

УДК 629.782:621.31

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА СИНУСОИДАЛЬНЫЕ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

А.В. Полякова, М.В. Поляков, В.С. Дмитриев

Томский политехнический университет

E-mail: plemjaschka@mail.ru

**Полякова Анна Валерьевна**, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: plemjaschka@mail.ru  
Область научных интересов: испытания элементов космической техники.

**Поляков Мирослав Вадимович**, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: plemjaschka@mail.ru  
Область научных интересов: проектирование систем ориентации космических аппаратов.

**Дмитриев Виктор Степанович**, д-р техн. наук, профессор кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: dmitriev@tpu.ru  
Область научных интересов: системы ориентации космических аппаратов.

Целью работы является определение собственных частот трехмерной модели двигателя-маховика системы ориентации малого космического аппарата, а также ее поведение под действием квазистатической нагрузки, синусоидальных и случайных вибраций, акустического и ударного воздействия. Компьютерный анализ, проведенный в процессе проектирования, позволяет определить характеристики изделия и провести оптимизацию конструкции без создания опытного образца. Анализ проводился с помощью специального программного обеспечения «Т-Flex Анализ». Исходная трехмерная модель была разбита на три под сборки: корпусную, роторную и статорную. Приведены результаты частотного анализа и расчета при воздействии на двигатель-маховик квазистатических нагрузок. По результатам проведенного компьютерного конечно-элементного анализа можно сказать, что спроектированный двигатель-маховик с большим запасом удовлетворяет требованиям надежности. Большие коэффициенты запасов говорят о том, что конструкцию в дальнейшем можно оптимизировать.

**Ключевые слова:**

Конечно-элементный анализ, двигатель-маховик, малый космический аппарат.

Современные изделия космической техники являются сложными и дорогостоящими техническими устройствами, которые должны удовлетворять повышенным требованиям надежности. Элементы космической техники подвергаются всесторонним испытаниям: механическим, климатическим, электрическим и т. д. [1]. Это относится и к двигателям-маховикам систем ориентации космических аппаратов.

При современных тенденциях в использовании малых космических аппаратов массой менее 100 кг (микро-, нано- и пикоспутников) двигатели-маховики должны удовлетворять более жестким требованиям по массогабаритным характеристикам и при этом обладать достаточной прочностью, жесткостью и надежностью конструкции, способной выдержать нагрузки, действующие в процессе транспортировки и вывода космического аппарата на орбиту. Поэтому перед разработчиками двигателей-маховиков стоит сложная задача создания легкой и в то же время прочной конструкции. Поскольку зачастую невозможно получить адекватное техническое описание и полную математическую модель, описывающую поведение проектируемого устройства, то принятые технические решения проверяются при проведении испытаний изготовленного макета изделия. Для проверки его работоспособности требуется подготовить необходимую для создания опытного образца конструкторскую и технологическую документацию, изготовить физический макет прибора и провести испытания. Если результаты проведенных испытаний показывают, что изделие не отвечает требованиям, то необходимо изменение конструкции и принятие других технических решений. Это приведет к тому, что необходимо заново

во пройти этапы разработки документации и изготовления макета. Результатом такого подхода являются большие финансовые затраты, увеличение сроков изготовления изделия.

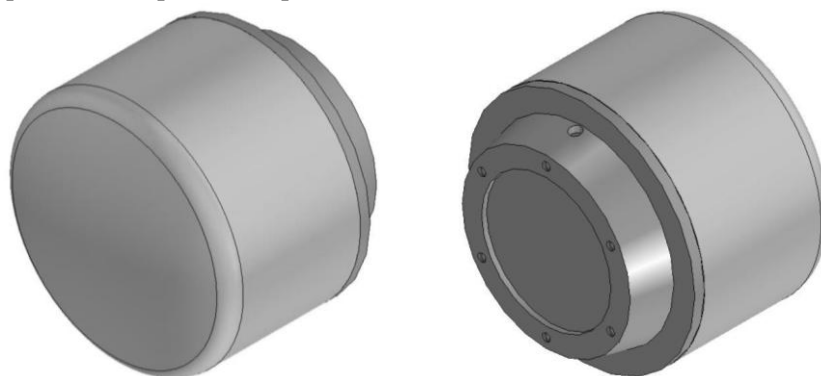
Одним из способов снижения стоимости и времени разработки новой конструкции является проведение компьютерного анализа модели изделия еще на этапе проектирования без создания физического макета изделия. Такой подход позволит еще на начальном этапе оценить характеристики конструкции и своевременно внести необходимые изменения для ее оптимизации. Очевидны и экономические преимущества: экономия материалов и времени при отработке новой конструкции, электроэнергии, затрат на зарплату, уменьшение износа оборудования и инструмента.

В настоящее время такой подход реализуется с помощью систем инженерного анализа, или САЕ-систем (computer-aided engineering). На современном уровне развития системы инженерного анализа позволяют определить частотные характеристики изделия, провести статический анализ, анализ устойчивости, усталости, тепловой анализ и т. д. Для проведения анализа в САЕ-системах используется трехмерная твердотельная модель изделия (3D-модель).

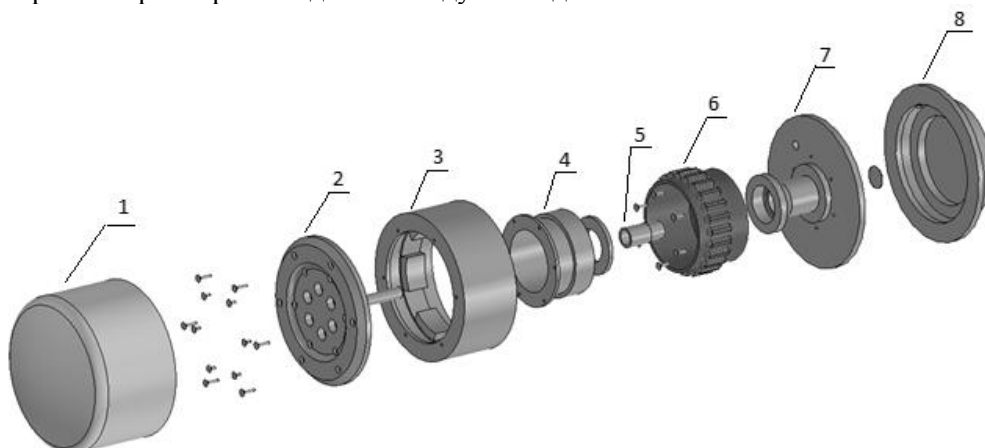
Одной из таких систем является отечественная система конечно-элементного анализа «Т-FLEX Анализ» («Топ Системы», Россия). Особенностью данной системы является прямая интеграция САЕ-системы «Т-FLEX Анализ» с САД-системой T-FLEX CAD, что подразумевает обмен геометрическими данными через внутренние структуры данных напрямую из одного программного модуля в другой.

На базе «Т-FLEX Анализ» модель конструкции можно подвергнуть воздействию квазистатических, синусоидальных, случайных, акустических, ударных, транспортных нагрузок. По результатам анализа можно судить о работоспособности разрабатываемой модели.

В статье приведены результаты компьютерного конечно-элементного анализа трехмерной модели двигателя-маховика с кинетическим моментом  $0.17 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$  [2]. Сборочная 3D-модель двигателя-маховика приведена на рис. 1, сборочная 3D-модель в разобранном состоянии – на рис. 2.



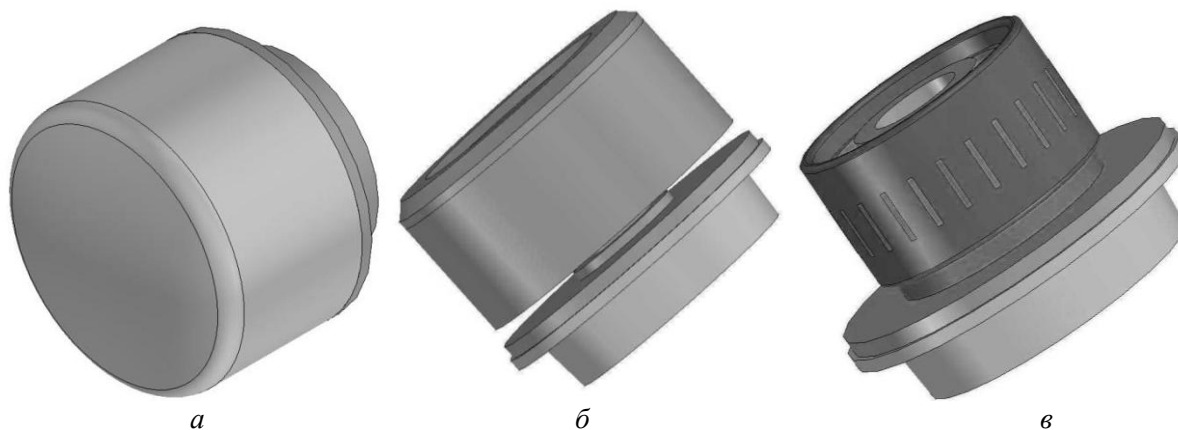
**Рис. 1.** Сборочная трехмерная модель исследуемого двигателя-маховика



**Рис. 2.** Сборочная трехмерная модель исполнительного органа в разобранном состоянии: 1 – кожух; 2 – вал-диафрагма; 3 – обод с активными частями ротора двигателя; 4 – втулка; 5 – распорная втулка; 6 – статор двигателя; 7 – корпус; 8 – крышка

Поскольку в конструкции двигателя-маховика присутствуют три кинематические схемы, каждая консольного типа, то для проведения анализа конструкция разделена на три под сборки.

Первая под сборка (рис. 3, *а*) – корпусная – представляет собой защитный кожух 1 и крышку 8. Вторая под сборка (рис. 3, *б*) – роторная – состоит из ротора-маховика, установленного в корпусе посредством шарикоподшипниковых опор. Третья под сборка (статорная) содержит закрепленный на корпусе 7 обмотанный статор (рис. 3, *в*).



**Рис. 3.** Под сборки двигателя-маховика при проведении анализа

Анализ трех отдельных подборок упрощает общий расчет и повышает его точность.

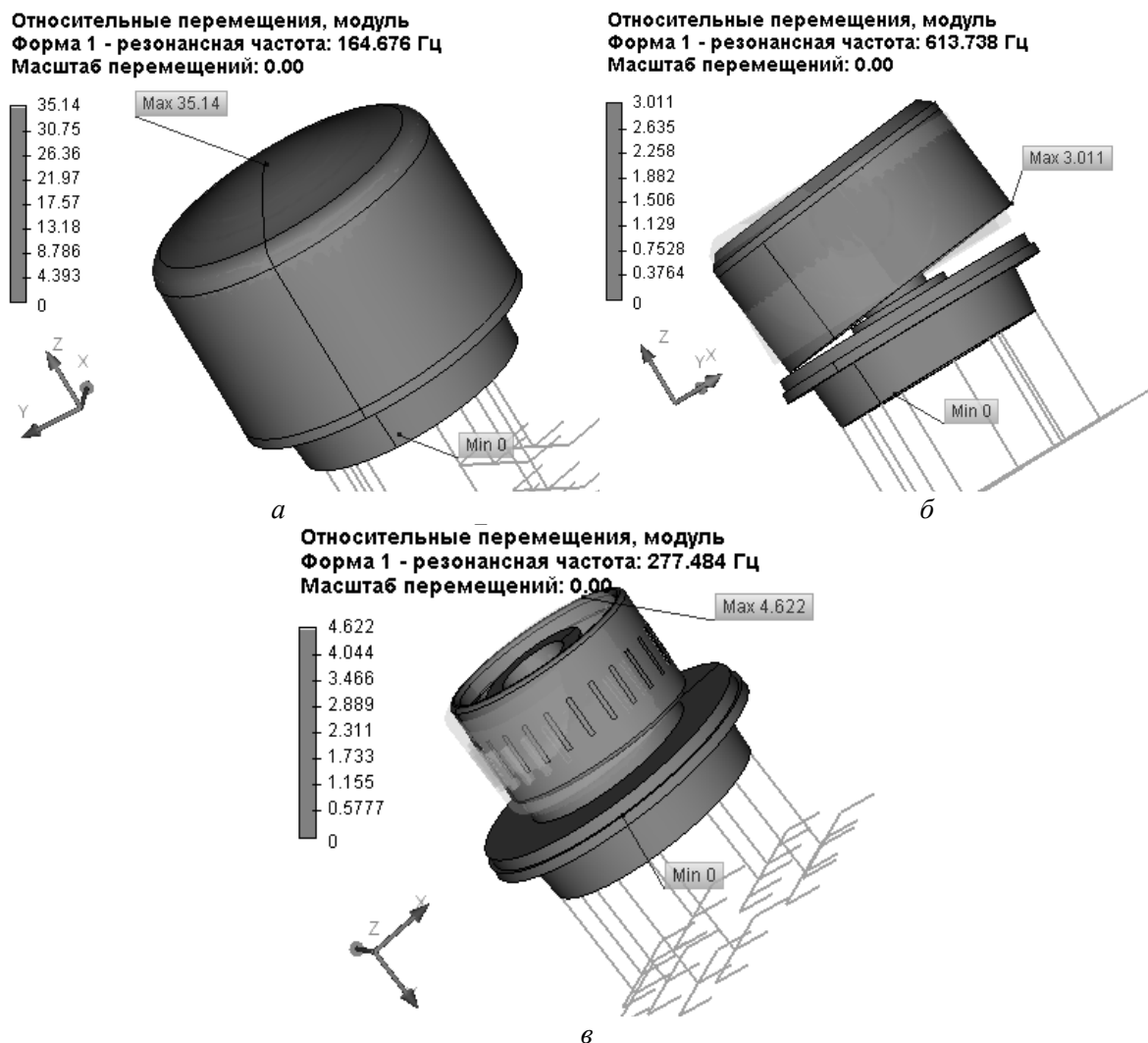
При определении работоспособности 3D-модели конструкции двигателя-маховика она подвергалась следующим видам воздействий:

- квазистатической нагрузке;
- синусоидальным вибрациям;
- случайным вибрациям;
- акустическим воздействиям;
- ударным воздействиям.

Кроме того, с целью исключения возникновения резонанса конструкции в условиях эксплуатации был проведен частотный анализ конструкции. Результатами анализа являются собственные частоты конструкции и соответствующие им формы колебаний. Конструкция удовлетворяет требованиям, если ее собственные частоты не лежат в пределах диапазона частот внешних воздействий. Поскольку угловая скорость вращения маховика может изменяться от 0 до 6000 об/мин (0–100 Гц), то собственные частоты конструкции с учетом коэффициента запаса должны превышать 150 Гц. Значения первых собственных частот для каждой под сборки приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, наименьшую собственную частоту имеет первая под сборка. Значение собственной частоты для первой формы колебаний равно 164,7 Гц, что является допустимым.

Помимо частотного анализа рассмотрим анализ при воздействии на двигатель-маховик квазистатических нагрузок. Величина прикладываемой нагрузки зависит от вариантов полета («старт», «полет первой ступени», «полет второй ступени», «полет третьей ступени»). Нагрузки действуют одновременно в аксиальном и поперечном направлениях.



**Рис. 4.** Результаты частотного анализа для первой (а), второй (б) и третьей (в) подборок

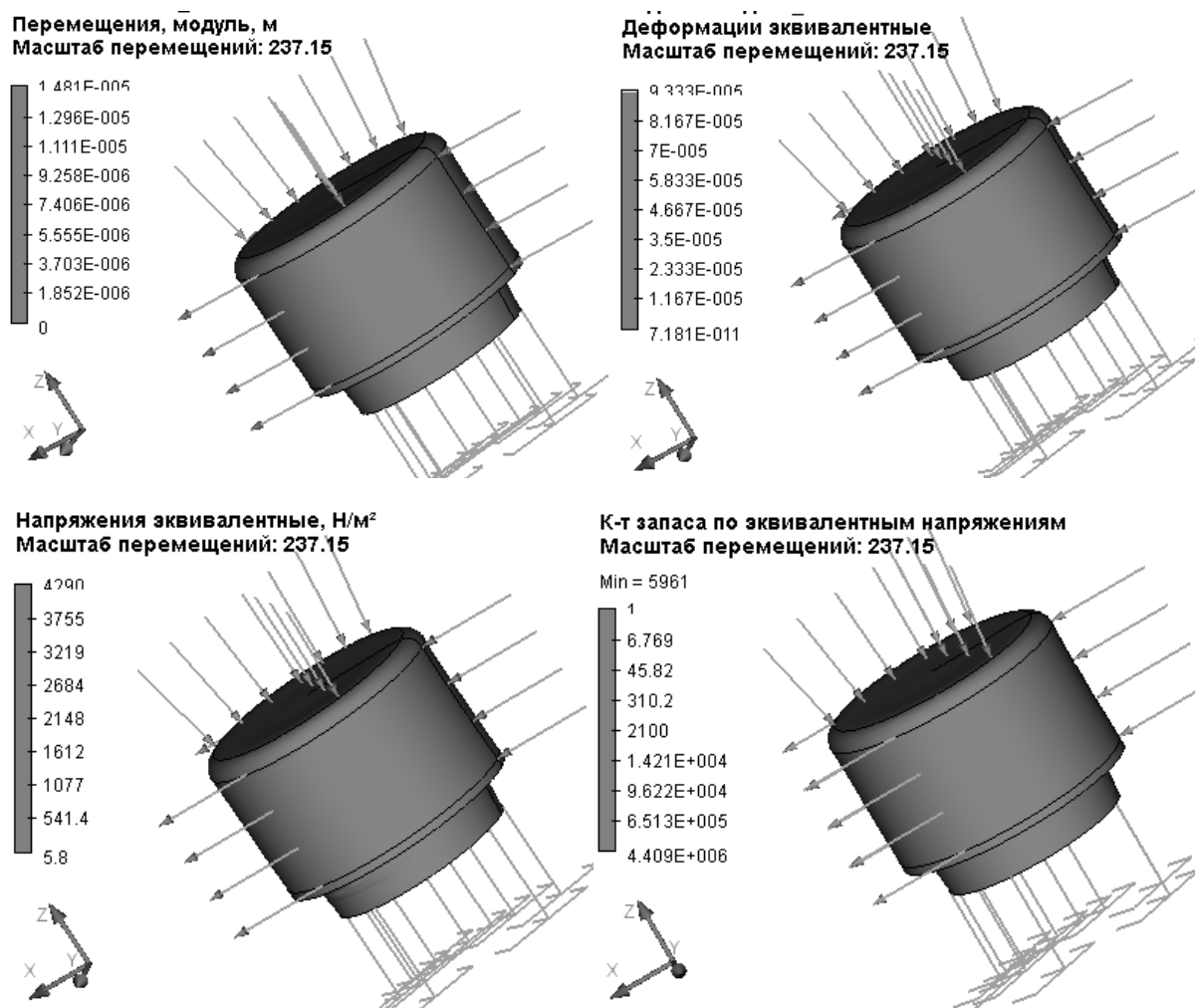
Амплитудное значение квазистатической силы  $F_{\text{кв.ст}}$  определяется в соответствии с вторым законом Ньютона:

$$F_{\text{кв.ст}} = k \cdot m \cdot a,$$

где  $k$  – коэффициент запаса;  $m$  – масса элемента, подвергающегося действию нагрузки;  $a$  – максимальное значение перегрузки.

Результатами расчетов при воздействии квазистатических нагрузок являются перемещения узлов сетки, модуль, деформации эквивалентные, напряжения эквивалентные, коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям. Данные характеристики отражают поведение конструкции под действием квазистатических сил.

Результаты анализа для первой подборок при воздействии квазистатических нагрузок во время старта приведены на рис. 5. Полученные результаты по эквивалентным напряжениям и коэффициенту запаса по эквивалентным напряжениям показывают, что в конструкции не возникают критические напряжения, коэффициент запаса составляет 5961.



**Рис. 5.** Результаты анализа на квазистатические воздействия

Таким образом, по полученным результатам можно сделать вывод, что конструкция двигателя-маховика удовлетворяет требованиям по надежности под воздействием внешних возмущающих факторов. Большие коэффициенты запасов говорят о том, что конструкцию в дальнейшем можно оптимизировать, добившись тем самым уменьшения массогабаритных характеристик.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы испытаний и экспериментальная обработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др. – М.: Логос, 2003. — 736 с.
2. М.В. Поляков, А.В. Полякова. Электромеханический исполнительный орган для управления малым космическим аппаратом // Космическое приборостроение: сборник научных трудов Форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, г. Томск, 10–12 апреля 2013 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 104–107.

Поступила 22.05.2014 г.