

УДК 629.1-46

**А. А. РАДКЕВИЧ**

Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

## **МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РОБОТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОБУСА**

### **Аннотация**

Рассмотрен вопрос проектирования микропроцессорной системы управления тяговым электроприводом роботизированного электробуса на основе составления алгоритма программы управления по заранее запланированному маршруту движения в городском цикле. В качестве устройства программной реализации был выбран микропроцессорный модуль на основе микроконтроллера TMS320F28035. Составленный алгоритм позволяет осуществить как регулирование скорости электропривода в соответствии с выдержкой интервалов времени, так и реализовать векторное управление тяговым электроприводом, а также допускает возможность вмешательства водителя в процесс управления.

### **Ключевые слова:**

микропроцессор, микроконтроллер, асинхронный электродвигатель, тяговый электродвигатель, электробус, роботизированный электробус, среда разработки.

**Введение.** Несмотря на то, что электробус считается инновационным видом городского пассажирского транспорта, массовая эксплуатация которого началась относительно недавно, ведущие автопроизводители продолжают поиски способов усовершенствования конструкции и систем управления этим видом транспорта. Одним из перспективных направлений в данной отрасли является концепция роботизированного беспилотного электробуса, способного передвигаться по маршруту автономно, без участия водителя [1, с. 29]. Разработками в этой области занимались швейцарская компания Rinspeed и американская фирма Local Motors, которые представили опытные образцы автономных электробусов пассажироместимостью до 8 чел., способных автономно передвигаться по заданным маршрутам. Компания Tesla в 2022 г. анонсировала создание электробуса с функцией автономного управления Full-Self Drive, который находится в стадии тестирования. Однако на сегодняшний день массового серийно выпускаемого роботизированного беспилотного электробуса не представлено, в связи с чем данная тема представляет особую актуальность для исследования в области машиностроения.

Анализ режимов работы электробуса, как и других транспортных средств, показывает, что необходимой для регулирования выходной координатой является скорость его движения. Поскольку ведущая ось приводится в движение тяговым асинхронным электроприводом, то возникает потребность в изменении частоты вращения электродвигателя во всём диапазоне регулирования скорости электробуса. Кроме того, необходимо изменение тягового усилия электробуса для преодоления сопротивления силы трения и воздуха, а также подъёмов и иных внешних сил.

В связи с этим возникает потребность регулирования вращательного момента на валу тягового электропривода. Заданному моменту на механической характеристике электропривода будет соответствовать определенная скорость движения электробуса. В целях обеспечения плавности разгона и торможения

транспортного средства, обеспечения минимального и максимального ускорений и диапазона регулирования скорости целесообразно использовать замкнутую систему управления пуском и торможением с частотно регулируемым управлением. С учётом того, что управляемой координатой является крутящий момент, возникает необходимость использования векторного частотного управления, которое позволяет получить требуемые динамические свойства при регулировании скорости вверх от основной путём ослабления магнитного потока  $\Phi$ . Такая система предполагает двухзонное регулирование скорости электропривода. Для изменения вращательного момента необходимо регулировать ток статора  $i_1$  и потокосцепление ротора  $\Psi_2$  двигателя, напряжение  $U_1$  и частоту питающей сети  $f_1$  [2].

Исходя из этого, актуальной целью исследования является проектирование микропроцессорной системы управления тяговым электроприводом, которая должна обеспечивать как перемещение электробуса по заранее заданному маршруту на основании разработанного алгоритма движения, так и реализацию векторного управления асинхронным двигателем. Достижение поставленной цели возможно при решении следующих задач:

- определение заданного маршрута движения электробуса;
- составление алгоритма работы тягового электропривода с учётом выполнения маршрута движения и реализации векторного управления;
- выбор микропроцессорного устройства для выполнения алгоритма функционирования тягового электропривода и среды разработки программы управления.

**Определение цикла движения.** Зададимся параметрами планируемого маршрута, который представляет собой цикл из 10 участков движения электробуса между остановочными пунктами. Каждый участок представляет собой отрезок протяжённостью 500 м. Характер движения имеет следующий вид (рис. 1): разгон с начальной скорости до номинальной скорости  $\vartheta_{ном}$  за время  $t_1$ ; движение со скоростью выше номинальной до значения  $\vartheta_4$  с ослаблением магнитного поля за время  $t_1...t_2$ ; выбег до скорости выбега  $\vartheta_3$  за время  $t_2...t_3$ ; торможение после выбега до маневровой скорости  $\vartheta_2$  за время  $t_3...t_4$ ; дотягивание до скорости  $\vartheta_1$  за время  $t_4...t_5$ ; торможение до полной остановки, остановка в течение 15 с.

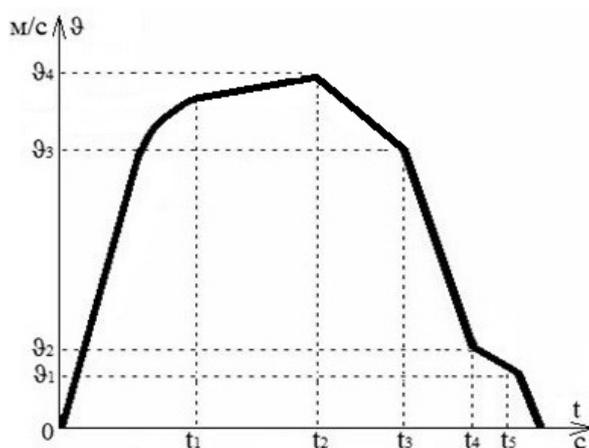


Рис. 1. Скоростная диаграмма движения электробуса по маршруту

**Составление алгоритма управления.** Для составления алгоритма управления тяговым электроприводом по заданному маршруту необходимо определить значения скоростей и интервалов времени на скоростной диаграмме. Согласно рекомендациям Международной ассоциации общественного транспорта режим работы электробуса в городских условиях соответствует лёгкому городскому циклу движения SORT 2 (Standardized On-Road Test Cycle), в соответствии с которым средняя скорость движения транспорта составляет 12 м/с. На основе анализа существующих конструкций электробусов допустим, что в качестве передаточного механизма, передающего вращательный момент от электропривода ведущим колёсам, используется дифференциал с радиусом приведения  $\rho = 0,049$  м/рад. Исходя из этого, составим таблицу определения параметров скоростной диаграммы движения электробуса по маршруту (табл. 1).

Табл. 1. Значения параметров скоростной диаграммы движения электробуса по заданному маршруту

Скорость движения электробуса	Угловая скорость вращения вала электропривода	Временной интервал отрезка цикла
$\vartheta_1 = 2,6$ м/с	$\omega_1 = 53$ рад/с	$0 - t_2 = 22$ с
$\vartheta_2 = 3$ м/с	$\omega_2 = 61$ рад/с	$t_2 - t_3 = 10$ с
$\vartheta_3 = 7,3$ м/с	$\omega_3 = 149$ рад/с	$t_3 - t_4 = t_4 - t_5 = 4$ с
$\vartheta_4 = 12,5$ м/с	$\omega_4 = 255$ рад/с	$t_5 - t_6 = 2$ с

Для расчета сигнала управления необходимо задаться значениями ускорения при разгоне и торможении, а также длительностью интервалов разгона, установившегося режима работы и торможения. Допустим, что электробус разгоняется и тормозит с постоянным ускорением  $a = 1,5$  м/с<sup>2</sup>.

Обеспечение выдержек времени в алгоритме будет реализовано через пустые вложенные циклы. Поскольку микроконтроллер работает с тактовой частотой 1 МГц, то если задать в цикле 50000 итераций, выдержка составит 0,2 с. Таким образом, для выдержки времени разгона  $0...t_2$  потребуется 110 циклов по 0,2 с, для выдержки времени выбега  $t_2...t_3$  необходимо 50 циклов, для выдержки времени торможения и дотягивания  $t_3...t_4$ ,  $t_4...t_5$  потребуется 20 циклов, для выдержки времени остановки необходимо 10 циклов.

В алгоритме, представленном на рис. 2, происходит ввод и объявление переменных и АЦП, инициализация устройств ввода и вывода через интерфейсы, ввод сигналов с датчиков для реализации векторного управления. Затем задаются циклы разгона, выдержек интервалов времени и торможения. Каждый из таких циклов включает запись переменной с присвоенным ей значением, её инкрементацию либо декрементацию и блок сравнения с заданным числом. В зависимости от исхода сравнения происходит либо возврат к началу цикла, либо переход к следующему циклу. По окончании циклов осуществляется вывод переменных через параллельный порт для формирования сигналов на автономный инвертор напряжения (АИН). После циклов разгона, торможения и выдержек времени происходит проверка нажатия на педали акселератора и тормоза водителем. В случае воздействия водителем на педаль хода начинается цикл разгона электропривода, а в случае нажатия на педаль тормоза – его торможение. При отсутствии влияния водителем на цикл алгоритм повторяется, начиная со

считывания сигналов датчиков. Когда прерывания от педалей не обрабатываются, ядро микроконтроллера отключено и микроконтроллер находится в режиме энергосбережения.

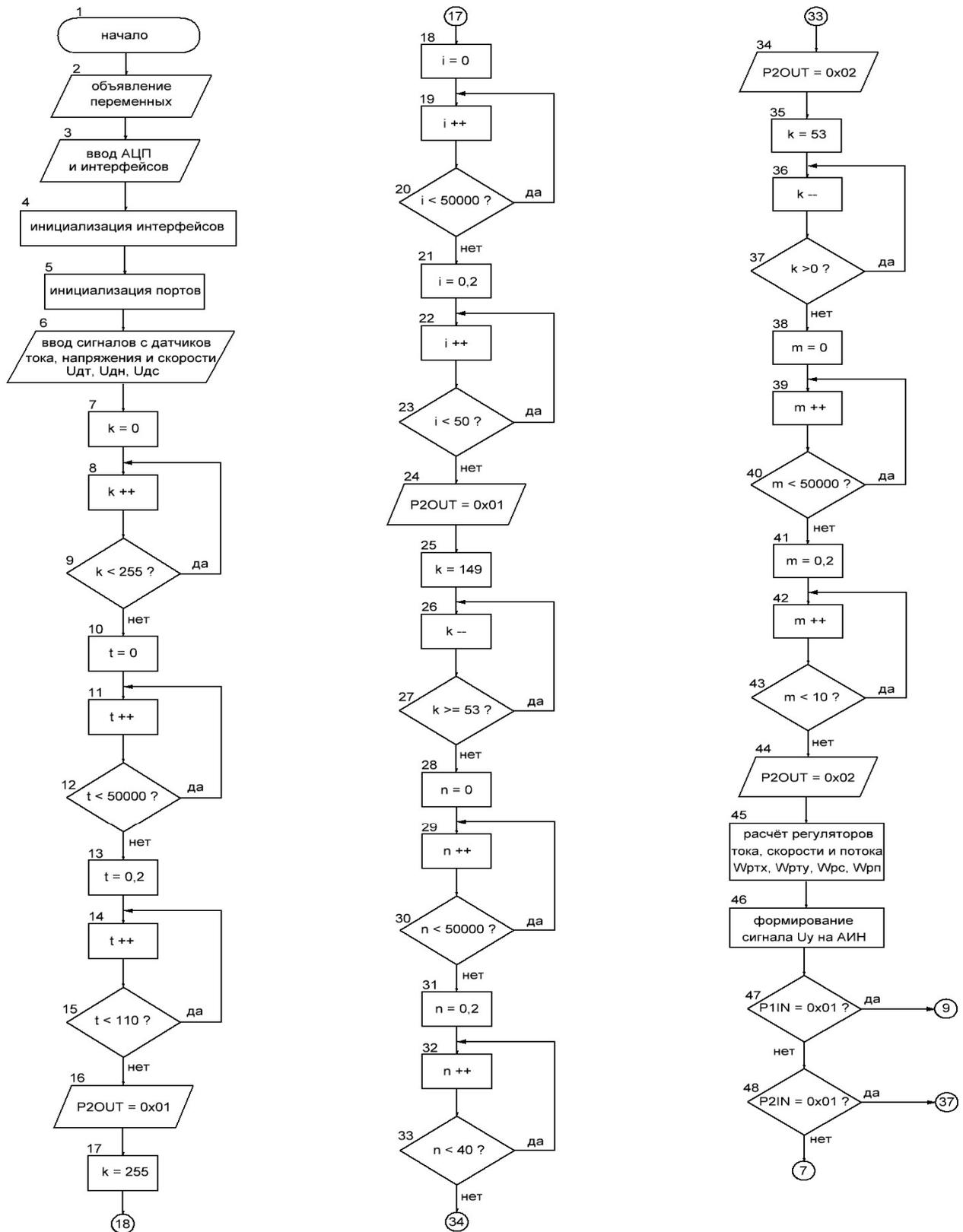


Рис. 2. Алгоритм микропроцессорного управления тяговым электроприводом роботизированного электробуса

**Выбор микроконтроллера и среды разработки.** Для аппаратной реализации составленного алгоритма микропроцессорного управления тяговым электроприводом транспортных средств в настоящее время широко используются цифровые сигнальные процессоры семейств LPC3180, C5000, TMS320, PIC32 и др. [3].

Поскольку силовая цепь тягового электропривода электробуса содержит автономный инвертор напряжения, необходимо согласовывать входные и выходные параметры микроконтроллера и платы драйверов транзисторных IGBT-модулей АИН. По этой причине для тяговых электроприводов транспортных средств существуют комплектные АИН с микропроцессорным управлением. Для выполнения задачи управления электроприводом роботизированного электробуса используют микропроцессорный модуль SDMC-103-03.01 на основе микроконтроллера TMS320F28035, который включает в себя силовой модуль транзисторных IGBT-модулей MF-250/05-02-01, модуль сглаживающих устройств MI3-01, платы драйверов транзисторных ключей 2ED60017-ST с передачей информации по интерфейсу CAN.

Микропроцессорный модуль выполняет сбор данных и управление низковольтными элементами управления, которые расположены в кабине водителя, такими как педали акселератора и тормоза, селектор направления движения, датчики тока, скорости и напряжения. Задачей микроконтроллера TMS320F28035 является формирование необходимых управляющих сигналов для силовых ключей инвертора. Микроконтроллер формирует команды управления частотным преобразователем в цифровом коде, передает команды управления двигателем по оптическому интерфейсу в соответствии с программой управления. Выходные сигналы с микроконтроллера передаются на плату драйверов, на выходе которой формируется сигнал требуемой скважности на транзисторные IGBT-модули.

Разработка программы управления микроконтроллером осуществляется в интегрированной среде разработки Code Composer Studio (CCS). Программа управления может быть выполнена как на низкоуровневом языке ассемблера, так и на высокоуровневом языке C в соответствии с алгоритмом управления. Среда CCS позволяет осуществить отладку и произвести компиляцию программы управления с записью и просмотром значений регистров.

**Заключение.** Таким образом, в результате решения задач микропроцессорного управления тяговым электроприводом роботизированного электробуса был составлен маршрут автономного движения транспортного средства в соответствии с циклами разгона и торможения определенной длительности. На основании заданного маршрута движения был составлен алгоритм управления тяговым электроприводом, учитывающий как выполнение заданных циклов регулирования скорости электропривода с определённой выдержкой времени с возможностью вмешательства водителя, так и осуществления векторного управления асинхронным электродвигателем. Для аппаратной реализации алгоритма управления был выбран микропроцессорный модуль SDMC-103-03.01 на основе микроконтроллера

лера TMS320F28035; для написания программы управления – среда разработки Code Composer Studio.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атаманов, Ю. Е.** Теория электрического и автономного транспорта. Общая характеристика: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт» / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.

2. **Нго, Ф.** Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля. Энергетика / Ф. Нго, Г. И. Гульков // Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – № 60 (1). – С. 41–53.

3. **Гульков, Г. И.** Микропроцессорное управление с синхронным двигателем с постоянными магнитами / Г. И. Гульков, Ф. Нго // Наука – образованию, производству, экономике: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 235.

Контакты:

artyomradkevichbntu@gmail.com (Радкевич Артём Андреевич).

***A. A. RADKEVICH***

#### **MICROPROCESSOR CONTROL OF ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC cDRIVE OF A ROBOTIC ELECTRIC BUS**

##### **Abstract**

The article discusses the issue of designing a microprocessor control system for the traction electric drive of a robotic electric bus based on drawing up a control program algorithm for a pre-planned route in the urban cycle. A microprocessor module based on the TMS320F28035 microcontroller was chosen as a software implementation device. The compiled algorithm allows both the regulation of the speed of the electric drive in accordance with the timing of time intervals and the implementation of vector control of the traction electric drive, and also allows for the possibility of driver intervention in the control process.

##### **Keywords:**

microprocessor, microcontroller, asynchronous electric motor, traction electric motor, electric bus, robotic electric bus, development environment.