

Д.В. Вершинин;  
В.А. Войтенко, Е.А. Смотров, кандидаты техн. наук,  
А.Н. Николенко, Н.А. Процорова

## ЭЛЕКТРОПРИВОД МОТОР-КОЛЕСА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*Розглянуто електропривод змінного струму електротранспортного засобу з мікропроцесорним керуванням. Наведено функціональну схему електроприводу, фрагменти схем керуючого і перетворюючого пристроїв, а також експериментальні механічні характеристики. Стисло описано конструкцію мотор-колеса і блоку управління.*

*Рассмотрен электропривод переменного тока электротранспортного средства с микропроцессорным управлением. Приведена функциональная схема электропривода, фрагменты схем управляющего и преобразовательного устройств, а также экспериментальные механические характеристики.*

*The electrodrive of alternating current for electromobile is considered. The functional diagram of electrodrive, fragments of charts of managing and educational devices, and also experimental mechanical descriptions of electrodrive, is resulted.*

В настоящее время в связи с истощением природных энергетических ресурсов и глобальным загрязнением окружающей среды все более актуальной становится проблема создания экологически безопасного электро-транспорта, экономичность которого обусловлена наличием режима рекуперации энергии торможения и последующим использованием её.

В частности, целесообразно создание лёгких электротранспортных средств (ЛЭТС) на базе электрических мотор – колёс (МК). Применение МК позволит отказаться от коробки скоростей и главной механической передачи автомобиля, что значительно упростит кинематику ЛЭТС и повысит его экономичность.

Конструкция МК, разработанного специалистами ЗАО НПП «Инкар» [2], показана на рис.1. На неподвижном относительно корпуса электромобиля статоре находится трехфазная обмотка. Диск колеса соединён с ротором, на котором в качестве полюсов установлены постоянные магниты. Внутри ротора установлен механический тормоз. Таким образом, МК представляет собой трехфазный синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

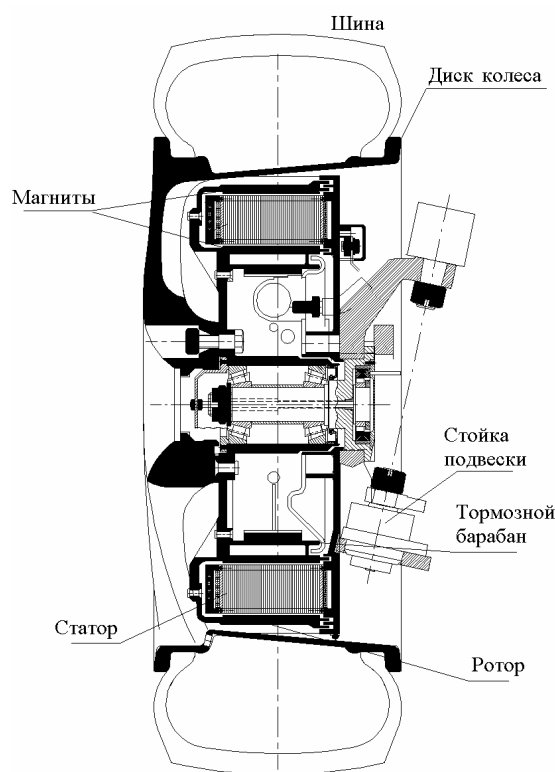


Рис.1. Мотор-колесо в разрезе

В ходе научно-исследовательской работы по созданию ЛЭТС был разработан блок управления мотор – колеса ПМК-2,5 номинальной мощностью 2,5 кВт (рис.2). Функциональная схема двухконтурной системы регулирования скорости МК реализуется программно, на базе специализированного сигнального процессора TMS320LF2406.

© Вершинин Д.В., Войтенко В.А.,  
Николенко А.Н., Процорова Н.А.,  
Смотров Е.А., 2009

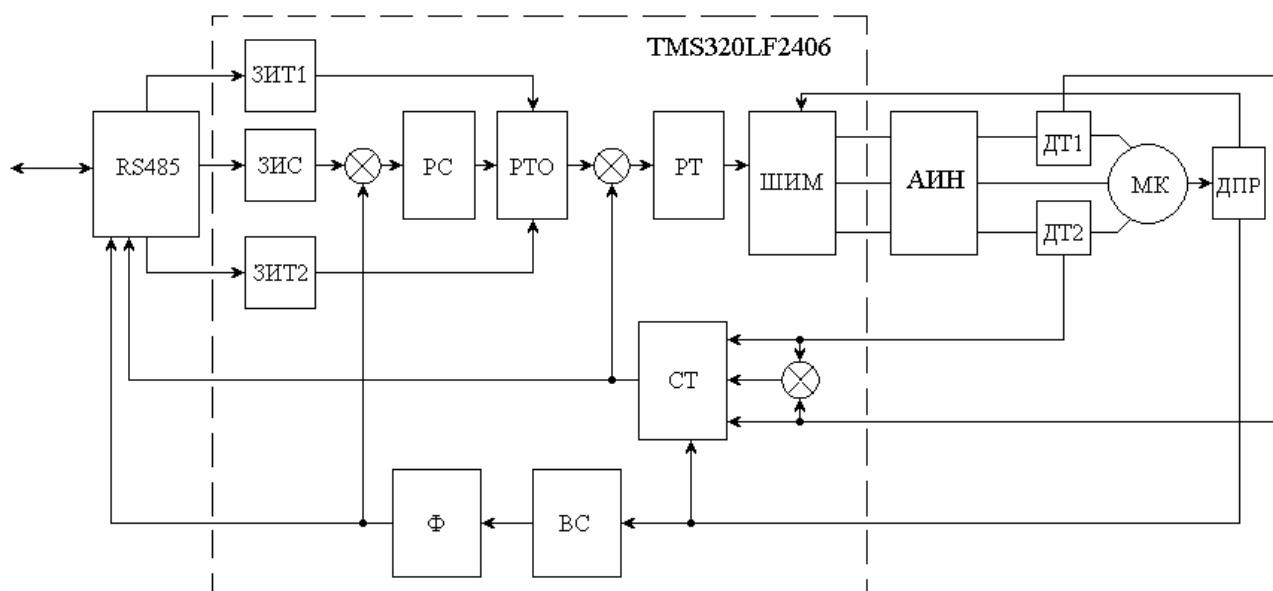


Рис. 2. Функциональная схема блока управления мотор – колеса типа ПМК-2,5

Через интерфейс RS485 от внешних устройств управления в ПМК-2,5 поступает сигнал разрешения работы, сигнал задания скорости и сигналы задания регулируемого уровня ограничения тока разгона и торможения. Сигналы обратной связи по скорости и току, а также информация о состоянии устройств защиты и диагностики через интерфейс RS485 поступают из ПМК-2,5 в систему индикации и в систему управления верхнего уровня.

Сигналы задания скорости и ограничения тока передаются на задатчики интенсивности изменения скорости (ЗИС) и тока при разгоне и торможении (ЗИТ1, ЗИТ2).

Раздельное управление уровнями ограничения тока при разгоне и торможении позволяет организовать управляемое электрическое торможение ЛЭТС с рекуперацией энергии в бортовой источник питания (БИП) [1]. Сигнал задания скорости, формируемый ЗИС, сравнивается с сигналом оценки фактической скорости, и их разность поступает на вход регулятора скорости РС.

С выхода регулятора скорости сигнал задания тока поступает на блок регулируемого ограничителя тока (РТО), который, в соответствии с поступившими на него сигналами из ЗИТ1 и ЗИТ2, ограничивает значение сигнала на выходе РС «сверху» и «снизу».

Далее сигнал задания тока поступает на сумматор, где из него вычитается сигнал об-

ратной связи по току. Затем сигнал ошибки регулирования тока поступает на вход регулятора тока (РТ). С выхода РТ сигнал поступает на вход широтно-импульсного преобразователя (ШИМ), который в соответствии с сигналами, поступающими от датчика положения ротора (ДПР), формирует широтно-модулированные сигналы управления транзисторными ключами автономного инвертора напряжения (АИН), который осуществляет коммутацию фаз обмотки статора синхронного двигателя.

Оценка значения тока в двух фазах обмотки статора осуществляется с помощью двух датчиков тока ДТ1 и ДТ2, а значение тока в третьей фазе определяется с помощью суммирующего устройства в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

Выходные сигналы датчиков тока поступают на селектор тока (СТ), который в соответствии с сигналами, поступающими от ДПР, определяет знак момента синхронного двигателя и формирует сигнал обратной связи по току (ОСТ). Затем сигнал ОСТ поступает на вход сумматора, включённого на входе регулятора тока, замыкая отрицательную обратную связь по току. Также сигнал о токе поступает через блок RS485 в систему управления верхнего уровня. Сигнал с выхода ДПР поступает на вход вычислителя скорости ВС, который рассчитывает значение сигнала обратной связи по скорости (ОСС).

Ввиду особенностей конструкции МК-2,5 и ДПР сигнал ОСС имеет высокий уровень помех, поэтому он проходит через адаптивный фильтр (Ф). Сигнал с выхода Ф поступает на вход сумматора, включённого на входе РС, и замыкает отрицательную обратную связь по скорости. Кроме того, сигнал ОСС поступает через блок RS485 в систему управления верхнего уровня.

Управляющая часть ПМК-2,5 реализована на базе специализированного сигнального процессора TMS320LF2406. Она обведена на рис.2 штриховой линией. Фрагмент схемы передачи сигнала управления с выхода процессора на вход АИН (фаза А) показан на рис. 3. Импульсы управления поступают от управляющего устройства к преобразовательному устройству через драйвер – специализированную микросхему IR2113 (U18, U22, U30). Связь между управляющим и преобразовательными устройствами осуществляется посредством разъёмных соединений (J7, J10, J11). Электрически-изолированный интерфейс с сигнальным процессором реализован на оптотранзисторах PC817 (U5 – U13).

Преобразовательное устройство блока управления ПМК-2,5 представляет собой трехфазный АИН, собранный на полевых транзисторах IRFP4668 (VT1 – VT18).

На рис. 4 показана схема, формирующая напряжение на фазе А обмотки статора синхронного двигателя. На входе преобразова-

тельного устройства включены импульсные усилители, выполненные на интегральных комплементарных полевых транзисторах IRF7309. Размещение импульсных усилителей вблизи затворных цепей транзисторов силовых ключей, обеспечивает минимизацию пути протекания тока к затвору полевых транзисторов и, следовательно, уменьшает паразитную ёмкость цепи затвора. Это позволяет достигнуть высокой скорости переключения ключей силового каскада и вследствие этого уменьшить потери переключения в полевых транзисторах.

Для ограничения коммутационных скачков напряжения при закрывании силовых транзисторных ключей используются пассивные фильтры, реализованные на резисторах (R14, R15), конденсаторах (C7, C17) и диодах (VD1, VD9). Для защиты силового ключа от перенапряжения используются защитные стабилитроны VD2, VD8, типа 1,5KE180CA (рис. 4).

Отключение преобразовательного устройства от бортового источника питания (БИП) при срабатывании одного из аварийных устройств защиты обеспечивает реле типа RP3SL024.

Для получения информации о значении тока в фазах МК используются датчики тока ДТ1 и ДТ2 типа HAS50P/SP1, реализованные на эффекте Холла.

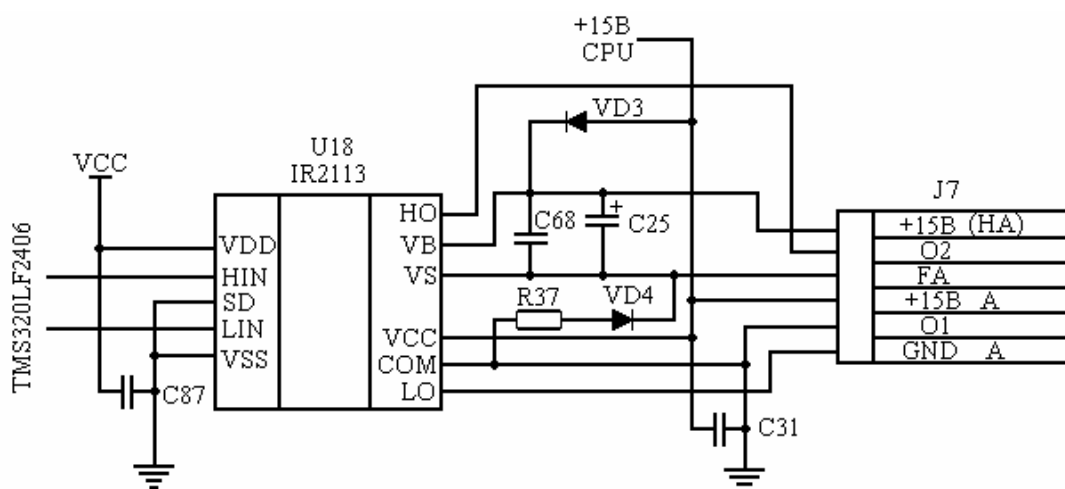


Рис. 3. Фрагмент схемы подключения драйвера IR2113 (фаза А)

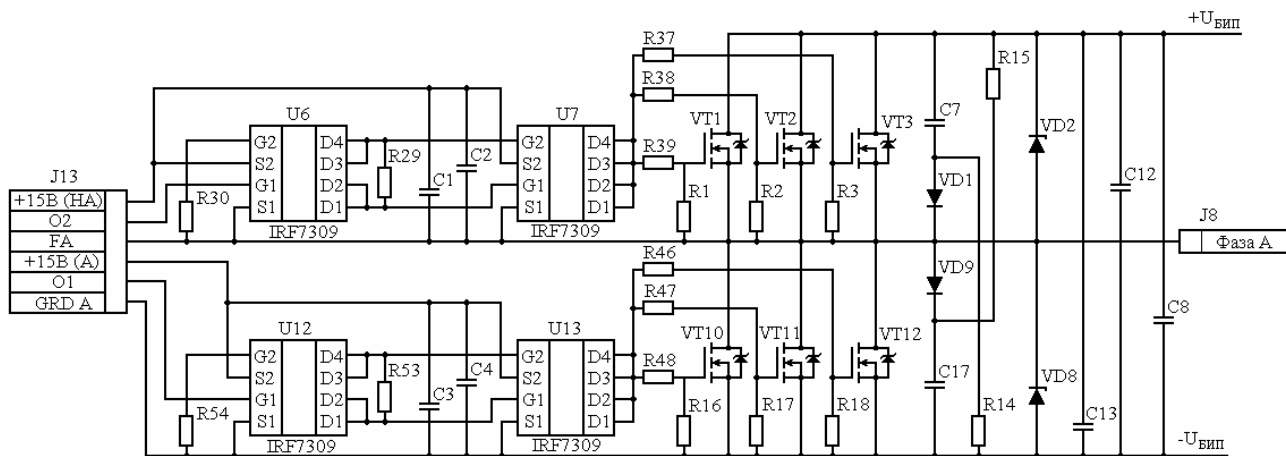


Рис. 4. Фрагмент схемы АИН (фаза А)

Информацию об угле поворота ротора относительно статора синхронного двигателя и о скорости вращения МК в электроприводе позволяют получить девять дискретных датчиков магнитного поля, которые установлены в рабочем зазоре на статоре и работают на эффекте Холла. На статоре МК также расположена трехфазная обмотка на восемь пар полюсов. Схема обработки сигналов, поступающих от датчиков положения, формирует 144 передних и задних фронта импульсов за один оборот МК. По длительности интервалов времени между передними и задними фронтами импульсов производится оценка значения скорости вращения МК. Из установленных девяти дискретных датчиков магнитного поля три датчика используются также и в качестве ДПР. Питание датчиков магнитного поля осуществляется от электрически изолированного источника напряжения 9 В, входящего в состав ПМК-2,5, что повышает помехоустойчивость ДПР.

Источник питания схемы управления выполнен по обратноходовой топологии с использованием импульсного трансформатора. Максимум его КПД равен 80 % при номинальном напряжении БИП (120 В). На выходе импульсного трансформатора формируются импульсные сигналы частотой 20 кГц и напряжением 24 В (питание реле), 9 В (питание схемы управления) и 12 В (питание датчиков магнитного поля). Значения напряжений на выходе импульсного трансформатора стабилизируются замкнутой системой регулирования напряжения, которая реализована на ШИМ-контроллере UC3842 с

использованием обмотки обратной связи импульсного трансформатора.

С вторичных обмоток импульсного трансформатора напряжения поступают на выпрямители и далее на стабилизаторы напряжения (микросхемы LM7815, LM7809, LM7805 и LM317). Выходные напряжения стабилизаторов используются для питания магнитных датчиков (+9 В), логических микросхем ПМК-2,5 (+5 В), цепей процессора (+3,3 В), а также драйверов и затворных цепей силовых транзисторных ключей (+15 В). При снижении напряжения БИП до 70 В ШИМ-контроллер (UC3842) источника питания схемы управления отключается, что исключает работу управляющего и преобразовательного устройств на пониженном напряжении.

Для обмена информацией с системой индикации и с устройством задания основных параметров движения (направления, скорости, ограничения тока) в ПМК-2,5 используется интерфейс RS485. В качестве драйвера интерфейса применена интегральная микросхема MAX1480A, которая кроме согласования уровней напряжений сигналов, обеспечивает электрическую изоляцию цепей процессора и интерфейса.

На рис. 5 показаны экспериментальные механические характеристики, соответствующие работе ПМК-2,5 в режиме ограничения тока при значениях сигнала задания тока 10 А (график 1), 25 А (график 2) и 50 А (график 3) при заданной частоте вращения МК  $n_3=125$  об/мин. Экспериментальные исследования показали, что ПМК-2,5 позволяет

осуществить плавное регулирование тока от нуля до 80 А. При этом момент, развиваемый МК, также плавно регулируется от нуля до 160 Н·м. Это важно для точного распределения движущего момента между мотор – колёсами при их движении по грунту с разным коэффициентом трения и на поворотах.

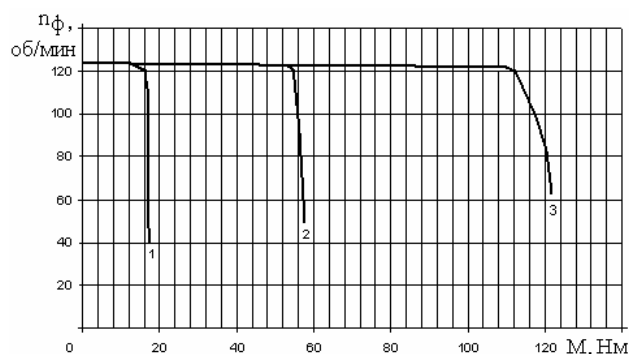


Рис. 5. Экспериментальные механические характеристики, соответствующие работе ПМК-2,5 в режиме ограничения тока

Экспериментальные механические характеристики, соответствующие работе ПМК-2,5 в режиме регулирования скорости при значениях сигнала задания скорости 30 об/мин (график 4), 75 об/мин (график 3), 150 об/мин (график 2) и 300 об/мин (график 1) приведены на рис. 6. Эксперимент показал, что ПМК-2,5 обеспечивает плавное регулирование скорости в диапазоне 30:1. Это важно для плавного движения ЛЭТС на малой скорости.

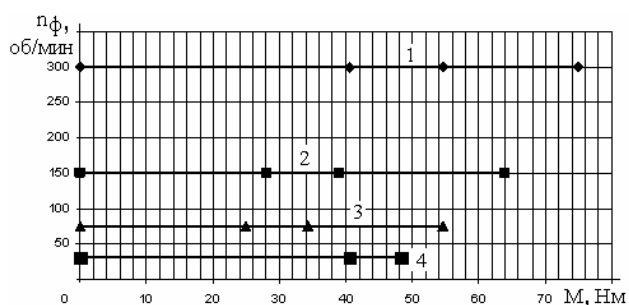


Рис. 6. Экспериментальные механические характеристики, соответствующие работе ПМК-2,5 в режиме регулирования скорости

На рис. 7 приведен экспериментальный график зависимости фактического значения частоты вращения МК ( $n_\phi$ ) от заданного значения ( $n_3$ ) для замкнутой системы регулирования скорости. На основании этого графика

можно судить о линейности разработанной системы регулирования скорости. Кроме того, были проведены тепловые исследования ПМК-2,5, показавшие, что при выходной мощности 2,8 кВт температура транзисторных ключей внутри блока не превышает 70 °С (при допустимой температуре 100 °С). При этом значение КПД электропривода достигало 70 %.

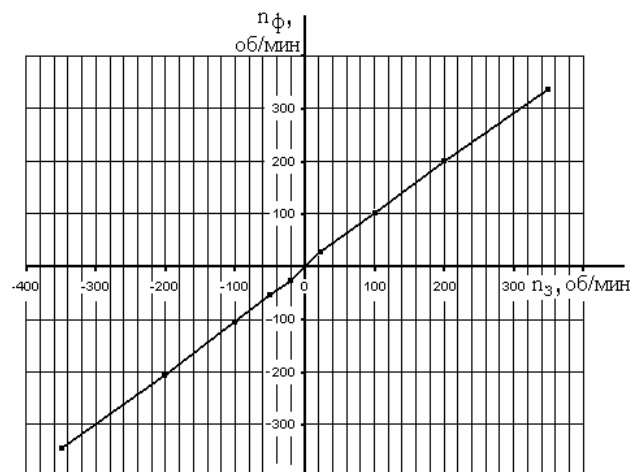


Рис. 7. Экспериментальная характеристика «вход-выход» замкнутой системы регулирования скорости

Конструктивно блок управления ПМК-2,5 разделен на две части: блок преобразовательного устройства (силовой блок) и блок управляющего устройства (отсек управления). В силовом блоке расположены силовые транзисторы, конденсаторы входного фильтра силового источника питания и датчики тока. Силовой блок отделён от отсека управления металлическим экраном, который предназначен для ослабления влияния на управляющее устройство помех, создаваемых преобразовательным устройством. Все металлические части ПМК-2,5 электрически соединены с корпусом ЛЭТС, а при стендовых испытаниях – с корпусом испытательного стенда с соблюдением правил техники безопасности. Электрические цепи преобразовательного и управляющего устройств ПМК-2,5 электрически изолированы от корпуса.

Блок ПМК-2,5 предполагает вертикальную установку (по ребрам радиатора) и крепление на поверхность, обеспечивающую отвод тепла, с использованием теплопровод-

ной пасты. Подключение к ПМК-2,5 силовых цепей МК, датчиков и устройств управления производится сверху.

#### **Выводы**

Разработан микропроцессорный блок управления синхронным двигателем, входящим в состав МК, который обеспечивает плавное регулирование скорости и момента во всех четырёх квадрантах.

Управление мотор-колесами ЛЭТС осуществляется через последовательный интерфейс RS485.

Благодаря возможности осуществления независимого управления каждым из колёс значительно упрощается реализация сложных алгоритмов, используемых для оптимизации работы антиблокировочных и антипробуксовочных систем, а также выполнение функции механического дифференциала.

#### **Список использованной литературы**

1. Вершинин Д.В. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства / Вершинин Д.В., Водичев В.А., Войтенко В.А., Смотров Е.А // Электромашиностроение та электрооборудование. – К.: Техника. – 2008. – Вып. 71. – С. 5 – 11.

2. <http://inkar.mccinet.ru>

ЗАО НПП «Инкар». Мотор-колёса для электромобилей.

Получено 05.10.2009



Вершинин Дмитрий  
Вениаминович,  
инженер-исследователь  
ОСКБ специальных станков.  
тел. 048-728-8505



Войтенко Владимир  
Андреевич,  
канд.техн.наук, доцент каф.  
ЕМС КУ Одеск. нац.  
политехн. ун-ту  
тел. 048-779-7497



Смотров Евгений  
Александрович,  
канд. техн. наук,  
заведующий сектором  
ОСКБ специальных станков.  
тел. 048-728-8505



Николенко Анатолий  
Николаевич,  
вед.инж. ГП.  
Научно-технический центр  
Станкосерт,  
тел. 048-725-9266



Процорова Наталья  
Александровна,  
вед.инж. ГП.  
Научно-технический центр  
Станкосерт,  
тел. 048-725-9266