**Реферат**

На 28 с., 8 рисунков, 1 таблицы, 1 приложения

РОБОТОТЕХНИКА, МАНИПУЛЯТОР, БОРТОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ, ЭНКРЕМЕНТАЛЬНЫЙ ЭНКОДЕР, ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ, АППАРТАНЫЙ ТАЙМЕР STM32.

В данной работе представлено сравнение методов детектирования положения ротора шагового двигателя как непосредственно считывая значения с энкодера, так и эмуляция обратной связи внутренними инструментами микроконтроллера STM32F767ZI. Описанный метод эмуляции позволяет сократить необходимое количество периферии. Сравнение методов показывает, что каждый из них имеет как плюсы, так и минусы и может применяться в зависимости от поставленной задачи.

Так же в работе приводится сравнение математического описания траектории движения звеньев манипулятора и табличного метода задания управляющих скоростей Описанные методы построения траектории движения звеньев манипулятора позволяют генерировать необходимое управление на каждом такте дискретного управления.

Вывод

Предложенный метод потимизации решения задачи позволяет сократить использования

Введение

В рамках гранта Фонда содействия инновациям командой резидентов «ФАБЛаб Политех» был разработан телеуправляемый исследовательский катамаран «Кадет-М». Одной из полезных нагрузок катамарана, согласно техническому заданию, является манипулятор, предназначенный для сбора плавающих объектов с поверхности воды. Так же в конструкцию манипулятора была заложена возможность обслуживания и замены аккумуляторов на сигнальных буях.

Манипулятор предусматривает управление как в ручном режиме по скоростям, так и в программном по координатам с пульта корабля сопровождения. Для эргономичного управления движением манипулятора необходимо преобразовывать движение задающих рукояток на пульте управления в изменение декартовых координат рабочего инструмента манипулятора. Что приводит к необходимости преобразования декартовых координат захватного устройства в обобщенные координат манипулятора.

В рамках данной работы рассмотрены методы обстрой связи по положению для шаговых двигателей, а также методы построения траекторий звеньев.

# Отслеживание положения. Обратная связь по положению

## Отслеживание положений энкодеров

Для осуществления обратной связи по положению между микроконтроллером и шаговым двигателей применяются различные методы. Самый простой и надежный метод, это отслеживание сигналов энкодеров, подключенных к драйверу шаговых двигателей. Для реализации данного метода в микроконтроллерах STM32 предусмотрена опция таймеров для аппаратной обработки сигналов инкрементальных энкодеров. Для реализации данной опции необходимо для каждого двигателя выделить таймер, способный работать в энкодерном режиме, и дополнительно два вывода микроконтроллера, связанные с двумя каналами таймера. Обрабатывать сигнал энкодеров способны таймеры 1-5 и 8. На рисунке 3 представлена схема работы инкрементального энкодера, основанного на оптопарах.

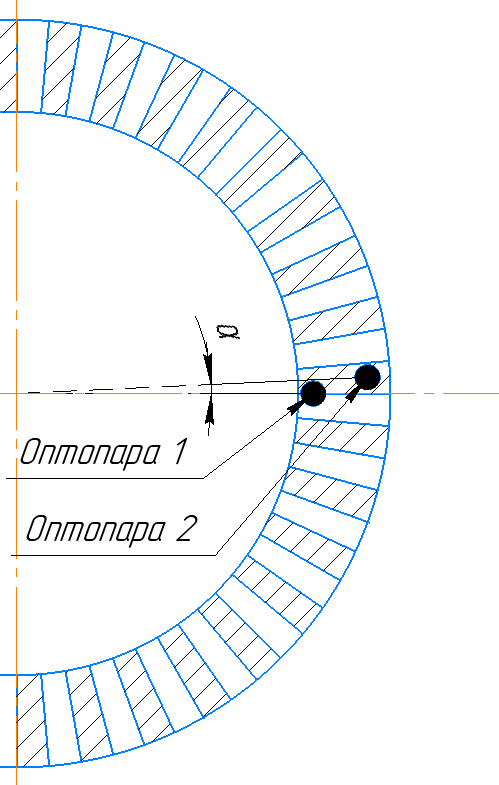


Рисунок – Схема инкрементального энкодера

ШД nema 23 компонуются энкодерами, изготовленными из прозрачных дисков. По диаметру данных дисков через одинаковое расстояние нанесены штрихи, которые не пропускают свет, на рисунке обозначены штриховкой. Количество штрихов определяет дискретизацию измерения положения энкодера такого типа. В работе рассматриваются энкодеры, дискретизация которых составляет 1000 шагов на оборот, или 0,36 градуса. Смещение одной оптопары на угол α, равный половине угла дискретизации позволяет устанавливать направление выражения вала двигателя. Принцип детектирования положения ротора показан на рисунке 4.

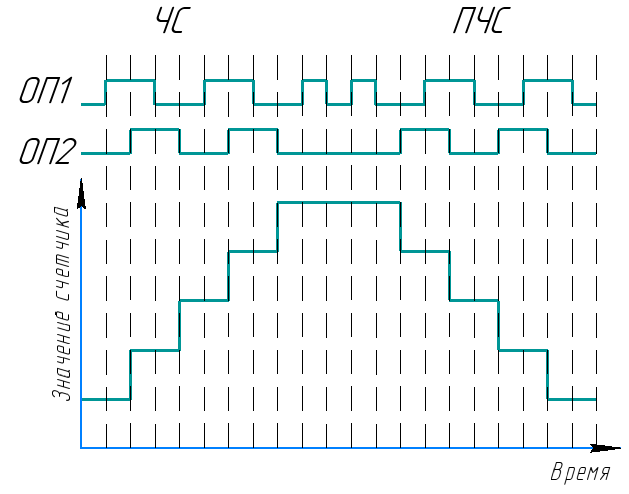


Рисунок – Принцип подсчета положения энкодера

На рисунке 4 ЧС и ПЧС обозначает вращение по часовой стрелке и против часовой стрелки соответственно. ОП1 и ОП2 обозначают соответственные оптопары. Благодаря запаздыванию либо опережению фронта сигнала ОП2 относительно сигнала ОП1 определяется направление вращения. Так как для изменения значения положения таймеру микроконтроллера необходимо детектировать 2 последовательных сигнала на двух выводах, то увеличение или уменьшение счетчика таймера происходит не на один, а на два. То есть один оборот шагового двигателя все равно соответствует 1000 шагам энкодера, дискретизация так же составит 0,36 градуса, но при полном обороте в регистре счетчика таймера будет находится значение 2000.

Данный метод имеет значительный минус в количестве дополнительно используемых выводов и таймеров микроконтроллера. При использовании данного метода для работы одного двигателя необходимо использовать 5 выводов микроконтроллера, 3 для управления: STEP, DIR, EN, а также 2 для обеспечения обратной связи. При этом необходимо задействовать 2 таймера, один для генерации ШИМ сигнала, и один для отслеживания положения инкрементального энкодера.

## Метод захвата сигнала таймера

Второй метод отслеживания положения представляет из себя уже не прямую, а косвенную обратную связь двигателя с микроконтроллером. Так как драйвер шагового двигателя обеспечивает своевременное коммутирование обмоток, и засчёт обратной связи драйвера и двигателя с энкодером обеспечивается отсутствие пропуска шагов и обработка управляющих команд в реальном времени, можно разделить линию обратной связи. Таким образом драйвер обрабатывает информацию, поступающую с энкодеров, а микроконтроллер обрабатывает ШИМ сигнал, генерируемый им же. Таймеры в микроконтроллерах STM32 могут работать не только в режиме генерации ШИМ сигнала, но и в режиме захвата сигнала. Таким образом можно отслеживать какое количество импульсов было послано на драйвер двигателя, соответственно на какое количество шагов повернулся вал двигателя. Для данного метода так же необходимо при каждом срабатывании прерывания на следящем таймере учитывать какой уровень задан на управляющем пине DIR, и в зависимости от него инкрементировать, либо декрементировать текущее положение двигателя. Для реализации представленного метода так же необходимо задействовать дополнительный таймер и дополнительный вход микроконтроллера. Стоит отметить, что некоторые таймеры 1-5 и 8 могут работать в подчинённом режиме, что позволяет назначить одному таймеру роль ведущего, а второму ведомого. Данная опция позволяет отслеживать сигналы внутри микроконтроллера не соединяя выводы.

Описанные выше два метода подразумевают использование дополнительного таймера для каждого шагового двигателя. Ниже в таблице 1 приведены возможности таймеров микроконтроллера STM32F767ZI.

Таблица – Возможности таймеров микроконтроллера STM32F767ZI

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер таймера | Энкодерный режим работы | Возможность работать в режиме ведущего/ведомого | Возможность захвата внешнего ШИМ | Количество внешних ШИМ каналов |
| 1 | + | + | + | 6 |
| 2 | + | + | + | 4 |
| 3 | + | + | + | 4 |
| 4 | + | + | + | 4 |
| 5 | + | + | + | 4 |
| 6 | - | - | - | 0 |
| 7 | - | - | - | 0 |
| 8 | + | + | + | 2 |
| 9 | - | - | + | 1 |
| 10 | - | - | - | 1 |
| 11 | - | - | - | 1 |
| 12 | - | - | - | 1 |
| 13 | - | - | - | 1 |
| 14 | - | - | - | 1 |

Как видно из таблицы 1, при использовании энкодерного метода для манипулятора, имеющего 6 степеней свободы, соответственно 6 шаговых двигателей необходимо будет задействовать все таймеры, имеющие внешние каналы, 1-5 и 8 для обработки энкодеров и 9-14 для генерации ШИМ сигнала. Что делает невозможным, так как необходимо также управлять захватным устройством.

Использование ведущих и ведомых таймеров невозможно, потому что только 6 таймеров обладают данной опцией, что дает возможность управления только тремя двигателями. Использование режима захвата приводит к тому же, что и энкодерный режим – необходимо задействовать все таймеры, имеющие внешние каналы.

## Интегральный метод вычисление положения

Вышеописанное приводит к необходимости использовать меньшее количество таймеров для отслеживания положения вала шагового двигателя. Предлагается применить один таймер, который по периодическому прерыванию будет вычислять текущее положение ротора двигателя путем дискретного интегрирования текущей скорости. Для реализации данного метода можно использовать один таймер, который даже может не иметь внешних выводов, что позволит значительно сократить использованную периферию. Схема алгоритма работы интегрального метода представлена на рисунке 5, программная реализация алгоритма на микроконтроллере STM32F767ZI представлена в приложении 1.

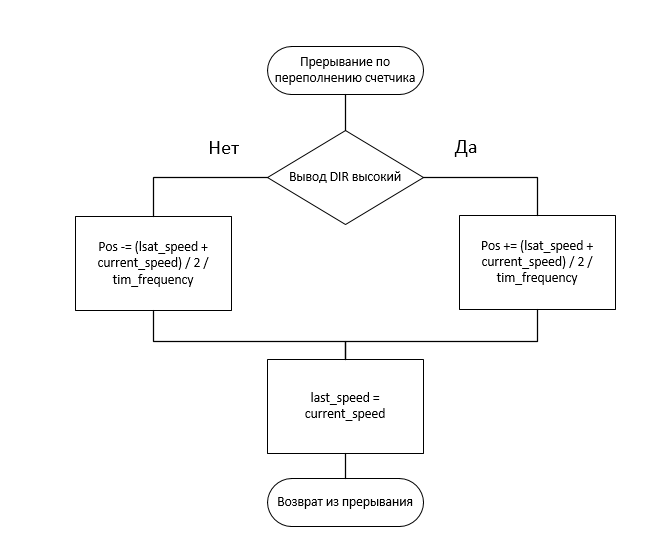


Рисунок – Алгоритм расчета положения

На рисунке 5 Pos – позиция ротора, last\_speed – скорость на прошлом срабатывании прерывания, current\_speed – текущая скорость, tim\_frequency – частота таймера, использующегося для вычисления положения. Вычисление положения ротора осуществляется по методу трапеций.

Точность определения положения ротора шагового двигателя интегрального метода зависит от частоты вызова интегрального прерывания, а также от характера изменения скорости. Для компенсации ухода расчетных значений от реальных в конструкции рассматриваемого манипулятора присутствую концевые датчики.

Управление серводвигателями происходит путем задания скважности ШИМ сигнала. Период ШИМ для всех серводвигателей должен быть одинаковым, а скважность задает угол поворота вала двигателя. Таким образом, для управления серводвигателями используется один аппаратный таймер с двумя каналами, позволяющий задавать разную скважность на двух выводах, при одинаковом периоде сигнала.

Система управления расположена на микроконтроллере STM32F767ZI. Управляющие сигналы для шаговых двигателей задаются ШИМ сигналом и направлением вращения.

# Сравнение методов вычисления положения

В рамках проделанной работы был проведен эксперимент для сравнения трех методов определения положения ротора шагового двигателя. Во время эксперимента движение ротора двигателя имело равномерный и ускоренный характер, что позволяет оценить погрешность вычисления положения по интегральному методу. В рамках эксперимента драйвер двигателя настроен на 2000 микрошагов на оборот ротора, что соответствует количеству шагов энкодера, считываемых таймером микроконтроллера за один оборот. Из-за особенностей аппаратной обработки энкодеров на STM32 каждый импульс считается 2 раза, соответственно дискретизация (d) положения ротора, считанная с энкодера, также составляет 2 шага, или 0,36 градуса, что видно из формулы 1

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Для оценки необходимой частоты срабатывания прерывания для вычисления положения по интегральному методу необходимо сравнить вычисленное значение положения ротора со значением, полученным путем обработки энекдеров, при разных частотах срабатывания прерывания.

Для оценки точности определения положения ротора на разных скоростных режимах, заданная скорость во время проведения эксперимента изменялась по закону синуса, так как исходя из общего решения обратной задачи кинематики для манипуляторов с шарнирными сочленениями при прямолинейном движении ЗУ скорость сочленения меняется также по закону синуса. Полученные в ходе эксперимента зависимости максимальной и медианной ошибки положения ротора от частоты срабатывания прерываний позволяют оценить необходимую частоту таймера, для генерации прерываний интегрального метода вычисления положения ротора шагового двигателя.

На рисунках 6 и 7 представлены график зависимости максимальной и медианной ошибок положения ротора от частоты срабатывания прерывания.

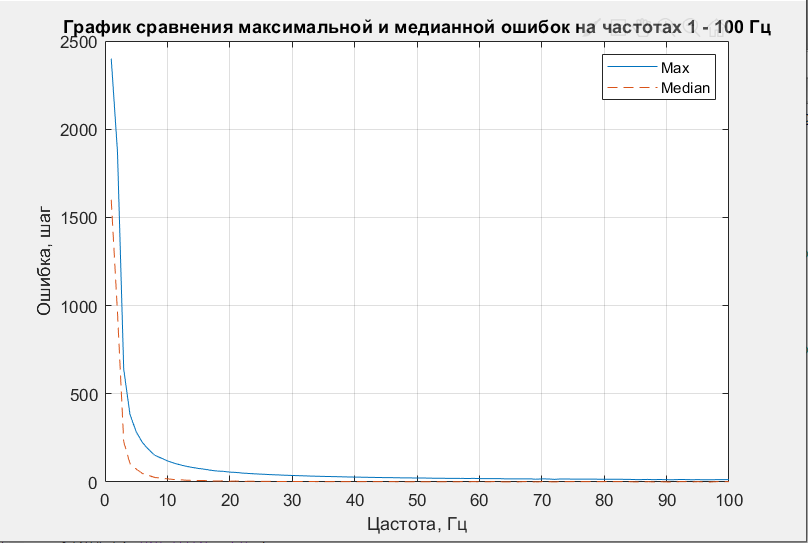


Рисунок – Зависимость ошибок в диапазоне 1 – 100 Гц

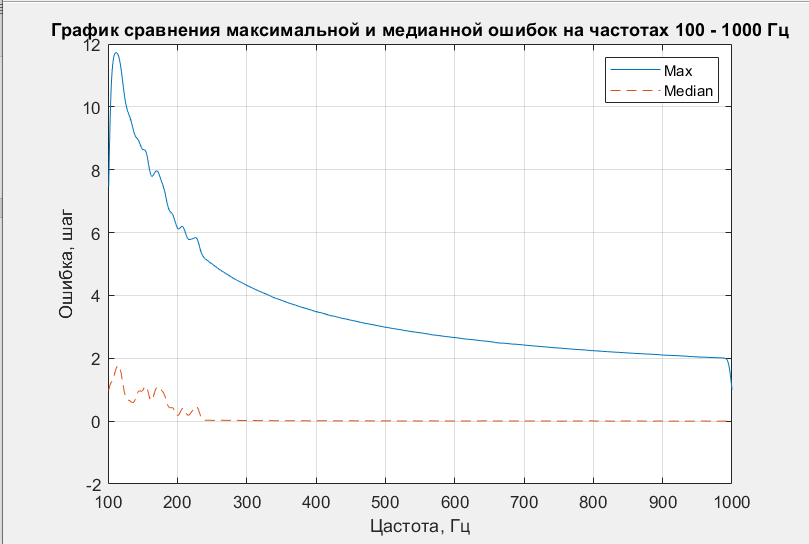


Рисунок - Зависимость ошибок в диапазоне 100 – 1000 Гц

Как видно из рисунка 6 при частоте 100 Гц медианная ошибка падает ниже размера дискретизации положения, а при частоте около 1000 Гц максимальная ошибка положения ротора также падает ниже размера дискретизации. Из чего можно сделать вывод, что минимально необходимая частота срабатывания прерывания составляет 100 Гц, но при такой частоте необходимо применять фильтры сглаживания выбросов. При использовании частоты в 1000 Гц полученные значения положения ротора будут максимально соответствовать реальным и необходимость в фильтрации пропадает.

Так же для оценки необходимой частоты срабатывания прерываний необходимо учесть время обработки одного прерывания, так как оно имеет наибольший приоритет, значит другие прерывания от других событий не смогут вступить в работу, до тех пор, пока не завершится интегральное прерывание. Также стоит учесть, что микроконтроллер с системой управления манипулятором на борте помимо вычисления положения должен выполнять большое число действий, таких как отправка и прием сообщений по UART и CAN, расчет целевых координат, предупреждение столкновений, изменение скорости вращения звеньев и так далее, что также требует задействовать ресурсы ядра микроконтроллера. Следовательно, если время обработки одного прерывания интегрального таймера будет велико, то для остальных задач у микроконтроллера не останется свободного вычислительного времени ядра. Согласно проведенным измерением время, необходимое на выполнение одного прерывания для интегрального таймера для расчёта положения четырех двигателей составляет 64мкс, при системной частоте ядра равной 96 МГц. Значит при частоте прерывания 1000 Гц время, затрачиваемое на выполнения интегрального прерывания, составляет 6,4% от общего вычислительного времени микроконтроллера. При необходимости частоту срабатывания интегральных прерываний допустимо снижать со 300 Гц, тогда медианная ошибка останется близкой к нулю, а выбросы текущей ошибки положения ротора до 4х шагов необходимо фильтровать применяя фильтр высоких частот, так как исходя из результатов эксперимента значение ошибки положения ротора, при низких частотах срабатывания прерывания, имеют высокочастотных характер изменения, причем на частотах более 40 Гц частота резкого изменения ошибки положения ротора совпадает с частотой срабатывания интегрального прерывания.

Список литературы

1. Guo, D., Ju, H., Yao, Y., Ling, F., & Li, T. (2009). Efficient Algorithms for the Kinematics and Path Planning of Manipulator. 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence.
2. Kondak, K., Huber, F., Schwarzbach, M., Laiacker, M., Sommer, D., Bejar, M., & Ollero, A. (2014). Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
3. From, P. J., Duindam, V., Pettersen, K. Y., Gravdahl, J. T., & Sastry, S. (2010). Singularity-free dynamic equations of vehicle–manipulator systems. Simulation Modelling Practice and Theory, 18(6), 712–731.
4. Wuthier, D., Kominiak, D., Kanellakis, C., Andrikopoulos, G., Fumagalli, M., Schipper, G., & Nikolakopoulos, G. (2016). On the design, modeling and control of a novel compact aerial manipulator. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED).
5. Love, L. J., Jansen, J. F., & Pin, F. G. (2004). On the modeling of robots operating on ships. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA ’04. 2004.
6. A revert of the clone armdroid 1 / Derek F. Stubbs. <http://www.theoldrobots.com/Teachmover.html> (20.11.2019)
7. AR2 Robot Documentation / Chris Annin. <https://www.anninrobotics.com> (20.11.2019)
8. <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning/> , 20.11.2019
9. Шахинпур М. Курс робототехники / Шахинпур М. Пер с англ – М. Мир, 1990 – 572 с, ил.
10. Иванов М.Н. Детали машин / Иванов М.Н., Финогенов В.А. – Высшая школа, 2008 – 480 с, ил
11. Matlab Robotic System Toolbox User`s Guide, 2019 – 294 с.
12. https://github.com/auralius/my-matlab-robotics-toolbox / 20.11.2019