

УДК 629.7.062.2

Разработка параметрической модели управляющего двигателя-маховика для микроспутника

С.С. Ефимов¹, Н.А. Ивлев^{1,2,3}, А.В. Ноздрин¹

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²ООО «Спутникс»

³Институт космических исследований РАН

Непрерывное развитие электроники приводит к постепенному уменьшению электронных элементов, что находит непосредственное отражение в космической отрасли: размеры спутников самых разных назначений постоянно снижаются. Одним из результатов этого процесса стало появление микроспутников – нового класса космических аппаратов массой менее 100 кг. Как следствие, актуальность набрала проблема разработки механических элементов, в частности исполнительных органов систем ориентации, удовлетворяющих постоянно растущим требованиям к размеру и массе. При конструировании управляющих двигателей-маховиков (УДМ) с этой целью можно использовать уже существующие линейки электродвигателей, но такой подход не может в общем случае обеспечить оптимальное использование всего диапазона параметров, задаваемого техническим заданием (ТЗ). Специальная же разработка УДМ под каждую отдельную ситуацию требует существенных затрат и на практике реализуема только при наличии параметрической модели способной варьировать параметры УДМ, подстраивая их под конкретное ТЗ.

В данной работе была создана такая параметрическая модель на основе маховика *SXPH-WH-100* [1]. Она состоит из трёх частей:

- 1) Входной файл с полным набором уравнений, описывающих конструкцию УДМ. В их число входят формулы для связи геометрических размеров различных элементов конструкции, формулы, аппроксимирующие зависимости масс, моментов инерции и различных электромеханических характеристик элементов конструкции от параметров модели, формулы для оценки наименьших собственных частот конструкции и формулы для вычисления итоговых характеристик УДМ, предполагающие управление с использованием алгоритмов векторного регулирования. В файл дополнительно включаются требования ТЗ к управляющему моменту УДМ, кинетическому моменту на максимальной скорости, габаритам, напряжению питания и т.д., а также различные накладываемые технологические ограничения и критерий, по которому производится оптимизация модели. Этим критерием может быть, например, требование минимизации потребляемой мощности или массы УДМ.
- 2) Программа на языке *Wolfram Language* [2] для решения полученной системы уравнений и неравенств. Нахождение глобального экстремума в общем случае является довольно непростой задачей. Наличие дополнительных условий ещё сильнее усугубляет ситуацию. Поиск экстремума аналитическими методами требует рассмотрения двух частных случаев для каждого нестроого ограничения (поскольку каждое из них может выполняться как строгое равенство или как строгое неравенство). Поэтому общая сложность задачи растёт примерно как 2^n , где n – число ограничений. В рассматриваемой модели это число меняется в диапазоне от 10 до 20, то есть аналитическое решение задачи требует рассмотрения более тысячи отдельных случаев, что представляется нецелесообразным. Из этих соображений выбор способа нахождения оптимальных параметров модели был сделан в пользу численных методов глобальной оптимизации, наиболее удачным из которых для рассматриваемой задачи оказался метод дифференциальной эволюции [3]. Это простейший генетический алгоритм, основным достоинством которого в данном контексте является независимость от производных оптимизируемой функции, что позволяет применять его к функциям с большими градиентами. Как следствие, задачу нахождения условного экстремума можно методом штрафных функций [4] свести к поиску безусловного экстремума, в результате чего

достигается высокая скорость вычислений, которая к тому же слабо зависит от числа ограничений.

- 3) Параметризованная трёхмерная модель в *SolidWorks*. Принимая на вход некоторый набор ключевых параметров, эта модель перестраивает конструкцию УДМ с соблюдением всех связей между геометрическими размерами отдельных деталей.

Практическое использование параметрической модели состоит из указания требований ТЗ во входном файле, проведения вычислений при помощи оптимизирующей программы и загрузки списка получаемых значений параметров в *SolidWorks*. Вся последовательность занимает не более нескольких минут и даёт на выходе полную трёхмерную конструкцию УДМ, готовую для прохождения численных тестов и отправки на производство.

Литература

1. *Ивлев Н.А., Ефимов С.С., Ноздрин А.В., Попов А.В., Притыкин Д.А., Продан Д.В., Сергеев Р.И., Сивков А.С.* Разработка и создание управляющего двигателя-маховика для малого космического аппарата выполняющего задачи высокодетального ДЗЗ // Материалы круглого стола «Создание малых космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения». 2016. С. 99-120.
2. *Wolfram S.* An Elementary Introduction to the Wolfram Language. Wolfram Media, Inc, 2015. 324 p.
3. *Storn R., Price K.* Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization. 1997. V. 11, P. 341–359.
4. *Smith Alice E., Coit David W.* Penalty functions // Handbook of Evolutionary Computation, Section C 5.2. Oxford University Press and Institute of Physics Publishing. 1996.