

Богуцкий М. М., инженер-конструктор, Ткаченко В. В., зав. лабораторией,
Юдаева Л. А., вед. инженер-программист, ОИПИ НАН Беларуси

АЛГОРИТМЫ МИКРОПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ДРОБЛЕНИЕМ ШАГА

Maintaining pulse-width modulation microstepping control for stepper motors is considered. The algorithm implicating internal timer interrupts and special bit-table is preposed for budget RISC microprocessor system.

Микропроцессорные системы обладают определенной гибкостью в отношении выбора способа автономного управления электроприводом полиграфического оборудования и введения одновременно необходимых дополнительных функций: контроль датчиков состояния объекта, сопряжение с внешним ведущим контроллером и др. Это справедливо также для дискретного электропривода с управлением в режиме дробления шага, выбор которого оправдывается оправданным во многих случаях, когда требуется высокая точность позиционирования, плавность перемещений и низкий уровень вибраций (девиации скорости) [1].

При работе в этом режиме соотношение токов фаз шагового двигателя (ШД) определяет промежуточное положение ротора внутри полного шага и в принципе позволяет реализовать плавное движение при питании обмоток через усилители постоянного тока (УПТ), подключенные к цифроаналоговым преобразователям (ЦАП) на выходе контроллера [1].

Как правило УПТ выполняется на базе регулятора с мощными выходными ключами и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) их сигналов управления, что позволяет исключить ЦАП и использовать импульсный режим как для полношагового, так и микрошагового режимов ШД. Эта особенность принята нами во внимание при проектировании микропроцессорной системы управления дискретным четырехфазным электроприводом широкого назначения и выборе рациональных алгоритмов ее работы.

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема системы управления шаговым приводом. На схеме условно показаны контуры обратных связей, которые могут быть введены в систему управления на стадии ее проектирования и выбора структуры. Непрерывная часть регулятора представлена блоками ЦАП, УПТ и электронными схемами (ЭС) формирования сигналов

состояния многоконтурной системы, которую необходимо рассматривать не только как многоконтурную, но и как многосвязную [2], поскольку прямая цепь управления фазами содержит несколько каналов, имеющих перекрестные электромагнитные связи (на схеме не показаны). Внешний контур с объектом управления (ОУ) включает обратные связи от датчиков, сигналы которых могут быть обработаны с использованием ресурсов внешнего компьютера (ВК) для выдачи команд на уровень микропроцессорной системы. Ограничения внешнего контура управления могут быть связаны с малой пропускной способностью каналов передачи данных и скоростью выполнения компьютерных программ. Эти ограничения являются существенными также и для контура, в который входит микропроцессор (МП).

Современный рынок микроэлектроники предлагает специально для построения систем с дискретным электроприводом разнообразные микросхемы. В наиболее совершенных решениях, имеющих микропроцессорное ядро, поддерживается режим дробления шага, возможны выбор закона управления и организация обратной связи по току обмоток ШД на основе ШИМ-преобразования с помощью встроенных ЦАП и аналоговых компараторов [3–6]. Однако для МП с универсальным или специализированным набором микрокоманд, выполняемых последовательно, слишком большое время микропрограммного цикла может стать препятствием достижению необходимых показателей качества дискретной системы с замкнутым или разомкнутым контуром управления.

Один из основных показателей цифровой системы управления — это частота формируемого ШИМ-сигнала, которая должна быть не меньше требуемой частоты коммутации выходных каскадов мощных электронных ключей. Алгоритм с коротким микропрограммным циклом, который наиболее просто реализуется для разомкнутой системы, позволяет непосредственно с выходов МП управлять ключами. Другой показатель такой системы — статическая ошибка — при известных моментах нагрузки ШД определяется нелинейностью его электро-механических характеристик. Для многих практических применений статическая ошибка в пределах допуска обеспечивается компенса-

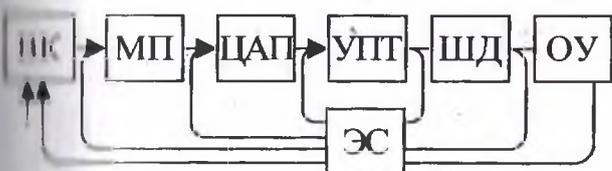


Рис. 1. Структура системы управления дискретным электроприводом

ей нелинейности с помощью изодромного звена, например, в виде программируемой таблицы «ток — положение». При этом точность компенсации будет определяться размером таблицы, от минимума, рассчитанного на среднестатистическую нелинейность в пределах одного шага (чаще всего в виде синусоиды [2, 4, 5]), и до максимума — с учетом нелинейностей в пределах каждого шага одного и более оборотов привода.

В эксперименте нами использован гибридный двигатель ДШИ-200-1, контроллер на базе RISC-процессора AT90S2313 семейства AVR фирмы Atmel и электронные ключи микросхемы L298N фирмы STMicroelectronics. Обмен ВК и контроллера осуществляется по интерфейсу RS-232C с логической адресацией и позволяет одновременно подключить на один COM-порт до 8 контроллеров. Особенность архитектуры AVR с разделенными адресными пространствами памяти программ и памяти данных, а также шинами доступа к ним, коротких машинный цикл (один такт опорного генератора) позволяют построить быстрые алгоритмы формирования ШИМ-сигнала.

Для экспериментальной проверки были использованы алгоритмы, генерирующие на выходах PORTB7-PORTB4 порта МП импульсные последовательности для формирования фазных токов, изменяющихся по закону, близкому к симметричной пиле. На рис. 2 приведена ос-

циллограмма изменения тока одной из фаз. Для остальных фаз обеспечивается сдвиг на 1/4 периода. Пульсации тока, наблюдаемые на той же осциллограмме, но в другом масштабе времени (рис. 3), определяются частотой ШИМ и постоянной времени индуктивной нагрузки ключей.

Пульсации определяют уровень вибраций, создаваемых приводом не только при движении, когда каждый шаг сопровождается колебательным переходным процессом, но и в режиме удержания.

Причем наибольший уровень акустического шума имеет место в режиме полного шага. В полшаговом режиме энергия, сообщаемая ротору, составляет около 30% от энергии полного шага, а в микрошаговом режиме с шагом 1/32 основного — всего около 0,1%.

Желательно, чтобы и вибрации, вызванные пульсацией тока в режиме удержания, не превышали уровня виброшума в режиме движения. Эти пульсации тока могут быть снижены включением последовательно с обмотками дроссельных фильтров, увеличивающих постоянную времени электромагнитной цепи. Результат использования дросселей в схеме питания ШД показан на рис. 4.

Недостаток такого способа — существенное увеличение габаритов, массы привода и энергетические потери.

Другой способ — увеличение частоты ШИМ — ограничивается возможностями МП.

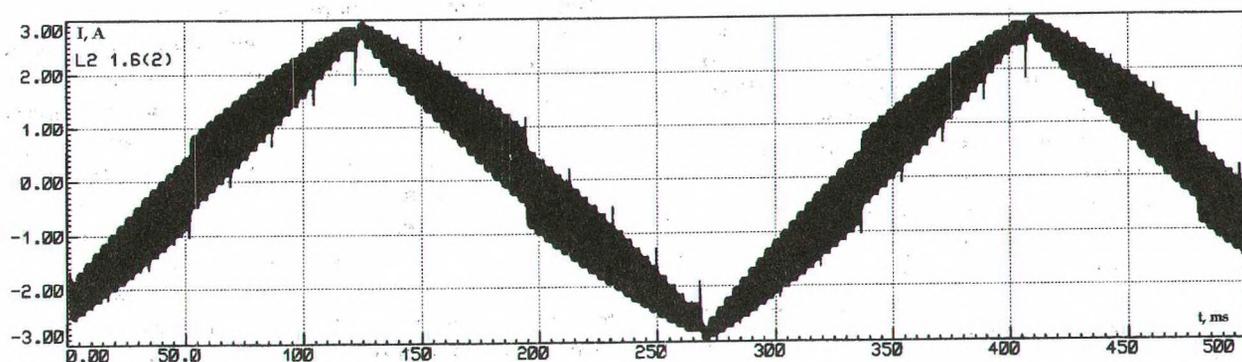


Рис. 2. Осциллограмма изменения фазных токов

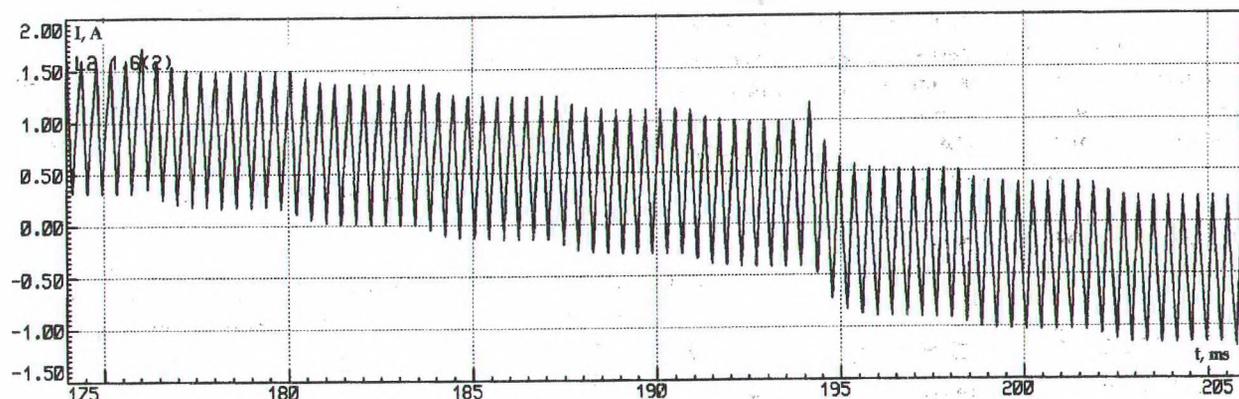


Рис. 3. Осциллограмма фазного тока в схеме без дополнительных дросселей

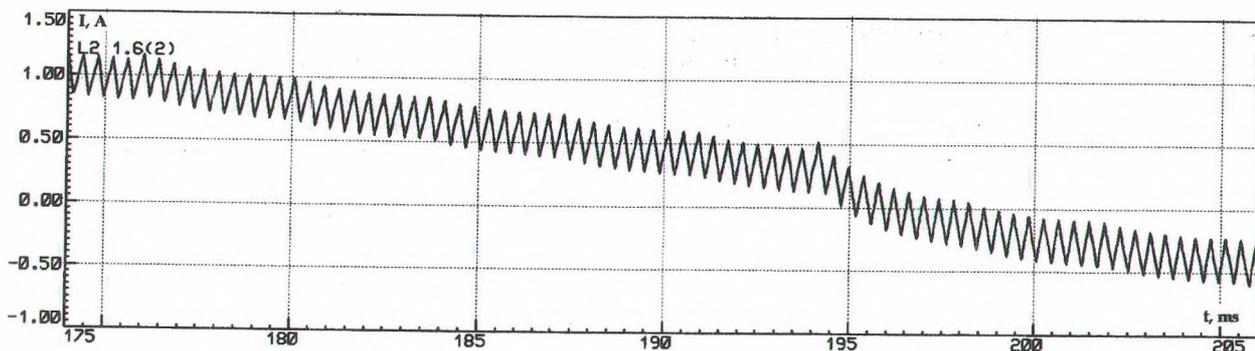


Рис. 4. Осциллограмма фазного тока в схеме с дросселями

Оценкой эффективности микропроцессорной системы формирования ШИМ-сигнала может служить показатель K , связывающий частоту ШИМ-сигнала с частотой опорного генератора:

$$F_{\text{ШИМ}} = 10^{-3} K F_{\text{ОГ}},$$

где $F_{\text{ШИМ}}$ — частота ШИМ; $F_{\text{ОГ}}$ — частота опорного генератора микроконтроллера.

При допустимой амплитуде пульсаций, заданной величиной шага позиционирования или коэффициентом дробления полного шага, желаемый период изменения фазных токов и допустимая скорость движения в пределах частоты приемистости ШД обеспечиваются выбранным МП и его программой. Формула, связывающая период фазного тока, изменяющегося по пилообразной форме, имеет вид

$$N = \sqrt{Q/2mT},$$

где N — число микрошагов, укладываемыхся на полупериоде $Q/2$ изменения фазного тока; m — число импульсов ШИМ, повторяющихся в пределах микрошага; T — минимальная длительность импульса, принятого за единичный.

В первоначальном варианте алгоритма, построенного на программном счетчике МП АТ90S2313, частота ШИМ-сигнала с дискретизацией по ширине импульса, соответствующей коэффициенту дробления шага 1 : 8, составила 2630 Гц при опорной частоте 10 МГц ($K = 0,26$). В усовершенствованном варианте алгоритма, в котором использована программируемая таблица кодирования ШИМ-сигналов с различной

скважностью (по числу ступеней дробления микрошага) и внутренний таймер, эффективность была повышена в 6 раз ($K = 1,56$). При этом пульсации тока, вызванные ШИМ, и пульсации, связанные с позиционированием по микрошкагам, сравнялись по амплитуде (рис. 5). Частота ШИМ-сигнала составила 15625 Гц при шаге временной дискретизации 3,5 мкс и 20 уровнях квантования по среднему току, что позволило отказаться от балластных дросселей.

Блок-схема общего алгоритма управления для отработки команды на выполнение заданного числа микрошагов приведена на рис. 6. Здесь длительности импульсов T_1 и T_2 ШИМ-сигнала в первом и втором полутактах составляют один его период (такт).

Счетчик m определяет число повторяющихся тактов в пределах одного микрошага. После установки параметров движения, принимаемых от ВК, подпрограмма восстанавливает текущее состояние системы по таблице кодов для токов всех четырех фаз ШД и передает управление подпрограмме (рис. 7) обработки прерываний таймера, которая обеспечивает наименьшую задержку при выдаче в порт сигналов коммутации.

В таблице, которая используется представленными алгоритмами, битовая матрица содержит описание, сжатое (с целью минимизации объемов используемой памяти) на основе симметрий диаграмм фазных токов относительно: 1) направления движения; 2) уровня средних токов; 3) инверсии четных/нечетных фаз.

Предложенный подход, таким образом, опирается на 1) возможности сжатия табличного

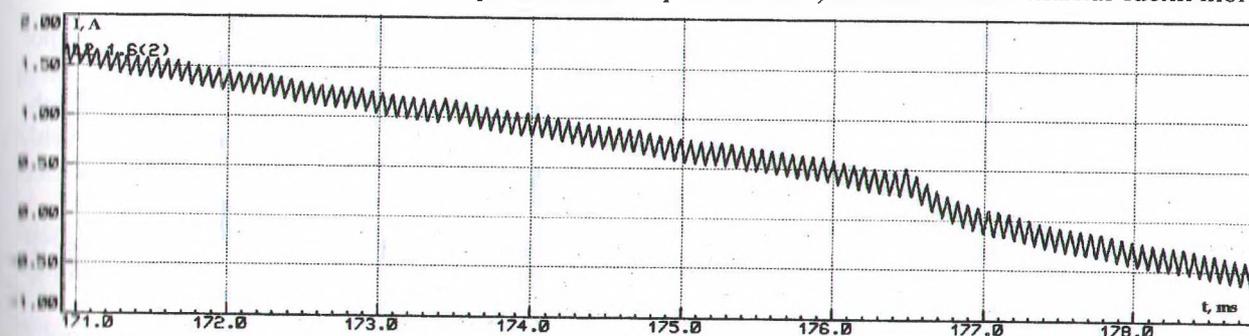


Рис. 5. Осциллограмма фазного тока с частотой ШИМ 15625 Гц

представления закона коммутации ШД и на 2) структуру подпрограмм, обеспечивающую минимум обращений к памяти программ за счет полного использования ресурсов внутренних регистров. Экспериментальные результаты показали возможность алгоритмической реализации микрошагового управления ШД с ШИМ-преобразованием сигнала и достижения приемлемых показателей качества при ограничениях

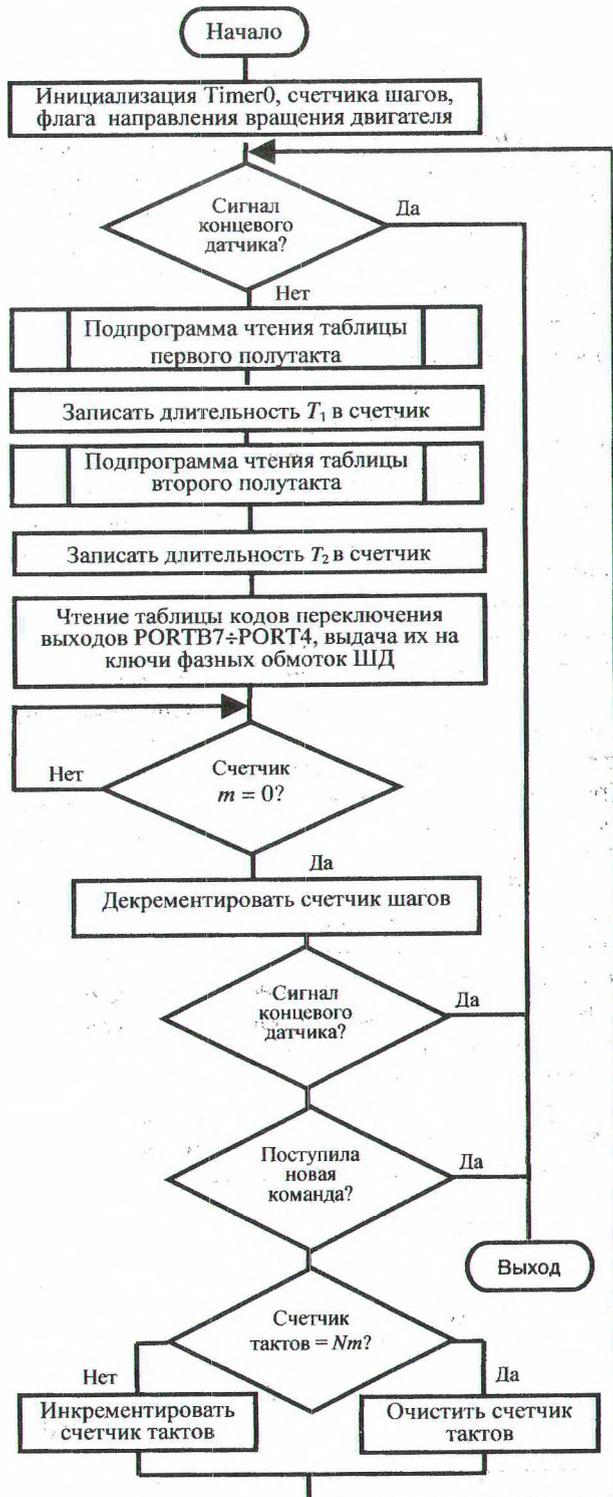


Рис. 6. Блок-схема алгоритма отработки N шагов



Рис. 7. Блок-схема алгоритма обработки прерываний на быстрдействие и объемы памяти программ МП с относительно низкой стоимостью.

Литература

1. Соколов, М. М. Дискретный электропривод механизмов электротермических установок / М. М. Соколов, В. П. Рубцов // М.: Энергоатомиздат, 1986. — 120 с.
2. Шмакова, Ю. В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в системе сканирования рентгенодифракционного прибора / Ю. В. Шмакова // Исследовано в России: электронный журнал. — С. 1092—1102. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/080.pdf>
3. LM9833. National Semiconductor Corporation. — 46 p. <http://www.national.com>
4. Measurement and Identification of Brush, Brushless, and dc Steppin / Stuart Schweid, et. al. — Copyright 2000 CRC Press LLC. <http://www.engnetbase.com>
5. Processing back EMF signals of hybrid step motors / R. Lofthuis, et. al. — Control Eng. Practice. — 1995. — Vol. 3(10). — P. 1—10.
6. ST52x301 for stepper motors fuzzy control / G. Grasso, M. Lo Presil. — STMicroelectronics. — 1999. — P. 16. <http://www.st.com>