

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ПЛИС И БМК

Дёмин Александр Николаевич (staff@vniief.ru), Коянкин Сергей Николаевич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Необходимость применения вентильных электроприводов (ЭП) на основе бесколлекторных электродвигателей (ЭД) с постоянными магнитами в авиакосмическом приборостроении привела к разработке специализированных блоков управления. Основными требованиями к таким блокам являются повышенная стойкость к внешним воздействующим факторам, обеспечение минимального рассогласования между заданным и измеренным положением механизма ЭП, минимальные габаритно-массовые характеристики и высокий коэффициент полезного действия.

За выполнение алгоритма в составе блока управления отвечает модуль контроллера на основе базовых матричных кристаллов (БМК). Для ускорения процесса разработки, отладки и последующей корректировки логического проекта для БМК алгоритм реализован на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Вращение ротора электродвигателя осуществляется путем формирования блоком управления переменных токов в фазах электродвигателя. При этом модуль контроллера обрабатывает информацию о положениях ротора и выходного звена по сигналам датчиков, а также формирует управляющие сигналы на трехфазный инвертор.

Основная цель данной работы – разработка логического проекта для БМК и ПЛИС, реализующего алгоритмы управления вентильными электроприводами, один из которых обеспечивает высокоточное задание положения выходного звена, а другой – определенные скорости перемещения. Алгоритмы управления реализуют следующие требования:

- формирование последовательности импульсных сигналов для функционирования датчиков;
- обработка информации с датчиков о положении ротора электродвигателя и выходного звена;
- контроль исправности датчиков положения и концевых выключателей;
- выполнение алгоритма пропорционального-интегрального-дифференциального (ПИД) – регулятора положения или скорости;
- формирование меандра с частотой 2,0 МГц для тактирования модуля гальванической развязки;
- вычисление и формирование управляющих широтно-импульсных модулированных (ШИМ) сигналов для формирования токов в статорных обмотках электродвигателя через силовой инвертор;
- выполнение информационного взаимодействия с системой верхнего уровня по магистральному последовательному интерфейсу в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003.

В докладе рассмотрен способ реализации на ПЛИС алгоритма управления вентильным электроприводом, а также представлены результаты функционального моделирования логического проекта.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, пропорциональный-интегральный-дифференциальный регулятор, модуль гальванической развязки, вентильный электропривод.

IMPLEMENTATION OF THE CONTROL ALGORITHM BY THE VALVE ELECTRIC MOTOR ON THE FPGA AND GATE ARRAY

Dyomin Alexandr Nikolaevich (staff@vniief.ru), Koyankin Sergey Nikolaevich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Necessity to apply the valve electric motor on the basis of non-collector electric motors (EM) with permanent magnets in aerospace instrument engineering has led to development of specialized control

units. The basic demands to such units are the increased resistance to external affecting factors, ensuring minimum misalignment between the set and measured position of EM gear, minimum mass and minimum overall dimensions and a high coefficient of performance.

The control unit module on the basis of GA is responsible for accomplishment of algorithm as a part of the control package. The algorithm is realized on the Field Programmable Gate Arrays (FPGA) for acceleration of process of development, adjustment and the subsequent correction of the logic design for GA. Rotation of the electric motor rotor is implemented by formation by the control unit of alternating currents in electric motor phases. Thus the control unit processes the information on positions of a rotor and an output link on signals of sensors, and also forms controlling signals on the three-phase inverter.

Main objective of the given work – development of the logic design for GA and a FPGA, realizing control algorithms of the valve electric motors, one of which provides the high-precision set to a position of an output link, and another one – certain speeds of moving. Control algorithms realize the following demands:

- formation of sequence of impulse signals for functioning of transducers;
- processing of the information from transducers about a position of an electric motor rotor and an output link;
- control of position transducers and limit switches operability;
- performance of the PID-regulator algorithm on a position or speed;
- formation of a meander with frequency of 2,0 MHz for clocking of the galvanic decoupling module;
- calculation and formation of controlling LPM-signals for formation of currents in electric motor stator windings through the power inverter;
- the informational interacting with top level system on the main serial interface according to GOST R 52070-2003;

The way of implementation on the FPGA of the valve electric motor control algorithm is observed in the report.

Key words: the latitudinal pulse modulation (LPM) signal, the proportional integrated differential (PID) regulator, the module of a galvanic decoupling, the valve electric motor.

Аппаратная реализация

С учетом области применения блока управления логический проект реализуется на двух типах микросхем.

Для изделий, стойких к внешним воздействующим факторам, логический проект реализован в БМК типа 5511БЦЗТ производства ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – филиал НИИИС. Данный тип БМК имеет ёмкость 750 тыс. эквивалентных вентилей, напряжение питания 3,3 В, выходы толерантны ко входному напряжению 5 В.

Для изделий, предназначенных для исследовательских работ, логический проект реализован в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) типа 5576ХС4Т производства АО «ВЗПП-С». Данный тип ПЛИС имеет емкость 200 тыс. эквивалентных вентилей, напряжения питания ядра 1,8 В и периферии 3,3 В, выходы не толерантны ко входному напряжению 5 В. Для хранения прошивки ПЛИС применяется постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) 5576РС1У производства АО «ПКК «Миландр» с объемом 4 Мбит.

Описание структурной схемы

Структурная схема логического проекта, исходя из требований назначения, представлена рис. 1 [1]. В логический проект входят следующие основные блоки:

- автомат состояния;
- блок управление (БУ) сброса;
- БУ модуля обработки сигналов датчиков в составе (МОСД):
 - блок захвата (БЗ);
 - блок постобработки;
 - формирователь импульсных последовательностей (ФИП);
- пропорциональный-интегральный-дифференциальный (ПИД) регулятор;
- БУ модуля гальванической развязки (МГР) в составе:
 - блок расчета синуса угла (БРС);
 - БУ ориентацией поля и пространственно-векторной модуляции (ОППВМ);
- контроллер магистрального последовательного интерфейса (МПИ) в режиме оконечного устройства (ОУ).

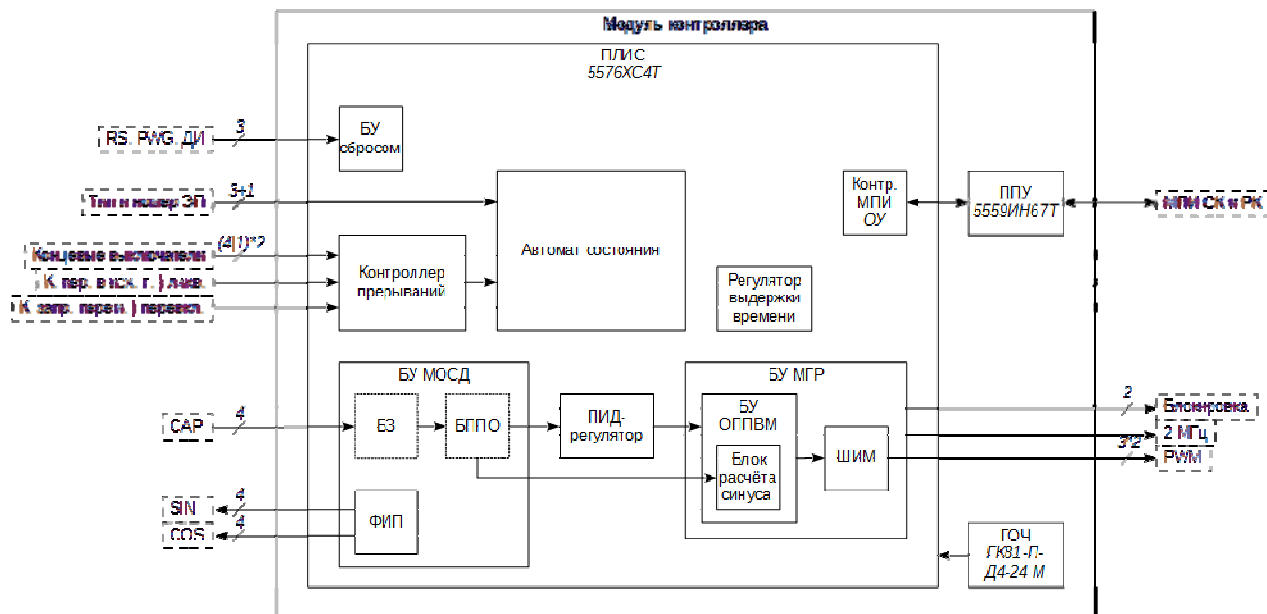


Рис. 1. Структурная схема логического проекта в составе модуля контроллера

Описание функциональных блоков логического проекта

Автомат состояний представляет собой конечный автомат Мили. Основными функциями автомата являются:

- организация взаимодействия всех функциональных блоков;
- организация взаимодействия блока управления с системой управления (СУ):
 - прием и передача информации по МПИ;
 - прием разовых команд на движение электропривода (ЭП) влево и вправо;
 - опрос концевых датчиков и реализация алгоритма работы при их срабатывании;
- прием и исполнение команд ликвидации;
- обработка сигналов с устройства блокировки, формирование сигналов подтверждения приема сигналов, исполнение команд блокировки ЭП.

Автомат состояний имеет два алгоритма работы, выбор алгоритма зависит от типа ЭП.

Процесс работы ЭП А типа может быть разделён на следующие режимы:

- инициализация;
- рабочий режим – вращение электродвигателя (ЭД);
- остановка (удержание ЭД в текущем положении);
- режим реверса ЭД;
- перемещение в исходное положение (в процессе выполнения команды ликвидации);
- неисправность.

Диаграмма режимов работы ЭП А типа приведена на рис. 2.

Процесс работы ЭП Б типа может быть разделён на следующие режимы:

- инициализация;
- ЭД заблокирован;
- рабочий режим (управление положением, ЭД разблокирован);
- удержание в положении «0 мм» (в процессе выполнения блокировки ЭД или при получении по цифровому интерфейсу МПИ команды «Выставка ЭМП»);
- удержание в положении «+22 мм» или «-22 мм» (в процессе выполнения команды ликвидации);
- блокировка ЭД;
- разблокировка ЭД;
- переключение;
- неисправность.

Диаграмма режимов работы ЭП Б типа приведена на рис. 3.

БУ МОСД предназначен для формирования последовательности импульсных сигналов SIN1-SIN4, COS1-COS4 с частотой 10 кГц для тактирования модуля обработки сигналов датчиков. Форма сигналов приведена на рис. 4. Сигналы формируются во всех режимах работы.

Еще одним назначением БУ МОСД является обработка сигналов с датчика положения ротора (ДПР) и датчика положения (ДП). Измерение углового положения ДПР выполняется по сигналам CAP1 (опорный) и CAP2 (измерительный). Сигналы CAP1, CAP2 представляют собой прямоугольные импульсы. Диаграмма сигналов представлена на рис. 5. Сдвиг фазы между опорным и измеряемым сигналами пропорционален угловому положению ротора. Период возбуждения датчика составляет $T = 100$ мкс.

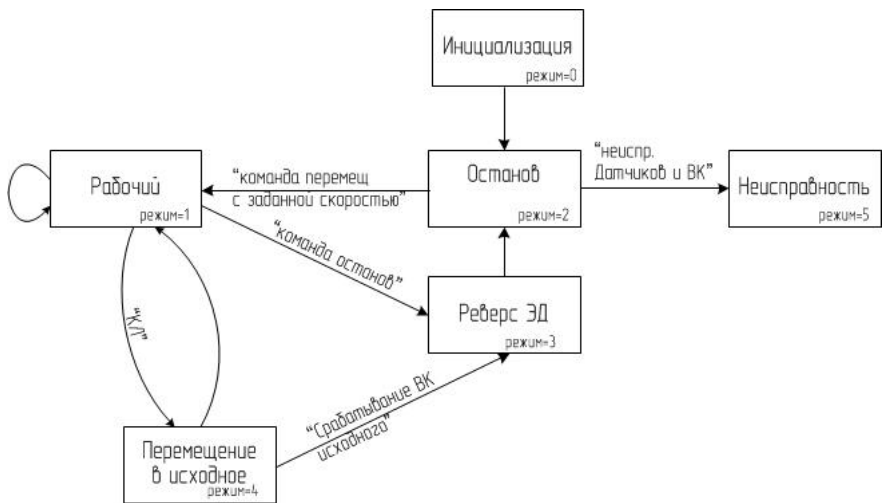


Рис. 2. Диаграмма режимов работы ЭП А типа

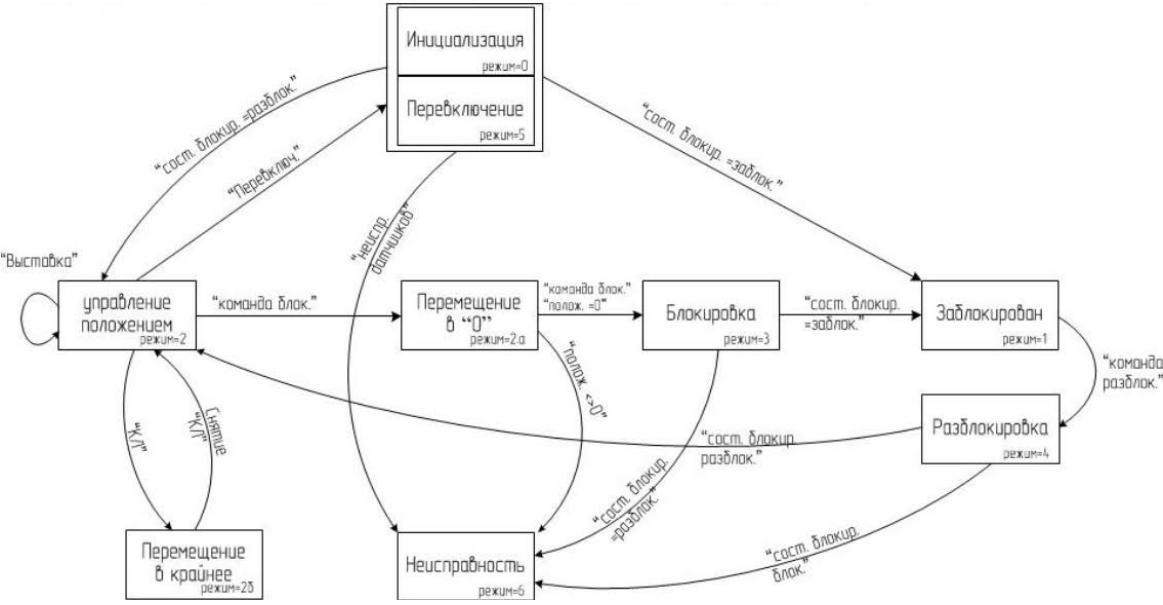


Рис. 3. Диаграмма режимов работы ЭП Б типа

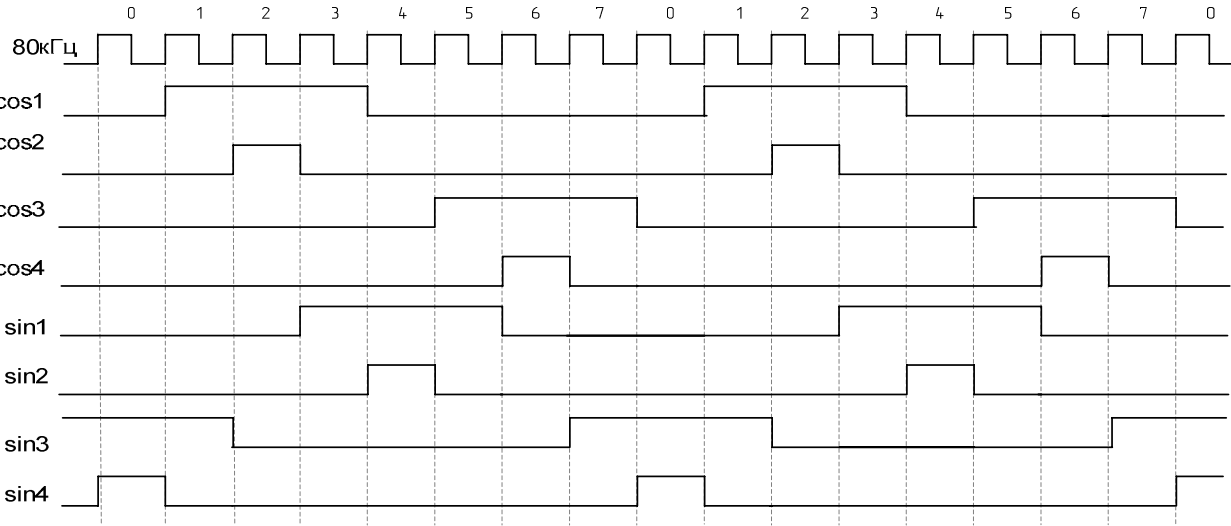


Рис. 4. Выходные сигналы SIN1-SIN4, COS1-COS4

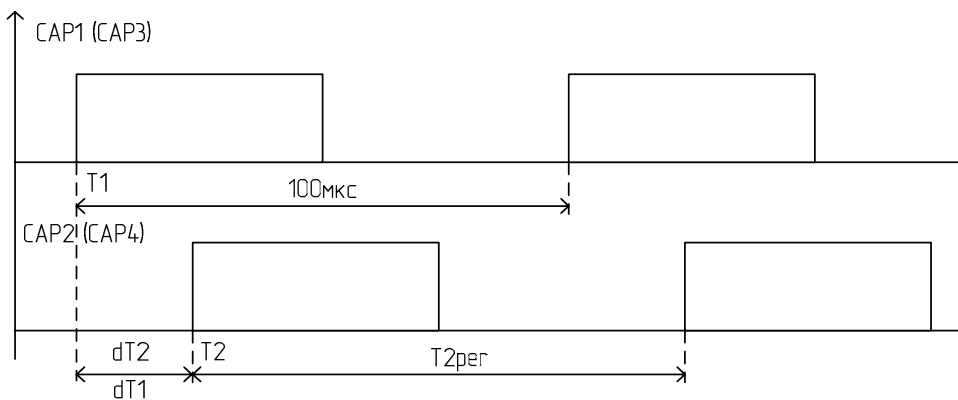


Рис. 5. Диаграмма сигналов: CAP1, CAP3 – опорные сигналы; CAP2, CAP4 – измерительные сигналы.

Измерение сдвига фазы $dT1$ и $dT2$ реализуется с помощью счетчика, выполняющего подсчет тактовых импульсов T_0 с частотой 24 МГц. Измеренное значение $dT1$ соответствует угловому положению ДПР и используется в алгоритме формирования векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а измеренное значение $dT2$ соответствует положению выходного звена и используется в ПИД-регуляторе положения.

Для компенсации потерь, связанных с перемещением ротора за период обработки датчика 100 мкс, используется переменная, связанная со скоростью вращения ротора. ДПР одновременно используется как датчик скорости вращения вала ЭД.

Измерение положения ДП выполняется по сигналам CAP3 (опорный) и CAP4 (измерительный). Сигналы CAP1, CAP2, CAP3, CAP4 представляют собой прямоугольные импульсы. Диаграмма сигналов представлена на рис. 5. Сдвиг фазы между опорным и измеряемым сигналами пропорционален положению выходного штока. Период возбуждения датчика составляет $T = 100$ мкс.

В модуле ПИД-регулятора рассчитывается требуемый уровень выходных токов, который подается на статорные обмотки ЭД. Функциональная схема алгоритма ПИД-регулятора представлена на рис. 6. В модуле ПИД-регулятора реализован алгоритм регулирования положения и скорости ЭД, состоящий из:

- алгоритмы вычисления интегральной, пропорциональной и дифференциальной составляющих;
- алгоритма обнуления интегральной составляющей при насыщении пропорциональной составляющей;
- алгоритма обнуления интегральной, пропорциональной и дифференциальной составляющих при включении изделия, при остановке и в режиме разблокировки.

БУ МГР формирует меандр с частотой 2,0 МГц для тактирования модуля гальванической развязки, а также производит вычисление и формирование управляющих ШИМ-сигналов для формирования токов в статорных обмотках электродвигателя через силовой инвертор. Схема подключения ШИМ-сигналов и фаз ЭД к силовому преобразователю показана на рис. 7. Сигналы ШИМ формируются с помо-

щью счетчика, выполняющего симметричный счёт вверх/вниз. При превышении значения счетчика значения соответствующего компаратора $cmp1$, $cmp2$, $cmp3$ аппаратно формируется уровень «Лог. 1» на выходах PWM1, PWM3 и PWM5. ШИМ-сигналы одной фазы между собой всегда инвертированы. Так же в алгоритме реализована задержка «мертвое время» меправления ключами одного плеча, для исключения протекания сквозного тока через плечо инвертора. Значение «мертвого времени» $\Delta T_m = 4$ мкс. Диаграмма ШИМ-сигналов приведена на рис. 9. Значения компараторов $cmp1$, $cmp2$, $cmp3$ вычисляются в каждом периоде ШИМ-сигналов – 100 мкс.

Внутри периода ШИМ формируется две длительности:

- $t1$ – время подключения фазной статорной обмотки к $+U$;
- $t2$ – время подключения фазной статорной обмотки к $-U$.

Меняя соотношение длительностей подключения внутри периода ШИМ, можно менять среднее напряжение, прикладываемое к обмоткам, в частности по синусоидальному закону с учетом фазовых сдвигов. То есть, с помощью ШИМ происходит формирование трехфазной системы статорных токов и средних напряжений различной частоты и амплитуды.

При векторной ШИМ реализация вектора напряжения осуществляется с помощью базовых векторов в трехфазной системе координат. Каждый базовый вектор характеризуется определенным состоянием ключей инвертора.

Набор используемых базовых векторов зависит от сектора угла, в котором лежит реализуемый вектор. Диаграмма векторов показана на рис. 8.

Алгоритм векторной ШИМ выполняется при получении нового значения углового положения α с ДПР и включает в себя:

- определение сектора угла α ;
- вычисление угла внутри сектора;
- вычисления значений синуса угла табличным методом;
- далее для каждой фазы необходимо вычислить время ее подключения к $U_{пит}$ в периоде ШИМ.

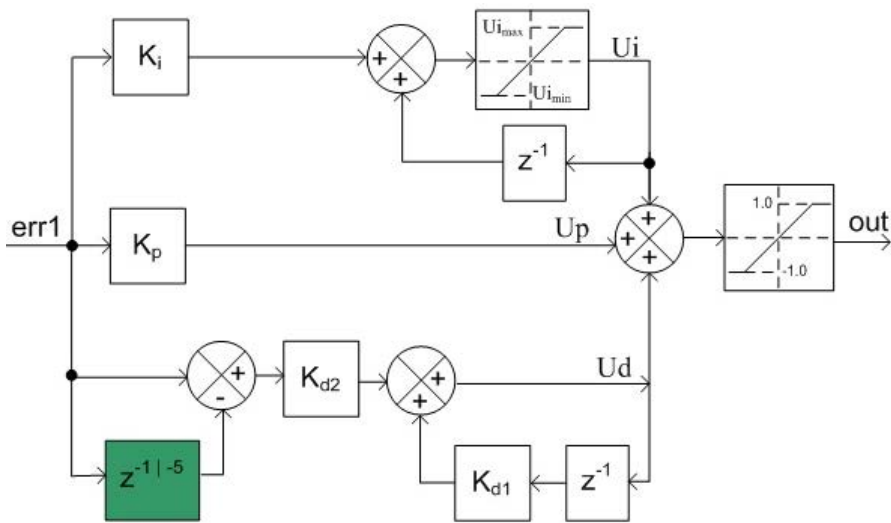


Рис. 6. Функциональная схема алгоритма ПИД-регулятора: out – выходной сигнал регулятора на текущем цикле вычисления; err – значение ошибки на текущем цикл вычисления; K_i – интегральный коэффициент ПИД-регулятора; K_p – пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора; K_{d1} , K_{d2} – дифференциальные коэффициенты ПИД-регулятора

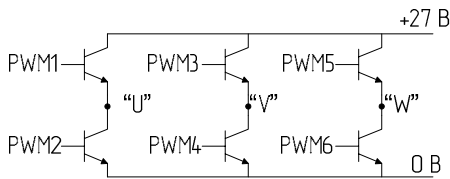


Рис. 7. Схема подключения ШИМ-сигналов и фаз ЭД к силовому преобразователю

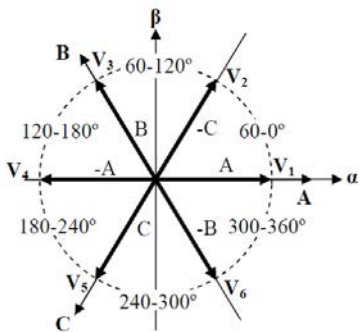


Рис. 8. Диаграмма базовых векторов

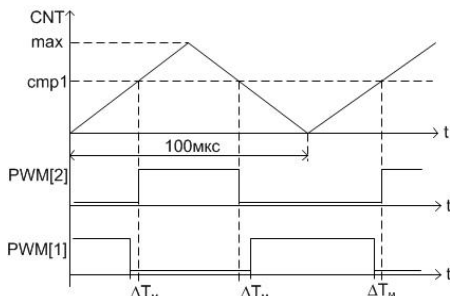


Рис. 9. Диаграмма формирования ШИМ-сигналов

Для обеспечения вращения ЭД в прямом направлении к измеренному значению ДПР необходимо добавить значение, соответствующее углу 90° , в обратном – вычесть 90° .

Требуемое направление вращения определяется по значению переменной out выхода ПИД-регулятора.

Взаимодействия ЭП с системой верхнего уровня по ГОСТ Р 52070-2003 организовано посредством IP-ядра Core1553BRT [2].

Данный логический проект так же реализован на двух ПЛИС типа 5576XC8T производства АО «ВЗПП-С». Этот тип ПЛИС имеет емкость 200 тыс. эквивалентных вентилей, напряжения питания ядра 1,8 В и периферии 3,3 В. При обмене данными между ПЛИС используется интерфейс SPI в режиме ведущий-ведомый.

В случае применения в изделии двух одинаковых блоков управления ЭП при одном блоке, обменивающемся информацией с СУ, обмен данными между модулями контроллеров производится по средством интерфейса UART.

Заключение

В докладе рассмотрен способ реализации алгоритма управления вентильными электроприводами на ПЛИС и БМК. Алгоритм обеспечивает минимальное рассогласование между заданным и измеренным положением механизма ЭП, все промежуточные данные хранятся в регистрах ПЛИС, что увеличивает быстродействие алгоритма, за счет отсутствия необходимости траты времени на операции чтения и записи с оперативного запоминающего устройства.

Список литературы

1. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие. Под ред. А. С. Сыров. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. С. 304: ил.
2. Руководство по IP-ядру Core1553BRT.