машины (ВИМ) в качестве ТЭД для ЭМ и стартер-генератора. Преимущества ВИМ: простая и дешевая конструкция из-за отсутствия обмотки ротора и постоянного

магнита; малая инерция ротора и высокое соотношение момента/инерции; фазы статора можно управлять отдельно, повреждение одной из фаз статора не предотвращает действие привода. Основные недостатки ВИМ: высокая пульсация вращающего момента; более высокий акустический уровень шума, чем у других двигателей.

Проведенный анализ показывает целесообразность и перспективность применения ТЭД переменного тока на базе АД с короткозамкнутым ротором и СДПМ на борту АТС.



Рис. 1. Обобщенная структура ТЭП АТС

### *Перспективность повышения технико-эксплуатационных показателей АТС улучшением ТЭП*

Развитие теории и практики производства автомобилей подтвердило их основные эксплуатационные свойства: тягово-скоростные и тормозные свойства, топливная экономичность, экологическая безопасность, управляемость, устойчивость движения, маневренность, проходимость, плавность хода, надежность. В автомобильной промышленности непрерывно идет процесс повышения качества автомобиля. В современных автомобилях данные свойства обеспечивает сложная совокупность силовых агрегатов и вспомогательных оборудования, включая их системы управления. Эксплуатационные свойства классического автомобиля тесно связаны с процессом управления моментом и скоростью ДВС.

Следует отметить, что механические и энергетические характеристики ТЭД, которые подлежат к управлению, напрямую влияют на эксплуатационные качества АТС. Для улучшения тягово-скоростных, тормозных свойств, проходимости, маневренности автомобиля ТЭД должны, при необходимости, развивать свои предельные значения момента и мощности во всех рабочих режимах с учетом существующих ограничений на его ресурсы, а также ресурсы связанных с ними других агрегатов. Улучшение плавности хода возможно путем демпфирования электроприводом (ЭП) динамических нагрузок в трансмиссии. Высокие динамичность и точность регулирования момента ТЭД позволяют повысить управляемость и устойчивость движения автомобиля.

В гибридных автомобилях механическими характеристиками ТЭД можно управлять с более высокой точностью и быстродействием, чем ДВС. Это значит, все «пиковые» нагрузки ДВС можно демпфировать электроприводом при достаточной мощности последнего, что позволяет «косвенным путем» но более эффективно управлять моментом и скоростью ДВС, и в конечном итоге, снизить расходы топлива и токсичные выбросы.

Таким образом, имеется возможность улучшения эксплуатационных свойств АТС повышением технико-эксплуатационных показателей ТЭП.

В структуре ТЭП АТС принципиально выделение двух взаимодействующих каналов – силового и информационно-управляющего. Силовой канал, предназначенный для преобразования энергии первичного источника в механическую, как правило, содержит энергоустановку, вентильный преобразователь, ТЭД, механическую трансмиссию. Информационно-управляющий канал, содержащий микропроцессорные средства управления и систему датчиков, предназначен для управления потоком энергии, а также сбора и обработки сведений о состоянии и функционировании системы, диагностики ее неисправностей.

С возрастающей популярностью АТС с ТЭП удешевляются их элементные базы, причем стоимость микропроцессорных средств управления снижаются более динамично по сравнению с силовыми агрегатами. Кроме того, жесткая конкуренция на мировом рынке электроники заставляет производителей микропроцессорных контролеров выпускать продукцию с большими, порой избыточными функциональными возможностями. Отсюда видны резервы, которые позволяют, без существенных материальных затрат, дальнейшему повышению технико-эксплуатационных показателей ТЭП путем совершенствования их методов управления при максимальном использовании заложенных в электронных средствах управления возможностей.

Для повышения эксплуатационных показателей АТС с ТЭП следует совершенствовать ТЭП по следующим направлениям:

- применить на борту АТС источники электропитания и ТЭД с высокими энергетическими, динамическими характеристиками и надежностью;
- построить высококачественные системы управления ТЭП, удовлетворяющие требованиям: высокое быстродействие и высокая точность регулирования момента; предельная эксплуатация электропривода по моменту во всем диапазоне изменения скорости при высокой энергетической эффективности и надежности; реализация законов управления ТЭП по минимуму потерь в квазистатических режимах.

В соответствии с вышеотмеченными требованиями к ТЭП основными критериями, являются критерии оптимальности по быстродействию, точности регулирования момента, минимуму потерь, минимуму удельных расходов энергии ИЭП, максимуму момента при действующих в приводе ограничениях по ресурсу всех силовых агрегатов системы.

На основе вышеприведенного анализа перспективных направлений совершенствования ТЭП АТС обоснована обобщенная структура ТЭП переменного тока на базе АД и СДПМ, позволяющая реализовать вышеотмеченные требования (рис. 2). В системе управления ТЭД предусмотрены контуры прямого регулирования момента и магнитного потока электродвигателя. При необходимости можно исключить внешний контур регулирования скорости электропривода.

На схеме, приведенной на рис. 2, приняты следующие обозначения: РС – регулятор скорости (частоты вращения ТЭД); ФЗМ – формирователь задания момента; РМ – регулятор момента; РП – регулятор потокосцепления статора (или ротора); ПЧ – преобразователь частоты; НУ – наблюдающее устройство;  $\hat{M}, \omega, \hat{\Psi}$  – текущие значения электромагнитного момента, угловой частоты вращения ротора и потокосцепления ТЭД,  $M^*, \omega^*, \Psi^*$  – их задающие значения;  $U_d, I_d$  – выходные напряжение, ток ИЭП;  $\Omega_{\max}$  – векторы допустимых значений напряжений, токов, потокосцеплений в системе;  $\mathbf{u}_s, \mathbf{i}_s$  – векторы текущих значений напряжения и тока статора ТЭД;  $\mathbf{U}_s^*$  – вектор задающих значений напряжения для ПЧ;  $\hat{\Theta}$  – оцениваемые параметры ТЭП;  $M_c$  – приведенный к ротору ТЭД момент сопротивления движению ТЭП. Здесь и далее величины, обозначенные жирным шрифтом – векторы или матрицы; верхним индексом «^» – оцениваемые по модели ТЭД наблюдающими устройствами; «звездочкой» – задающие значения для СУ; нижними индексами «max», «min» – максимальные и минимальные значения соответствующих величин.

Блок «Оптимизатор» предназначен для формирования заданных значений потокосцеплений  $\Psi^*$  исходя из статических зависимостей ТЭП по желаемым критериям оптимальности, на основании текущей частоты  $\omega$  и задания момента  $M^*$ , с учетом совокупности ограничений на ресурсы силовых агрегатов в системе  $\Omega_{\max}$ .

#### *Система прямого управления моментом ТЭД переменного тока*

Регулирующие качества современных ТЭП переменного тока не уступают ТЭП постоянного тока, благодаря применению передовых методов частотного управления электрическими машинами переменного тока, один из которых, метод прямого управления моментом (ПУМ) [1] получил широкое распространение в последнее десятилетие. По

сравнению с классическими векторными системами управления ЭП системы ПУМ обладают достоинствами [2]:

- простотой реализации из-за отсутствия операции преобразования координат из неподвижной системы во вращающуюся (и обратно), отсутствия широтно-импульсного модулятора (ШИМ) напряжения и регуляторов проекций вектора тока статора;
- высокой динамикой контуров регулирования потокосцепления статора (ПСС) и момента благодаря применению гистерезисных регуляторов и таблицы оптимальных переключений силовых ключей преобразователей частоты (ПЧ).

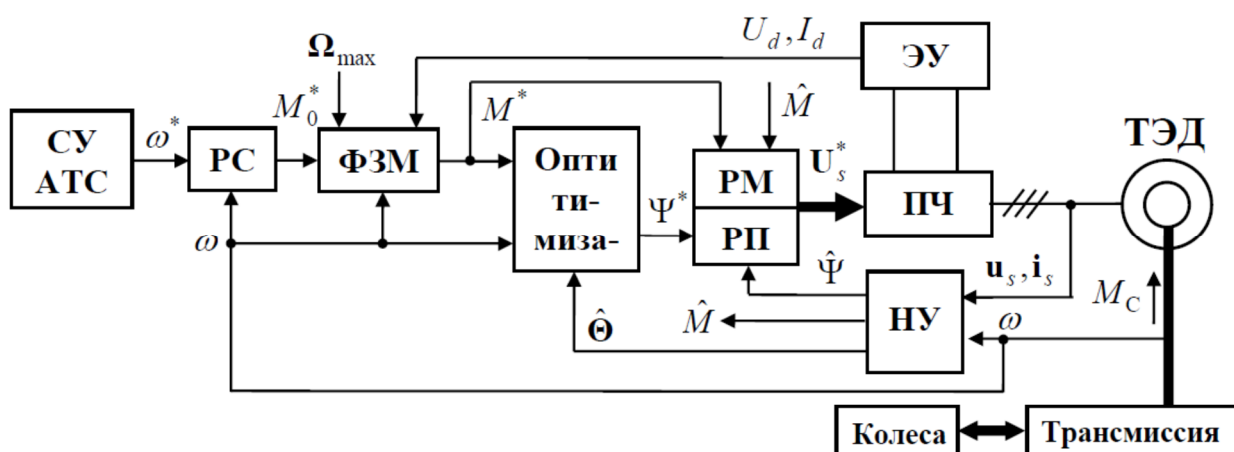


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема системы управления ТЭП на базе АД и СДПМ

Однако применение релейных регуляторов порождает основной недостаток систем ПУМ: частота переключения силовых ключей, зависящая от ширины петель гистерезиса регуляторов, не постоянна, что приводит к возрастанию коммутационных потерь в ПЧ, повышенной пульсации момента АД по сравнению с методом векторного управления. Этот недостаток можно устранить путем отказа от релейных регуляторов при применении ШИМ выходного напряжения ПЧ, вместо таблицы оптимальных переключений [3-8]. В дальнейшем будем называть системы управления АД, построенные по данному принципу, системами «прямого управления моментом с ШИМ» (ПУМ-ШИМ).

В работе на основании анализа существующих систем ПУМ-ШИМ предложена система управления моментом АД, реализуемая в неподвижной системе координат, с линейными регуляторами момента и потокосцепления статора (ПСС), что позволяет упростить структуру системы управления электропривода, обеспечивая его высокое динамическое качество, присущее системам ПУМ.

Основой для синтеза системы ПУМ-ШИМ является математическая модель АД в ортогональной неподвижной системе координат  $(\alpha, \beta)$ , связанной со статором, выведенная из математической модели обобщенной электрической машины [9]:

$$\begin{cases} p\Psi_{s\alpha} = -R_s i_{s\alpha} + u_{s\alpha}; \\ p\Psi_{s\beta} = -R_s i_{s\beta} + u_{s\beta}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} pi_{s\alpha} = -\frac{i_{s\alpha}}{T_0} - \omega_r i_{s\beta} + \frac{\Psi_{s\alpha}}{L_\sigma T_r} + \frac{\omega_r \Psi_{s\beta}}{L_\sigma} + \frac{u_{s\alpha}}{L_\sigma}; \\ pi_{s\beta} = \omega_r i_{s\alpha} - \frac{i_{s\beta}}{T_0} - \frac{\omega_r \Psi_{s\alpha}}{L_\sigma} + \frac{\Psi_{s\beta}}{L_\sigma T_r} + \frac{u_{s\beta}}{L_\sigma}; \end{cases} \quad (4)$$

$$M = 1,5z_p (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}). \quad (5)$$

где  $R, L$  – активное сопротивление и индуктивность; индексы "s, r, m" соответствуют величинам статора, ротора и контура намагничивания;  $\omega_r$  – электрическая угловая частота вращения ротора;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $M$  – электромагнитный момент;  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$  – коэффициент рассеяния магнитного поля АД;  $L_\sigma = \sigma L_s T_r = L_r / R_r \tau_s = \sigma T_r$ ;  $\tau_s = L_\sigma / R_s$  – постоянные времени роторной и статорной цепей;  $T_0 = (1/\tau_s + 1/\tau_r)^{-1}$ .

Продифференцировав (5), можем получить уравнение, описывающее динамику изменения момента от управляющего напряжения:

$$pM = -M/T_0 + k_M U + k_M W_1, \quad (6)$$

где  $U, W_1$  – управляющее и возмущающие воздействия контура регулирования момента,

$$U = u_{s\beta} \Psi_{s\alpha} - u_{s\alpha} \Psi_{s\beta}; \quad (7)$$

$$W_1 = \omega_r L_\sigma (\Psi_{s\alpha} i_{s\alpha} + \Psi_{s\beta} i_{s\beta}) - \omega_r \Psi_s^2 - z_p Q / k_M, \quad Q = 1,5(u_{s\beta} i_{s\alpha} - u_{s\alpha} i_{s\beta}) \text{ – реактивная мощность;}$$

$$k_M = 1,5z_p / L_\sigma.$$

После умножения первого уравнения системы (3) на величину  $\Psi_{s\alpha}$ , второго уравнения на  $\Psi_{s\beta}$  и их сложения, получим:

$$(1/2)p\Psi_s^2 = V + W_2, \quad (8)$$

где  $V, W_2$  – управляющее и возмущающие воздействия контура ПСС,

$$V = u_{s\alpha} \Psi_{s\alpha} + u_{s\beta} \Psi_{s\beta}; \quad (9)$$

$$W_2 = -R_s (\Psi_{s\alpha} i_{s\alpha} + \Psi_{s\beta} i_{s\beta}).$$

Выведенные уравнения (6), (8) позволяют предлагать структурную схему контуров регулирования ПСС и момента, представленную на рис. 3. ПЧ характеризуется единичным



коэффициентом передачи по напряжению и чистым запаздыванием на время  $T_\mu$ , равное периоду модуляционного сигнала.

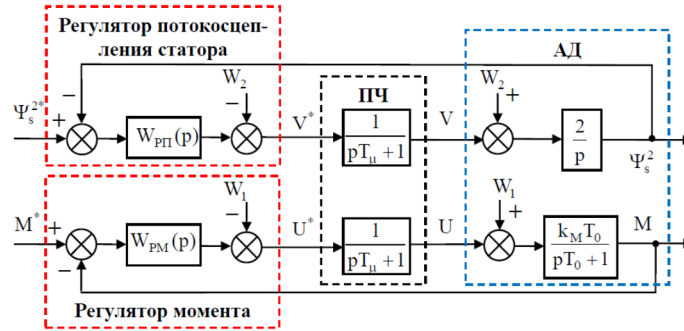


Рисунок 3 – Структурная схема замкнутых контуров регулирования потокосцепления статора и момента АД

Передаточные функции объекта (АД-ПЧ) по контурам ПСС и момента имеют вид:

$$W_\Psi(p) = \frac{\Psi_s^2(p)}{V^*(p)} = \frac{2}{p(T_\mu p + 1)}; W_M(p) = \frac{M(p)}{U^*(p)} = \frac{k_M T_0}{(T_0 p + 1)(T_\mu p + 1)}.$$

На рис. 4 представлена функциональная схема асинхронного привода с ПУМ-ШИМ в неподвижной системе координат, связанной со статором. На выходе регуляторов момента и ПСС формируются управляющие сигналы  $U^*$ ,  $V^*$ , которые позволяют определить задающие напряжения  $u_{s\alpha}^*$ ,  $u_{s\beta}^*$  для синтеза алгоритма ШИМ при решении (7) и (9):

$$u_{s\alpha}^* = \frac{V^* \hat{\Psi}_{s\alpha} - U^* \hat{\Psi}_{s\beta}}{\hat{\Psi}_s^2}; u_{s\beta}^* = \frac{U^* \hat{\Psi}_{s\alpha} + V^* \hat{\Psi}_{s\beta}}{\hat{\Psi}_s^2}. \quad (10)$$

Текущие значения момента, ПСС рассчитываются через токи и напряжения статора, причем последние определяются через напряжение звена постоянного тока  $U_d$  и алгоритм функционирования ШИМ. Базовым уравнениями для оценки указанных величин являются (3), (5).

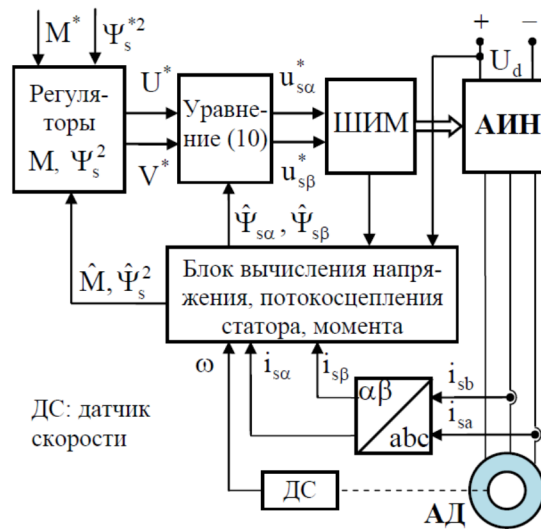


Рисунок 4 – Функциональная схема асинхронного электропривода с прямым управлением моментом

В блоке преобразования координат  $(abc-\alpha\beta)$  вычисляются составляющие  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  вектора тока статора на основании измеренных фазных токов  $i_{sa}, i_{sb}$ :

$$i_{s\alpha} = i_{sa}; i_{s\beta} = (i_{sa} + 2i_{sb})/\sqrt{3}.$$

Необходимо отметить, что в предложенной системе управления АД использованы только элементарные вычислительные операции (сложение, вычитание, умножение, деление). Это позволяет применить дешевые микропроцессы в системе управления ЭП.

Для сравнения характеристик и энергетических показателей электропривода при разработанном способе ПУМ-ШИМ и классическом способе ПУМ с гистерезисными регуляторами момента и ПСС проведено имитационное моделирование движения электропривода на базе АД марки 5AMX132S4 при питании от аккумулятора напряжением 520 В (рис. 5 и 6).

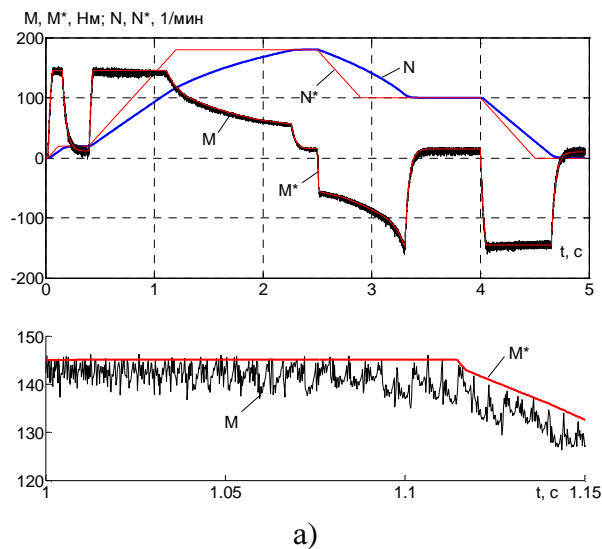
На рис. 5 и 6 представлены временные диаграммы развиваемого АД момента ( $M$ ), его задания ( $M^*$ ), скорости ( $N$ ), модуля вектора ПСС ( $\Psi_s, \Psi_s^*$ ), фазного тока ( $I_{sa}$ ), тока аккумуляторной батареи.

Как видно из полученных результатов моделирования, несмотря на простоту исполнения, предложенная система ПУМ АД гарантирует устойчивость системы управления, высокую динамику электропривода, высокую точность слежения за заданием момента при его малых пульсациях. С целью сравнения энергетических показателей ТЭП при различных способах управления введем показатель удельного расхода энергии источника питания  $w_a$  (в нашем случае – ТАБ) за цикл движения электропривода:

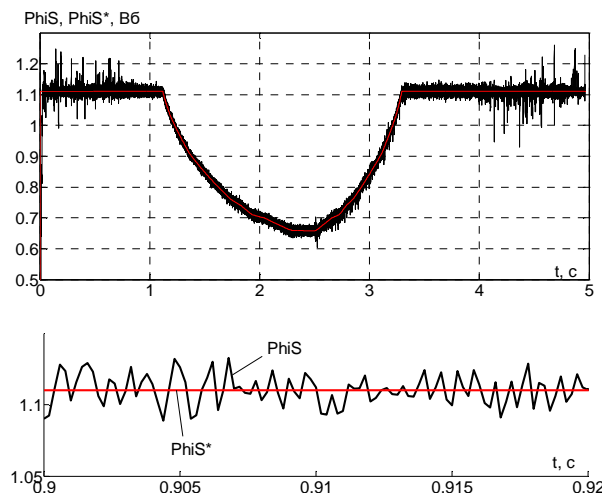
$$w_a = \frac{E_a}{\varphi},$$

где  $\varphi = \int_0^{T_{\Pi}} \omega dt$  – суммарный механический угол поворота ротора двигателя, эквивалентный пути, преодолеваемому тяговым электроприводом, при совершении транспортной работы по ездовому циклу;  $E_a = \int_0^{T_{\Pi}} P_a dt$  – энергия, расходуемая ТАБ за общее время движения ТЭП по ездовому циклу  $T_{\Pi}$ , включающее все фазы разгона, установившегося движения и торможения.

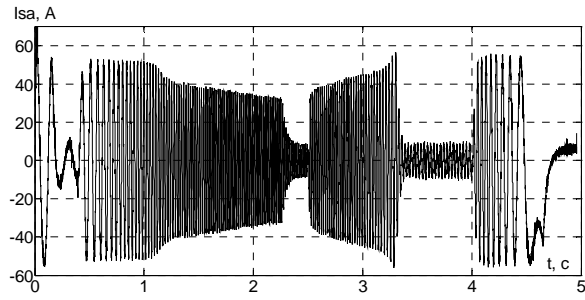
Результаты моделирования основных энергетических показателей представлены в таблице 1.



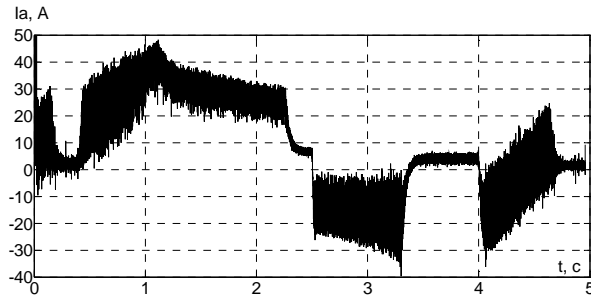
а)



б)

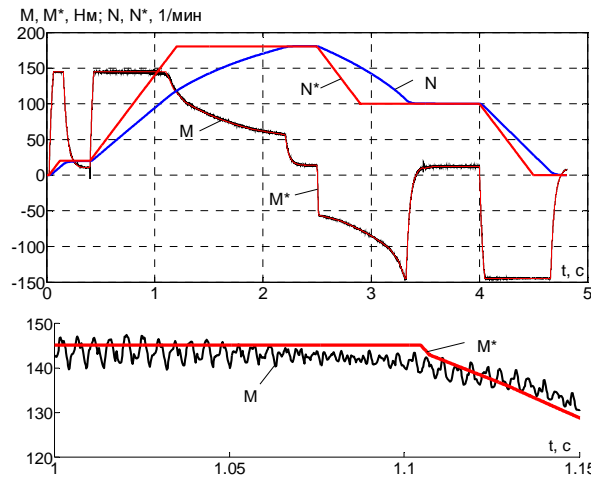


В)

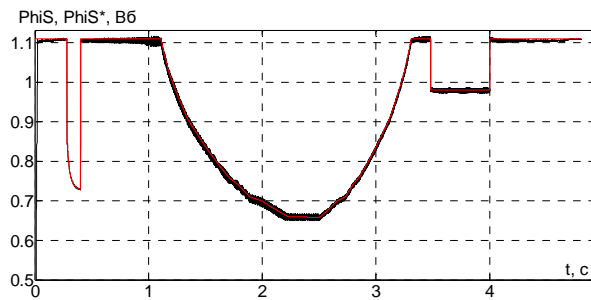


Г)

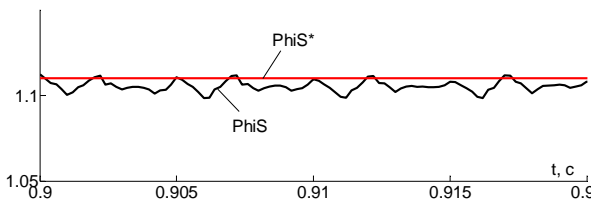
Рис. 5. Характеристики АД при классическом ПУМ

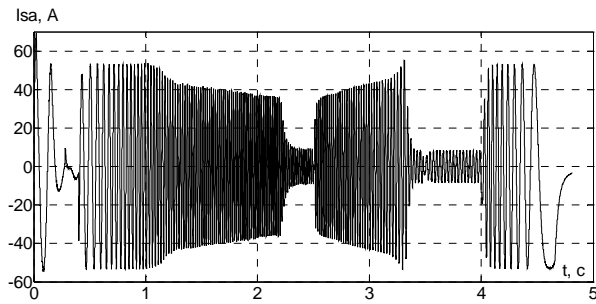


а)

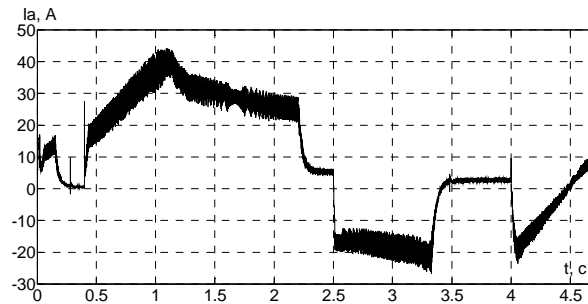


б)





в)



г)

Рис. 6. Характеристики АД при ПУМ-ШИМ

Таблица 1

Основные энергетические показатели ТЭП при различных способах управления

Способы управления	Показатели				
	$E_1$	$E_a$	$\varphi$	$E_1 / \varphi$	$E_a / \varphi$
	Дж.		рад	Дж./рад	
ПУМ с гистерезисными регуляторами	21021	22191	516,2	40,72	42,99
ПУМ-ШИМ	19285	20359	516,2	37,36	39,44

Анализ данных, полученных в таблице 1, показывает энергетическое превосходство предложенной системы ПУМ-ШИМ по сравнению с классической системой ПУМ.

### Выводы

На основании анализа существующих технических реализаций систем ПУМ-ШИМ предложена новая система управления АД с линейными регуляторами ПСС и электромагнитного момента.

Построение регуляторов предложенной системы ПУМ-ШИМ основано на дифференциальных уравнениях первого порядка, описывающих аналитические связи между динамикой изменения момента, ПСС и управляющим напряжением. Это позволяет при проектировании ЭП использовать стандартные методы настройки регуляторов (по техническому оптимуму, симметричному оптимуму), что дает возможность сократить время синтеза, отладки системы управления ЭП.

Предложенная система ПУМ АД отличается простотой исполнения при обеспечении высоких качеств тягового ЭП (высокого быстродействия, малых пульсаций момента), что важно для применения в автомобильном транспорте.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.*

### Список литературы

1. Браславский, И.Я., Адаптивная система прямого управления моментов асинхронного двигателя / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, Е.И. Барац // Электротехника. - 2001. - № 11. - С. 35-39.
2. Сидоров, К.М. Индивидуальный электропривод ведущих колес транспортного средства. Результаты разработки и стендовых испытаний / К.М.Сидоров, В.Е.Ютт, Т.В.Голубчик // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2013. № 1. С. 13а-20.
3. Сидоров, К.М. Комбинированные энергетические установки в системе автономного электроснабжения / К.М.Сидоров, В.Е.Ютт, Т.В.Голубчик // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2013. № 4. С. 37а-44.
4. Сурин, Е.И. Энергетическая эффективность электромобилей и гибридных автомобилей / Е.И.Сурин, Т.В.Голубчик // Электроника и электрооборудование транспорта. 2006. № 6. С. 3-5.
5. Stojic, D. S. Vukosavic. A new induction motor drive based on the flux vector acceleration method / D. Stojic, S. Vukosavic. // IEEE Trans. Energyconversion. 2005. - Vol. 20, No.1. - P. 173-180.
6. Kumsuwan, Y. A new approach to direct torque control for induction motor drive using amplitude and angle of the stator flux vector / Y. Kumsuwan, S. Premrudeepreechacharn, H.A. Toliyat. // Journal of electrical engineering & technology. 2008. - Vol. 3, No.1. - P. 79-87.
7. Miranda, H. Predictive torque control of induction machines based on state space models / H. Miranda, P. Cortes, J.I. Yuz, J. Rodriguez. // IEEE Trans. Ind. Electronics. 2009. - Vol. 56, No. 6. - P. 1916-1924.
8. Takahashi, I. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor / I. Takahashi, T. Noguchi // IEEE Trans. Ind. Applications. 1986. - Vol. 22, No. 5. - P. 820-827.

9. Lee, K. B. Sensorless DTC-SVM for induction motor driven by a matrix converter using a parameter estimation strategy / K.B. Lee, F. Blaabjerg. // IEEE Trans. Ind. Electronics. 2008. - No. 2. - P. 512-521.

**Рецензенты:**

Сидоров Б.Н., д.т.н., профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование», ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г.Москва.

Марсов В.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВПО ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г.Москва.