

РЕЗЕРВИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ДЛЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

Н. С. Дятлов✉, Д. Н. Глазкин, К. В. Ануфрейчик,
И. В. Чулков, А. С. Буторкин, А. В. Семенов, А. В. Никифоров

Институт космических исследований РАН,
г. Москва, Российская Федерация

Вентильные двигатели (в англоязычной литературе – «BLDC motors») широко применяются в научной аппаратуре космического назначения. Для управления двигателями такого типа требуется создание сложно-функциональной системы управления, учитывающей как базовые технические требования, так и требования к надежности с учетом ее применения в условиях космического пространства. В статье сформулированы требования к характеристикам, которыми должна обладать система управления вентильными двигателями и определены дополнительные требования к надежности системы. При этом в качестве алгоритма для приведенной системы был выбран алгоритм блочной коммутации, реализация которого не требует высокой вычислительной мощности и точных датчиков положения ротора. На основе сформулированных задач и выбранного алгоритма представлена структурная схема системы управления, учитывающая необходимость холодного резервирования для выполнения требований к надежности. Далее рассмотрены конкретные схемотехнические решения для выходных каскадов, позволяющие подключать один набор двигателей и датчиков Холла к обоим полукомплектам системы управления. Для апробации структурных и схемотехнических решений был разработан и изготовлен макет. Проведена успешная проверка работоспособности макета и, соответственно, приведенных решений.

Ключевые слова: аппаратура космического аппарата, комплекс научной аппаратуры, вентильный двигатель, система управления двигателями, блочная коммутация, датчик Холла, синхронный бесколлекторный двигатель постоянного тока, радиационная стойкость.

Введение

В аппаратуре космического назначения для управления движением механизмов используются двигатели различных типов. В частности, большой популярностью пользуются вентильные двигатели (или синхронные бесколлекторные двигатели постоянного тока) [1] в связи с хорошими динамическими характеристиками, высоким крутящим моментом и отсутствием щеточно-коллекторного узла, который имеет малый ресурс [2].

В научных космических комплексах такие двигатели используются для поворота приборов [3] или их подвижных частей, для управления движением планетоходов [4], управления буровыми устройствами [5] и манипуляторами [6].

Управление вентильными двигателями, в отличие от двигателей с коллекторным узлом, осу-

ществляется электронной системой, коммутирующей питание на обмотки статора таким образом, чтобы создавать вращающееся магнитное поле. Статор, как правило, имеет 3 обмотки, при этом обмотки соединены по схеме «звезда» и центральная точка не выведена (рис. 1). Управление именно таким типом двигателей будет рассмотрено в статье.

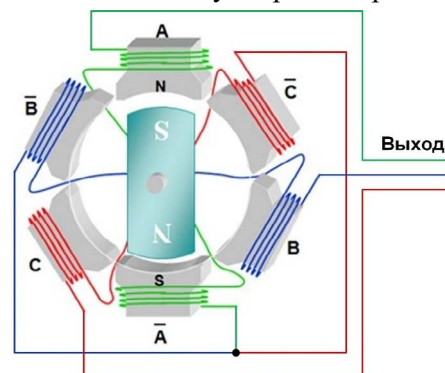


Рис. 1. Подключение обмоток вентильного двигателя

✉ nsdiatlov@gmail.com

1. Методы управления вентильными двигателями

Существует 3 основных метода управления вентильными двигателями, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [7; 8].

Блочная коммутация

В каждый момент времени с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) формируется постоянный уровень тока, который подается через две обмотки из трех. С помощью изменения полярности и перебора активных пар обмоток создается магнитное поле, вращающееся с шагом 60° (6 фаз на один оборот). При этом для устойчивого вращения вектор магнитного поля должен всегда «опережать» вектор магнитного поля ротора, поэтому системе управления требуется обратная связь по положению ротора. Для этого используются датчики Холла, которые выдают логический сигнал, соответствующий положению ротора, либо производится измерение противо-ЭДС на незапитанной обмотке (с невозможностью работать на низких скоростях) [7].

Достоинства:

- простота реализации. Возможно управление без дополнительных датчиков, что повышает надежность;
- не требуется высокая вычислительная мощность.

Недостатки:

- колебания крутящего момента $\sim 14\%$ [9];
- не самый высокий КПД.

Синусоидальное управление

На обмотки с помощью ШИМ подаются синусоидальные сигналы тока, сдвинутые относительно друг друга на 120° , что создает непрерывно вращающееся магнитное поле. При этом для устойчивого вращения вектор созданного магнитного поля должен всегда «опережать» вектор магнитного поля ротора на 90° , поэтому системе управления требуется точная обратная связь по положению ротора. Таким датчиком, как правило, является энкодер, который, также как и датчики Холла, выдает логический сигнал, соответствующий положению ротора, но имеет существенно более высокое разрешение [7].

Достоинства:

- отсутствуют колебания крутящего момента;
- реализация проще, чем для векторного управления;
- максимальный КПД.

Недостатки:

- для эффективной реализации требуется точное определение положения ротора двигателя, например, с помощью энкодера. Возможно определение положения ротора бездатчиковым ме-

тодом, однако, использовать двигатель на малых скоростях будет невозможно.

Векторное управление

На обмотки также подаются модулированные синусоидальные сигналы тока, однако в данном методе контролируется не только ортогональность вектора созданного магнитного поля к магнитному полю ротора, но и величина этого вектора, которая соответствует крутящему моменту. Требуется точное определение положения ротора, а также измерение токов обмоток двигателя [7].

Достоинства:

- отсутствуют колебания крутящего момента. При этом его можно контролировать и задавать;
- высокий динамический диапазон скорости;
- максимальный КПД.

Недостатки:

- для эффективной реализации требуется точное определение положения ротора двигателя, например, с помощью энкодера. Возможно определение положения ротора бездатчиковым методом, однако, использовать двигатель на малых скоростях будет невозможно;
- высокая сложность алгоритма. Требуется производительный микроконтроллер и измерение токов на обмотках.

С учетом перечисленных достоинств и недостатков для применений, не требующих большой плавности движения и прецизионности задания момента, но при этом требующих максимально высокую надежность и простоту реализации, больше всего подходит метод блочной коммутации. Для систем с более строгими механическими требованиями, но допускающими усложнение системы, наиболее подходит векторное управление.

2. Требования к резервированной системе управления вентильными двигателями для подвижных механизмов научной аппаратуры

Для множества задач управления вентильными двигателями в научной аппаратуре, таких как управление манипуляторами, буровыми устройствами или перемещением планетоходов, ключевым параметром системы является ее надежность – при этом небольшие колебания крутящего момента во многих случаях не являются критичными. Поэтому в качестве основного решения, которое рассматривается в данной статье, был выбран алгоритм блочной коммутации, не требующий точного определения положения ротора (и соответствующих датчиков), а также большой вычислительной мощности или точности измерений. С учетом выбора были сформулированы общие требования к системе

управления вентильными двигателями для подвижных механизмов научной аппаратуры:

- номинальное напряжение – от 6 до 50 В;
- мощность двигателей – до 120 Вт;
- номинальный ток фазы – до 10 А;
- способ задания тока в обмотках – ШИМ.

Частота ШИМ, как правило, лежит в пределах от 10 кГц до 500 кГц (в зависимости от постоянной времени обмоток двигателя);

- минимизация пикового потребления за счет плавного разгона двигателей;
- в системе управления задается скорость вращения двигателей;
- должны использоваться радиационно-стойкие электрорадиоизделия (ЭРИ) отечественного производства (ОП).

Во многих случаях система управления двигателями является критически важной для функционирования множества приборов [5]. По этой причине она должна быть стойкой к единичному отказу, что обеспечивается холодным резервированием системы. При этом ввиду того, что не всегда имеется возможность резервировать также и двигатели, оба полукомплекта должны иметь возможность управлять одним набором двигателей (с датчиками Холла). С учетом этого были сформулированы требования по обеспечению надежности системы:

- должно быть реализовано два полукомплекта системы управления. Неактивный полукомплект находится в холодном резерве (выключен);
- оба полукомплекта должны иметь возможность подключаться к одному набору двигателей и датчиков Холла;

• при работе системы управления должна быть исключена запитка неактивного полукомплекта;

• при любом единичном отказе в системе управления основного полукомплекта (в том числе при отказе компонентов выходного каскада) должна быть возможность работы от резервного полукомплекта и наоборот;

• при отказе датчиков Холла система управления должна перейти на управление соответствующим двигателем по «бездатчиковой» схеме;

• единичный сбой и отказ в системе управления не должен приводить к перегрузке и выходу из строя двигателей;

• при нештатном отключении системы управления должна быть сохранена информация о текущем положении подвижных систем.

3. Реализация резервированной системы управления вентильными двигателями

Общий алгоритм управления вентильными двигателями при задании скорости с учетом схемы плавного пуска представлен на рис. 2.

Постоянное напряжение питания системы коммутируется на активную обмотку с определенной частотой и коэффициентом заполнения. Чем больше коэффициент, тем большее время напряжение подается на обмотку и тем выше ток обмотки, а значит выше крутящий момент и достигнутая скорость вращения. Поэтому в алгоритме регулировки скорости основной переменной является коэффициент заполнения.

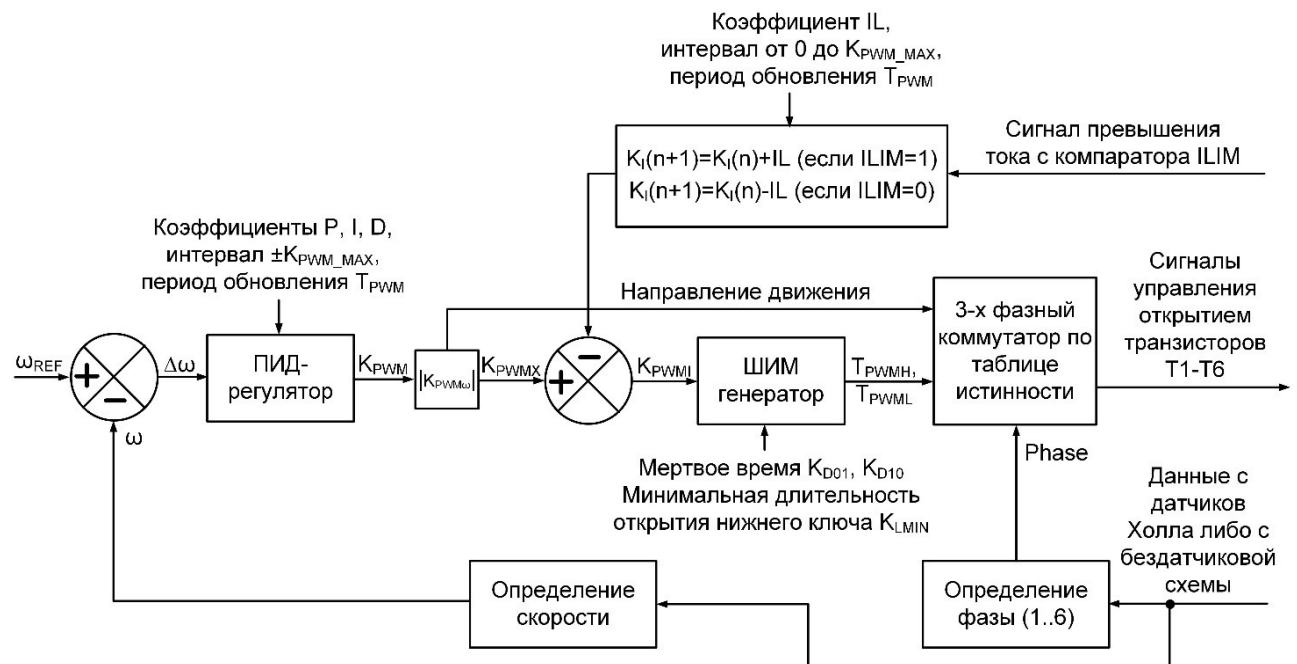


Рис. 2. Алгоритм управления скоростью с учетом схемы плавного пуска

В основе алгоритма лежит ПИД-регулятор, который в зависимости от сигнала ошибки скорости $\Delta\omega$ периодически корректирует коэффициент заполнения K_{PWM} . В зависимости от полученного знака коэффициента коммутатору задается направление вращения двигателя, а для дальнейших расчетов используется модуль коэффициента заполнения. Далее из полученного результата вычитается токоограничивающий коэффициент, который итеративно увеличивается при поступлении сигнала превышения тока заданного уровня. При отсутствии сигнала превышения тока токоограничивающий коэффициент равен нулю.

По полученному коэффициенту заполнения K_{PWM} генератор формирует два противофазных сигнала ШИМ – для верхнего и нижнего ключа активной обмотки. При этом при формировании сигнала учитывается «мертвое время» для исключения протекания сквозного тока, а также минимальное время открытия транзистора нижнего уровня, которое необходимо для подзарядки Bootstrap емкости.

Полученные сигналы ШИМ коммутируются на транзисторы, соответствующие таблице истинности при наступлении соответствующей фазы (рис. 3) [7].

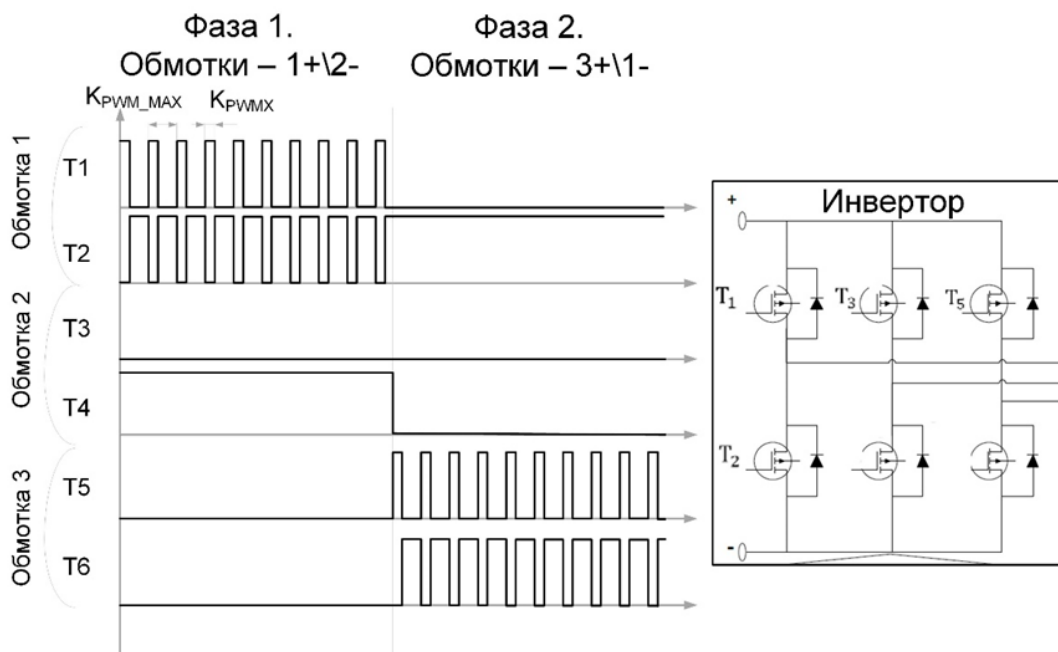


Рис. 3. Формирование ШИМ-сигнала на обмотках вентиляного двигателя

На рис. 3 T_1 – T_6 – логические сигналы включения соответствующих транзисторов, которые подаются на драйвер полумоста. В соответствии с алгоритмом блочной коммутации для каждой фазы одна из обмоток неактивна (фаза 1, обмотка 3), одна из обмоток подключена к «нулю» (фаза 1, обмотка 2 – открыт нижний транзистор), на оставшейся обмотке модулированный сигнал (фаза 1, обмотка 1).

Скорость и положение ротора определяется с помощью датчиков Холла, встроенных в двигатель, либо с помощью схемы для бездатчикового определения положения ротора путем анализа противо-ЭДС на неактивной обмотке [10].

На основе используемого алгоритма управления с учетом общих технических требований и требований надежности была спроектирована система управления вентильными двигателями. Структурная схема системы приведена на рис. 4.

Алгоритм управления, приведенный на рис. 2, реализуется на процессоре с ШИМ кон-

троллером и АЦП. При большом количестве подключаемых двигателей либо при отсутствии ШИМ контроллера в процессоре функция формирователя ШИМ (С1), а также программные модули (С2–С4) могут быть реализованы на ПЛИС. Далее будет рассмотрен вариант с использованием ПЛИС.

3-х фазный инвертор реализован на дискретных транзисторах и высоковольтных драйверах полумоста. Сигнал превышения тока ШИМ (рис. 2) для схемы плавного пуска формируется быстродействующим компаратором (А6), который сравнивает усиленный с помощью операционного усилителя (А5) сигнал тока с шунта (А7) с заданным с помощью ЦАП (А8) опорным уровнем.

Для реализации схемы управления используются компоненты отечественного производства фирм АО «ПКК Миландр», АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», АО «Ангстрем», АО «Дизайн Центр «Союз», АО «Конструкторско-технологический центр «ЭЛЕКТРОНИКА» и др.

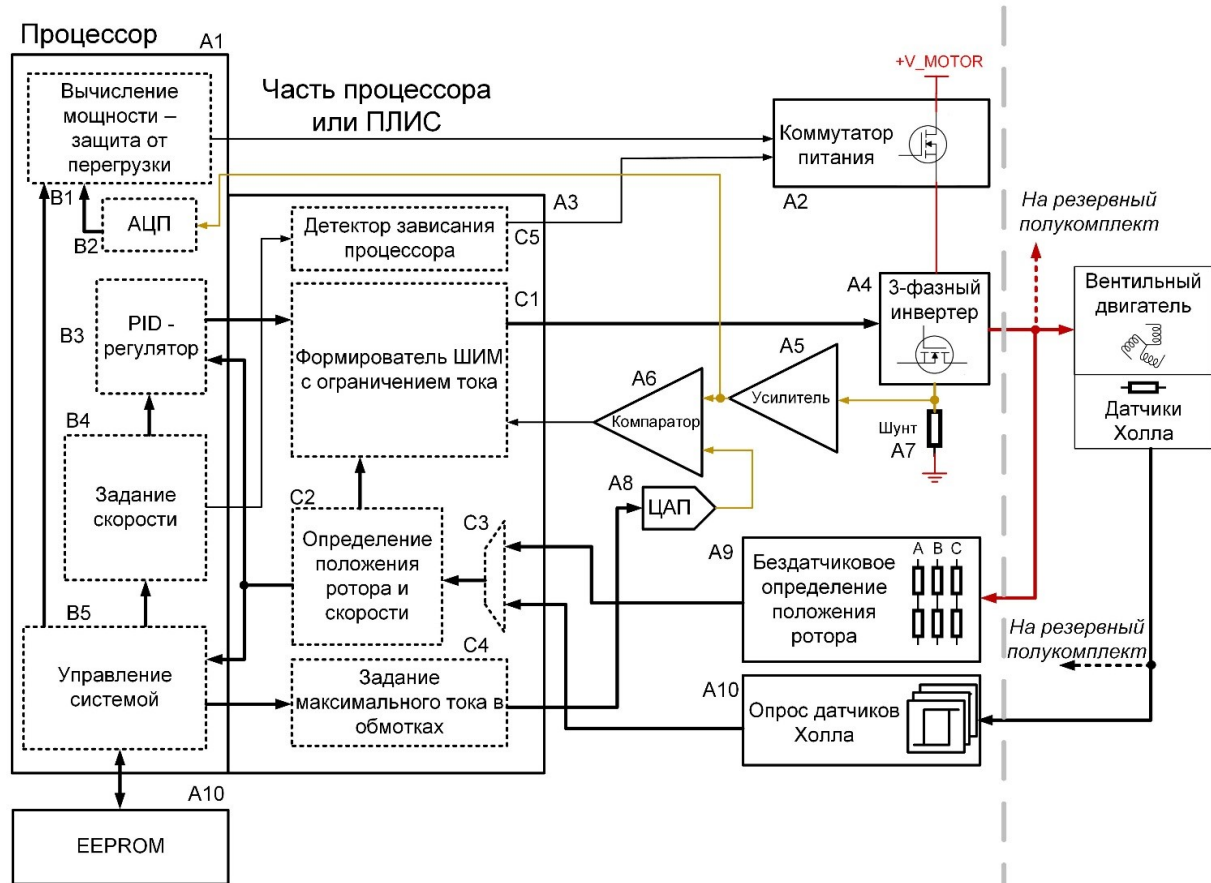


Рис. 4. Структурная схема системы управления вентильными двигателями с учетом требований надежности

Модуль управления (B5) в зависимости от внешних команд генерирует зависимость целевой скорости вращения от времени, задает текущий уровень ограничения тока фаз, а также периодически перезаписывает положение ротора двигателя (и количество оборотов от исходной точки) в постоянную перезаписываемую память (A10) – это необходимо для восстановления положения механической системы при нештатном отключении питания прибора.

В качестве меры защиты от возможного зависания формирователя ШИМ (C1) процессор с помощью встроенного АЦП (B2) и модуля (B1) постоянно анализирует суммарный ток, проходящий через обмотки двигателя, и при выходе двигателя из безопасной области работы с помощью коммутатора питания (A2) отключает питание инвертора (A4). С учетом этого защита от перегрузки двигателя реализуется двумя группами компонентов:

- формирователем ШИМ (C1), реализованным в ПЛИС, и компаратором (A6). Дополнительно детектор зависания процессора (C5) отключает питание для остановки двигателя при сбое в системе управления;
- АЦП (B2) и анализатором мощности (B1) в процессоре. При реализации программных блоков (B) и (C) на процессоре приведенная система

защиты должна быть реализована на отдельных компонентах.

Таким образом, при сбое одного из устройств ток через обмотки не превышает максимально допустимых значений. При отказе шунта (A7) или усилителя (A5) обратная связь по скорости не позволит вывести двигатель из области безопасной работы.

В итоге часть требований к надежности системы управления реализована с помощью дублирования блоков токовой защиты и каскадов опроса датчика положения:

- при отказе датчиков Холла (A10) система управления переходит соответствующим двигателем по «бездатчиковой» схеме (A11) [10];
- при зависании ПЛИС или процессора или выхода из строя компонентов защита от перегрузки двигателя по току продолжает обеспечиваться дублирующей системой;
- при зависании системы управления вращение двигателя прекращается;
- при нештатном отключении системы управления сохраняется информация о текущем положении подвижных систем.

Выполнение остальных требований надежности системы обеспечивается с помощью прямого подключения резервного полуконтакта си-

стемы управления к двигателям и датчикам Холла. При этом сигналы с основного и с резервного полукомплекта системы управления объединяются.

Для недопущения паразитной запитки неактивного комплекта через объединения, а также для обеспечения возможности работы резервного полукомплекта при отказе любого компонента выходного каскада основного полукомплекта эти выходные каскады были спроектированы особым образом.

4. Схемотехническая реализация выходных каскадов системы управления с учетом работы в холодном резерве

Схема выходного каскада инвертора для одной из трех обмоток двигателя, спроектированная с учетом возможности работы в режиме холодного резерва, приведена на рис. 5.

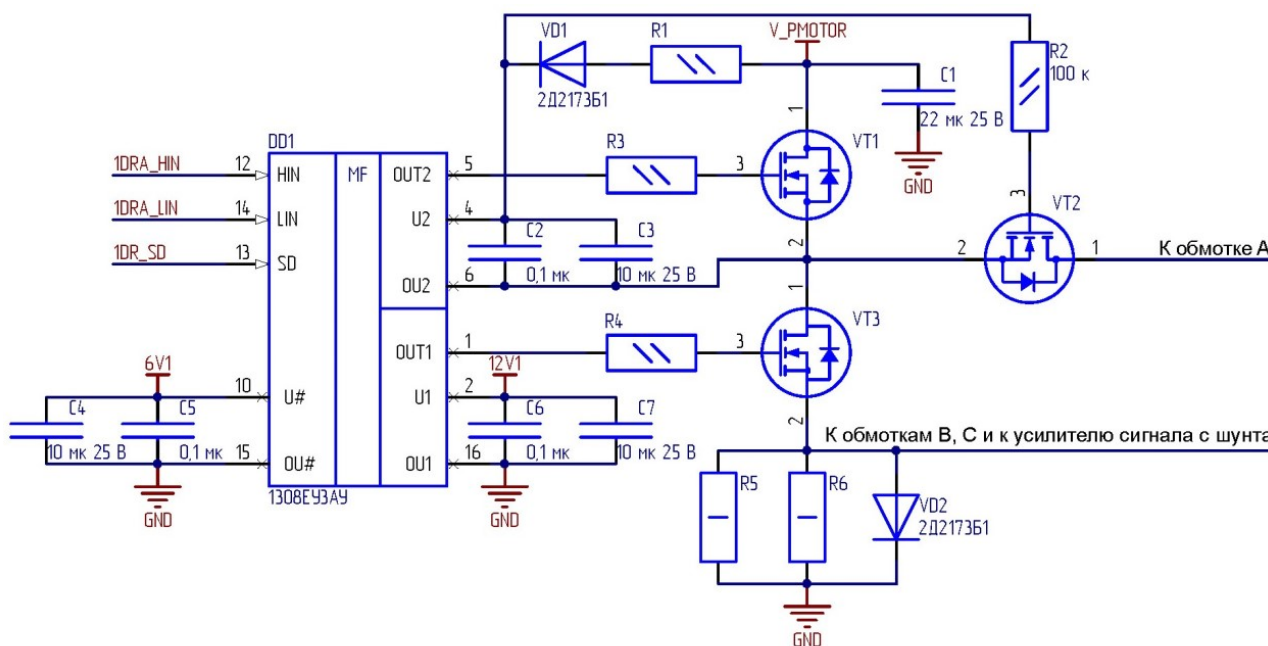


Рис. 5. Схема выходного каскада инвертора для одной из трех обмоток двигателя с учетом работы в холодном резерве

На рис. 5 транзисторы VT1 и VT3 в схеме полумоста с помощью микросхемы 1308EУ3АУ и схемы bootstrap коммутируют питание на одну из трех обмоток. Напряжение на остальные обмотки коммутируются аналогичными каскадами. При этом истоки нижних ключей (на схеме VT3) объединяются для всех 3-х обмоток и подключаются к общей цепи GND через шунты R5, R6 и защитный диод. Шунт подключается к схеме усилителя сигнала и предназначен для измерения суммарного тока через обмотки.

Для исключения паразитной запитки схемы в выключенном состоянии используется транзистор VT2. Транзистор подключен по схеме «идеального диода», то есть его исток подключен в той же точке, что и ключ верхнего уровня VT1. Подключение затвора транзистора VT2 к выводу № 4 микросхемы DD1 через резистор позволяет постоянно удерживать его в открытом состоянии при работе с обмоткой. Дополнительно такая реализация позволяет исключить утечку тока в неактивный полукомплект при пробое нижнего или верхнего ключа неактивного полукомплекта. Таким образом, обеспечивается стойкость к единичному отказу при холодном резервировании.

Схема каскада опроса и питания датчиков Холла с учетом необходимости холодного резервирования приведена на рис. 6.

Выход каждого датчика Холла имеет тип «открытый коллектор», поэтому для опроса требуется резистор R1, подтянутый к питанию через два диода VD1 и VD3. Два диода необходимы для исключения запитки неактивного полукомплекта и для стойкости к единичному отказу (при использовании одного диода при его пробое будет происходить паразитная запитка неактивного полукомплекта). Питание датчика Холла осуществляется также через пару диодов VD1 и VD2.

Микросхема DD1 имеет входы, обеспечивающие возможность работы в холодном резерве (низкий ток утечки по входу в выключенном состоянии). В случае пробоя входа микросхемы DD1 резистор R2, установленный перед входом, ограничивает ток утечки в поврежденный каскад уровнем 500 мкА.

Схема каскада бездатчикового определения положения ротора двигателя приведена на рис. 7. Схема для бездатчикового определения местоположения ротора двигателя с помощью измерения противо-ЭДС на незапитанной обмотке практиче-

ски не отличается от схемы, приведенной в [10], за исключением дублирования резисторов до входов компараторов DD1. Это сделано для предотвраще-

ния утечки в неактивный полукомплект, достаточной для паразитной запитки (~10–100 мА) при отклае любого из резисторов на короткое замыкание.

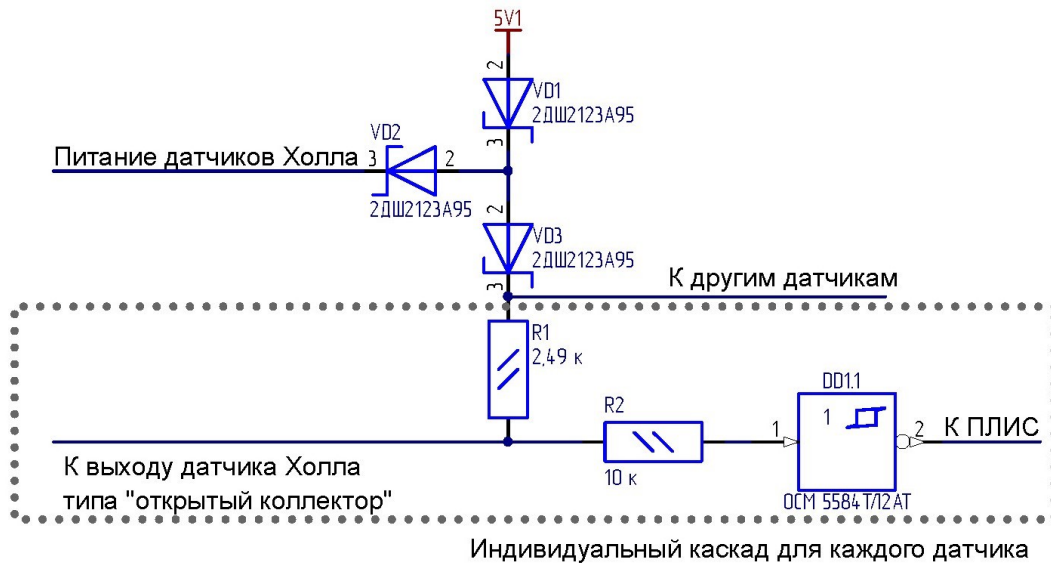


Рис. 6. Схема каскада опроса и питания датчиков Холла с учетом необходимости работы в холодном резерве

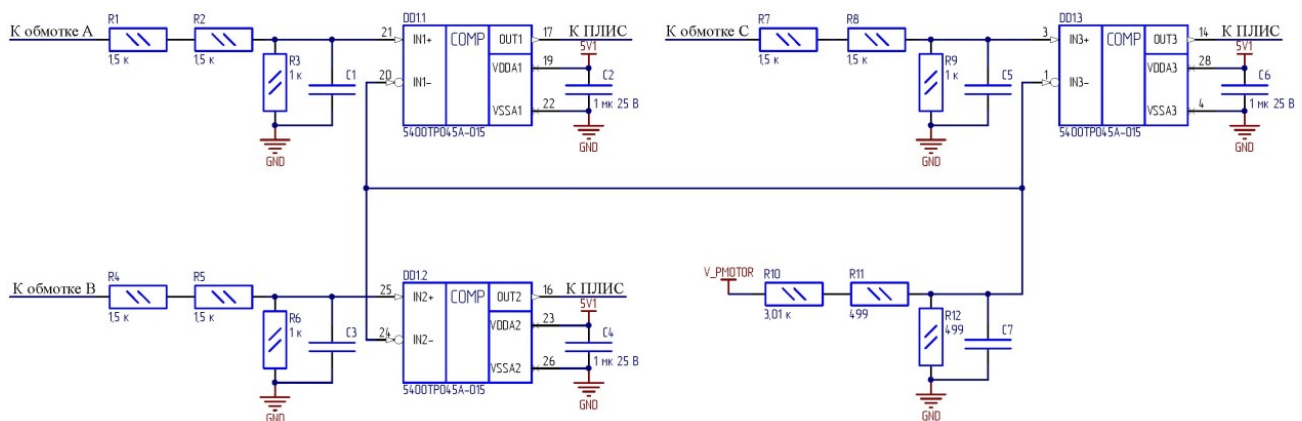


Рис. 7. Схема каскада бездатчикового определения местоположения ротора двигателя с учетом холодного резервирования

В итоге реализация выходных каскадов с учетом холодного резервирования позволяет выполнить требования по стойкости к единичному отказу, то есть при отказе любого компонента системы управления работа от резервного полукомплекта возможна без ограничений в функционировании.

5. Макет резервированной системы управления вентильными двигателями

Для проверки схемотехнических решений, представленных на рис. 5–7, а также для проверки структуры и алгоритма ограничения тока был разработан макет для управления вентильным двигателем производства Махон номинальной мощно-

стью 5 Вт и номинальным напряжением 12 В. Для экономии стоимости и времени большинство ЭРИ ОП системы управления были заменены импортными аналогами.

Фотография макета представлена на рис. 8. Осциллограмма напряжений на обмотках, а также осциллограмма тока на одной из обмоток представлены на рис. 9.

Колебания тока на рис. 9 (справа) связаны поворотом ротора и изменением противо-ЭДС.

Для проверки алгоритма плавного пуска производился старт двигателя без ограничения тока и с ограничением на уровне 240 мА. Осциллограммы тока в одной из обмоток двигателя для обоих измерений приведены на рис. 10.

Как видно на рис. 10 при работающем ограничении тока пусковой ток при старте двигателя

уменьшился более чем в два раза. При работе двигателя на меньшую нагрузку (с меньшей скоростью) разница еще больше увеличивается.

При подаче на выключенный макет постоянного напряжения 12 В и сигнала ШИМ амплитуды

до 12 В и частотой 500 кГц напряжение на линии питания составило не более 0,17 В. Т. к. такого уровня напряжения недостаточно для включения активных компонентов в схеме, то считается, что паразитная запитка не происходит.

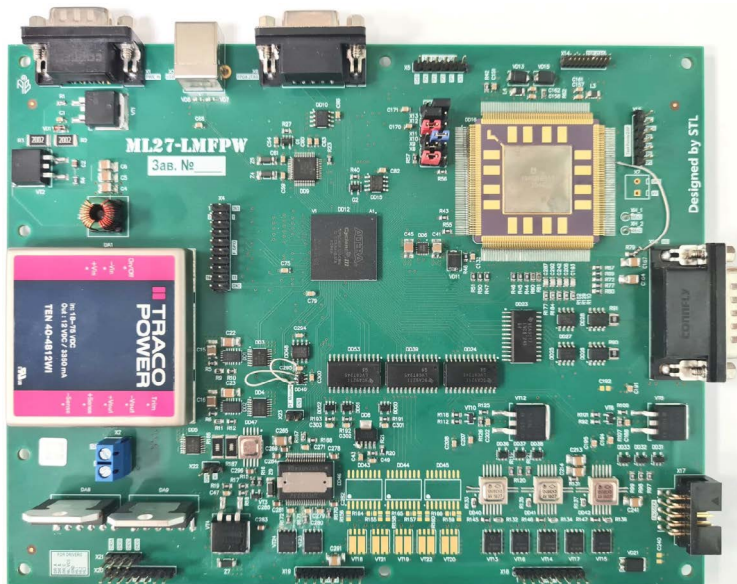


Рис. 8. Макет системы управления вентильными двигателями



Рис. 9. Осциллограмма напряжений на 3-х обмотках в момент перехода с одной фазы поворота на другую (слева) и осциллограмма тока на одной из обмоток за два оборота двигателя (справа) – каждый оборот состоит из 6 фаз

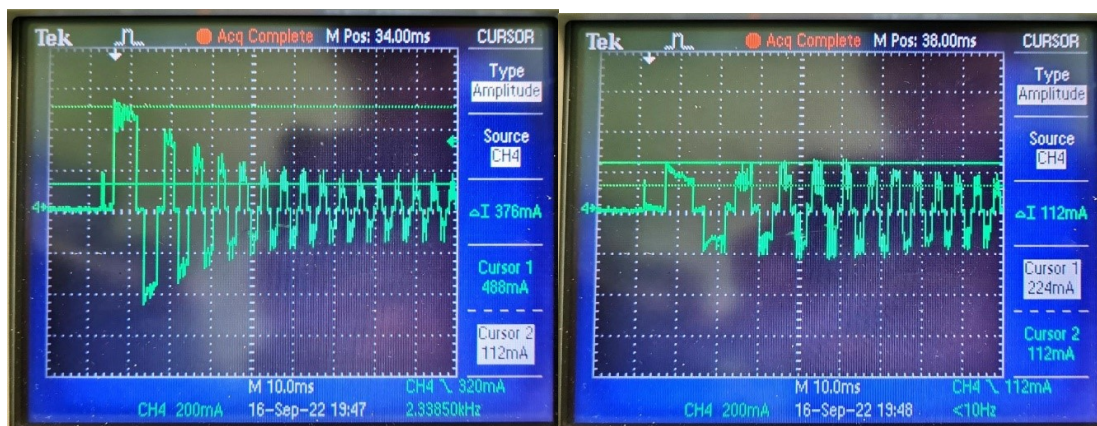


Рис. 10. Осциллограмма тока в одной из обмоток двигателя при выключенном ограничении тока (слева) и включенном ограничении на уровне 240 мА

Заключение

В статье была предложена резервированная система управления вентильными двигателями для научной аппаратуры автоматических космических миссий с использованием алгоритма блочной коммутации. На уровне структуры были реализованы меры по защите от сбоев СБИС для недопущения перегрузки двигателей и аварийного останова, а также реализована защита от отказа датчиков положения ротора. На схемотехническом

уровне выходные каскады системы управления реализованы с учетом возможности холодного резервирования системы, что позволяет подключить два полукомплекта системы управления к одному набору двигателей и датчиков Холла.

Реализация структуры и алгоритма управления двигателем, а также схемотехнические решения были успешно опробованы на макете. В перспективе планируется реализовать макет системы управления, использующий метод бездатчикового векторного управления вентильными двигателями.

Список литературы

- [1] Матвеев С. А., Тестоедов Н. А., Слободзян Н. С., Гончаров В. О., Киселев А. А., Баленко Н. А. Отказоустойчивая система управления электронасосным агрегатом космического назначения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 37–44.
- [2] Selection of Electric Motors for Aerospace Application [Электронный ресурс]. URL: <https://lis.nasa.gov/lesson/893> (дата обращения: 28.09.2022).
- [3] Maier M., Reill J., Sedlmayr H.-J., Chalon M. Highly integrated, radiation-hardened, motor controller with phase current measurement // Proceedings of ASTRA 2017. 2017.
- [4] Once again, NASA relies on maxon technology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/news/Once-again-NASA-relies-on-maxon-technology> (дата обращения: 28.09.2022).
- [5] Литвак М. Л., Носов А. В., Козлова Т. О., Михальский В. И., Перхов А. С., Третьяков В. И. Глубинные грунтозаборные устройства для будущих российских лунных полярных миссий // Астрономический вестник. 2020. Т. 54. № 3. С. 225–246. doi: 10.31857/S0320930X20030081.
- [6] Kozlov O. E., Aleksashkin S. N., Ivanov A. V., Kozlova N. O., Sutugin S. E. Manipulator system of the sampling complex of the Phobos-Grunt spacecraft // Solar System Research. 2010. vol. 44. no. 5. pp. 451–455. doi: 10.1134/S0038094610050138.
- [7] Demystifying BLDC motor commutation: Trap, Sine, & FOC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/lit/ml/slyp711/slyp711.pdf> (дата обращения: 28.09.2022).
- [8] A comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless DC motor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.magnelab.com/wp-content/uploads/2015/02/A-comparison-study-of-the-commutation-methods-for-the-three-phase-permanent-magnet-brushless-dc-motor.pdf> (дата обращения: 28.09.2022).
- [9] Maxon Motor. High precision drives and systems. Selection Guide. 2019/2020. P. 44.
- [10] AN1946 Application note [Электронный ресурс]. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an1946-sensorless-blcdc-motor-control-and-bemf-sampling-methods-with--st7mc-stmicroelectronics.pdf (дата обращения: 28.09.2022).

REDUNDANT BLDC MOTORS CONTROL SYSTEM FOR SCIENTIFIC UNCREWED SPACE MISSIONS

**N. S. Diatlov, D. N. Glazkin, K. V. Anufreichik, I. V. Chulkov,
A. S. Butorkin, A. V. Semenov, A. V. Nikiforov**
*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

Brushless DC (BLDC) motors are widely used in payloads of scientific space missions. To work with this type of motor it's required to develop a complex control system considering basic technical requirements as well as the demands to reliability linked with the space application of the

system. The basic technical requirements and the demands for the reliability of the system were formulated in the article. The block commutation algorithm was selected for the system since it's simple and it doesn't require using a high-performance processor and precision rotor position sensors. Based on the selected algorithm and the requirements structural scheme of the control system with redundancy features was designed. Further, schematics for output stages of the system were considered. They allowed connecting one set of motors and Hall sensors to both the main and the redundant control system. To test the structural and schematic solutions a prototype board was developed. The prototype was successfully tested and the solutions were verified.

Keywords: spacecraft payload, scientific payload, brushless DC motor, motor control, block commutation, Hall sensor, radiation hardness.

References

- [1] Matveev S. A., Testodov N. A., Slobodzyan N. S., Goncharov V. O., Kiselev A. A., Balenko N. A. *Otkazoustojchivaya sistema upravleniya elektronasosnym agregatom kosmicheskogo naznacheniya* [Fail-safe control system for an electric pump unit of space application] // *Izv. VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika*, 2021, no. 2, pp. 37–44. (In Russian)
- [2] Selection of Electric Motors for Aerospace Application. Available at: <https://llis.nasa.gov/lesson/893> (accessed 28.09.2022).
- [3] Maier M., Reill J., Sedlmayr H.-J., Chalon M. Highly integrated, radiation-hardened, motor controller with phase current measurement // *Proceedings of ASTRA 2017*, 2017.
- [4] Once again, NASA relies on maxon technology. Available at: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/news/Once-again-NASA-relies-on-maxon-technology> (accessed 28.09.2022).
- [5] Litvak M. L., Nosov A. V., Kozlova T. O., Mikhal'skii V. I., Perkhov A. S., Tret'yakov V. I. *Glubinnye gruntozabornye ustrojstva dlya budushchih rossijskih lunnyh polyarnyh missij* [Deep-hole soil-sampling tools for future Russian Lunar Polar missions] // *Solar System Research*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 203–222. doi: 10.31857/S0320930X20030081. (In Russian)
- [6] Kozlov O. E., Aleksashkin S. N., Ivanov A. V., Kozlova N. O., Sutugin S. E. Manipulator system of the sampling complex of the Phobos-Grunt space-craft // *Solar System Research*, 2010, vol. 44, no. 5, pp. 451–455. doi: 10.1134/S0038094610050138.
- [7] Demystifying BLDC motor commutation: Trap, Sine, & FOC. Available at: <https://www.ti.com/lit/ml/slyp711/slyp711.pdf> (accessed 28.09.2022).
- [8] A comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless DC motor. Available at: <https://www.magnelab.com/wp-content/uploads/2015/02/A-comparison-study-of-the-commutation-methods-for-the-three-phase-permanent-magnet-brushless-dc-motor.pdf> (accessed 28.09.2022).
- [9] Maxon Motor. High precision drives and systems. Selection Guide. 2019/2020, P. 44.
- [10] AN1946 Application note. Available at: https://www.st.com/resource/en/application_note/an1946-sensorless-bldc-motor-control-and-bemf-sampling-methods-with--st7mc-stmicroelectronics.pdf (accessed 28.09.2022).

Сведения об авторах

Ануфрейчик Константин Владимирович – начальник лаборатории Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2002 году. Область научных интересов: космическое приборостроение, встраиваемое программное обеспечение.

Буторкин Александр Сергеевич – ведущий инженер Института космических исследований РАН. Окончил МИРЭА – Российский технологический университет в 2013 году. Область научных интересов: космическая техника, печатные платы, микроэлектроника.

Глазкин Дмитрий Николаевич – ведущий инженер Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2013 году. Область научных интересов: космическая техника, радиоэлектронная аппаратура.

Дятлов Николай Сергеевич – ведущий инженер Института космических исследований РАН, аспирант. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2018 году. Область научных интересов: космическая техника, научная аппаратура, электроника.

Никифоров Андрей Владимирович – ведущий инженер Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2003 году. Область научных интересов: космическая техника.

Семенов Александр Викторович – главный специалист Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2004 году. Область научных интересов: космическая техника.

Чулков Илья Владиленович – заместитель директора по приборостроению и качеству Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 1983 году. Область научных интересов: космическое приборостроение, электроника, автоматика, системы управления.