

УДК 621.313.17

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО СИЛОВЫМ ПРОВОДНИКАМ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

**К.П. Акинин**, канд. техн. наук, **А.Е. Антонов**, докт. техн. наук, **В.Г. Киреев**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: ak.k.p@yandex.ua, aoe@ied.org.ua, vkireev@ied.org.ua

*Предложен подход к реализации последовательного интерфейса для передачи данных по силовым проводникам статорных обмоток бесконтактного двигателя с постоянными магнитами. Предлагаемый последовательный интерфейс предназначен для использования при конструктивном исполнении электромеханической системы в виде стационарного блока управления с инвертором напряжения и выносного исполнительного двигателя с пультом управления. При этом в качестве тактовых сигналов интерфейса используются импульсы выходного напряжения инвертора напряжения. По передним фронтам тактовых сигналов в соответствии с форматом пакета данных формируется последовательность импульсов тока, появление которых фиксируется при внешнем прерывании контроллера инвертора напряжения. Таким образом, данные, введенные с выносного пульта управления, передаются в стационарный блок управления и определяют режим работы инвертора напряжения. Использование такого последовательного интерфейса позволяет минимизировать количество проводников и тем самым повысить надежность системы. Библиограф. 6, рис. 5.*

**Ключевые слова:** передача команд управления, связь по силовым проводникам, последовательный интерфейс, бесконтактный двигатель с постоянными магнитами, электропривод.

**Введение.** Одним из основных принципов создания современной техники является структурная оптимизация технических систем. При этом разработчики стремятся минимизировать количество электрических проводников, соединяющих составляющие элементы таких систем. Минимизация количества проводников кабеля и нередко совмещение функций подачи питания к исполнительному устройству и передачи команд управления посредством одних и тех же проводников являются одним из путей повышения надежности и технологичности изготовления, а также удобства работы с устройством.

В настоящее время известны различные способы передачи информации по силовым проводникам технических систем различного функционального назначения с помощью специальных передающих и принимающих устройств [4–6].

В [1, 3] описан способ передачи команд управления по силовым проводникам, соединяющих выход инвертора напряжения с исполнительным двигателем ручного инструмента, при котором посредством органов управления, размещенных на корпусе ручного инструмента, вносятся изменения в характер нагрузки инвертора напряжения путем подключения параллельно цепи статорной обмотки двигателя дополнительной нагрузки. Возникающие при воздействии на органы управления изменения в форме кривой тока фиксируются с помощью датчика тока в звене постоянного тока инвертора напряжения, а сформированные в результате преобразования сигналы используются для управления двигателем. Такой подход был применен для управления бесконтактными двигателями с постоянными магнитами (БДПМ). В работе [1] также представлены разработка функциональных узлов для изменения характера нагрузки в выходной цепи инвертора напряжения, управляющего БДПМ, и исследование режимов формирования команд управления.

**Целью** статьи являются развитие подходов, описанных в [1, 3], построение структур, реализующих последовательный интерфейс для передачи данных по силовым проводникам статорных обмоток БДПМ.

**Основное изложение.** На рис. 1 показана обобщенная функциональная схема электромеханической системы (ЭМС), содержащей два основных конструктивно разделенных узла – блок управления (БУ) и исполнительный модуль (ИМ), где ИП – источник питания; ДТ – датчик тока; ИН – инвертор напряжения; МК1 – ведущий микроконтроллер; КИТ –

компаратор импульса тока; СО – статорные обмотки БДПМ; ПУ – пульт управления исполнительным двигателем; БФИ – блок формирования информационных импульсов, подключаемый параллельно статорным обмоткам; МК2 – ведомый микроконтроллер; ЭК – электрокабель.

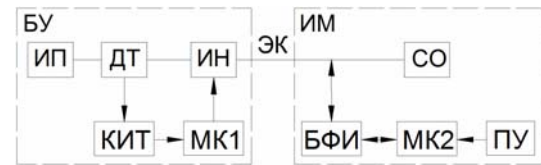


Рис. 1

Представим значимые особенности и условия построения систем, содержащих конструктивно разделенные стационарный блок управления и исполнительный модуль с электродвигателем и пультом управления:

- блок управления и исполнительный модуль соединяются кабелем, количество проводников которого может не превышать число фаз статорной обмотки БДПМ;
- инвертор напряжения коммутирует напряжение источника питания в цепи статорной обмотки БДПМ, которая может быть как одно-, так и трехфазной. Соответственно транзисторный инвертор напряжения должен быть реализован по одно- или трехфазной мостовой схеме;
- в зависимости от функций, выполняемых ЭМС, на пульте управления могут задаваться и передаваться любые данные, определяющие режим работы: команды включения и реверса БДПМ, значения задания частоты и амплитуды выходного напряжения инвертора и т.д.

Известно несколько вариантов последовательных интерфейсов, например, TWI, SPI, USART [2] и другие. Общий принцип действия последовательного интерфейса заключается в том, что по одной из линий связи ведущий микроконтроллер передает тактовый сигнал, а как минимум еще по одной линии передает или принимает данные, причем каждый передаваемый или принимаемый информативный бит сопровождается импульсом тактового сигнала. Формат адресного пакета или пакета данных определяется специальным протоколом обмена данными между ведущим и ведомым микроконтроллерами.

На основании изложенного можно сформулировать общие принципы построения обобщаемых систем, оснащенных последовательным интерфейсом для передачи данных по силовым проводникам:

- использование в качестве тактовых сигналов импульсов напряжения на выходе инвертора напряжения;
- формирование (если это необходимо) в цепи статорной обмотки импульса тока по переднему фронту импульса напряжения, на появление которого должна реагировать система управления стационарного блока управления;
- формирование пакета данных в виде последовательности ненулевых или нулевых импульсов тока;
- начало передачи пакета данных соответствует началу полупериода первой гармоники для однофазного или одной шестой части периода для трехфазного инвертора;
- питание ведомого микроконтроллера и пульта управления должно осуществляться от выходного напряжения инвертора напряжения.

На рис. 2 и 3 показаны более подробные схемы одно- и трехфазной ЭМС, где ДВ – одно- и трехфазный диодный выпрямители; ФИТ – управляемый формирователь импульса тока; БП – блок питания на базе диода, фильтрующего конденсатора и стабилизатора напряжения СН; БСН1, БСН2 и БСН3 – блоки согласования уровней напряжения выходных импульсов инвертора с параметрами

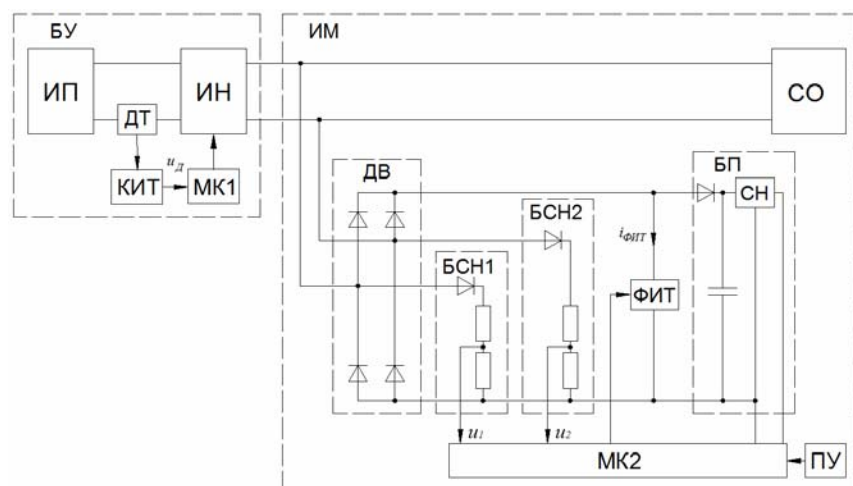


Рис. 2

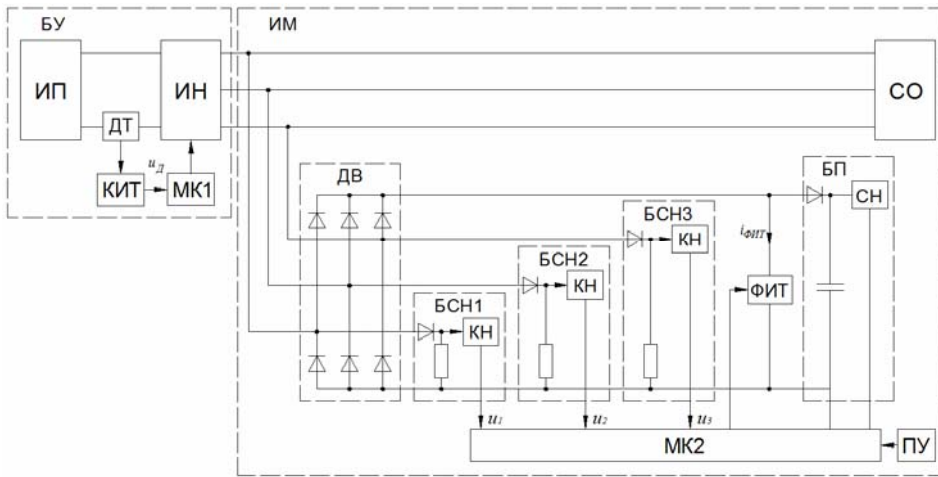


Рис. 3

входов контроллера для схемы на рис. 2, реализованные на базе диодов и резистивных делителей напряжения, для схемы на рис. 3 – на базе диодов, подтягивающих резисторов и компараторов напряжения КН);  $u_1, u_2, u_3$  – преобразованные импульсы напряжения, подаваемые на входы внешнего прерывания МК2.

На рис. 4 показана схема простейшего формирователя импульса тока на базе токоограничивающего резистора и транзисторного ключа.

Таким образом, в данном случае имеем структуру, в которой ведущий контроллер МК1 формирует последовательность тактовых импульсов, передаваемых в цепь нагрузки в виде выходного напряжения инвертора напряжения. С помощью специальной схемы ведомый контроллер МК2 по передним фронтам этих импульсов напряжения формирует пакет данных в виде последовательности импульсов тока, которые принимает ведущий контроллер МК1.

На рис. 5 показаны диаграммы сигналов, иллюстрирующие процесс передачи данных, где  $N_T$  – состояние таймера ведущего контроллера;  $N_3$  – задание выходного напряжения инвертора;  $u_{ИН}$  – последовательность импульсов выходного напряжения инвертора напряжения;  $i_{ФИТ}$ ,  $u_D$  – последовательности импульсов тока и соответствующие им импульсы пакета данных; Пр1 – внутреннее прерывание при переполнении таймера широтно-импульсного модулятора ведущего контроллера МК1; Пр2 – внешнее прерывание ведомого контроллера МК2 по переднему фронту импульса напряжения  $u_{ИН}$  инвертора напряжения; Пр3 – внешнее прерывание ведущего контроллера МК1 по переднему фронту импульса напряжения  $u_D$  пакета данных. Пунктирной линией на рисунке обозначены диаграммы сигналов, появление или отсутствие которых зависит от значения передаваемого бита данных.

При возникновении внутреннего прерывания Пр1 ведущего контроллера МК1 происходят считывание бита данных предыдущего такта и подготовка к обработке предстоящего внешнего прерывания Пр3. При появлении на одном из входов ведомого контроллера МК2 сигналов  $u_1, u_2$  или  $u_3$  происходит событие внешнего прерывания Пр2, и в зависимости от состояния буфера передаваемых данных подается или пропускается импульсная команда формирования импульса тока  $i_{ФИТ}$ . Появление информативного импульса тока  $i_{ФИТ}$  в звене

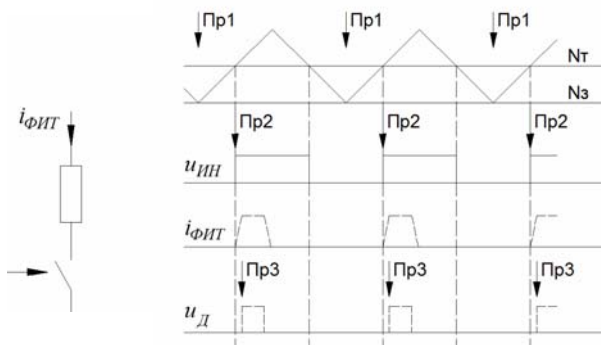


Рис. 4

Рис. 5

постоянного тока инвертора напряжения посредством компаратора источника тока КИТ преобразуется в импульс сигнала  $u_D$ , который подается на вход внешнего прерывания микроконтроллера МК1. По переднему фронту нулевого или ненулевого импульса  $u_D$  возникает или не возникает внешнее прерывание Пр3, при этом в ведущем микроконтроллере МК1 в буфер данных заносится нулевое или ненулевое принятое значение бита.

Представляется естественным принять длину пакета данных, определяемую количеством битов, в зависимости от значений частот первой гармоники  $f_1$  и модуляции напряжения инвертора  $f_M$ , а также числа фаз  $m$  обмотки двигателя, то есть  $n = \text{int} \left[ \frac{f_M}{2 \cdot m \cdot f_1} \right]$ . Например, при  $f_1 = 100$  Гц и  $f_M = 16$  кГц для одно- и трехфазной схем имеем соответственно 80 и 26 бит. Очевидно, что достигаемая скорость передачи данных относительно невысока, тем не менее достаточна для дистанционного управления исполнительным двигателем.

**Выводы.** Использование предлагаемого подхода к реализации последовательного интерфейса позволяет минимизировать количество проводников, соединяющих стационарный блок управления и выносной исполнительный модуль на базе БДПМ, и при этом увеличить объем передаваемой информации для управления режимом работы двигателя, что дает возможность расширить функциональные возможности ЭМС. Такой положительный эффект достигается за счет того, что импульсы выходного напряжения инвертора напряжения, определяющие основной режим работы БДПМ, используются как тактовые сигналы последовательного интерфейса при передаче пакетов данных по его выходным проводникам. При этом силовые проводники статорных обмоток служат как для подачи управляющего напряжения инвертора напряжения к статору БДПМ, так и для передачи данных от выносного пульта управления, размещенного на корпусе двигателя, в ведущий микроконтроллер стационарного блока управления ЭМС. Такое совмещение функций при использовании элементов системы позволяет оптимизировать ее структуру, повысить надежность работы и технологичность изготовления ЭМС, а также сделать работу с электромеханическим прибором более удобной.

1. Акинин К.П., Киреев В.Г. Способ передачи команд управления по силовым проводникам исполнительных бесконтактных двигателей с постоянными магнитами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 42. – С. 64–69.
2. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: Изд. Дом «Додэка-XXI», 2007. – 592 с.
3. Пат. №101252, Україна. Масажний пристрій / Акинін К.П., Антонов О.Є., Киреев В.Г.; Опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.
4. <http://pcb-admin.ru/stati/13-peredacha-signalov-upravleniya-po-shine-pitaniya>
5. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/Telecontrolli/power/Plinius.htm>
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/PLC>

УДК 621.313.17

**К.П. Акинин**, канд. техн. наук., **О.Є. Антонов**, докт. техн. наук, **В.Г. Киреев**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Последовательный интерфейс для передачи данных по силовым проводникам бесконтактных двигателей с постоянными магнитами**

*Запропоновано підхід до реалізації послідовного інтерфейсу для передавання даних по силових провідниках статорних обмоток безконтактного двигуна з постійними магнітами. Запропонований послідовний інтерфейс призначається для використання при конструктивному виконанні електромеханічної системи у вигляді стаціонарного блока керування з інвертором напруги та виносного виконавчого двигуна з пультом керування. При цьому як тактові сигнали використовуються імпульси вихідної напруги інвертора напруги. За передніми фронтами тактових сигналів відповідно до формату пакета даних формується послідовність імпульсів струму, виникнення яких фіксується при зовнішньому перериванні контролера інвертора напруги. Отже, дані, введені з виносного пульта керування, передаються до стаціонарного блока керування та визначають режим роботи інвертора напруги. Використання такого послідовного інтерфейсу дає змогу мінімізувати кількість провідників та підвищити надійність системи. Бібл. 6, рис. 5.*

**Ключові слова:** передача команд управління, зв'язок по силових провідниках, послідовний інтерфейс, безконтактний двигун з постійними магнітами, електромеханічна система, електропривід.

**K.P. Akinin, O.E. Antonov, V.G. Kireyev**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Serial interface for data transmission over the power wires of brushless motors with permanent magnet**

*This paper proposes an approach to the implementation of the serial interface for data transmission over the power conductors of the stator winding of brushless motor with permanent magnets. Proposed serial interface intended for use in an electromechanical system in the form of a stationary control device with a voltage inverter and the remote executive motor with a control panel. The voltage pulses of the output inverter voltage is used as clock signals of serial interface. On the rising edge of clock signals in accordance with the format of the data packet is formed a sequence of current pulses, the occurrence of which are registered at the input of the external interrupt of controller. Thus, the data inputted from the remote control panel are transmitted to the stationary control device. Using of such serial interface minimizes the number of conductors and, thereby, increases the reliability of the system. References 6, figures 5.*

**Key words:** control command transmission, connection over the power wires, serial interface, permanent magnet brushless motor, electromechanical system, electric drive.

Надійшла 29.02.2016

Received 29.02.2016

УДК 621.3.01, 621.313

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДИФИКАЦИЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА

**В.В. Гребеников<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **П. Шымчак<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **М.В. Прыймак<sup>3</sup>**, инж. I кат.

1, 3 – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, г. Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: elm1153@gmail.com

2 – Западнорейнский технологический университет в Щецине,  
Аллея Пьястов, 17, г. Щецин, 320588161, Польша

*Приведены результаты моделирования электродвигателя с постоянными магнитами, который может быть использован вместо двигателя внутреннего сгорания в городском автобусе средней вместимости. Исследованы четыре типа электродвигателей с различной конфигурацией постоянных магнитов в роторе, выполнен расчет электромагнитного момента и рабочих характеристик в программных пакетах Magnet и MotorSolve, предоставленных компанией InfoLytica. Выполнен тепловой расчет электродвигателя при его жидкостном охлаждении в пакете Comsol. Библ. 5, рис. 6.*

**Ключевые слова:** постоянные магниты, электродвигатель, магнитное поле, пульсации момента, рабочая характеристика, электробус.

Для городских автобусов средней вместимости используются, как правило, дизельные двигатели. Основные показатели одной из модификаций такого двигателя следующие: мощность  $P = 114$  кВт (155 л.с.) при частоте вращения  $n = 2600$  об/мин; крутящий момент  $M = 419$  Нм при  $n = 1600...2600$  об/мин. Применение электродвигателя с постоянными магнитами вместо дизельного в городском автобусе позволит снизить уровень вредных выбросов, повысить комфортность для пассажиров за счет уменьшения уровня шума в салоне, а также существенно снизит эксплуатационные расходы [2, 5].

Цель работы – исследование влияния конфигурации магнитной системы ротора с постоянными магнитами на характеристики электродвигателя для электробуса и определение конфигурации, при которой достигается максимальное значение электромагнитного момента и мощности.

Для реализации поставленной цели были исследованы четыре конфигурации магнитной системы ротора: в электродвигателе М1 ротор имеет шесть полюсов с постоянными магнитами (ПМ) радиальной намагниченности; в электродвигателе М2 – шесть полюсов с ПМ тангенциальной намагниченности; М3 – каждый из полюсов имеет три ПМ, размещенных в роторе специальным образом; М4 – каждый из полюсов имеет двенадцать ПМ, размещенных таким образом, что между ними имеется тонкий слой электротехнической стали (рис. 1).