

ИЗОТОПИЯ ФОРМ КОРПУСОВ ОТСЕКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2022

А. А. Беляков студент института авиационной и ракетно-космической техники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; jake.dunn@inbox.ru

А. И. Шулепов кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; shulepov-al@mail.ru

Исследуется изотопия отсеков космических аппаратов при размещении в них бортового оборудования. Дается определение данного конструктивного топологического свойства. Рассмотрены наиболее часто применяемые в конструировании и производстве формы корпусов отсеков космических аппаратов и различный состав их оболочек. Также рассмотрены основные стратегии принятия решения, определяющие выбор технологий моделирования и показателей эффективности. Представлен метод сравнения компоновок по совокупности показателей эффективности размещения объектов. Решена задача размещения бортовой аппаратуры. Приведены обобщающие математические модели показателей эффективности, построена расчётная схема и диаграммы результатов. Результаты исследования позволяют совершенствовать алгоритмы размещения.

Конструкция отсека космического аппарата; размещение бортовой аппаратуры; компоновка бортовых систем; космический аппарат; форма корпуса; бортовая аппаратура; показатель эффективности

Цитирование: Беляков А.А., Шулепов А.И. Изотопия форм корпусов отсеков космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 1. С. 7-13. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-7-13

Введение

На протяжении всего этапа разработки конструкторской документации на изделие космической техники ведётся согласование решений в части компоновки устанавливаемых систем. Вопрос подбора оболочек и их комбинаций приводит к созданию отсеков с разными формами корпусов, причём их оснащение также может быть различным.

Отсеки космических аппаратов (КА) предназначены для размещения в них бортовой аппаратуры (БА) – целевой, научной, обеспечивающей и т.д., а также для соединения частей конструкции в общую компоновку [1]. Классификация отсеков довольно обширна: приборные, агрегатные, двигательные, переходные, ферменные, бытовые, командные, целевой аппаратуры и т.д. От них значительно отличаются топливные отсеки (баки), которые в настоящей статье не рассматриваются, так как обычно причисляются к агрегатам КА.

Варианты компоновки БА, особенно с внешней стороны отсеков, влияют на ориентацию КА в процессе эксплуатации и на функционирование его бортовых систем. Наибольшее влияние на облик КА оказывают панели солнечных батарей, антенно-фидерные устройства, блоки определения координат звёзд, датчики угловых скоростей и некоторые другие элементы [2]. Методы повышения эффективности работы КА вследствие моделирования программы полёта приводят к разработке конкретных требований к формам корпусов отсеков для размещения БА в наиболее рациональных зонах на внешних поверхностях [3; 4]. Определённость в поиске и принятии решения позволяет получать оптимальный проектный облик КА. Однако данная тенденция от-

существует при размещении БА внутри отсеков, поскольку там возникает больше требований разной физической природы. В этом случае габаритными ограничениями являются геометрические параметры отсеков, поэтому напрямую собирать схему размещения, а потом облачать её в корпус непроизводительно. Искать решение нужно при неизменных характеристиках отсека, по которым определяются конструктивные параметры для установки и крепления БА.

Конструкция отсеков

Свойство отсека, заключающееся в том, что его конструкция никак не изменяется при конвертации проектной схемы размещения (ПСР) БА в рабочую схему размещения (РСР) БА, называется изотопией, а начальная и конечная компоновки БА – изотопными. Иначе говоря, при проектировании решение должно находиться путём изменения расположения приборов, а не вследствие изменения конструкции самого отсека. Это свойство является топологическим и относится к одноимённой группе технологий решения задачи. Его необходимо учитывать при создании математической модели.

Форма корпуса отсека КА на практике может иметь следующие виды:

- усечённый конус с плоскими, сферическими или эллиптическими днищами;
- прямоугольный параллелепипед;
- шестигранная или восьмигранная призма;
- круговой или эллиптический цилиндр с плоским или сферическим днищем;
- сфера, эллипсоид или тор;
- многогранная усечённая пирамида;
- двуполостный гиперboloид.

Как правило, та или иная поверхность выбирается из конструктивно-технологических соображений. Например, круглая форма обеспечивает меньшую массу по сравнению с другими формами благодаря малому отношению площади поверхности к объёму, форма в виде шестигранника выбирается, чтобы использовать тепловые сотовые панели, в которых тепловые трубы будут выполнять роль подкрепляющих элементов и т.д. Путём комбинирования разных форм отсеков синтезируют проектный облик КА. Более подробно с вариантами можно ознакомиться в пособии [5].

В то же время оболочка отсека может быть следующего состава [1]:

- гладкая;
- стрингерная;
- вафельная;
- трёхслойная.

Далее рассматриваются основные подходы к размещению БА в отсеках КА.

Стратегии размещения бортовой аппаратуры

Постановка задачи: разместить набор БА в выбранном отсеке КА так, чтобы отклонение центра масс компоновки от центра масс отсека было минимальным при функциональных, тепловых, монтажных требованиях и габаритных, виброударных, акустических ограничениях.

Технологии поиска решения было принято разделять на классические, численные и топологические [6], но в каждой из этих групп сами методы основываются на некоторых стратегиях, зачастую выработанных экспериментально.

Концентрированное решение – стратегия поиска и принятия решения, подразумевающая фокусирование на отдельно выбранном частном показателе эффективности. При этом остальные параметры переводятся в разряд ограничений [5].

При таком подходе можно записать функцию цели:

$$\begin{cases} |F(Y_{Ц} - Y_C)| \rightarrow \min \\ \Phi \leq \bar{\Phi} \end{cases},$$

где $F(Y_{Ц} - Y_C)$ – функция цели, определяющая допустимое отклонение центра масс; $Y_{Ц}$ – вектор центра масс отсека; Y_C – вектор центра масс компоновки БА; Φ – оператор моделей прочих показателей эффективности компоновки БА; $\bar{\Phi}$ – вектор требований и ограничений задачи.

Изотопия отсека выражается в том, что $Y_{Ц} = \text{const}$. Следовательно любые компоновки БА будут изотопными друг относительно друга на соседних итерациях размещения, если они были получены без промежуточных перестановок. Имеется в виду, что при изменении схемы размещения координаты каждого прибора были пересчитаны только один раз согласно последовательно-одиночному методу размещения. Понимание этого факта моделирования на начальном этапе даёт возможность вычислять координаты положения объектов в обратном порядке, то есть задавать положение последней единицы БА и отсчитывать все предыдущие, корректируя полученные значения на величины соответствующих параметров вектора $\bar{\Phi}$. В итоге образуемая компоновка должна полностью поместиться в отсек без образования большого числа замкнутых незаполненных приборами зон размещения.

Теоретически оптимальная РСР БА по выбранному показателю эффективности будет найдена, если привести загруженный отсек к «сухому», то есть рассмотреть предельный случай:

$$\text{opt}F = \lim_{Y_C \rightarrow Y_{Ц}} F(Y_{Ц} - Y_C) = F(0).$$

Однако технологически этот результат недостижим в силу того, что модель не способна учесть всё многообразие факторов, влияющих на получение оптимального решения. Так что на практике условие оптимальности будет иметь вид:

$$\text{opt}F = F(dY_C) \leq \xi,$$

где dY_C – мгновенное значение отклонения вектора центра масс компоновки БА; ξ – величина допускаемого отклонения центра масс компоновки БА.

Результатом выбора этой стратегии является весьма узкий набор компоновок, который обладает высоким качеством, но низкой гибкостью в случае изменений в проекте.

Дифференцированное решение – стратегия поиска и принятия решения, при которой к наиболее значимым показателям эффективности применяются различные подходы. Инженер нередко решается работать с определёнными факторами, а другие временно зафиксировать.

Математически это можно представить следующим образом:

$$F(Y_{Ц} - Y_C) = \left(\frac{\partial}{\partial a_1} + \frac{\partial}{\partial a_2} + \dots + \frac{\partial}{\partial a_k} \right) f(u) + \Phi(v) \rightarrow \min,$$

где $f(u)$ – оператор управляемой модели компоновки БА; u – вектор управляемых параметров компоновки БА; v – вектор неуправляемых параметров компоновки БА; a_k – дифференцирующий метод в рамках стратегии, где под методом понимается набор пе-

ременных, связанных с вычислением определённых физических величин (на их место обычно подставляются декартовы координаты, углы, температура, деформации); k – количество управляемых параметров компоновки БА; $\frac{\partial}{\partial a_k} f(u)$ – оператор управляющей модели компоновки БА.

Оптимальные значения вектора u можно найти из системы уравнений для условия минимума:

$$\left(\frac{\partial}{\partial a_1} + \frac{\partial}{\partial a_2} + \dots + \frac{\partial}{\partial a_k} \right) \frac{df(u)}{du} = 0.$$

При этом соответствующие решению компоненты вектора v должны входить в область допустимых значений $\bar{\Phi}$.

Выбор переменных a_k для оптимизации модели по показателю эффективности u_k исходит из физической природы учитываемых факторов и технических соображений. Это также связано с типом космической техники. Очевидно, что показатели эффективности для КА, космических кораблей и станций будут различаться.

Эвристическое решение – стратегия поиска и принятия решения без явно выраженных показателей эффективности. Выбор этого пути может означать недостатки анализа прототипов и нехватки компетенций инженера, либо может являться следствием сознательного стратегического выбора из-за низкой чувствительности между показателями эффективности с позиции оценки их отклика на преобразование ПСР в РСР.

Поскольку в данном варианте исход операции размещения на каждой итерации зависит от случайных факторов и аналитическая модель решения отсутствует, то целесообразно прибегнуть к методу Монте-Карло, с помощью которого многократно генерируют ПСР и затем обрабатывают накопленную статистику, чтобы выбрать допустимое решение. Тогда знание свойства изотопии отсека здесь может помочь тем, что позволит сократить область поиска за счёт задания границ его конструкции.

На практике стратегия эвристического решения оправдывает себя лишь в определённых обстоятельствах, когда нужно применять метод увязок для срочных согласований в проекте.

Чтобы провести оценку компоновки в отсеке по изменению центровки, предлагается воспользоваться расчётной схемой, представленной на рис. 1.

Построение основано на том, что отсек делится с помощью поперечных сечений на сегменты элементарного объёма dV и затем ниже строится продольная проекция трубки области допустимых значений (ОДЗ) отклонения центра масс в этих сечениях компоновки [1] с учётом показателей эффективности в масштабе M . Тогда каждому элементарному приращению объёма dV будет соответствовать элементарная величина функции dF отклонения центра масс выделенного сегмента компоновки БА. Проинтегрировав по длине продольного габарита отсека КА, можно получить диаграмму, показывающую изменение положения центра масс компоновки БА по сечениям. Её значения вне отсека будут нулевыми. В этом есть принципиальная разница в сравнении с ОДЗ отклонения центра масс общей компоновки, представляющей собой эллипсоид. Распределение центра масс по сечениям отсека важно потому, что в задаче размещения часто прибегают к переходу от трёхмерной размерности к двумерной и рассчитывают центровки на амортизирующих или силовых ферменных плоскостях.

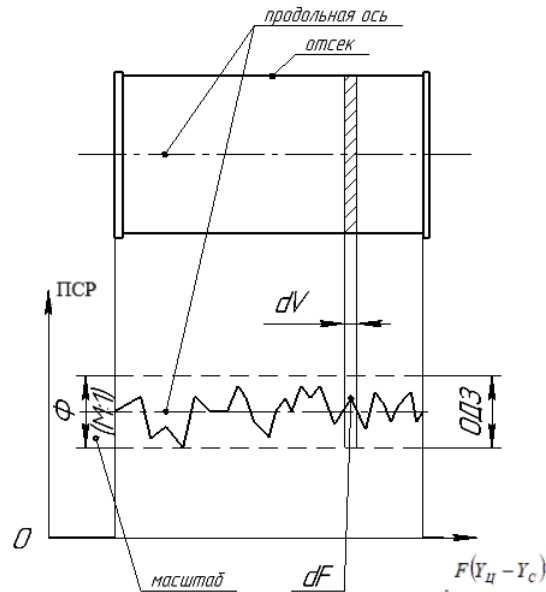


Рис. 1. Расчётная схема для оценки компоновки БА в отсеке КА

На рис. 2 представлены часто используемые формы корпусов приборных отсеков и диаграммы изменения центровок в сечениях компоновки БА в них по функции допустимого отклонения центра масс для трёх основных стратегий поиска решения поставленной задачи.

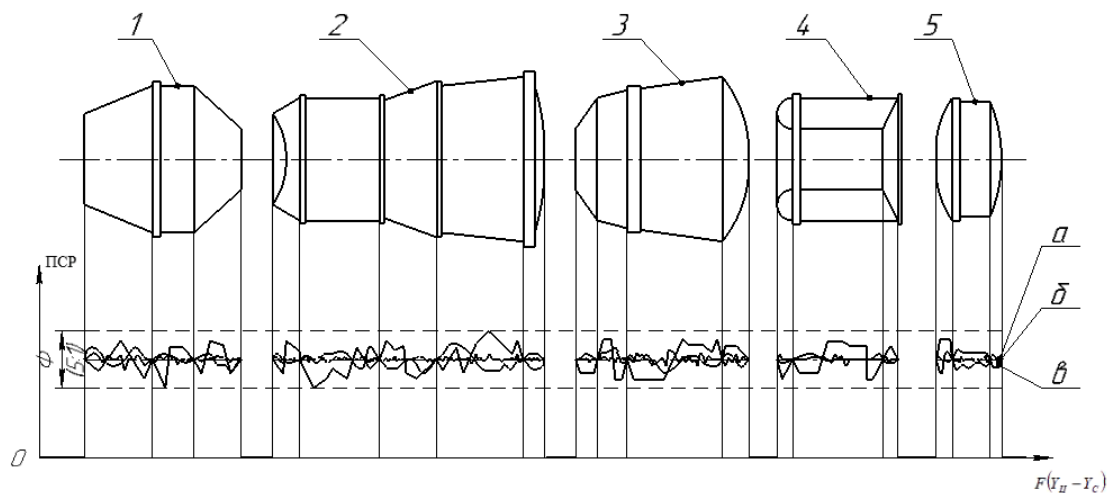


Рис. 2. Наиболее распространённые формы корпусов стрингерных приборных отсеков

На рис. 2 нанесены следующие обозначения: 1 – КА «Фотон-М»; 2 – КА «Ресурс-П»; 3 – КА «Бион-М»; 4 – навесной тороидальный отсек; 5 – приборный контейнер «Наука»; *a* – концентрированное решение; *b* – дифференцированное решение; *v* – эвристическое решение.

Частный вид кривых на диаграммах можно получить в результате математического моделирования задачи размещения или с помощью весовых испытаний КА при наличии соответствующего сканирующего оборудования. Здесь же они изображены схематично, чтобы показать, что при изменении форм корпусов отсеков колебания сохраняются, но они не становятся тем фактором, который вынуждает менять конструкцию отсека. Следовательно для каждого из них сгенерированные тройки компоновок БА – изотопные.

Заключение

Таким образом показано, что при любой стратегии размещения БА отклонение центра масс отсека сохраняет колебательный характер в ОДЗ при конвертации ПСР в РСР и не требует изменения его конструкции. В этом заключается свойство изотопии отсеков по отношению к компоновке БА в задаче размещения.

Однако существуют ещё требования жёсткости, обусловленные необходимостью сохранения требуемой формы корпусов отсеков посредством обеспечения точности взаимного расположения БА. Они связаны с массово-центровочными и инерционными, а также виброударными ограничениями, предъявляемыми к конструкции [1]. На практике эти требования относятся к узлам крепления и корпусам БА, поэтому свойство изотопии отсеков сохраняется.

Материал данного исследования может быть полезен при совершенствовании алгоритмов автоматизированного размещения БА, построенных на матрично-топологических моделях, так как при разработке соответствующего программного обеспечения для операторов конвертации схем размещения необходимо задавать свойство сохранения одинаковой конструкции отсека на каждом шаге при связи математической модели со средой твердотельного моделирования. Например, в кодах РТС Сгео Parametric и Python на сегодняшний день это решается созданием большого количества копий файла сборки.

Библиографический список

1. Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Агарков В.Ф., Антонов Ю.Г., Козлов В.Д., Чечин А.В., Фомин Г.Е. Конструирование автоматических космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.
2. Куренков В.И., Салмин В.В., Прохоров А.Г. Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. 160 с.
3. Шилов Л.Б. Методика выбора мест установки и пространственной ориентации внешних устройств космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом целевых разворотов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2016. 16 с.
4. Кириллин А.Н., Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож Д.А. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ ЦСКБ-Прогресс. Самара: Издательский дом «Агни», 2011. 280 с.
5. Куренков В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. 461 с.
6. Беляков А.А., Шулепов А.И. Анализ схемы размещения бортовой аппаратуры на примере блока выведения «Волга» // Сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VII Козловские чтения), (31 августа, 2021 года, г. Самара). Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2021. С. 64-73.

ISOTOPY OF SPACECRAFT COMPARTMENT HULL SHAPES

© 2022

A. A. Belyakov Student of the Institute of Aeronautical and Space Rocket Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; jake.dunn@inbox.ru

A. I. Shulepov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; shulepov-al@mail.ru

The goal of the work is to research the case of isotopy of spacecraft compartments in the problem of on-board equipment location. A definition of this engineering topological property is given in the article. The most frequently used spacecraft compartment hull shapes and various compositions of their casings are considered. Also, general strategies of taking decisions that determine the choice of modeling technologies and performance factors are discussed. A method of comparing various layouts on the strength of the object location performance factors was developed. The problem of on-board equipment accommodation is solved. Generalized mathematical models of performance factors are presented. Design models and diagrams are constructed. The results obtained make it possible to upgrade algorithms of accommodation.

Spacecraft compartment design; accommodation of on-board equipment; layout of on-board systems; spacecraft; hull shape; on-board equipment; performance factor

Citation: Belyakov A.A., Shulepov A.I. Isotopy of spacecraft compartment hull shapes. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 1. P. 7-13. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-7-13

References

1. Kozlov D.I., Anshakov G.P., Agarkov V.F., Antonov Yu.G., Kozlov V.D., Chechin A.V., Fomin G.E. *Konstruirovaniye avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of unmanned spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1996. 448 p.
2. Kurenkov V.I., Salmin V.V., Prokhorov A.G. *Metodika vybora osnovnykh proektnykh kharakteristik i konstruktivnogo oblika kosmicheskikh apparatov nablyudeniya: ucheb. posobie* [Methodology of choosing principal design characteristics and conceptual design of surveillance spacecraft: Study guide]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2007. 160 p.
3. Shilov L.B. *Metodika vybora mest ustanovki i prostranstvennoy orientatsii vneshnikh ustroystv kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli s uchetom tselevykh razvorotov. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology of choosing the areas of location and spatial orientation of appendage on-board equipment of Earth remote sensing spacecraft]. Samara, 2016. 16 p.
4. Kirillin A.N., Anshakov G.P., Akhmetov R.N., Storozh D.A. *Kosmicheskoe apparatostroenie: nauchno-tekhnicheskie issledovaniya i prakticheskie razrabotki GNPRKTs TsSKB-Progress* [Spacecraft engineering]. Samara: Izdatel'skiy Dom «AGNI» Publ., 2011. 280 p.
5. Kurenkov V.I. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov optiko-elektronnogo nablyudeniya poverkhnosti Zemli. Raschet osnovnykh kharakteristik i formirovaniye proektnogo oblika: ucheb. posobie* [Basics of design of electro-optical Earth remote sensing spacecraft. Computation of principal characteristics and conceptual design: Study guide]. Samara: Samara University Publ., 2020. 461 p.
6. Belyakov A.A., Shulepov A.I. Analysis of on-board equipment layout on example of rocket stage «VOLGA». *Sbornik materialov VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye Problemy Raketno-Kosmicheskoy Tekhniki» (VII Kozlovskie Chteniya), (August, 31, 2021, Samara)*. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2021. P. 64-73. (In Russ.)