

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ НАНОСПУТНИКА

А.В. Ивлиев, А.А. Кумарин, А.Н. Соборницкая

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

alky_samara@mail.ru

Введение

Для реализации различных миссий малых космических аппаратов, в том числе наноспутников, может быть необходимо обеспечение параметров движения. Для углового движения – стабилизация или управление движением. Для стабилизации движения возможны как пассивные методы, так и активные. К активным относится стабилизация при помощи маховиков или магнитных катушек, а также с помощью реактивных двигателей. Для движения центра масс применимо только реактивное движение. Для аппаратов стандарта CubeSat задача создания двигательной установки является сложной задачей в виду значительных ограничений на массу, габариты и энергопотребление [1-3]. Одной из задач здесь является разработка системы управления двигательной установкой, которая решалась в данной работе.

В данной работе рассматривается система управления электротермической двигательной установкой для спутника формата CubeSat, разработанной в Самарском университете [4-6].

При разработке двигательной установки было решено руководствоваться следующими требованиями:

- запас характеристической скорости не менее 50 м/с;
- изменение скорости полета за один этап коррекции – порядка 0,1 м/с.
- масса двигательной установки не более 2 кг, размеры не более 1,5U

Рабочим телом выступает вода с добавлением 40% этилового спирта для снижения температуры замерзания до -28°C . В отличие от метилового спирта, который чаще применяется в двигателях такого класса, данное рабочее тело позволяет обезопасить персонал при изготовлении и тестировании образцов двигателя, а также космонавтов в случае вывода аппарата с борта космической станции.

Рабочее тело из бака, при открытии отсечного клапана по команде системы управления двигателем поступает в нагреватель. Там оно нагревается до температуры кипения, испаряется и перегревается до температур выше точки кипения, после чего оно подается на сопло Лавала, где создает тягу.

При разработке структуры системы управления необходимо было решить ряд ключевых задач:

1. Определить полный перечень объектов управления;
2. Выбрать степень локализации системы управления;
3. Определить механические и электрические ограничения на систему управления.

Объекты управления и источники данных

Для проектирования системы управления в первую очередь необходимо было выделить объекты управления. Основной принцип действия двигательной установки заключается в порционной подаче рабочего тела через нагреватель на сопло для создания тяги. Таким образом, необходимо управлять клапаном подачи рабочего тела, а также нагревательной системой. Нагре-

вательная система в данной работе основывается на батарее суперконденсаторов [7] – низковольтных конденсаторов повышенной емкости за счет использования эффекта двойного электрического слоя. Данная батарея требует наличие зарядного устройства (ЗУ) – импульсного источника тока, работающего в широком диапазоне выходных напряжений. ЗУ питается от штатной системы электропитания (СЭП) спутника. Система управления должна включать и выключать зарядное устройство, проводить задание зарядного тока. Также батарея нуждается в балансировке. Поскольку напряжение на суперконденсаторах мало (ограничивается величиной 2,5–3 В в зависимости от производителя и модели), необходимо использовать последовательное включение отдельных конденсаторов в батарею. При этом возникает проблема, что при различных значениях емкости отдельных элементов батареи, максимальное напряжение на наименее емком будет достигнуто значительно раньше, чем произойдет полная зарядка остальных элементов. Таким образом, батарея остается недозаряженной. Для коррекции данного эффекта необходима балансировка, когда наименее емкие элементы принудительно разряжаются на балластные резисторы. Возможно применение пассивной схемы, однако она разряжает батарею постоянно вне зависимости от степени дисбаланса. Поэтому в данной работе была применена активно-пассивная схема балансировки: резисторы подключаются не постоянно, а только по мере необходимости транзисторами и только к проблемным элементам батареи [8].

Перед впуском рабочего тела в нагреватель, последний необходимо нагреть до заданной температуры. Для этого после заряда батареи суперконденсаторов в необходимый момент времени производится нагрев за счет энергии батареи. Нагрев от аккумуляторной батареи штатной СЭП спутника при этом невозможен в виду ограничений на мощность потребления. Система управления должна обеспечить включение силовых ключей.

Таким образом, объектами управления являются:

- электроклапан подачи рабочего тела;
- зарядное устройство батареи суперконденсаторов;
- транзисторы системы балансировки батареи суперконденсаторов;
- силовые ключи разряда суперконденсаторов на нагреватель.

Источниками данных являются:

- измерители напряжения на элементах батареи суперконденсаторов;
- термопары, установленные на нагревателе;
- датчик тока нагревателя.

Структура управления

Система управления для описанной двигательной установки может быть реализована различными способами. Наиболее целесообразными выглядят структуры, показанные на рисунках 1 и 2. Принципиальное различие между ними – в первом случае система централизованная, имеется общая система управления одновременно относительным движением (маховики и/или магнитные катушки) и двигательной установкой. Во втором случае система управления распределенная. Она состоит из отдельной системы управления движением (СУД) и отдельной системы управления двигательной установкой, включающей в себя все, что нужно для работы с элементами двигательной установки. Главным преимуществом централизованной системы является ее компактность. Вся электроника может быть умещена на единую печатную плату. Однако, в отличие от распределенной системы, централизованная не является универсальной и может потре-

боваться ее модификация при изменении состава двигательной установки. Распределенная система, в свою очередь, состоит из двух отдельных электронных блоков. При этом смена двигательной установки не требует изменений в СУД. В данной работе была реализована распределенная система управления. Все задачи обеспечения движения относительно центра масс возлагались на СУД, при этом система управления двигательной установкой получает команды от СУД или бортового компьютера. Структура реализованной системы управления показана на рисунке 3.

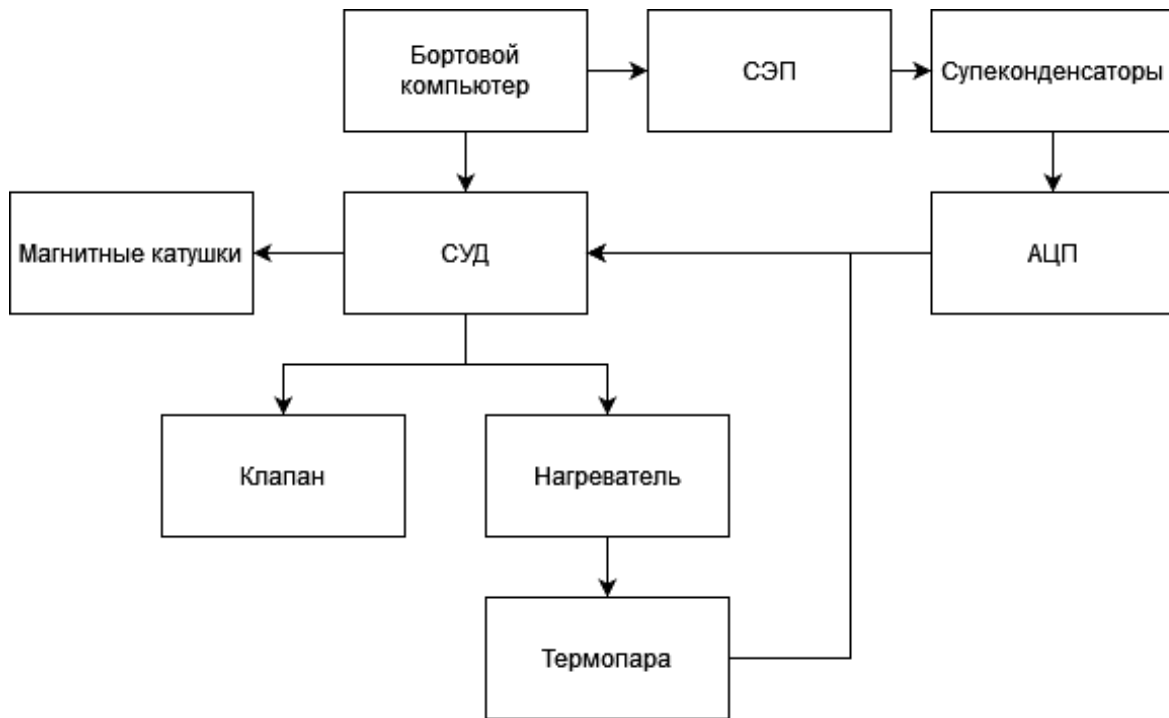


Рисунок 1 – Централизованная структура системы управления



Рисунок 2 – Распределенная структура системы управления



Рисунок 3 – Структура реализованной системы

Основой системы управления является микроконтроллер. Он получает команды по I2C шине с бортового компьютера или СУД. Шина спутника отделена от шины системы управления буфером, что снижает вероятность выведения из строя шины при выходе из строя системы управления, что позволит спутнику функционировать с сохранением по крайней мере части функциональности. Питание осуществляется от штатной СЭП спутника. Предусмотрена защита питания, автоматически отключающая его при превышении заданного порогового значения тока, что предотвращает вывод из строя штатной СЭП при выходе из строя системы управления. Для работы с исполнительными органами предусмотрены драйвер электроклапана, зарядное устройство для батареи суперконденсаторов и система ее активно-пассивной балансировки. Силовые ключи представляют собой сборку из нескольких силовых полевых транзисторов с мало-мощными полевыми транзисторами в цепи управления, что позволяет управлять блоком ключей напрямую от микроконтроллера без дополнительных драйверов. Для получения данных о работе систем присутствует система измерения для батареи суперконденсаторов, термопара(ы) на нагревателе с драйвером, производящим оцифровку и конвертацию данных.

Алгоритмы управления

По команде с бортового компьютера или СУД может производиться настройка системы управление, включение и выключение заряда, включение и выключение нагревателя, запуск процесса выдачи импульса тяги. Операции могут проводиться как в режиме последовательности команд, так и в режиме единой команды полного цикла. В последнем случае одна команда запускает автоматическую процедуру выдачи импульса с заданными параметрами. Наиболее целесообразно отдельно выдавать команду на заряд суперконденсаторов, поскольку это требует значительное время – 10-60 минут в зависимости от установленного тока заряда.

Алгоритм работы системы управления в режиме автоматической выдачи импульса:

1. Включается нагреватель от батареи суперконденсаторов;
2. Включается таймер задержки открытия клапана;
3. Открывается клапан на заданное время;
4. Выключается нагреватель.

Во время работы двигательной установки осуществляется контроль параметров, таких как температура(ы) нагревателя при помощи термопар, напряжения суперконденсаторов. Все эти данные могут использоваться при испытаниях, а также в летном варианте для диагностики двигательной установки и косвенного подтверждения ее штатной работы.

На момент написания работы двигательная установка находится на стадии тестирования в термовакуумной камере. Ее система управления с небольшими доработками может стать системой управления летной двигательной установкой.

Разработана тестовая установка и специальное приложение на ПК, дающее возможность выводить измеряемые данные (температуру и напряжение) на графики в режиме реального времени. Также к этому же ПК и приложению подключается устройство измерения тяги и температур в различных точках нагревателя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

Список литературы:

- 1 Leslabay P., Lauretta R., Pedreira P. 2017 The ResistoJet as a simple and cost-effective propulsion system for nano- and microsatellites 1st IAA Latin merican Symposium on Small Satellites // Advanced Technologies and Distributed Systems. IAA-LA-13-03.
- 2 2013 Active space debris removal by a hybrid propulsion module / L.T. Deluca, F. Bernelli, F. Maggi [et al.] // Acta Astronautica Vol. 91. pp. 20-33.
- 3 O'Reilly D., Herdrich G., Kavanagh D.F. 2021 Electric Propulsion Methods for Small Satellites // A Review. Aerospace, 8, 22.
- 4 Выбор проектного облика двигательной установки наноспутника / И.В. Белоконов, А.В. Ивлиев, А.М. Богатырев [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, No 3. С. 29-37.
- 5 I. Belokonov, A. Ivliev. 2017 Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite Procedia Engineering. P. 366-372.
- 6 Белоконов И.В. Электротермическая двигательная установка наноспутника / Белоконов И.В. [и др.] // Космическая техника и технологии. №4(39). – 2022. – С. 45-57.
- 7 Kumarin A.A., Kudryavtsev I.A. 2018 Modelling the EDLC-based Power Supply Module for a Maneuvering System of a Nanosatellite IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 302. No. 1. p. 1-6.
- 8 Кумарин А.А., Кудрявцев И.А. Методы выравнивания напряжения батарей суперконденсаторов // Международная молодежная научная конференция "XV Королевские чтения", посвященная 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова. Т.1. – С. 377.