

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ИНКРЕМЕНТНОГО ЭНКОДЕРА НА БАЗЕ ПРЕРЫВАНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОБЛЕМЫ ДРЕБЕЗГА КОНТАКТОВ

А. А. Пономарев✉, Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева

*Кафедра математического моделирования и информационных технологий,
caprimores@gmail.com; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: внешние прерывания; дребезг контактов; инкрементный энкодер; микроконтроллер; определение вращения; система.

Аннотация: Одной из ключевых проблем в задачах определения вращения инкрементных энкодеров является возникновение дребезга электрических контактов, из-за которого реализация алгоритмов анализа осуществляется не на базе прерываний, а на основе постоянного опроса, приводящего к неэффективному использованию процессорного времени. Проведено исследование данной проблемы, в ходе которого разработано комплексное аппаратно-программное решение в виде системы определения вращения, в том числе в условиях износа инкрементных энкодеров, приводящего к возникновению дребезга контактов. Предложены принципиальная электрическая схема универсального аппаратного сглаживающего фильтра для частичного подавления помех, а также асинхронный алгоритм анализа вращения на основе прерываний для эффективного использования вычислительных ресурсов управляющего устройства.

Введение

В последние десятилетия научно-технический прогресс привел к значительным инновациям в области бытовой техники, технического оборудования и устройств для опытов и экспериментов на основе микроконтроллеров [1]. При производстве промышленного оборудования, где требуется точное измерение положения, углов вращения или скорости движения, используются энкодеры различных типов. Например, в работе [2] представлена система управления электроприводом измельчителя плодоовощной продукции на базе микроконтроллера ATmega328, но в ней отсутствует подсистема определения скорости вращения электромотора. Отсутствие такой подсистемы может привести к поломке оборудования (в случае заклинивания продукции), а также делает установку полуавтоматической. В работе [3] исследуется и моделируется аппаратно-программный комплекс системы микроклимата на базе микроконтроллера ATmega2560, который можно усовершенствовать, обеспечив контроль работоспособности устройства охлаждения воздуха. Поскольку такие устройства в основном работают с использованием электромоторов, их работоспособность можно контролировать как с помощью датчиков тяги воздушных масс, так и простейших инкрементных энкодеров, позволяющих определять направление и скорость вращения. В работе [4] представлена система мониторинга и управления работой фронтального погрузчика трактора, где энкодеры, подключенные к микроконтроллеру, используются для измерения угла наклона стрелы. Применение системы определения скорости вращения

трехфазного двигателя в условиях повышенного электромагнитного шума и последующая передача данных на персональный компьютер по протоколу универсального асинхронного приемопередатчика описаны в [5], но не учитывается проблема дребезга контактов энкодера, возникающего при его износе.

Дребезг контактов представляет собой явление, наблюдаемое в электромеханических системах, таких как микропереключатели, реле, кнопки, энкодеры, и его негативное влияние невозможно полностью устранить [6]. В работе [7] исследуется влияние дребезга контактов в микропереключателях с учетом электростатической силы затвора, демпфирования сжимающей пленки и пружинной модели контактных наконечников, но не предлагаются практические способы устранения данного эффекта. Принцип работы инкрементного энкодера ЕС11, причины возникновения дребезга в нем и его подключение к микроконтроллеру STM32 описаны в [8]. Однако алгоритм получения данных от энкодера реализован с использованием таймера, что может приводить к излишней вычислительной нагрузке, а предлагаемая электронная схема требует доработки, так как номиналы внутренних подтягивающих резисторов на разных микроконтроллерах отличаются.

Отсутствие комплексного решения для определения направления вращения инкрементного энкодера при дребезге контактов подчеркивает актуальность данного исследования.

Целью работы – разработка комплексного аппаратно-программного решения для широкого спектра микроконтроллеров, которое позволит получить информацию о вращении от инкрементного энкодера при наличии проблемы дребезга контактов. Аппаратное решение включает принципиальную электрическую схему, а программное – асинхронный алгоритм получения данных на основе прерываний и кольцевого буфера.

Теоретическая часть

Поворотные энкодеры – устройства для измерения углового перемещения или вращения, которые являются датчиками угла поворота [9, 10]. Обычно энкодер состоит из вращающегося диска и считывающего элемента, который регистрирует изменения положения вращающегося элемента и преобразует их в электрический сигнал. Абсолютные энкодеры предоставляют информацию о точном угловом положении вращающегося элемента независимо от его предыдущего положения, тогда как относительные (инкрементные) энкодеры фиксируют изменение угла относительно начального положения.

Типовой энкодер инкрементного типа имеет два канала (А, В). Фазовый сдвиг между сигналами А и В позволяет определять направление вращения. Так, если его значение положительно – вращение энкодера осуществляется в одну сторону, отрицательно – в противоположную:

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг, °; φ_A , φ_B – фазы каналов А и В соответственно, °.

Пример осциллограммы отображает фазовый сдвиг на каналах А (канал Ch1) и В (канал Ch2) при вращении энкодера (рис. 1).

Для того чтобы определить направление вращения, необходимо вычислить фазовые сдвиги (1) для каналов А и В соответственно. Предположим, энкодер имеет N_{\max} импульсов на один полный оборот, то есть каждый полный оборот вала или оси соответствует N_{\max} импульсам сигнала для каналов А и В. Тогда определение фазы сигнала для конкретно взятого канала может выражаться через

$$\varphi = (N/N_{\max}) \cdot 360^\circ, \quad (2)$$

где N – текущее количество импульсов для канала А или В, шт./об; N_{\max} – число импульсов на полный оборот, шт./об.

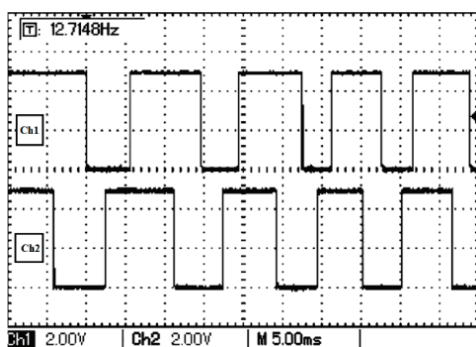


Рис. 1. Осциллограмма импульсов на каналах А и В при вращении энкодера

Определение разрешения (количества переходов) фазовых сигналов R , шт./об, в инкрементных энкодерах имеет значение для повышения точности измерений углового или линейного перемещения и определяется как

$$R = 2CN_{\max}, \quad (3)$$

где C – число каналов, шт.

Разрешение энкодера (3) отображает число фазовых переходов (2) у равномерно смещенных каналов (или одного канала) в зависимости от количества импульсов на один полный оборот. Например, для энкодера EC11 разрешение составляет 80 фазовых переходов, поскольку он имеет два канала, каждый из которых при полном обороте создает 20 импульсов.

Определение вращения энкодеров программным обеспечением (ПО) может выполняться двумя методами: постоянного опроса и на базе прерываний. Метод постоянного опроса подразумевает настройку таймера микроконтроллера на периодический вызов функции, анализирующей состояние логических уровней на его выводах. Сигналы энкодера опрашиваются с фиксированной частотой F_{pool} , определяемой таймером. Длительность периода использования процессорного времени (ПИПВ) T_{timer} , с, при анализе вращения на основе метода постоянного опроса выражается

$$T_{\text{timer}} = F_{\text{pool}} t_{\text{analysis}}, \quad (4)$$

где F_{pool} – количество запусков функции анализа вращения, раз; t_{analysis} – длительность выполнения функции анализа вращения, с.

Анализ вращения на базе прерываний работает аналогично, но вызов функции анализа происходит не периодически, а по внешнему прерыванию – триггеру изменения логических уровней, срабатывающему в момент фазовых переходов сигнала на каналах при вращении энкодера. Длительность ПИПВ управляющего устройства T_{intr} , с, при анализе вращения на основе прерываний выражается через

$$T_{\text{intr}} = R U_{\text{rpm}} t_{\text{analysis}}, \quad (5)$$

где U_{rpm} – скорость вращения энкодера, об/с.

Внешние прерывания возникают при значительном изменении напряжения (переход от логического нуля к единице и обратно). Напряжение логической единицы зависит от аппаратного устройства микроконтроллера и обычно приближено к напряжению его питания. На рисунке 2 показаны диапазоны напряжений логических уровней для 5 и 3,3 В транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), которые описывают интерпретацию микроконтроллером высокого уровня (логическая единица) и низкого уровня (логический ноль).

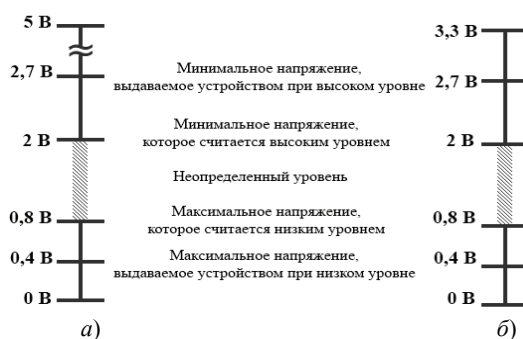


Рис. 2. Напряжения логических уровней ТТЛ для 5 В (а); 3,3 В (б)

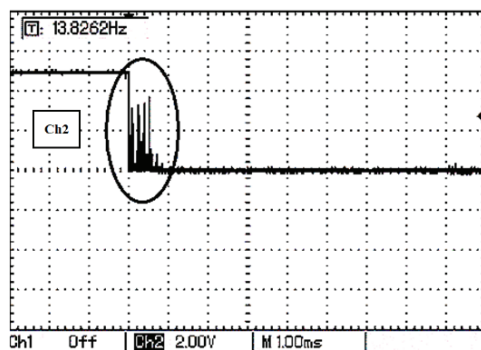


Рис. 3. Осциллограмма, отображающая наличие дребезга контактов

При сравнении процессов получения данных от энкодера с помощью постоянного опроса и на базе прерываний, очевидно, что при постоянном опросе используется больше процессорного времени (4). Однако определение вращения может быть точнее, поскольку проверка значений логических уровней на каналах происходит чаще, чем при использовании прерываний. Тем не менее такой процесс анализа улавливает возникающие паразитные помехи в сигнале, что требует использования алгоритмов сглаживания.

Применение внешних прерываний позволяет более рационально использовать процессорное время (5) и вызывать алгоритмы анализа вращения только при фазовых переходах. Однако точность определения направления вращения сильно зависит от наличия помех в сигнале, вызванных дребезгом контактов. На рисунке 3 показан пример дребезга контактов в инкрементном энкодере ЕС11 на канале В.

Для решения данной проблемы в основном применяются программные методы фильтрации и/или аппаратные сглаживающие фильтры [6]. Один из программных методов – использование таймеров для игнорирования переходных состояний в течение определенного времени после первого обнаружения переключения логических уровней; другой – использование машины состояний для определения и контроля фаз сигналов при вращении. При использовании аппаратных сглаживающих фильтров решением может являться применение конденсаторов или RC-цепочек.

Разработка сглаживающего фильтра

Для решения проблемы дребезга контактов с аппаратной стороны разработана электрическая схема сглаживающего фильтра на основе RC-цепочек для подключения энкодера к микроконтроллеру (рис. 4). Выводы А, G, В, BTN, G подключаются непосредственно к инкрементному энкодери, а выводы МК А, МК В, МК

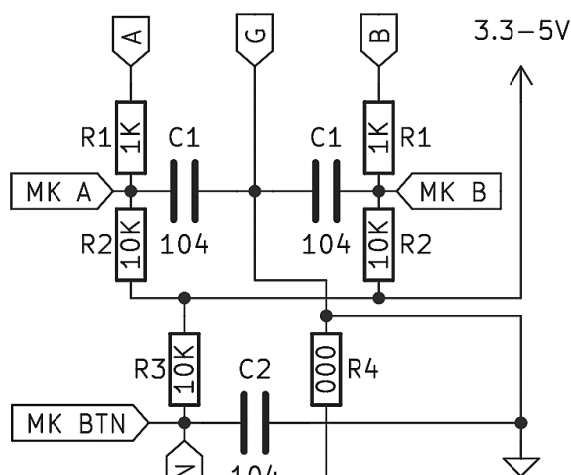


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема сглаживающего фильтра

BTN – к микроконтроллеру. Резисторы R1 и R2 номиналом 1 и 10 кОм отвечают за время падения и нарастания фронтов напряжения на каналах А и В. Конденсаторы C1 (для каналов А и В) номиналом 1 мкФ предназначены для сглаживания пульсаций; при падении напряжения они разряжаются через резистор R1, а заряжаются через резистор R2. Предполагается, что длительность заряда будет значительно превышать длительность разряда (примерно в 10 раз). Резистор R3 номиналом 10 кОм ограничивает время заряда конденсатора C2 номиналом 1 мкФ в цепи кнопки энкодера. Разряд происходит очень быстро, так как резистор R4 является переключкой с практически нулевым сопротивлением и может изменяться лишь в случаях необходимости ограничения длительности разряда.

Стоит заметить, что даже небольшое количество помех, особенно в диапазоне неопределенного логического уровня, все еще может приводить к значительному числу прерываний, что в свою очередь вызовет неверную интерпретацию сигналов вращения энкодера и излишнее использование процессорного времени. Минимизация данной проблемы осуществляется за счет использования программных алгоритмов фильтрации.

Разработка программного обеспечения для определения вращения

Для предотвращения реагирования на возможные пульсации и получения достоверных данных о вращении энкодера разработан асинхронный алгоритм анализа событийного типа на базе прерываний и кольцевого буфера. Вызов алгоритма сконфигурирован таким образом, что для канала А настроено прерывание на падение напряжения (при отсутствии вращения сигнал имеет значение логической единицы), а определение вращения осуществляется по каналу В. Это обусловлено тем, что логическое значение канала В к моменту срабатывания триггера прерывания может быть либо логической единицей, либо логическим нулем согласно фазовому сдвигу (1) между каналами. Значение логического уровня канала В является основным источником информации о направлении вращения.

Для минимизации ложных срабатываний анализ вращения должен осуществляться с некоторой задержкой, которая подбирается эмпирически для конкретного экземпляра энкодера. Выбор канала для прерывания (при возможности определения степени дребезга контактов канала) должен осуществляться по критерию меньшего износа, то есть числа возникновений паразитных помех. Схема работы алгоритма прерывания, анализирующего вращение энкодера, показана на рис. 5.



Рис. 5. Схема работы алгоритма анализа вращения

В алгоритме анализа используется кольцевой буфер для минимизации использования процессорного времени, а также для возможности не блокировать исполнение основного кода ПО. На рисунке 6 представлен фрагмент кода (на языке C/C++), содержащий инициализацию конфигурационных параметров, переменных, необходимых для работы алгоритма, и функцию обработчика прерываний ENC_ESR(), которая определяет направление вращения.

```

#define CHANNEL_A_PIN 2
#define CHANNEL_B_PIN A3
#define MIN_TIME_BETWEEN_ISR_MS 3

uint32_t lastTimeISR = 0;
RingBuffer ringBuffer(10);
enum EncoderRotateEvent {LEFT, RIGHT};

void ENC_ESR() {
    if (millis() - lastTimeISR < MIN_TIME_BETWEEN_ISR_MS) return;
    lastTimeISR = millis();
    if (digitalRead(CHANNEL_B_PIN)) ringBuffer.write(LEFT);
    else ringBuffer.write(RIGHT);
}

```

Рис. 6. Фрагмент кода алгоритма анализа вращения энкодера

Стоит отметить, что извлечение события из кольцевого буфера и обработка события вращения энкодера должны осуществляться в основном потоке исполнения кода, что подразумевает использование асинхронной, неблокирующей архитектуры ПО.

Экспериментальная часть

На основе спроектированной принципиальной схемы аппаратного фильтра сглаживания пульсаций собрана электронная схема, работоспособность которой тестировалась при напряжениях 3,3 и 5 В для обеспечения возможности применения на микроконтроллерах с уровнями напряжения ТТЛ. Электронная схема также использовалась для проверки наличия дребезга контактов на различных скоростях вращения энкодера (0,05...1,0 об./с).

Разработка ПО, реализующего алгоритм, проводилась в среде Platformio IDE при использовании фреймворка Arduino и на базе платы Arduino Nano, в основе которой используется микроконтроллер ATmega328p с напряжением логического уровня 5 В. Канал А энкодера подключен к выводу D2 платы с микроконтроллером. В конфигурации алгоритма настроено внешнее прерывание INT0 на падение напряжения, которое реагирует на изменение логического уровня вывода D2. Канал В, участвующий в анализе вращения, подключен к выводу А3. Задержка для алгоритма подобрана опытным путем при проведении тестов на 5 образцах энкодеров ЕС11 и составила 3 мс (усредненное значение). Поиск оптимального значения осуществлялся с шагом 1 мс в диапазоне 1...5 мс.

Результаты и их обсуждение

При быстром вращении ручки энкодера выявлено, что дребезг контактов происходит редко (не более чем в 5 % случаев) и сильно зависит от износа. Собранная электрическая схема подавляет возникающие помехи в более чем 95 % случаев для исследуемых образцов. При единичных вращениях дребезг контактов на изношенном энкодере проявлялся достаточно часто (в среднем 20 %), а создаваемые помехи значительно (на 80 – 90 %) подавлялись сглаживающим фильтром, что показано на осциллограмме (рис. 7.)

Дребезг в таких случаях возникал из-за резкого изменения скорости (импульса) металлических контактов при старте и окончании вращения. При скорости вращения ручки энкодера от 0,5 об/с сглаживание было близко к идеальному (рис. 8), а амплитуда сигнала значительно (в 2,5 раза при ТТЛ 5 В) превышала уровень, считаемый за минимально высокий. Это подтверждает верно подобранное соотношение скорости заряда и разряда конденсаторов – 1:10.

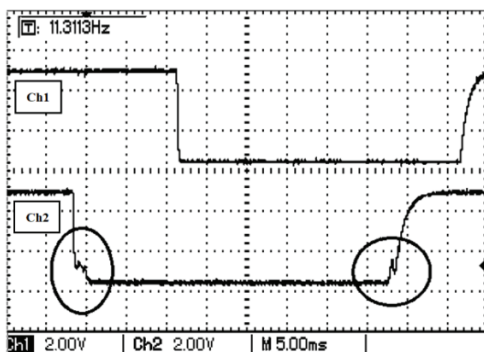


Рис. 7. Редкие случаи возникновения помех при сильном дребезге контактов и единичных импульсах

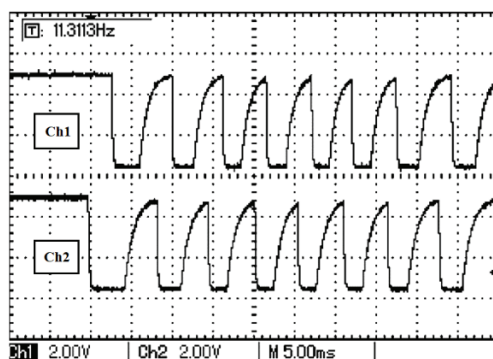


Рис. 8. Осциллограмма сигналов при быстром вращении энкодера

Для оценки эффективности методов анализа вращения энкодера выполнены расчеты на основе формул (4) и (5). Рассмотрим пример. Пусть таймер микроконтроллера настроен на вызов функции анализа вращения в количестве F_{pool} 500 раз в секунду. Длительность выполнения функции анализа $t_{analysis}$ составляет $2 \cdot 10^{-4}$ с, а разрешение R равно 80 импульсам на один оборот. Для метода на основе постоянного опроса длительность ПИПВ не будет меняться при изменении скорости вращения ручки энкодера и будет всегда равна 0,1 с. При скорости вращения $U_{rpm} = 1$ об./с для метода анализа на основе прерываний длительность ПИПВ составит 0,016 с. Так как скорости вращения больше 1 об./с при вращении ручки энкодера ЕС11 рукой являются труднодостижимыми, расчет эффективности при больших скоростях не будет иметь смысл для данной модели. Исходя из полученных результатов, эффективность метода на основе прерываний при скорости в 1 об./с в сравнении с методом на базе постоянного опроса составит 84 %, а в состоянии отсутствия вращения данный метод не использует процессорное время.

Заключение

В ходе проведенного исследования проанализирована проблема неверной интерпретации вращения вследствие возникновения дребезга контактов инкрементных энкодеров и предложено комплексное аппаратно-программное решение для ее минимизации. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность применения сглаживающего фильтра и асинхронного алгоритма на основе прерываний, которые значительно снижают число ошибок при обработке сигналов даже при износе энкодера. Полученное решение позволяет эффективно использовать процессорное время (от 84 % и более), обеспечивая точность анализа более 90 % при определении вращения в условиях умеренного износа механизма энкодера для скорости вращения его ручки в диапазоне 0,05...1,0 об./с. Дальнейшее развитие данного исследования подразумевает адаптацию предложенных методов к другим моделям и типам управляющих устройств, а также подбор оптимальных задержек алгоритма анализа для иных датчиков угла поворота.

Список литературы

1. Применение микроконтроллерных систем в исследованиях (на примере машины Атвуда) / Н. М. Сухомлинов, А. Г. Финогеев, Т. В. Смирнова, В. Д. Иващенко, Д. С. Парыгин// Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – Т. 59, № 3. – С. 112 – 121. doi:10.54398/20741707_2022_3_112
2. Лебедь, Н. И. Моделирование системы управления автоматизированного электропривода измельчителя плодоовощной продукции в виртуальной симуля-

ционной среде / Н. И. Лебедь // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 205 – 213. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.205-213

3. Исследование и моделирование режимов работы программно-аппаратного комплекса системы микроклимата на базе микроконтроллера ATMEGA2560 / Н. И. Лебедь, К. Е. Токарев, Д. Д. Нехорошев, М. П. Аксенов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 596 – 605. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.596-605

4. Mukhopadhyay, S. C. Embedded Microcontroller and Sensors Based front End Loader Control System / S. C. Mukhopadhyay, G. S. Gupta, J. W. Howarth // Instrumentation and Measurement Technology Conference. – 2008. – P. 1509 – 1514. doi: 10.1109/IMTC.2008.4547282

5. Венедиктов, Ф. А. Определение положения рабочего органа с помощью инкрементного энкодера и микроконтроллера / Ф. А. Венедиктов, А. А. Гольшева // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. – 2018. – Т. 2. – С. 55 – 58.

6. Yershov, R. Software-Based Contact Debouncing Algorithm with Programmable Auto-Repeat Profile Feature / R. Yershov, V. Voytenko, V. Bychko // International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – 2019. – P. 813 – 818. doi: 10.1109/PICST47496.2019.9061500

7. A dynamic model, including contact bounce, of an electrostatically actuated microswitch/ McCarthy B., G. G. Adams, N. E. McGruer, D. Potter // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2002. – V. 11, No. 3. – P. 276 – 283. doi: 10.1109/JMEMS.2002.1007406

8. Кондратьев, Н. О. Устройство ввода информации на базе механического инкрементального энкодера ЕС11 / Н. О. Кондратьев, К. А. Кузнецов, В. Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 39 – 45.

9. Аксенов, О. И. Анализ возможностей использования аморфных микропроводов в магнитоимпедансных датчиках, предназначенных для информационно-измерительных и управляющих систем / О. И. Аксенов, А. В. Рыбаков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – Т. 32, № 2. – С. 98 – 111.

10. Разработка концепции и опытного образца оптического энкодера на эффекте муара / В. Д. Забровский, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова, В. И. Коновалов, Ж. К. Мофу // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 383 – 389. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.383-389

Development of a System for Determining the Direction of Incremental Encoder Rotation Based on Interrupts in Case of Contact Bounce

A. A. Ponomarev✉, D. S. Solovjev, I. A. Solovjeva

*Department of Mathematical Modeling and Information Technologies,
caprimores@gmail.com; Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

Keywords: external interrupts; contact bounce; incremental encoder; microcontroller; rotation detection; system.

Abstract: The occurrence of electrical contact bounce is one of the key problems in the problem of determining the rotation for incremental encoders, due to which the implementation of analysis algorithms is carried out not on the basis of interrupts, but

on the basis of constant polling, leading to inefficient use of processor time. The article studies this problem, during which a comprehensive hardware and software solution is developed in the form of a system for determining rotation taking into account the wear of incremental encoders, leading to the contact bounce occurrence. A basic electrical circuit of a universal hardware smoothing filter for partial suppression of interference is proposed. An asynchronous algorithm for analyzing rotation based on interrupts for the efficient use of computing resources is considered.

References

1. Suhomlinov N.M., Finogeev A.G., Smirnova T.V., Ivashchenko V.D., Parygin D.S. [Application of microcontroller systems in research (using the example of Atwood's machine)], *Journal: Control and High Technologies*, 2022, vol. 59, no. 3, pp.112-121. doi:10.54398/20741707_2022_3_112. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Lebed N.I. [Modeling the Control System of an Automated Electric Drive for a Fruit and Vegetable Chopper in a Virtual Simulation Environment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 205-213. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.205-213 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Lebed N.I., Tokarev K.E., Nehoroshev D.D., Aksenov M.P. [Research and Simulation of Operation Modes of Hardware-Software Complex of Microclimate System Based on Programmable Microcontroller ATmega2560], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 596-605. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.596-605 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Mukhopadhyay S.C., Gupta G.S., Howarth J.W. Embedded microcontroller and sensors based front end loader control system, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2008, pp. 1509-1514.
5. Venediktov F.A., Golysheva, A.A. [Determination of implement positions using an incremental encoder and microcontroller], *Applied mathematics and computer science: modern research in the field of natural and technical sciences* [Applied Mathematics and Computer Science: Modern Research in the Field of Natural and Technical Sciences], 2018, vol. 2, pp. 55-58. (In Russ.)
6. Yershov R., Voytenko, V., Bychko, V. Software-based contact debouncing algorithm with programmable auto-repeat profile feature, *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2019, pp. 813-818.
7. McCarthy B., Adams G.G., McGruer N.E., Potter D. A dynamic model, including contact bounce, of an electrostatically actuated microswitch, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, vol. 11, no. 3, pp. 276-283. doi: 10.1109/JMEMS.2002.1007406.
8. Kondrat'ev N.O., Kuznecov K.A., Trubin V.G. [Information Input Device on the Basis of Mechanical Incremental Encoder EC11], *Avtomatika i programmaya inzheneriya* [Automation and software engineering], 2017, vol. 2, no. 20, pp. 39-45. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Aksenov O.I., Rybakov A.V. [Analysis of the possibilities of using amorphous microwires in magnetic impedance sensors intended for information-measuring and control systems], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2016, vol. 32, no. 2, pp. 98-11. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Zbrovskij V.D., Divin A.G., Ljubimova D.A., Konovalov V.I., Mofu Zh.K. [Development of a concept and prototype of an optical encoder based on the moire effect], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 383-389. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.383-389. (In Russ., abstract in Eng.)

Entwicklung eines Richtungsbestimmungssystems der auf Interrupt basierten inkrementellen Drehgeberrotationen bei Problemen mit Kontaktknall

Zusammenfassung: Eines der Hauptprobleme bei der Bestimmung der Drehung von inkrementellen Encoder ist das Auftreten von elektrischem Kontaktprellen, weshalb die Implementierung von Analysealgorithmen nicht auf der Grundlage von Interrupts, sondern auf der Grundlage ständiger Abfragen erfolgt, was zu einer ineffizienten Nutzung der Prozessorzeit führt. Zu diesem Problem war eine Studie durchgeführt, in deren Verlauf eine umfassende Hardware- und Softwarelösung in Form eines Rotationserkennungssystems entwickelt worden war, auch unter den Bedingungen des Verschleißes inkrementeller Encoder, der zum Auftreten von Kontaktprellen führt. Es sind ein grundlegender elektrischer Schaltplan eines universellen Hardware-Glättungsfilters zur teilweisen Unterdrückung von Störungen sowie ein asynchroner Algorithmus zur Rotationsanalyse basierend auf Interrupts zur effizienten Nutzung der Rechenressourcen des Steuergeräts vorgeschlagen.

Mise au point d'un système d'orientation de rotation du codeur incrémental sur à la base d'interruptions en cas de problème de cliquetis

Résumé: L'un des principaux problèmes rencontrés dans la détermination de la rotation des encodeurs incrémentiels est l'apparition d'un cliquetis de contact électrique, qui fait que les algorithmes d'analyse ne sont pas mis en œuvre sur à base d'interruptions, mais à la base d'une interrogation continue, ce qui entraîne une utilisation non efficace du temps processeur. Est menée une étude sur ce problème, au cours de laquelle une solution matérielle et logicielle complète est développée sous la forme d'un système de détection de rotation, y compris dans des conditions d'usure des encodeurs incrémentiels, entraînant l'apparition d'une perceuse sans contact. Est proposé le schéma de principe d'un filtre de lissage matériel universel pour la suppression partielle des interférences, ainsi qu'un algorithme asynchrone d'analyse de rotation basé sur les interruptions pour une utilisation efficace des ressources informatiques du dispositif de commande.

Авторы: *Пономарев Артур Анатольевич* – аспирант кафедры математического моделирования и информационных технологий; *Соловьев Денис Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий; *Соловьева Инна Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.