УДК 681.5

**СИСТЕМА БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ ПРИВОДОМ**

*В.О. Гончаров, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян\*, А.В. Четвертухин,*

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,*

*ja-nikita@mail.ru*

В Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова ведётся совместная разработка системы мониторинга и диагностики устройств исполнительной автоматики космических платформ связи. ПНИЭР выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы, соглашение от 26.09.2017 г. № 14.577.21.0270, уникальный идентификатор работ RFMEF157717X0270. Индустриальным партнером является АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва.

Устройства исполнительной автоматики, предназначенные для работы в космическом пространстве, имеют ряд специфических особенностей в эксплуатации и обслуживании. Была поставлена задача разработать прецизионную систему, позволяющую использовать двигатель в безвоздушном пространстве. В ходе реализации данной задачи была разработана система бездатчикового управления вентильным приводом, позволяющая осуществлять запуск вентильного двигателя и частотное регулирование приводом, не оснащенным датчиками положения угла ротора.

В состав разрабатываемого вентильного привода входит трехфазный двигатель переменного тока и система регулирования [1]. Вентильный привод обладает наиболее подходящим характеристиками, учитывая особенности эксплуатации данной системы — щеточно-коллекторный узел заменен на электронные ключи, что позволяет снизить массогабаритные характеристики двигателя, уменьшить потери на коммутацию обмоток двигателя и повысить надежность привода, что немаловажно, учитывая агрессивную среду использования и обслуживания данной системы. Данный тип двигателя позволяет обеспечить наилучшие показатели КПД и мощности на килограмм собственного веса, широкий диапазон регулирования скоростей, а также имеет минимальные пульсации вращающего момента – это позволяет использовать его для создания прецизионной системы.

В вентильных двигателях переменного тока ротор синхронно вращается за вращающимся полем статора [2]. Для этого необходимо управлять вращением поля статора путем переключения фазных обмоток статора. Вектор магнитного поля статора должен быть ортогонален вектору магнитного поля ротора. Для определения угла положения магнитного поля ротора относительно поля статора обычно используются датчики положения угла ротора, однако в условиях космической среды использование датчиков нецелесообразно, так как увеличивается вероятность отказа системы, что недопустимо, в связи с трудностью обслуживания системы. Именно поэтому применяется технология бездатчикового управления вентильным приводом. Для поддержания взаимного расположения векторов магнитных потоков статора и ротора микроконтроллер системы управления с помощью аналого-цифровых преобразователей получает значение напряжения в неподключенной фазе ротора и, исходя из этих данных, система управления формирует сигналы управления ключами, с помощью которых регулирует напряжение на обмотках фаз двигателя.

Рассмотрим принцип бездатчикового управления вентильным приводом [2]. В каждый момент времени к двум фазам обмотки статора подводится питание, одновременно с этим третья фаза отключена от питания и во время вращения статора, в ней наводится ЭДС. Напряжение в обмотках статора сдвинуты друг относительно друга на 120˚ (рисунок 1). Пусть фазы двигателя называются U, V, W. С изменением угла положения магнитного поля ротора напряжение в свободной фазе изменяется.

Полный оборот ротора можно разбить на 6 одинаковых периодов (P1-P6). В первый период P1 на обмотку U подается отрицательное напряжение, на обмотку V – положительное. При этом от фазы W питание отключено, но видно, что напряжение в ней начинает расти. В середине периода P1 напряжение на фазе W пересекает нулевую точку – половину напряжения между фазами U и V. В этот момент необходимо переключить питание обмоток двигателя и на этапе P2 отслеживать напряжение на фазе V.

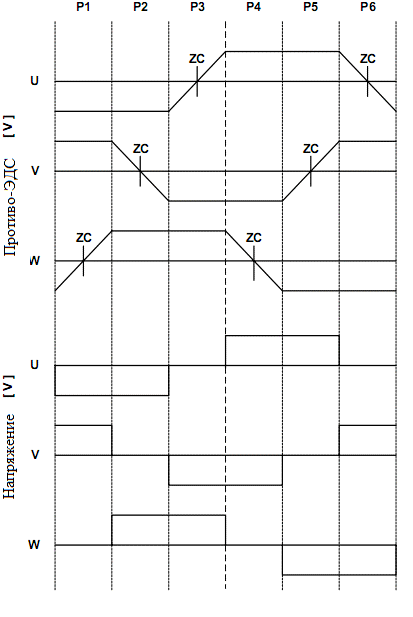


Рисунок 1 – Алгоритм коммутации обмоток

Можно считывать напряжение в свободной фазе с помощью аналого-цифрового преобразователя (далее АЦП), однако АЦП имеет задержку в обработке сигналов, что снижает качество системы [3]. Чтобы избежать данной проблемы напряжение в свободной фазе сравнивается с опорным напряжением и при достижении порогового значения происходит переключение питания обмоток статора. В качестве опорного напряжения используется виртуальная средняя точка, а блоком сравнения выступает операционный усилитель, работающий как компаратор. При достижении напряжения в свободной фазе порогового значения компаратор генерирует прерывание на микроконтроллер, который управляет переключением питания обмоток.

Управлять вентильным приводом можно как ступенчатыми, так и синусоидальными сигналами [4]. Управление синусоидальными переменным токами предпочтительнее, так как позволяет обеспечить плавность вращения магнитного потока статора и, как следствие, избежать рывков в движении ротора. Для управления двигателем используется микроконтроллер, генерирующий трехфазную синусоиду с регулируемой амплитудой и частотой. Для управления необходимо генерировать независимое напряжение для каждой фазы двигателя. Это делается с помощью трех полумостов, каждый их которых состоит из двух ключей – верхнего и нижнего. Роль ключей исполняют полевые транзисторы. Управляющее напряжение получаем при помощи широтно-импульсной модуляции (далее ШИМ). Изменяя скважность ШИМ сигнала, получаем требуемую величину управляющего напряжение и синусоидальную форму. Принцип генерации ШИМ сигнала показан на рисунке 2.

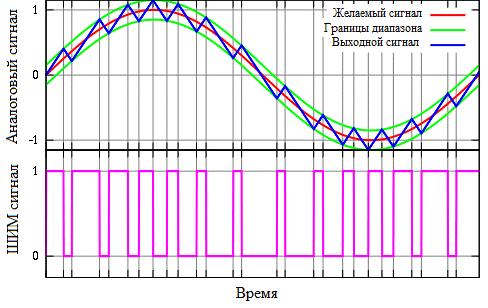


Рисунок 2 – Генерирование управляющего ШИМ сигнала.

В данной системе при генерировании не используется фильтр низких частот так как индуктивность и сопротивление обмоток фаз двигателя имитируют RL-фильтр, механическая инерция и нагрузка создают «механический» фильтр нижних частот. Помимо этого, при использовании RC-фильтра происходит большая потеря мощности.

На рисунке 1 видно, что переключение питания происходит с задержкой. Сначала выключается открытый ключ, и только после его закрытия необходимо открывать нижний ключ. Эта бестоковая задержка учитывается в аппаратном блоке микроконтроллера, генерирующего ШИМ сигнал — таймере. Напряжение на свободной фазе может как увеличиваться, так и уменьшаться относительно средней точки, поэтому микроконтроллер должен запоминать, на каком этапе от P1 до P6 в данный момент осуществляется работа и переключать соответствующие обмотки, исходя из времени вычисленных между событиями ZC. Принцип переключения обмоток фаз двигателя описан в таблице 1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Этап | Питание + | Питание – | Открытые ключи | Измерения на фазе |
| P1 | V | U | SW1, SW5 | W↑ |
| P2 | W | U | SW3, SW5 | V↓ |
| P3 | W | V | SW3, SW4 | U↑ |
| P4 | U | V | SW2, SW4 | W↓ |
| P5 | U | W | SW2, SW6 | V↑ |
| P6 | V | W | SW1, SW6 | U↓ |

Таблица 1 – Принцип питания обмоток фаз статора вентильного привода

Так же необходимо отслеживать, чтобы частота определения положения ротора, измерения тока и напряжения не совпадали с частотой ШИМ сигнала. Если эти частоты совпадают, то между моментами переключения ключей проходит ровно один ШИМ сигнал, это опасно в случае возрастания скорости вращения ротора, так как частота коммутации превысит частоту ШИМ и управляющий сигнал будет удерживать ключи открытыми дольше необходимого промежутка времени и противодействовать вращению. Поэтому в данной системе частота ШИМ в несколько раз превышает частоту коммутации обмоток.

Серьезным вопросом является момент старта вентильного привода и управление двигателем на малых оборотах, так как на малых скоростях в свободной фазе не наводится ЭДС или её приращение слишком мало для достоверного определения угла положения ротора [5]. Поэтому, для определения угла положения ротора используется метод, суть которого в том, что в разных положениях ротора магниты по-разному воздействуют своим магнитным полем на зубцы статора, то есть, магнитное насыщение зубьев статора будет различно при разных положениях магнитов ротора.

Чтобы определить уровень насыщения на обмотки статора, подают импульс напряжения на одну из фаз и замеряют импульс напряжения на средней точке. Сравнив результаты измерений после подачи импульсов на разные фазы, можно оценить положение ротора. Предлагаемый подход нуждается только в информации об изменении индуктивности двигателя и не требует знаний каких-либо параметров двигателя. Основная идея заключается в том, чтобы использовать двигатель как часть измерительного моста. Другой частью моста является резистивный делитель, который подключают к источнику питания двигателя (рисунок 3).

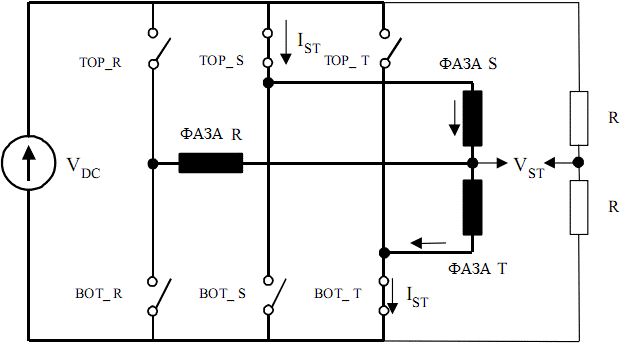


Рисунок 3 – Схема определения начального угла положения ротора.

Условно, положение магнитов ротора изменяет индуктивность обмоток статора. Напряжение Vst на резистивном делителе растет не скачкообразно, следовательно, можно замерить время, за которое напряжение достигнет предельного значения, или измерять напряжение через фиксированный отрезок времени после подачи импульсов. Измеренные время или напряжение будут изменяться. На основании измерений можно сделать вывод, в каком положении находится ротор относительно статора.

На обмотки статора последовательно подаются 6 импульсов (таблица 2), которые соответствуют 6 положениям ключей и измеряется напряжение средней точки.

Таблица 2 – Подача импульсов для определения положения ротора

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Vrs | top\_r | bot\_s |
| Vrt | top\_r | bot\_t |
| Vst | top\_s | bot\_t |
| Vsr | top\_s | bot\_r |
| Vtr | top\_t | bot\_r |
| Vts | top\_t | bot\_s |

На рисунке 4 приведены формы сигналов напряжения и тока средней точки при проведении измерений.

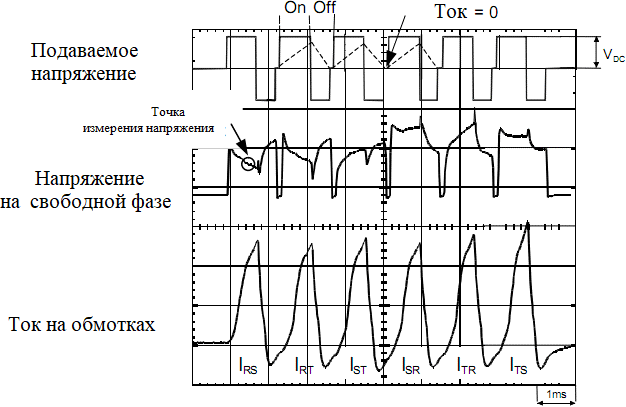


Рисунок 4 – Форма сигналов напряжения и тока средней точки

Для достоверного измерения требуется следующее:

• амплитуда фазного тока должна быть в диапазоне номинального тока;  
• длина импульсов должна быть как можно короче, чтобы избежать любого движения ротора;  
• следующий импульс должен быть подан после того, как напряжение средней точки упадет до нуля, чтобы избежать воздействий вызванных подачей предыдущего импульса.

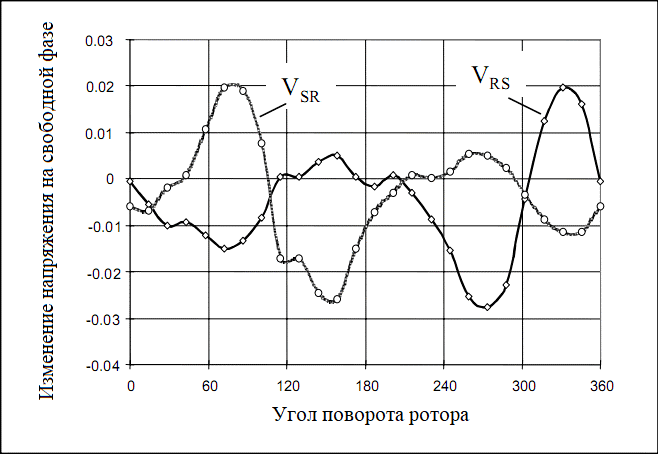


Рисунок 5 – Графики напряжений снимаемы при подачке различных импульсов

Как можно видеть на рисунке 5 - трудно определить положение ротора по форме кривых. Потребуется некоторые дополнительные операции с данными. Потребуются значения: **[f1](http://www.avislab.com/blog/wp-content/uploads/2013/11/f1.png)**

где **Vrs** – напряжения, во время импульса, когда напряжение подается от источника питания к фазе **R**, в то время как фаза **S** подключена к земле. По аналогии и остальные значения. Распределение этих значений показано на рисунке 5.

Из рисунка 6 видно, что, применяя простые логические функции можно определить положение ротора в пределах 180 электрических градусов. Эти функции приведены в таблице 3.

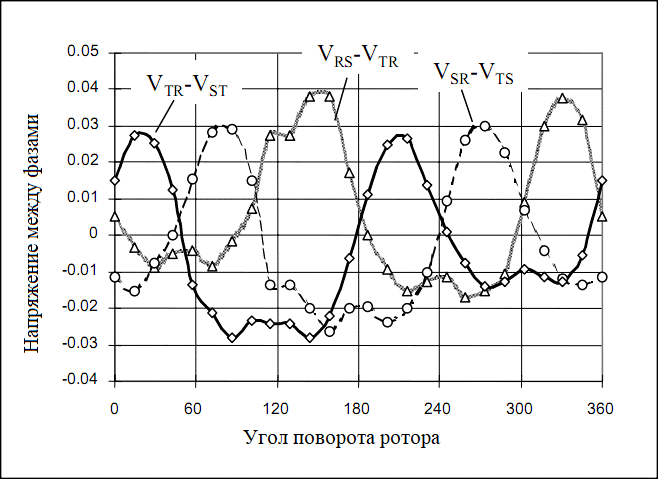
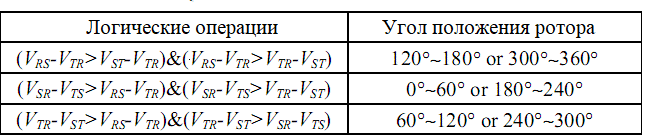


Рисунок 6 – Графическое определение угла положения ротора

Таблица 3 – Логические функции угла определения ротора



Результатом этого логического анализа является обнаружение двух сегментов в 60°, один из которых соответствует фактическому положению ротора. Для того, чтобы определить какой один из двух правильный применим второй алгоритм. Функции:

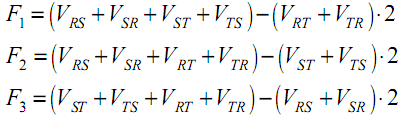
[](http://www.avislab.com/blog/wp-content/uploads/2013/11/f2.png)

Рисунок 7 показывает результаты функций F1, F2 и F3 соответствующие положению ротора.

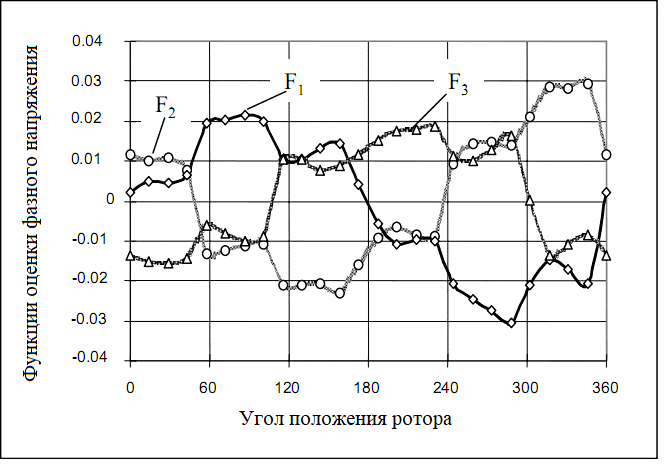


Рисунок 7 – Результаты функций F1, F2, F3

Эти графики являются периодическими функциями с периодом в 360 электрических градусов и с разностью фаз в 120 ° между соседними кривыми. Поэтому эти функции могут интерпретироваться как сигналы “виртуального датчика Холла” аналогично датчику Холла в [вентильных двигателях с датчиками](http://www.avislab.com/blog/brushless03/). Таблица 4 показывает метод определения положения ротора исходя из значений ранее приведённых функций.

Таблица 4 -



Таким образом, была разработан система бездатчикового управления вентильным приводом, позволяющая осуществлять запуск привода с нагрузкой и скоростное регулирование. Система позволяет использовать устройство в агрессивных и труднодоступных средах.

Список использованной литературы:

1. С. В. Рисованый В. Б. Финкельштейн ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Монография. – Х.: ХНУГХ, 2014. – 245 с.

# Дианов А.Н. Разработка и исследование системы бездатчикового управления вентильным вигателем.- Москва.: Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 : Москва, 2004 200 c.

1. Peter Vas. Sensorless vector and direct torque control.- Oxford, UK.: Oxford University Press, 1998.
2. Acarnley P.P., Watson J.F. Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines// IEEE Trans. Ind. Electron. - Vol. 53, No.2, P. 352-362, Apr. 2006.
3. **Sensorless Detection of Rotor Position of PMBL Motor** at Stand Still Авторы: Roustiam Chakirov, Yuriy Vagapov, and Andreas Gaede. WCECS 2007, October 24-26, 2007, San Francisco, USA.