**Проектирование системы управления электродвигателями в наноспутнике**

***Бунаков Егор Вадимович***

Московский физико-технический институт

**Введение:**

Установка положения спутника в пространстве осуществляется с помощью электродвигателей, снабженных маховиками. В докладе рассмотрены основные моменты по проектированию печатной платы, обеспечивающей вращение двигателя, и написанию программного обеспечения, реализующего управление электродвигателем.

**Печатная плата:**

Основным требованием к печатной плате является ее электромагнитная совместимость (ЭМС). Так как размеры наноспутника малы, а электродвигатели являются одним из основных источников электромагнитных помех, то ЭМС данного звена спутника особо важна. Поэтому расположение печатной платы, управляющей электродвигателями, внутри спутника, должно быть выбрано так, чтобы возникающие помехи не оказывали влияния на другие элементы аппарата. Отсюда возникает решение закрепить печатную плату на электродвигателе.

При проектировании наноспутника, нами было принято решение о проектировании отдельной печатной платы, не крепящейся к корпусу электродвигателя. В наностпутнике расположено четыре электродвигателя, печатная плата представляет собой четыре одинаковых блока, каждый из которых управляет своим двигателем. Далее речь будет идти об одном из таких блоков, разведенном на специальной одноканальной макетной плате.

Одноканальную плату можно разбить на несколько блоков: датчики обратной связи, силовая часть, интерфейсы связи с другими устройствами (для удобства программирования платы), вычислительная часть. Все они представлены на рисунке 1.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1 – Блок-схема печатной платы |

**Питание:**

Питание платы определяется электродвигателем. Под питание на плате выделен отдельный слой, он разделен на 3 полигона, с напряжениями 5V0, 3V3, 7\_12V0 (рисунок 2). Еще один полигон питания 3V0, необходим как опорное напряжение для измерителей тока, протекающего в катушках электродвигателя. Для уменьшения наводок от других полигонов питания, он размещен на верхнем сигнальном слое (рисунок 3).

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2 – Слой питания одноканальной платы |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3 – Верхний сигнальный слой c выделенным полигоном питания 3V0 |

**Датчики обратной связи:**

Для реализации векторного управления (field-oriented control - FOC) необходимо иметь обратную связь от электродвигателя, чтобы в каждый момент времени было возможным определить угловое положение ротора и его скорость. Внутри двигателя вмонтированы датчики Холла, они бывают цифровыми и аналоговыми. В электродвигателях, находящихся в нашем наноспутнике, вмонтированы цифровые датчики Холла, поэтому данные с них приходят сразу на GPIO вход микроконтроллера. Также необходимо измерять ток в обмотках статора электродвигателя, для этого на плате расположены три усилителя измеряемого напряжения. Внутренний АЦП микроконтроллера обрабатывает данные с усилителей сигнала.

**Силовая часть:**

Двигатель имеет три вывода (три фазы) на которые в разные моменты времени подается “+” или “-” питания. Это реализуется с помощью электронных ключей, включенных по мостовой схеме, представленной на рисунке 4.

|  |
| --- |
| brushless3_1 |
| Рисунок 4 –Мостовая схема ключей |

Мостовая схема может быть реализована с помощью МОП-транзисторов. Выбор силовых транзисторов делается на основании данных о максимальном возможном токе и напряжении питающей сети двигателя. С другой стороны, при проектировании силовой части можно использовать драйверы электродвигателей, которые содержат внутри себя мостовой каскад. Примером такой микросхемы является драйвер STSPIN830 от компании STmicroelectronics. Использование подобных микросхем позволяется уменьшить размер печатаной платы и количество компонентов на ней.

**Внешние интерфейсы**:

При разработке программного обеспечения требуется обратная связь от микроконтроллера, для проверки корректности работы прошивки. Поэтому на плате предусмотрен преобразователь USB-UART, а также связь по интерфейсу CAN.

**Вычислительная часть:**

Вычислительная часть платы состоит из микроконтроллера STM32L496RG и микросхемы памяти MR25H40VDF. Данная серия микроконтроллера от STmicroelectronics зачастую используется во встраиваемых спутниковых устройствах, так как имеет низкое энергопотребление. При исполнении функций калибровки во внешнюю MRAM память сохраняются коэффициенты ПИД регуляторов. При программировании микроконтроллера stm32 использовалась среда программирования Keil uVision5 и генератор кода CubeMX.

**Программное обеспечение:**

Спроектированное аппаратное решение позволяет реализовать три различных алгоритма управления электродвигателем.

Первый алгоритм управления можно назвать PMSM Сontrol. Данный алгоритм является более простым, чем векторное управление и требует меньше вычислений “на ходу”. В отличии от FOC, где по известному угловому положению ротора в каждый момент времени устанавливается нужное положение вектора магнитного поля статора, в алгоритме управления PMSM Control, вектор магнитного поля статора постоянно вращается. Причем скорость его вращения полностью определяется скоростью вращения ротора. Электродвигатель возбуждается синусоидальными токами, иначе говоря график зависимости разности напряжений между фазами от времени является синусоидой. Для этого на каждой фазе двигателя возбуждается напряжение, зависимость от времени которого представлена на рисунке 5. Данная форма зависимости напряжения на каждой из фаз позволяет увеличить максимальную амплитуду разности напряжений между фазами электродвигателя, что безусловно приводит к увеличению КПД.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 5 – генерация синусоидальной волны |

Так как напряжение питания является постоянным, то для генерации определенного уровня напряжения используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Для каждой из трех фаз существует таблица со значениями скважности ШИМ для прохождения 360 электрических градусов вектора статора. У такого подхода есть два преимущества:

1)максимальная амплитуда генерируемого напряжения выше, чем при генерации чистой синусоиды на каждой фазе. Как следствие получается более высокий момент и угловая скорость.

2)каждый вывод двигателя треть времени подключен к "земле", что сокращает потери мощности на коммутацию.

При данном методе регулирования токи в фазах двигателя не измеряются, используется только обратная связь по датчикам Холла. Происходит подстройка скорости вращения вектора статора в зависимости от реальной скорости вращения ротора, также при срабатывании цифрового датчика Холла, происходит сравнение текущего углового положения ротора и положение вектора статора, в зависимости от скорости вращения, настраивается угол опережения статора от ротора. Данный алгоритм управления синусоидальными токами подходит как для PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) двигателей, так и для BLDC (Brushless Direct Current).

Вторым более сложным алгоритмом управления является классическое векторное регулирование для PMSM двигателей или управление коммутацией по датчику положения ротора для BLDC двигателей, подробно данные алгоритмы описаны в источнике [2].

Современные среды разработки алгоритмов управления содержат в себе готовые модели с реализованным векторным управлением электродвигателей. Одной из таких сред динамического моделирования является SimInTech. С помощью данного ПО можно реализовать алгоритм управления из готовых блоков, протестировать его на смоделированном электродвигателе с заданными параметрами, сгенерировать Си код под микроконтроллер STM32. Далее вместо смоделированного электродвигателя выступает реальный двигатель, алгоритм выполняется на спроектированной плате, а органом управления является ПК, на котором отображаются все показания системы. Данный подход, по нашему мнению, является самым интересным в реализации и позволяет полностью изучить возможности электродвигателя.

**Литература:**1)Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering.

2)Ю.Н.Калачев. "SIMINTECH: основы регулируемого электропривода - антиучебник".

3)[AVR447: Sinusoidal driving of 3-phase permanent magnet motor using ATmega48/88/168 (microchip.com)](https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ApplicationNotes/ApplicationNotes/doc8010.pdf).