DOI - 10.32743/UniTech.2021.92.11.12668

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ТИПА СПД-50

Ольшанская Ольга Викторовна
инженер ФГУП ОКБ «Факел»,
аспирант БФУ им. И. Канта,
РФ, г. Калининград
E-mail: olikk2007@mail.ru

Ярисов Владимир Владимирович
д-р. техн. наук, доцент,
ст. науч. сотр. БФУ им. И. Канта,
РФ, г. Калининград
E-mail: VYarisov@kantiana.ru

STUDY OF ENGINE MECHANICAL STRENGTH TYPE SPD-50

Olga Olshanskaya
Engineer of FGUP OKB "Fakel",
post-graduate student of IKBFU I. Kant,
Russia, Kaliningrad

Vladimir Yarisov
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher of the IKBFU I. Kanta,
Russia, Kaliningrad

АННОТАЦИЯ

В статье приводится сравнительный анализ механических нагрузок двигателя типа СПД-50, представлены: описание математической модели, результаты верификации конструкции двигателя типа СПД-50, результаты частотного анализа, расчетов коэффициентов запаса при воздействии случайной вибрации и статических нагрузок, а также сопоставление результатов испытаний с расчетными данными.

ABSTRACT

The article provides a comparative analysis of the mechanical loads of an SPD-50 engine, presents: a description of the mathematical model, the results of verification of the design of an SPD-50 engine, the results of frequency analysis, calculations of safety factors under the influence of random vibration and static loads, as well as a comparison of the test results with the calculated ones data.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, верификация, конечно-элементная модель, мода колебания, напряженно-деформированное состояние, амплитудно-частотная характеристика, частотный отклик.

Keywords: stationary plasma engine, verification, finite element model, oscillation mode, stress-strain state, amplitude-frequency characteristic, frequency response.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современного космоса является создание группировок космических аппаратов (КА) для предоставления услуг широкополосного интернета по всему миру.

В настоящий момент на различной стадии реализации находится несколько крупных программ серийного производства КА. Хронологически отмечается тренд к росту объема космических аппаратов от программы к программе: от примерно 70 аппаратов системы IRIDIUM, до нескольких тысяч аппаратов программы Starlink, согласно заявлениям компании SpaceX. В настоящий момент во исполнение программы OneWeb, в рамках пилотной фазы запущено 6 аппаратов GEN1 при планируемом общем количестве спутников, одновременно находящихся на орбите, 600 штук.

Одной из важнейших задач для успешной реализации программ такого плана является создание малоразмерных КА.

Появление малых КА стало возможным благодаря стремительному развитию микроэлектроники, появлению новых конструкционных материалов, которые позволили снизить массу и размеры бортовой

Библиографическое описание: Ольшанская О.В., Ярисов В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ТИПА СПД-50 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2021. 11(92). URL: *https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12668*

аппаратуры и систем, а благодаря этому и массу КА в целом.

Из-за удешевления стоимости запусков, стало обоснованной инициатива одновременного пуска до нескольких десятков космических аппаратов. Ранее из-за высокой стоимости пусков такие аппараты могли запускаться лишь как «попутные», одновременно с «тяжелыми» аппаратами. Данная инициатива породила необходимость создания специальной оснастки, обеспечивающей одновременный запуск КА в определенной конфигурации, что, в свою очередь, явилось драйвером ужесточения требований к механическим нагрузкам элементов космического аппарата. Это связано, с одной стороны, с увеличением мощности ракет-носителей, а с другой, разработкой КА нового поколения, отличающихся более низкими демпфирующими свойствами силовой конструкции.

Согласно классификации, предложенной В.Ю. Клюшниковым в работе «Тенденции развития группировок малых КА и средств их выведения на орбиты»[1], малые КА можно классифицировать по массе, стоимости изготовления и времени активного существования на орбите. Классификация малых КА (МКА) представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Размерный ряд космических аппаратов

Размер	Масса, кг	Стоимость изготовления млн. €	Время активного существования, лет
Малые	600 – 1200	100	3 – 5
Мини	200 – 600	30	2
Микро	10 – 200	10	1,5
Нано	1 – 10	1	1
Пико	0,1 – 1,0	0,1	Менее 1
Фемто	< 0,1	< 0,1	Менее 1

Большинство вышеупомянутых программ применяют для своих группировок аппараты класса “Микро” и “Мини”. Следует отметить, что стоимости, приведенные в таблице 1, претерпевают значительные изменения в сторону уменьшения, в то время как время активного существования аппаратов класса “Микро” и “Мини” увеличивается до 5-7 лет.

В свою очередь ключевыми моментом, обусловившим развитее группировок малых КА, стало использование технология электрических ракетный двигателей малой мощности и как частный случай двигателей на эффекте Холла (стационарных плазменных двигателей (СПД)).

Именно благодаря очевидным преимуществам данного типа двигателей (высокому удельному импульсу, согласно формуле Циолковского,

$$V = I \times In\left(\frac{M1}{M2}\right)$$

то есть высокой скорости истечения струи, а также миокрорасходом рабочего тела, что позволят экономить на его массе в пользу полезной нагрузки) их применение позволяет осуществлять довыведение КА на рабочую орбиту без потери массы полезной нагрузки и сокращения срока активного существования (САС).

В целях данной статьи будет рассмотрен двигатель типа СПД-50, разработанный и серийно производимый ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград. Следует отметить, что несмотря на требование к удешевлению и упрощению изделия, технические требования к нему остаются на уровне прочих изделий ОКБ. Сложность конструкции СПД требует значительных временных затрат на проведение цикла испытаний для подтверждения безотказной работы изделия на орбите. Такие испытания являются дорогостоящими и зачастую требуют изготовления нескольких моделей двигателей, последующего анализа и доработки конструкции. Уменьшения временных и финансовых затрат на такие испытания можно добиться за счет использования методов численного моделирования. Данное утверждение было подтверждено в ходе работ по квалификации двигателя СПД-50 для одного из европейских заказчиков.

Задачи проектирования

При проектировании двигателя одним из важнейших требований является обеспечение его механической стойкости к внешним воздействующим факторам. В связи с этим возникает задача, во-первых, определение запасов прочности разработанных и квалифицированных ранее элементов систем ориентации и коррекции КА для новых условий применения, а во-вторых, при необходимости, их модернизация, с целью повышения прочности без изменения функциональных и тепловых схем элементов.

Двигатель СПД-50, спроектированный в ОКБ «Факел», разработанный и квалифицированный ранее на одни условия применения, предполагается использовать на малых космических аппаратах с увеличенным при этом временем существования на орбите.

В таблице 2 приведены характеристики двигателя СПД-50, модернизированного для малого КА.

Таблица 2.

Характеристики СПД-50

Разрядное напряжение, В	300
Разрядный ток, А	0,8 - 1,5
Мощность разряда, Вт	240 - 450
Тяга, мН (300 Вт)	18.0
Удельный импульс, с(300 Вт)	1200
КПД, %	34
Масса, кг	1,32
Кол-во включений	Не мене 11000
Ресурс, ч (300 Вт)	Не менее 5000
Суммарный импульс, КНс	Не мене 300

Выполнение предварительного анализа механической прочности изделия является обязательным требованием разработчика КА на этапе проектирования, что позволяет в дальнейшем минимизировать риски повреждения изделия при его отработке.

Предварительный анализ конструкции снижает риски поломки изделия при проведении квалификационных испытаний, позволяя внедрить необходимые и достаточные изменения в конструкцию с целью ее модернизации для выдерживания требуемых уровней механических нагрузок на этапе лабораторной или инженерной модели, что позволяет ускорить цикл отработки и квалификации новых изделий, а также модернизацию уже существующих под новые механические требования.

Для выполнения такого анализа широкое распространение получили программные системы, основанные на использовании метода конечных элементов (МКЭ).

Расчет прочности двигателя СПД-50 проводился при помощи программного комплекса NISA/DISPLAY ver. 18.0 разработки корпорации CranesSoftware, Inc, Troy, Michigan, USA [2].

Полученные при проведении результаты расчетов позволили провести модернизацию конструкции без проведения дополнительных ресурсных испытаний двигателя и сразу перейти к квалификационным (зачетным) испытаниям.

Анализ проводился с целью определения низших уровней резонансных частот и обеспечения требуемых коэффициентов запаса при воздействии внешних механических факторов.

Для обеспечения требований и соответствия конструкции двигателя заданной спецификации разработчика КА, расчет прочности выполнялся по общепринятым мировым стандартам в соответствии cECSS-E-HB-32-26A[3].Главными задачами расчета являлись:

- расчетная оценка спектров собственных частот двигателя СПД-50;
- расчетная оценка параметров НДС наиболее критичных элементов конструкции при действии внешних механических нагрузок, предъявляемых разработчиком КА;
- определение коэффициентов запаса наиболее критичных элементов конструкций при действии этих же механических нагрузок.

Описание конструкции двигателя СПД-50

Двигатели типа СПД предназначаются для выдачи импульсов тяги в обеспечение довыведения КА на рабочую орбиту.

Двигатель СПД-50 состоит из анодного блока и, расположенного на кронштейне, катодного блока, собранного в виде моноблока.

Общий вид двигателя СПД-50 показан на рисунке 1а.

В состав анодного блока входит несколько «несущих» основных элементов:

- магнитопровод с расположенными на нем внутренней и наружными магнитными катушками, и наружным полюсом;
- камера разрядная с анодом-газораспределителем;
- тракт подачи ксенона с газоэлектрической развязкой и газоподводом;
- теплопровод, соединенный с радиатором-излучателем.

Катод имеет принципиальную схему, аналогичную схемам ранее разработанных катодов для двигателей других типоразмеров, и содержит: капсулу с эмиттером, стартовый нагреватель в виде спирали и поджигной электрод. Подача ксенона в катод осуществляется по газоподводу, а электрическое питание цепей катода осуществляется через клеммник.

Критерии оценки

Критериями расчетной оценки прочности к воздействию нагрузокявляется обеспечение коэффициентов запаса по текучести для металлов и предельной прочности для хрупких материалов, определяемые по формулам:

$$\eta_{\text{Т}} = \left(\frac{\sigma_T}{1.1 \cdot \sigma_{\text{Р}}} - 1 \right) \geq 0 \cdot \quad (1)$$

$$\eta_{\text{В}} = \left(\frac{\sigma_B}{1.25 \cdot \sigma_{\text{Р}}} - 1 \right) \geq 0 \quad (2)$$

где $\eta_{\text{Т}}$ – запас безопасности по текучести;

$\eta_{\text{В}}$ – запас безопасности по пределу прочности;

$\sigma_{\text{Т}}$ – напряжение предела текучести;

σ_B – напряжение предела прочности;

σ_P – максимальное расчетное напряжение в двигателе

Одним из критериев, предъявляемых к двигателю являлось отсутствие резонансных частот ниже области 250 Гц.

Уровни внешних нагрузок, предъявляемые к двигателю

Двигатель и его элементы должны сохранять работоспособность после воздействия следующих нагрузок:

- квазистатических нагрузок на уровне 25g;
- случайной вибрации с максимальным среднеквадратичным значением ускорения 18g.

Моделирование конструкции

Существующие вычислительные техники и программно-математические пакетытипа ABAQUS, NASTRAN, ANSYS, NISA/DISPLAY позволяют внедрить численное моделирование для оценки прочности конструкций как КА в целом, так и отдельных элементов.

Для проведения соответствующих прочностных расчетов была разработана конечно-элементная модель (далее КЭМ) двигателя СПД-50 с использованием программного комплекса NISA/DISPLAY. Общий вид конечно-элементной модели двигателя СПД-50 представлен на рисунке 1б.

Данный расчет прочности проведен с использованием КЭМ, разработанных на основе сборочных чертежей соответствующих блоков. Модели представляют собой основные силовые элементы конструкции.

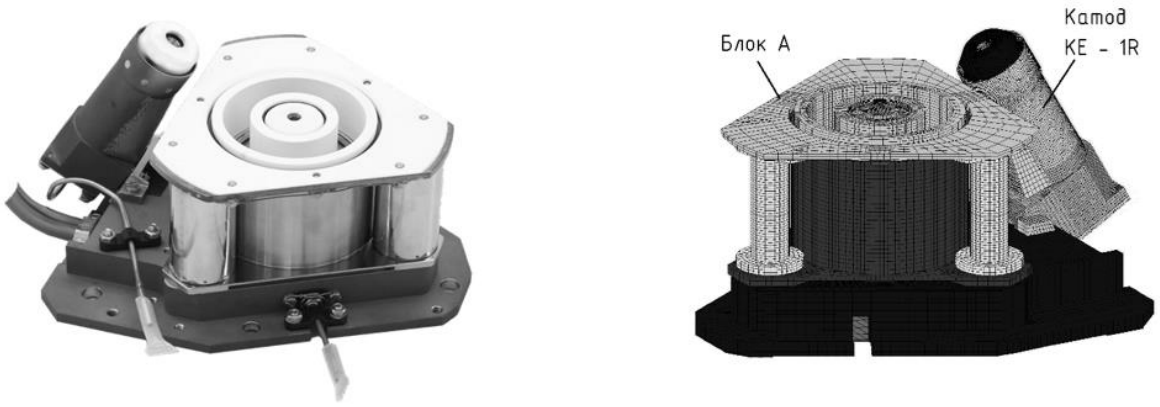
КЭМразработаны с использованием объемных (NKTP=4) и оболочечных (NKTP=20) элементов.

Свойства оболочечных элементов задавались равными номинальным значениям толщин соответствующих деталей.

Соединение различных деталей конструкции проведено с использованием процедуры слияния узлов (MERGENODES) или с использованием "жестких связей" (RIGID ELEMENT).

При разработке КЭМ отдельных элементов конструкции размер назначается с учетом их геометрических особенностей, поэтому плотность сетки конечных элементов для различных деталей может быть различной.

Мировая практика численного моделирования показывает, что при выполнении прочностного анализа, получаемые результаты хорошо коррелируют сэкспериментальными данными и, достоверная оценка амплитуды отклика конструкции позволяет проводить достаточно точную верификацию модели.



а *б*

Рисунок 1. Общий вид двигателя СПД-50
а) внешний вид опытного образца; б) конечно-элементная модель

Модальный анализ

Расчет собственных мод колебаний проводился на основе разработанной КЭМ двигателя СПД-50.

Частотный анализосуществлялся с применением метода Ланцоша [2] в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц,

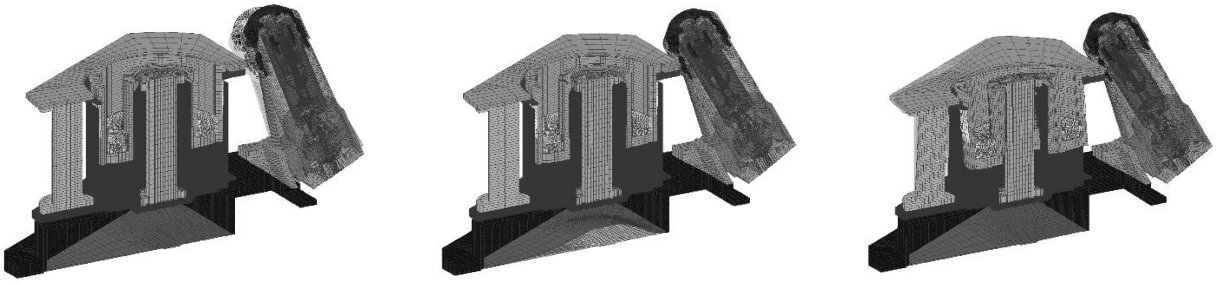
Результаты расчета анодного блока показали, что первая мода составляет ~ 385 Гц и обусловлена колебаниями катода на кронштейне вдоль плоскости крепления двигателя и является основной модой конструкции катодного блока двигателя [3]. Вторая мода колебаний лежит в области ~ 500 Гц и также обусловленаколебаниями катода на кронштейне вдоль другой плоскости крепления двигателя.

Третья мода колебаний составляют ~600 Гц, и является локальнойдля одной из деталей анодного блока двигателя СПД-50 [3].

Основной же модой анодного блока двигателя является четвертая мода колебаний, ее значение равно ~ 700 Гц и обусловлено колебаниями разрядной системы двигателя.

Остальные моды также связаны с колебаниями отдельных частей двигателя и по своей сути являются локальными модами.

На рисунке 2 представлены примеры моды колебаний двигателя СПД-50, полученные в ходе проведения расчета.



Основная мода катодного блока *Локальная мода* *Основная мода анодного блока*

Рисунок 2. Примеры мод колебаний двигателя СПД-50

Верификация конечно-элементной модели двигателя СПД-50

С целью определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) конструкции двигателя на первом этапе проводятся резонансные испытания двигателя посредством проведения испытаний на гармоническую вибрацию.

Преимуществом испытаний на гармоническую вибрацию является достаточная простота этого метода: простые средства задания и контроля режимов нагружения, небольшая погрешность задания режима испытаний, повторяемость (при необходимости повторных испытаний), понятные (с точки зрения толкования результатов измерений) и надежные алгоритмы обработки, легко реализуемые процедуры вырезаний и т. д.[4].

На основании анализа собственных форм колебаний можно оценить степень влияния модификации конструкции на ее динамический отклик. Таким образом, следует рассматривать анализ собственных частот и форм как исходные данные для некоторых типов анализа динамического отклика.

Задача о нахождении отклика линейных систем на гармоническое воздействие методом конечных элементов сводится к решению системы линейных уравнений:

$$[K]u+i\Omega[D]u-\Omega 2[M]u=F \quad (1)$$

где [K], [D] и [M] - матрицы жесткости, демпфирования и масс, соответственно;

F - внешнее воздействие;

Ω - частота возбуждения;

i - мнимая единица;

u - искомый отклик.

С целью определения резонансов конструкции двигатель СПД-50 подвергался воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот 5…2000 Гц при амплитудном значении виброускорения, равном 0,5g.

Испытания проводились методом плавной развертки частоты, при скорости сканирования по частоте, равной 2,0 октавам в минуту.

В процессе проведения испытаний на воздействие синусоидальной вибрации лабораторной модели двигателя СПД-50 были получены результаты АЧХ реального двигателя, которые в последствии были использованы для определения величины отклика и процедуры проведения верификации конечно-элементной модели.

На рисунке 3 представлены места расположения вибропреобразователей для процедуры верификации конечно-элементной модели при проведении испытаний.

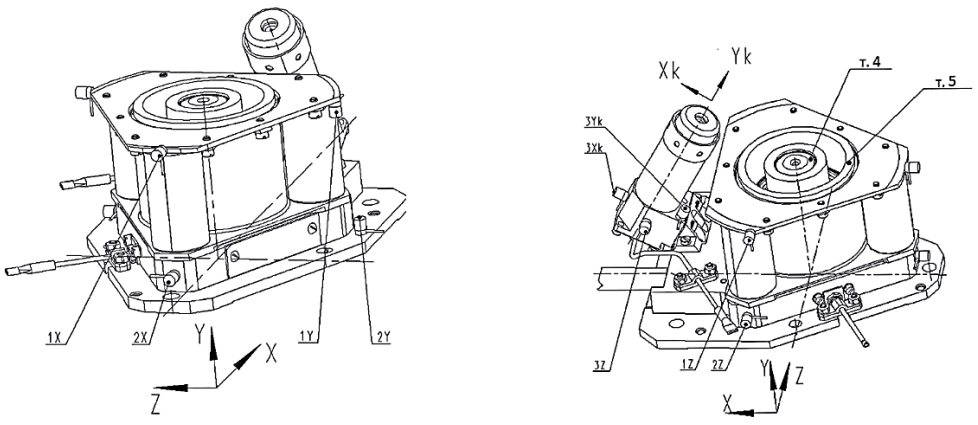


Рисунок 3. Места расположения вибропреобразователей при проведении резонансных испытаний

Анализ отклика на гармоническое воздействие

Для корректной верификации модели необходимо подобрать коэффициенты демпфирования для каждой оси так, чтобы добиться совпадения расчетных амплитудно-частотных характеристик низших тонов колебаний с полученными при испытаниях.

Для определения модального отклика (комплексных передаточных функций) в NISA/DISPLAY был использован модальный метод – FrequencyResponse Analysis, который позволил определить отклик двигателя СПД-50 на гармоническое воздействие в исследуемом частотном диапазоне.

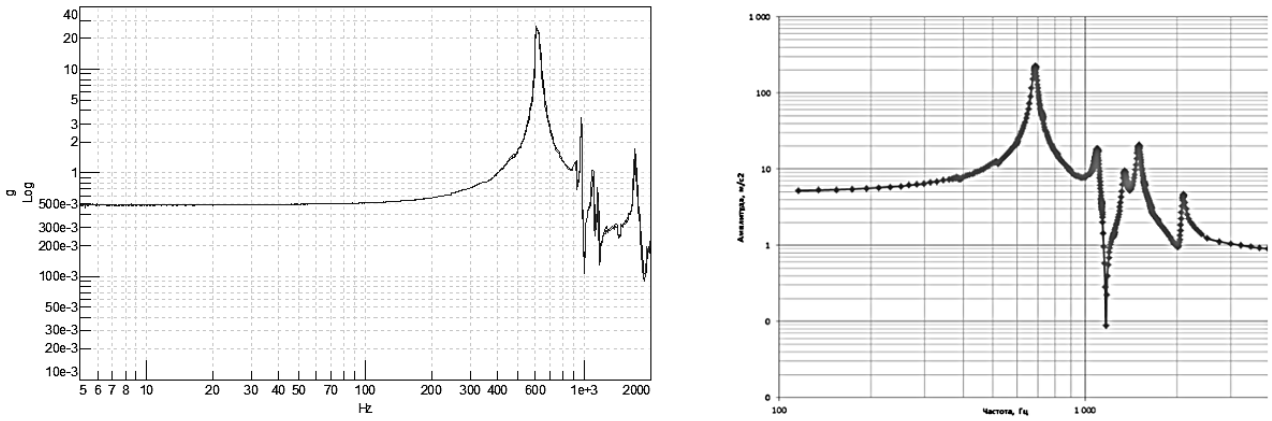
Гармоническое воздействие задавалось вдоль каждой из осей двигателя: X, Y, Z. Для возможности сопоставления результатов расчета с результатами испытаний, гармонический отклик определялся в точках, расположенных в местах установки вибропреобразователей при проведении испытаний.

Расчет на определение частотного отклика двигателя СПД-50 позволил определить величины коэффициентов демпфирования и провести более детальную оценку прочности конструкции двигателя.

В данной статье для примера приводятся результаты расчета отклика конструкции двигателяна воздействие гармонической вибрации вдоль одной из осей двигателя, расположенной вдоль плоскости крепления.

На рисунке 4а представлены амплитудно-частотные характеристики лабораторной модели двигателя СПД-50, полученные при проведении резонансных испытаний вдоль одной из осей. На рисунке 4б представлены АЧХ КЭМ этого же двигателя вдоль той же оси двигателя.

На рисунке 5 для примера приведены результаты расчета отклика двигателя в точках, соответствующих местам расположения вибропреобразователей.



а) *б)*

Рисунок 4. Отклик на гармоническое воздействие в точке 1Z
а) испытаниям лабораторной модели двигателя СПД-50; б) конечно-элементное моделирование

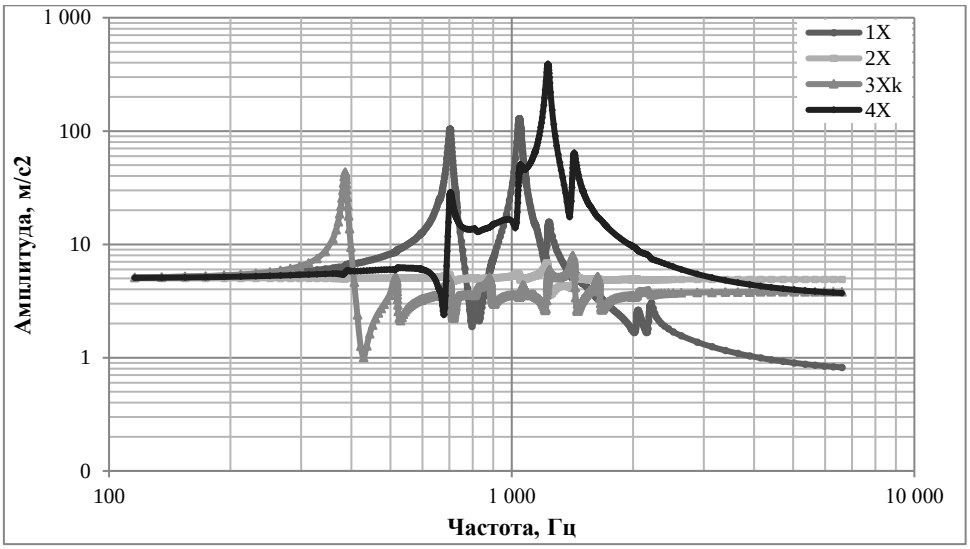


Рисунок 5. Отклик на гармоническое воздействие в точках, соответствующих расположению вибропреобразователям, в направлении одной из осей двигателя

По результатам испытаний лабораторной модели двигателя коэффициенты демпфирования были определены для каждой из осей гармонического воздействия для анодного и катодного блоков двигателя отдельно. Результаты определения коэффициентов демпфирования приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Значения коэффициентов демпфирования двигателя СПД-50

Коэффициент демпфирования		
Ось	**Анодный блок**	**Катодный блок**
X	0,0125	0,075
Y	0,0015	0,030
Z	0,0125	0,011

Определение значений коэффициентов демпфирования для анодного и катодного блоков отдельно позволило провести дальнейший расчет прочности на воздействие случайной вибрации с более высокой точностью и в дальнейшем приступить к доработке конструкции двигателя СПД-50для успешного прохождения приемочных и квалификационных испытаний.

Для более точного проведения процедуры верификации математической и реальной моделей двигателя рекомендуется пользоваться статистическими данными для расчета средних значений амплитудно-частотных характеристик, вычисляя средние значения первых тонов колебаний и соответствующих им амплитуд. На момент проведения данного расчета были данные АЧХ, полученные в результате проведенных резонансных испытаний, только для лабораторной модели двигателя старой конфигурации, которая требовала срочной доработки после проведения ряда неудачных испытаний на прочность.

Анализ конструкции при воздействии внешних механических нагрузок

После проведенного предварительного анализа прочности КЭМ, созданной в соответствии с лабораторной моделью двигателя СПД-50 (до ее модернизации), были определены критичные элементы двигателя и проведен ряд мероприятий по устранению причин несоответствий двигателя СПД-50: некоторые детали были модернизированы, также проведен ряд замен материалов в конструкции двигателя, проведен анализ крепежных элементов конструкции, проведен ряд мероприятий по доработке некоторых технологических процессов и пр., далее вновь был проведен прочностной расчет модернизированной конструкции двигателя СПД-50 для подтверждения соответствия механическим требованиям разработчика КА.

Расчет прочности проводился на подтверждение требованиям квазистатической нагрузки и случайной вибрации.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции двигателя СПД-50 при воздействии механических нагрузок проводился для осей X, Y и Z.

Коэффициенты запаса для элементов определялись по формуле 1.

Для определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкции при действии квазистатических нагрузок используется расчетный модуль STATIC ANALYSIS.

Для расчёта НДС прикладывалось ускорение 250 м/с^2 (25 g) вдоль выбранной оси. Результаты расчета коэффициентов запаса для элементов двигателя при воздействии квазистатической нагрузки показали соответствие значений коэффициентов запаса требованиям разработчика КА. Минимальный коэффициент запаса при этом составил 2,9 по текучести для одного из «несущих» элементов анодного блока двигателя СПД-50. Для катодного блока коэффициенты запаса для этого вида нагружения были больше 10.

Для определения параметров НДС элементов конструкции при действии случайной вибрации используется расчетный модуль DINAMIC ANALYSIS.

Анализ проводился при воздействии случайной вибрации вдоль каждой из осей двигателя со среднеквадратичным значением виброускорения18g.

Результаты расчета коэффициентов запаса для элементов двигателя при воздействии случайной вибрации показали соответствие значений коэффициентов запасатребованиям разработчика КА. Минимальный коэффициент запаса при этом составил 1,5 для одного из по текучести для одного из «несущих» элементов анодного блока и 0,7 по текучести для одного из «несущих» элементов катодного блока двигателя СПД-50.

Вывод

На этапе выведения КА ракетой-настелем двигатель СПД-50 испытывает существенные механические нагрузки.

Для анодного блока двигателя СПД-50 основная собственная мода колебаний обусловлена колебаниями разрядной системы, что приводит к возникновению значительных напряжений в одном из «несущих»элементов при действии как квазистатических нагрузок, так и случайной вибрации вдоль одной из поперечных осей двигателя. При этом механические воздействия по одному из поперечных направлений двигателя, наиболее критично действуют на катодный блок. Катодный блокдвигателя разработан таким образом, что критичные элементы демпфируются за счет особенностей конструкции, что даже имея небольшие коэффициенты запаса в «несущих» элементах, двигатель успешно прошел механические испытания на уровни нагрузок, заданные разработчиком КА.

Заключение

Полученные при проведении анализа результаты позволили избежать проведения дополнительных исследовательских механических испытаний двигателя и сразу перейти к квалификационным испытаниям. Более того, рассмотренный тип двигателя уже поставляется для летного применения и уже эксплуатируется на орбите. Таким образом, подтверждена состоятельность метода численного моделирования при доработке изделия под ужесточившиеся требования спецификации заказчика.

Список литературы:

1 В.Ю. Клюшников, И.И. Кузнецов, А.С. Осадченко. Тенденции развития группировок малых КА и средств их выведения на орбиты// Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований//ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 2015.- с. 73-79.

2 Manual “NISA FAMILY OF PROGRAMS, NISA-DISPLAY”, Engineering Mechanics Research Corporation, Troy, Michigan, USA.

3 ECSS-E-HB-32-26A. Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook, 19 February, 2013.

4 В.И. Копытов, С.А. Орлов.О процедурах приемочных испытаний космических аппаратов на механические воздействия // Решетневские чтения: Материалы XIX междунар. науч.-практ. конф., (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск) / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. - Ч. 2. - с. 373-375.