

МЕТОД ШЕСТИСТУПЕНЧАТОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В зависимости от показаний датчиков Холла, определяющих сектор, в котором находится ротор (3 датчика, 6 секторов), задается опережающий вектор магнитного поля, за которым увлекается ротор. Опережающий вектор магнитного поля задается включением одной высокой и одной низкой фазы (см. рис. 1). В каждый момент времени может быть включена только одна высокая и одна низкая фаза. Между переключением фаз необходимо выдержать т.н. «dead time» - время, в течение которого все фазы выключены. Сигнал на высокой фазе представляет собой ШИМ с регулируемым коэффициентом заполнения, на низкой фазе – 1 в активном состоянии, 0 в неактивном.

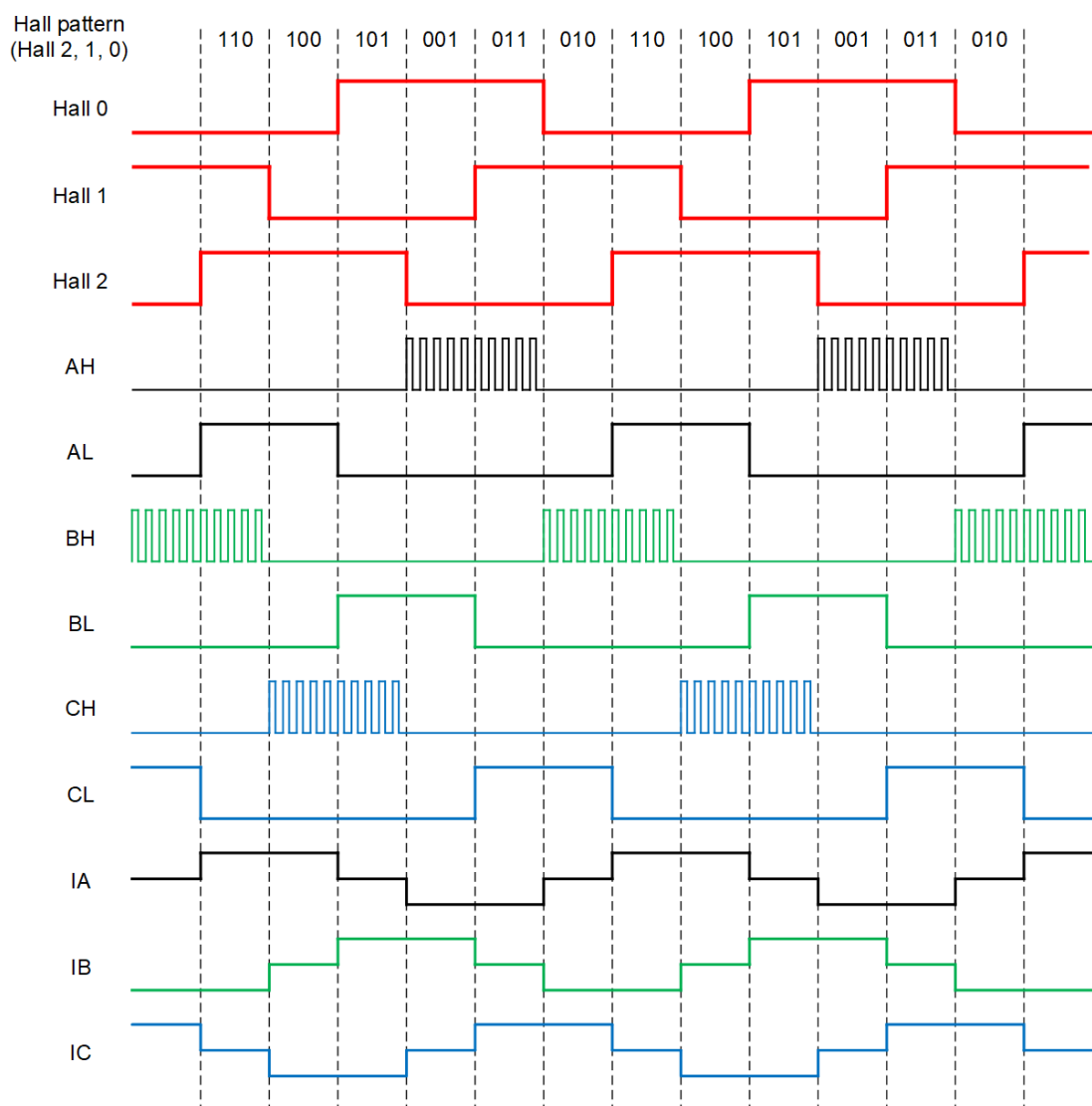


Рис. 1

Переключение фаз в зависимости
от показаний датчиков Холла

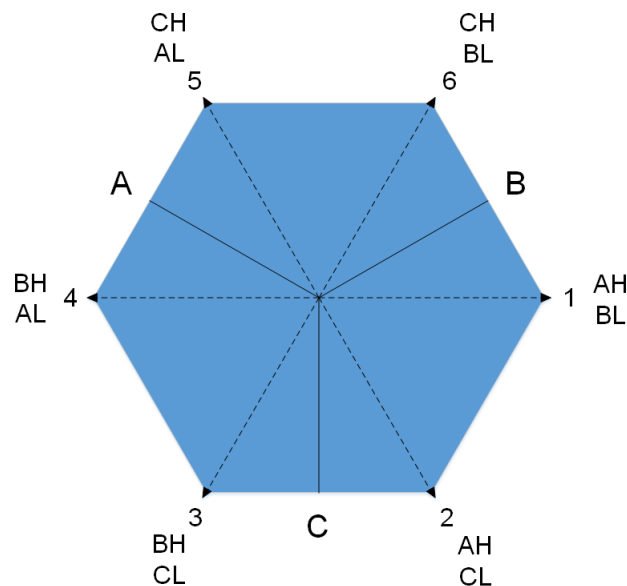


Рис 2.

Фазы и вектора магнитного поля

Сигнал на высокие фазы поступает с выходов каналов TOM (Timer Output Module) в составе GTM (Generic Timer Module), которые сконфигурированы на генерацию ШИМ сигнала с фиксированной частотой (PWM_PERIOD) и изменяемым коэффициентом заполнения (duty_cycle). Сигнал на низких фазах задается логическим уровнем на соответствующих выводах в режиме GPIO.

Сигналы с датчиков Холла поступают на выводы CCP0S модуля CCU6. Этот модуль содержит EXPHS регистр – Expected Hall Sensors Pattern Shadow Register, в который предварительно заносится значение следующего ожидаемого паттерна. По событию совпадения показаний датчиков Холла со значением в регистре EXPHS возникает прерывание ISR_correct_hall_event(), в котором производится перезапись регистра EXPHS, переключение фаз, а также регистрация мгновенной скорости вращения ротора.

Скорость вращения ротора – количество его оборотов в минуту, (TPM – turns per min) линейно зависит от коэффициента заполнения ШИМ сигнала ($D = \text{duty_cycle}$) на высокой фазе (уравнение вида: $\text{TPM} = (D * \text{multiplier}) + \text{offset}$). На рис. 3 представлен типовой график этой зависимости.

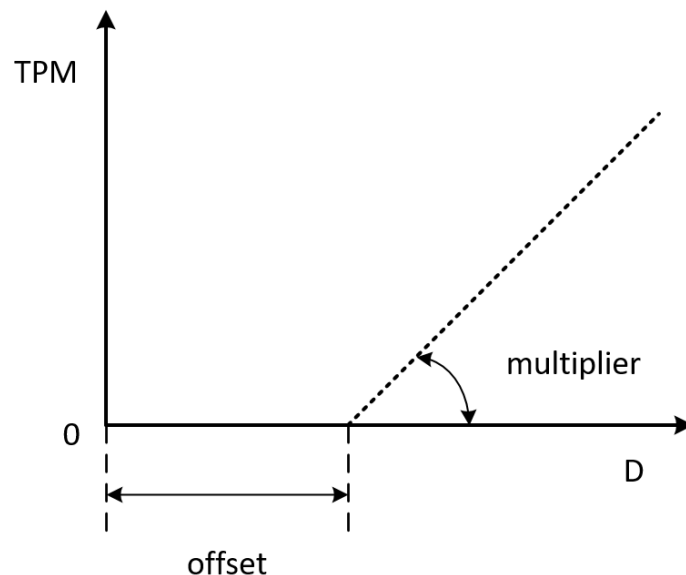


Рис. 3

Зависимость количества оборотов ротора в минуту
от коэффициента заполнения ШИМ сигнала на высокой фазе

Скорость вращения ротора задается по команде пользователя. В обработчике приема команды, после извлечения значения требуемой скорости, коэффициент заполнения D предварительно вычисляется по формуле:

$$D = (TTPM - offset) / multiplier,$$

где $TTPM$ – требуемая скорость вращения (target turns per min). В результате предустановки, скорость вращения ротора начнет плавно (без выбросов и колебаний) выходить на уровень, близкий к требуемому. Дальнейшая корректировка скорости вращения ротора производится по истечению времени удержания [1] с помощью ПИ-регулятора с фиксированной частотой в одном из уровней RTOS следующим образом:

$$D += pi_ctrl(TTPM, CTPM),$$

где $CTPM$ – текущая скорость вращения ротора (current turns per min), которая определяется с помощью измерения времени нахождения ротора в секторе по формуле:

$$TPM = 60 / ((TPS / fSTM) * 6),$$

где TPS – количество тактов системного таймера в секторе (ticks per sector, вычисляется в обработчике прерывания `ISR_correct_hall_event()`), $fSTM$ –

частота системного таймера. Для получения более стабильных результатов измерения скорости ее значение усредняется в кольцевом буфере.

Запуск двигателя производится с помощью вызова процедур `update_hall_sensors_pattern()` и `change_leading_vector()` в одном из уровней RTOS до тех пор, пока не возникнет первое прерывание `ISR_correct_hall_event()`, в котором выставляется флаг `rotor.is_launched`. Остановка ротора фиксируется установкой флага `rotor.is_launched = FALSE` в случае, если время от последней регистрации TPS до текущего момента превысило TPS в 3 раза.

Для каждого двигателя значения `multiplier` и `offset` должны быть предварительно вычислены с помощью процедуры автоматической калибровки и записаны во флэш память контроллера. Процесс калибровки заключается в вычислении трех пар значений – (D, СТРМ), т.е. нанесении на график зависимости скорости вращения ротора от коэффициента заполнения ШИМ (рис. 3) трех точек, по которым и вычисляются `multiplier` и `offset`. На каждое значение коэффициента заполнения выделяется определенное время, за которое скорость ротора стабилизируется и по истечению которого фиксируется текущая скорость вращения. По получившимся таким образом трем точкам вычисляются три значения `offset` и `multiplier`, среднее от которых заносится во флэш память. Запуск калибровки осуществляется изменением значения глобальной переменной `calibration_state` с IDLE на START в окне Watch отладчика.

[1] Время удержания ПИ-регулятора необходимо для того, что он не вносил выбросов и колебаний в процесс установления предварительного уровня скорости вращения ротора.