

УДК 533.9.07

А. В. ЛОЯН, А. И. ЦАГЛОВ, А. И. ПИСАНЫЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТИПА СПД100 НА СТАРТОВЫЕ НАГРУЗКИ**

В статье представлен анализ конструкции стационарного плазменного двигателя типа СПД100 под действием стартовых нагрузок, а именно гармонической и широкополосной случайной вибрации, ударных нагрузок. Приведены результаты предварительных расчетов на собственные резонансные частоты (модальный анализ), которые показали наличие резонансных частот в области ниже 2000 Гц, входящих в диапазон широкополосной случайной вибрации ракетоносителя. Изложены методы модернизации конструкции двигателя и результаты последующих моделирований на собственные частоты, вибрационные и ударные нагрузки. Показано, что напряжения и деформации в элементах усовершенствованной конструкции двигателя не превышают допустимых значений для материалов, из которых изготовлены данные детали.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, стационарный плазменный двигатель, модальный анализ, гармоническая вибрация, широкополосная случайная вибрация, ударные нагрузки

Введение

Стационарный плазменный двигатель (СПД) является электроракетным двигателем (ЭРД), который представляет собой устройство, преобразующее подводимую электрическую энергию в кинетическую энергию реактивной струи. Рассматриваемый в работе СПД100 обладает тягой в 80 мН при потребляемой мощности 1350 Вт и может быть использован на космических аппаратах различного назначения: от околоземных геостационарных спутников связи до межпланетных космических аппаратов. Двигатели данного типоразмера были использованы на таких спутниках, как Экспресс-АМ44, АМОС 5, и множестве других космических аппаратов [1].

Данный тип двигателя различных типоразмеров длительное время исследуется в отделении ЭРД ХАИ. Были изготовлены и испытаны модели двигателей с различной потребляемой мощностью, а именно СПД20 (100 Вт), СПД70 (650 Вт) и СПД100 (1350 Вт) [2, 3]. Фотография данных двигателей представлена на рис. 1.

Важным вопросом при разработке ЭРД является обеспечение стойкости конструкции двигателей к механическим нагрузкам, возникающим при старте ракеты-носителя, а именно к инерциальным, вибрационным и ударным. Вибрации возникают вследствие протекания нестационарных процессов внутри маршевого двигателя ракеты-носителя и процесса обтекания ракеты атмосферным воздухом. Опасность данные вибрации вызывают в случае возникновения резонанса с частями ракеты либо ее полез-

ной нагрузки. В случае резонанса может произойти усталостная поломка компонентов. Ударные нагрузки возникают при старте ракеты-носителя с земли, а также при отделении ступеней.



Рис. 1. СПД лаборатории ЭРД ХАИ

В процессе проектирования двигателей широко используются методы математического моделирования. Например, анализ конструкции методом конечных элементов (МКЭ) предоставляет возможность проверять спроектированную конструкцию до ее отправки в производство. Вследствие этого значительно уменьшается стоимость проектирования, так как исчезает необходимость в испытаниях большого количества тестовых образцов, что значительно снижает время испытаний. Также появляется возможность поэтапной модернизации, направленной на максимальное облегчение конструкции, что является очень важным параметром для космической техники

Поэтому моделирование конструкции ЭРД на действие стартовых механических нагрузок является важным этапом проектирования двигателей.

Цель работы

Целью данной работы являлось проведение моделирования конструкции электроракетного двигателя СПД100 методом конечных элементов под действием стартовых нагрузок с целью выявления слабых мест и последующей модернизации конструкции двигателя.

Предварительные расчёты

В процессе расчета был использован пакет программ ANSYS Workbench, который позволяет произвести расчеты ударных и вибрационных нагрузок при помощи МКЭ [4]. В данной среде производился расчет собственных частот двигателя (ANSYS modal). Последующим шагом являлась проверка модели двигателя в условии гармонических вибраций (ANSYS harmonic response). Также проводился расчет двигателя под воздействием широкополосных случайных вибраций (ШСВ) (ANSYS random vibration), и ударных нагрузок (ANSYS response spectrum). Это позволило получить данные о напряжениях, возникающих в двигателе, и, сравнивая их с допустимыми напряжениями материалов, сделать заключение о прочности конструкции двигателя в условиях ударных и вибрационных нагрузок.

Твердотельная модель двигателя СПД100 представлена на рис. 2.

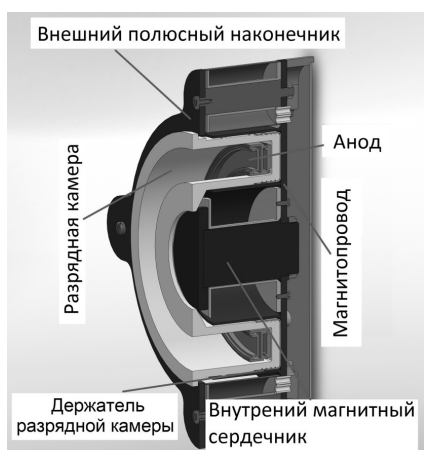


Рис. 2 3D модель двигателя

При моделировании учитывался способ крепления двигателя к мотораме. В качестве жесткой заделки была выбрана задняя стенка двигателя, на которой располагаются крепежные отверстия. Для моделирования были использованы характеристики материалов, полученные из справочных данных [5],

а именно: плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Магнитная система двигателя была изготовлена из электротехнической стали 10880, разрядная камера (РК) - из нитрида бора, анод и полюсные наконечники - из пермендюра 49КФ, проводка и катушки электромагнитов - из меди, соединительные болты и гайки - из стали 12Х18Н9Т и титана.

Результаты модального анализа первоначальной модели двигателя представлены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты модального анализа

| № | Резонансная частота, Гц | Резонирующая деталь двигателя |
|----|-------------------------|--|
| 1 | 1611,1 | Внутренний магнитный сердечник + магнитопровод |
| 2 | 1615,7 | |
| 3 | 1731,8 | |
| 4 | 1866,2 | Внешний полюсный наконечник |
| 5 | 1918,6 | |
| 6 | 1920,5 | |
| 7 | 1980,9 | Анод |
| 8 | 2457,9 | |
| 9 | 2461,3 | Внешний полюсный наконечник |
| 10 | 2591,8 | |

Исходя из технических характеристик ракеты-носителя (РН) «Днепр» [6], были заданы следующие виды стартовых механических нагрузок (таблица 2).

Таблица 2
Стартовые нагрузки РН «Днепр»

| Вид нагрузки | Частота, Гц | Нагрузка |
|-----------------------------------|-------------|--------------------------------|
| Синусоидальная вибрация | 5-10 | 0,5g |
| | 10-15 | 0,6g |
| | 15-20 | 0,5g |
| Широкополосная случайная вибрация | 20-160 | 0,007g ² /Гц |
| | 160-320 | 0,022-0,035 g ² /Гц |
| | 320-640 | 0,035 g ² /Гц |
| | 640-1280 | 0,035-0,017 g ² /Гц |
| Ударные нагрузки | 1280-2000 | 0,017-0,005 g ² /Гц |
| | 30 | 5 g |
| | 1000 | 1000 g |
| | 5000 | 1000 g |

Анализируя представленные данные (табл. 1,2), а именно собственные резонансные частоты двигателя и диапазон случайной вибрации в 20-2000 Гц, было принято решение модернизировать конструкцию двигателя с целью повысить резонансные частоты до уровня свыше 2000 Гц. Основываясь на результатах анализа, наиболее критичными элементами, требующими доработки, являлись магнитопровод, внутренний магнитный сердечник и внешний полюсный наконечник.

Модернизация конструкции двигателя

С целью повышения уровня резонансных частот, в конструкцию двигателя были внесены следующие изменения:

- внутренний магнитный сердечник был сделан полым;
 - магнитопровод был утолщен и дополнительно усилен ребрами жесткости
 - внешний полюсный наконечник был утолщен.
- Модернизированная конструкция двигателя была повторно рассчитана на действие стартовых нагрузок.

Моделирование усовершенствованной конструкции двигателя

Результаты модального анализа усовершенствованной конструкции представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты модального анализа усовершенствованной конструкции двигателя

| № | Резонансная частота, Гц | Резонирующая деталь двигателя |
|----|-------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1902 | Магнитопровод |
| 2 | 2107,3 | |
| 3 | 2118,2 | |
| 4 | 2242,6 | Внешний полюсный наконечник |
| 5 | 2351,7 | |
| 6 | 2355,3 | |
| 7 | 2470,5 | |
| 8 | 2604,5 | Анод |
| 9 | 2623,6 | |
| 10 | 3923,3 | Внешний полюсный наконечник |

Из представленных данных видно, что резонансные частоты двигателя значительно выросли. При этом только одна резонансная частота магнитопровода попадает в диапазон стартовых случайных вибраций. С целью проверки конструкции на стойкость к стартовым нагрузкам были проведены моделирования на возникающие в конструкции напряжения.

Результаты моделирование конструкции двигателя под действием синусоидальной, ШСВ и ударных нагрузок приведены в табл. 4. В качестве допустимого значения напряжений в конструкции СПД100, были взяты напряжения, соответствующие пределу текучести материала, разделенного на коэффициент запаса прочности, принятому 1,1.

В ходе расчетов максимальные напряжения были получены на держателе РК и магнитопроводе.

Таблица 4
Результаты моделирование на действие вибрационных и ударных нагрузок

| | Макс. напряжение, МПа | Название детали, материал | Доп. значение, МПа |
|-------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|
| Синусоидальная вибрация | 0,034 | Держатель РК, 29НК | 227 |
| | ШСВ | | |
| Ударные нагрузки | до 60 | Магнитопровод, сталь 10880 | 136 |
| | до 35 | | |

Таким образом, максимальные напряжения в конструкции усовершенствованной модели СПД100 не превышают 26 % от предельных, что говорит о стойкости конструкции к стартовым нагрузкам и возможности дальнейшего снижения массы.

Выводы и дальнейшие перспективы

Проведенное моделирование двигателя типа СПД100 на действие стартовых нагрузок позволило выявить критические места конструкции и провести её модернизацию. Результаты анализа усовершенствованной конструкции двигателя продемонстрировали стойкость СПД к стартовым нагрузкам.

Дальнейшими работами являются изготовление действующей модели СПД100, проверка её рабочих характеристик и испытания на вибростенде.

Литература

1. Гориков, О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О. А. Гориков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда. – М. : Машиностроение, 2008 – 280 с.
2. Loya, A. V. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Thruster [Электронный ресурс] / A. V. Loya, T. A. Maksymenko // 30th International Electric Propulsion Conference – 2007. – IEPC-2007-100. – P. 1-14. Режим доступа : <http://erps.spacegrant.org/index.php?page=2007-file-directory>. – 1.04.2015.
3. Тимов, М. Ю. Измерение зондовых характеристик в разрядном канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Тимов, А. В. Лоян // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8(125). – С. 82–88.
4. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: справ. пособие [Текст] / Р. Т. Андреева, С. И. Ипатова, Н. С. Розина [и др.]. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
5. Space Launch System Dnepr User's guide [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://snebulos.mit.edu/projects/crm/DNEPR/Dnepr_User_Guide.pdf. – 1.06.2016.

References

1. Gorshkov, O. A., Muravlev, V. A., Shagayda, A. A. *Khollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov* [Hall effect and ion thrusters for space vehicles], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 280 p.
2. Loyan, A. V., Maksymenko, T. A. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Thruster *Proceedings of 30th International Electric Propulsion Conference, 2007*. pp. 1-14.
3. Totov, M. Y., Loyan, A. V. Izmerenie zondovykh kharakteristik v razryadnom kanale statsionarnogo plazmennogo dvigatelya [Measurements of probe

characteristics in the discharge channel of stationary plasma thruster]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 8 (125), pp. 82-88. (In Russian).

4. Andreeva, R. T., Ipatova, S. I., Rozinova, N. S. *Svoystva i primeneniye metallov i splavov dlya elektrovakuumnykh priborov* [Features and applications of metals and alloys for electro-vacuum industry]. Energiya Publ., 1973. 336 p.

5. *Space Launch System Dnepr User's guide* [The global pharmaceutical industry]. Available at: https://snebulos.mit.edu/projects/crm/DNEPR/Dnepr_User_Guide.pdf (accessed 1.06.2016).

Поступила в редакцию 6.06.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, доц., доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сысоев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА ТИПУ СПД100 НА СТАРТОВІ НАВАНТАЖЕННЯ

А. В. Лоян, О. І. Цаглов, А. І. Писаний

У статті представлений аналіз конструкції стаціонарного плазмового двигуна типу СПД100 під дією стартових навантажень, а саме гармонійної і ширококуткової випадкової вібрації, ударних навантажень. Наведено результати попередніх розрахунків на власні резонансні частоти, які показали наявність резонансних частот в області нижче 2000 Гц, що входять в діапазон ширококуткової випадкової вібрації ракетоносця. Викладено методи модернізації конструкції двигуна і результати подальших моделювань на власні частоти, вібраційні і ударні навантаження. Показано, що напруги і деформації в елементах вдосконаленої конструкції двигуна не перевищують допустимих значень для матеріалів, з яких виготовлені дані деталі.

Ключові слова: електроракетний двигун, стаціонарний плазмовий двигун, модальний аналіз, гармонійна вібрація, ширококуткова випадкова вібрація, ударні навантаження

MODELING OF STATIONARY PLASMA THRUSTER TYPE SPT100 CONSTRUCTION ON LAUNCH LOADS

A. V. Loyan, A. I. Tsaglov, A. I. Pysaniy

The article presents an analysis of the stationary plasma thruster type SPT100 construction under the influence of launch loads, namely the harmonic and broadband random vibration, shock loads. The results of preliminary calculations of own resonant frequencies (modal analysis) are shown the presence of resonance frequencies in the range below 2000 Hz, within the range of broadband random vibration of rocket. The modernization methods of thruster construction and the results of subsequent simulations on the natural frequencies, vibration and shock load are presented. It was shown that stress and strain in the elements of thruster construction do not exceed allowable values for the materials of which these parts were manufacture.

Keywords: electric propulsion, stationary plasma thruster, modal analysis, harmonic vibration, broadband random vibration, shock load

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Цаглов Александр Игоревич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.tsaglov@khai.edu.

Писаний Антон Игоревич – студент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.i.pysaniy@gmail.com.

Loyan Andrey Vitaliyovich - Candidate of Technical Science, Senior Researcher of department 402, head of Electric Propulsion department of MSTC STE, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Tsaglov Alexandr Igorevich - Candidate of Technical Science, Senior Researcher of department 402, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: a.tsaglov@khai.edu.

Pysaniy Anton Igorevich – student of National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: a.i.pysaniy@gmail.com.