

УДК 620.178.4/6

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-521-526

Для цитирования: Иголкин А. А., Филипов А. Г. Об альтернативном методе обработки динамической прочности конструкции малого космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 521–526. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-521-526.

For citation: Igolkin A. A., Filipov A. G. [On an alternative method for testing the dynamic strength of a small spacecraft structure]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 521–526. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-521-526.

Об альтернативном методе обработки динамической прочности конструкции малого космического аппарата

А. А. Иголкин, А. Г. Филипов*

Самарский университет
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34
*E-mail: iskander-filipov@yandex.ru

В данной статье представлен анализ возможности применения альтернативного метода обработки на механические воздействия конструкции малого космического аппарата дистанционно-зондирования Земли, имеющего изделие-аналог, прошедший полный цикл наземной экспериментальной обработки. Однако, несмотря на схожую силовую схему и максимальное заимствование бортовой аппаратуры с минимальными доработками, планируемый к обработке космический аппарат имеет ряд существенных отличий. Рассмотрено применение основных альтернативных методов в зарубежной и отечественной практике при наземной экспериментальной обработке космической техники, описаны их преимущества и недостатки. Приведены некоторые рекомендации принятия решений об отказе от применения традиционных методов наземной экспериментальной обработки космической техники на механические воздействия.

Анализ принятой в отечественной отрасли нормативно-технической документации в части уточнения перечня обработочных испытаний космических аппаратов, допущений применения расчетно-экспериментального метода к обработке динамической (вибрационной) прочности и анализ конструкции планируемого к обработке космического аппарата в сравнении с изделием-аналогом показал, что наиболее предпочтительным для обработки динамической (вибрационной) прочности является метод «протоквалификации». В соответствии с выбранным методом были определены задачи, которые позволят уточнить перечень обработочных испытаний объекта исследования.

Ключевые слова: вибрационная прочность, динамические испытания, наземная экспериментальная обработка, протоквалификация.

On an alternative method for testing the dynamic strength of a small spacecraft structure

A. A. Igolkin, A. G. Filipov*

Samara University
34, Moskovskoe shosse St., Samara, 443086, Russian Federation
*E-mail: iskander-filipov@yandex.ru

This article presents an analysis of the possibility of applying an alternative approach to testing the mechanical effects of the design of a small spacecraft for remote sensing of the Earth, which has an analog product that has passed a full cycle of ground experimental testing. However, despite the similar power

scheme and the maximum borrowing of onboard equipment with minimal modifications, the spacecraft planned for testing has a number of significant differences. The application of the main alternative strategies in foreign and domestic practice in the ground-based experimental development of space technology is considered, their advantages and disadvantages are described. Some criteria for decision-making on the rejection of the use of traditional methods of ground-based experimental testing of space technology for mechanical effects are given.

The analysis of the normative and technical documentation adopted in the domestic industry in terms of clarifying the list of development tests of spacecraft, the assumptions of applying the computational and experimental method to the development of dynamic (vibration) strength and the analysis of the design of the spacecraft planned for testing in comparison with an analog product showed that the most preferred method of testing dynamic (vibration) strength is the strategy "protocol qualifications". In accordance with the chosen strategy, a list of tasks was defined that will clarify the nomenclature of the development tests of the research object.

Keywords: vibration strength, dynamic testing, in the ground experimental development, protoqualification.

Введение

Одним из основных этапов жизненного цикла космического аппарата (КА) является его наземная экспериментальная отработка, и, как правило, это весьма затратный по стоимости и продолжительный по времени этап.

При традиционном подходе к отработке динамической (вибрационной) прочности образцы конструкции, прошедшие зачетные испытания, не допускаются к летной эксплуатации. Однако в зарубежной практике используются альтернативные подходы, которые позволяют уменьшить перечень используемых образцов при отработочных испытаниях, – методы испытаний, которые в отдельности или совокупности с другими методами могут использоваться при отработке. При этом признается, что применение альтернативных методов ведет к большему риску по сравнению со стандартной процедурой, регламентированной действующей в отрасли нормативной документацией, когда летный образец проходит приемочные испытания, а квалификационные запасы продемонстрированы на отдельном, соответствующем типу испытаний образце при зачетных испытаниях. Повышение риска при таких методах отработки может быть компенсировано более тщательным проведением конструкторско-доводочных испытаний (КДИ), увеличением проектных коэффициентов безопасности [1].

Методы отработки

В зарубежной практике, согласно [1–12], применяются следующие основные альтернативные методы экспериментальной отработки (необходимо отметить, что данные методы могут использоваться на различных уровнях комплектации, включая различные их комбинации на уровнях комплектации: КА в целом, его подсистемы или оборудование):

1) метод резервирования – опытный образец (макет, соответствующий виду отработки), прошедший зачетные испытания, может быть допущен к летной эксплуатации при условии минимизации риска за счет проведения (при необходимости) ремонтно-восстановительных работ, замены габаритно-массовых макетов оборудования на штатные и при условии успешного прохождения опытным образцом приемочных испытаний;

2) метод без зачетных испытаний – летные образцы подвергаются приемочным испытаниям на повышенные уровни воздействия (но ниже квалификационных уровней воздействия), при этом имеется риск того, что оставшийся ресурс конструкции может быть недостаточен (так как отсутствует демонстрация квалификационных запасов);

3) метод «протоквалификации» – первое летное изделие подвергается зачетным испытаниям с некоторыми изменениями (используются смягченные уровни нагружения с расчетным сопровождением анализа нагружения и прочности конструкции изделия). Приемка прошедших

испытания типа «протофлайт» компонентов проводится по результатам анализа фактически израсходованного ресурса, что позволяет определить необходимость восстановительных работ.

Несмотря на то, что критерии принятия решения об отказе от испытаний в зарубежной практике, как правило, не являются определенными и фиксированными и решения принимаются на основе детального анализа, в котором могут использоваться повышенные коэффициенты безопасности, все же существуют определенные рекомендации [1]:

- простота конструкторских решений (например, статическая определенность, геометрическая неизменяемость), распределение и передача нагрузок на подконструкции простые и предсказуемые. Все возможные комбинации нагрузок полностью промоделированы и проанализированы для всех случаев предполагаемой эксплуатации исследуемого объекта;

- конструкция аналогична в части общей конфигурации, конструктивных особенностей и комбинаций нагрузок ранее успешно испытанной конструкции изделия-аналога при условии подтверждения результатов расчетов измерениями;

- были проведены успешные КДИ или испытания отдельных элементов, которые считаются затруднительными для анализа, при этом результаты испытаний и расчетов хорошо коррелируют между собой.

Альтернативные методы отработки прочности также применяются в отечественной практике. Так, например, В. Д. Куреев, С. В. Павлов, Ю. А. Соколов (НИИ им А. А. Максимова, филиал ФГУП им. М. В. Хруничева) в своей статье описывали перспективную схему применения протолетного подхода при наземной экспериментальной отработке наноспутников [13]. В работе В. И. Копытова и С. А. Орлова (ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева) рассматривался порядок формирования режимов протолетных испытаний [14]. И. И. Зимин и др. в статье о принципах построения унифицированной космической платформы предлагают проводить полный цикл наземной отработки для субмодулей унифицированной платформы, а для последующих платформ объем отработки сократить до минимально необходимого [15].

Анализ и выбор метода отработки

Согласно требованиям, действующим в отрасли НТД, наземным испытаниям подвергаются все вновь создаваемые, модернизируемые КА, а также КА, для которых принципиально изменены условия функционирования, при этом перечень конкретных видов отработочных испытаний включает в себя проведение динамических (вибропрочностных) испытаний. Однако существует возможность уточнения (определения) перечня конкретных видов отработочных испытаний, включаемых в комплексную программу экспериментальной отработки.

Отработка вибрационной прочности включает в себя расчетную и экспериментальную отработку. Анализ требований стандартов вибрационной отработки показал, что, не смотря на совершенствование методов аналитической отработки прочности с применением подтвердивших свою надежность программных комплексов (Nastran, Ansys и др.), принятым за основу критерием, подтверждающим расчет, является его экспериментальная проверка, а в некоторых случаях нагружения (ударная нагрузка, вибрационное нагружение) допускается осуществлять исключительно с экспериментальной проверкой. Однако в ряде случаев те же стандарты регламентируют допущения, позволяющие уточнить перечень отработочных испытаний КА при выполнении определенных условий:

- наличие изделий-аналогов, на которых проведены необходимые отработочные испытания КА;
- коррекция расчетного анализа нагружения и прочности по результатам эксперимента;
- полный объем проведенной автономной отработки составных частей КА;
- выполнение требований норм прочности по результатам уточненного расчета конструкции КА;
- двойной запас прочности по измененным по сравнению с изделием-аналогом элементам конструкции, но с неизменной силовой схемой, материалами, технологиями изготовления, динамическими характеристиками и т. п.

Конструкция и компоновка МКА ДЗЗ в отличие от МКА «Аист-2Д» [16], несмотря на схожую силовую схему и максимальное заимствование бортовой аппаратуры с минимальными доработками, имеет ряд принципиальных отличий:

- на МКА ДЗЗ добавлен еще один комплект целевой аппаратуры обеспечения режима стереосъемки;
- проведена существенная переработка схемы установки целевой аппаратуры с применением шарнирного закрепления к силовой платформе аппарата;
- добавлена в состав МКА ДЗЗ двигательная установка для поддержания параметров орбиты в течение всего срока существования на рабочей орбите.

Изменение состава целевой и обеспечивающей аппаратуры, а, следовательно, и изменение мест установки приборов под измененный состав целевой и обеспечивающей аппаратуры приводит к изменению массово-центровочных и жесткостных характеристик МКА ДЗЗ по сравнению с МКА «Аист-2Д».

При приведенных выше различиях от изделия-аналога в соответствии с нормативно-технической документацией, принятой в отрасли, допущение применения расчетно-экспериментального метода к обработке динамической (вибрационной) прочности МКА требует разработки согласованного с заказчиком и головным институтом решения, в котором необходимо определить метод подтверждения динамической (вибрационной) прочности изделия, указать порядок работ и уточнения номенклатуры отработочных испытаний МКА в сборе.

Анализ различных методов экспериментальной обработки в странах ЕС и США показывает, что наиболее целесообразным является применение метода «Протоквалификации», который потенциально позволит уменьшить риск недостаточного ресурса после испытаний (по сравнению с методом без зачетных испытаний), а также потенциально минимизировать объем ремонтно-восстановительных работ (по сравнению с методом резервирования).

Подтверждение целей и решения задач обработки динамической (вибрационной) прочности МКА ДЗЗ может быть выполнено с помощью разработанного расчетно-экспериментального метода. При реализации расчетно-экспериментального метода будут выполнены следующие работы, которые позволят уточнить перечень отработочных испытаний МКА ДЗЗ:

- автономные испытания компонентов КА (КДИ);
- анализ нагрузок и прочности по конечно-элементной модели (КЭМ) МКА ДЗЗ (в соответствии с условиями эксплуатации), разработанной на основании проектно-конструкторской документации и результатов наземной экспериментальной обработки по прочности изделия-аналога МКА «Аист-2Д»;
- разработка рекомендаций по установке датчиков-преобразующей аппаратуры для контроля нагружения летного образца при его протоквалификационных динамических (вибропрочностных) испытаниях;
- определение режимов протоквалификационного нагружения летного образца МКА ДЗЗ;
- проведение протоквалификационных динамических (вибропрочностных) испытаний летного образца МКА ДЗЗ;
- коррекция расчетной КЭМ МКА ДЗЗ, создание высокоточной КЭМ МКА ДЗЗ, расчет нагрузок и прочности по откорректированной высокоточной КЭМ;
- определение объема и проведение ремонтно-восстановительных работ (при необходимости);
- разработка заключения о прочности МКА ДЗЗ и допуска его к летным испытаниям в части прочности.

Заключение

В результате анализа НТД, принятой в отрасли, а также анализа отличий планируемой к обработке на механические воздействия конструкции КА от изделия-аналога, успешно прошедшего полный цикл наземной экспериментальной обработки, был разработан метод расчетно-

экспериментальной отработки динамической (вибрационной) прочности МКА ДЗЗ, основанный на применяемом в зарубежной практике методе «протоквалификации».

С целью возможности применения альтернативного метода при отработке МКА ДЗЗ требуется разработка рекомендаций к расчетным работам, которые могут быть представлены как демонстрация проведения расчетных работ с их коррекцией по результатам испытаний на протоквалификационные уровни нагружения, подтверждения достаточности ресурса конструкции после проведения протоквалификационных испытаний летного образца МКА ДЗЗ с определением критериев, по которым в дальнейшем могут быть осуществлены ремонтно-восстановительные работы (при необходимости).

Благодарности. Описанные в настоящей статье научно-исследовательские результаты получены в рамках выполнения гранта РНФ 23-19-20025.

Acknowledgments. The research results described in this article were obtained within the framework of the Russian Science Foundation grant 23-19-20025.

Библиографические ссылки

1. Введенский Н. Ю., Пустобаев М. В. Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики. 2012. Т. 130. С. 19–26.
2. Product verification requirements for launch, up-per-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D. 15 January, 1999. 308 p.
3. MIL-STD-1540C. Test Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicles.
4. ISTS 94-b-01. M.C. Low, C.E. Lifer. Recent Developments in Structural Verification of Spacecraft.
5. SSP 30559, Rev. B. ISS. Structural Design and Verification Requirements.
6. SSP 41172B. ISS. Qualification and Acceptance Environment Test Requirements.
7. NASA-STD-5001. Structural Design and Test Factors of Safety for Spaceflight Hardware.
8. http://www.ruag.com/de/Space/Products/Launcher_Structures_Separation_Systems/Adapters_Separation_Systems/payload_adapter_systems.
9. NASA-STD-5002. Loads Analysis of Spacecraft and Payloads.
10. Force limited vibration testing. NASA-HDBK-7004. 2000. May 16. 21 p.
11. Space engineering. Testing. ECSS-E10-03A, 15 02 2002. 170 p.
12. Space engineering. Verification guidelines. ECSS-E-HB-10-02A, 1712 2010. 96 p.
13. Перспективы реализации «протолетного» подхода при наземной отработке наноспутников / В. Д. Куреев, С. В. Павлов, Ю. А. Соколов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 477–481. DOI 10.17586/0021-3454-2016-59-6-477-481.
14. Копытов В. И., Орлов С. А. О процедуре протолетных и приемных испытаний космических аппаратов на механические воздействия // Решетневские чтения. 2013. Т. 1. С. 18–19.
15. Принципы субмодульного построения унифицированной космической платформы / И. И. Зимин, М. В. Валов, В. Е. Чеботарев // Исследования наукограда. 2017. Т. 1, № 4(22). С. 161–165. DOI 10.26732/2225-9449-2017-4-161-165.
16. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Е. В. Шахматов и др. Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. 324 с.

References

1. Vvedensky N.Yu., Pustobaev M.V. [Analysis of testing space technology for mechanical impacts in the US, EU and RF]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2012, Vol. 130, P. 19–26 (In Russ.).
2. Product verification requirements for launch, up-per-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D. 15 January, 1999. 308 p.

3. MIL-STD-1540C. Test Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicles.
4. ISTS 94-b-01. M.C. Low, C.E. Lifer. Recent Developments in Structural Verification of Spacecraft.
5. SSP 30559, Rev. B. ISS. Structural Design and Verification Requirements.
6. SSP 41172B. ISS. Qualification and Acceptance Environment Test Requirements.
7. NASA-STD-5001. Structural Design and Test Factors of Safety for Spaceflight Hardware.
8. http://www.ruag.com/de/Space/Products/Launcher_Structures_Separation_Systems/Adapters_Separation_Systems/payload_adapter_systems.
9. NASA-STD-5002. Loads Analysis of Spacecraft and Payloads.
10. Force limited vibration testing. NASA-HDBK-7004. 2000. May 16. 21 p.
11. Space engineering. Testing. ECSS-E10-03A, 15 02 2002. 170 p.
12. Space engineering. Verification guidelines. ECSS-E-HB-10-02A, 17 12 2010. 96 p.
13. Gureev V. D., Pavlov S. V., Sokolov Yu. A. [Prospects for the implementation of the proto-flight approach in the ground-based development of nanosatellites]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2016, Vol. 59, No. 6, P. 477–481. DOI 10.17586/0021-3454-2016-59-6-477-481 (In Russ.).
14. Kopytov V. I., Orlov S. A. [On the procedure of proto-flight and acceptance tests of spacecraft for mechanical effects]. *Reshetnevskie chteniya*. 2013, Vol. 1, P. 18–19 (In Russ.).
15. Zimin I. I., Valov M. V., Chebotarev V. E. [The principles of submodular design of the unifiedspace platform]. *Issledovaniya naukoigrada*. 2017, Vol. 1, No. 4(22), P. 161–165. DOI 10.26732/2225-9449-2017-4-161-165 (In Russ.).
16. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Shakhmatov E. V. et al. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat «AIST-2D»* [The pilot technology small satellite “Aist-2D”]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2017, 324 p.

© Иголкин А. А., Филипов А. Г., 2023

Иголкин Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, кафедра Автоматических систем энергетических установок; Самарский университет. E-mail: igolkin97@gmail.com.

Филипов Александр Геннадиевич – инженер, НИИ-201; Самарский университет. E-mail: iskander-filipov@yandex.ru.

Igolkin AlexandrAleksееvich – Dr. Sc., Associate Professor, Professor, Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University. E-mail: igolkin97@gmail.com.

Filipov AlexandrGennadieevich – engineer; Samara National Research University. E-mail: iskander-filipov@yandex.ru.
