

БАЗОВЫЕ АСПЕКТЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОМПОНОВКИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ В ОТСЕКАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ПРИМЕРЕ КА ДЗЗ «ЯНТАРЬ-2К»

© 2022

А. А. Беляков студент;
Институт 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

Представлены теоретические основы автоматизированной компоновки бортовой аппаратуры в отсеках космических аппаратов в топологической постановке. Цель работы состоит в создании гибкой модели размещения, позволяющей решать задачу для любой конфигурации конструкции с учётом технико-эксплуатационных ограничений, предъявляемых к объектам, находящимся в ограниченном пространстве. Технология формализуется по методам основ топологии и в настоящей работе демонстрируется для двумерного случая путём сличения с эталонной конструктивно-компоновочной схемой. Учитываются функциональные, монтажные, габаритные, тепловые, виброакустические требования при массово-центровочных ограничениях компоновки. Предложен новый подход к описанию процесса конструирования сборок бортовой аппаратуры, который может быть полностью оцифрован и затем интегрирован в известные системы автоматизированного проектирования. Такой подход верифицирован на примере системы электропитания космического аппарата «Янтарь-2к».

Космический аппарат; бортовая аппаратура; топология; отсек космического аппарата; схема размещения аппаратуры; компоновка оборудования; конструирование изделий в машиностроении

Цитирование: Беляков А.А., Шулепов А.И. Базовые аспекты топологической технологии автоматизированной компоновки бортовой аппаратуры в отсеках космических аппаратов на примере КА ДЗЗ «Янтарь-2к» // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 4. С. 7-24. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24

Введение

Задача размещения объектов различной формы в ограниченных пространствах является одной из основных задач конструирования при создании сложных изделий в машиностроении. Применительно к ракетно-космической технике – это задача компоновки бортовой аппаратуры (БА) в приборном или агрегатном отсеке космического аппарата (КА) и задача расположения полезной нагрузки (ПН) в грузовом или бытовом отсеке космического летательного аппарата с учётом тактико-технических требований к устойчивому функционированию изделия.

В своей работе инженер-конструктор имеет дело с деталями сборочных единиц, которые обладают метрическими и качественными свойствами. В отличие от проектан-та его работа состоит в манипуляциях с формами больше, чем с расчётами. Поэтому процессы решения таких задач по методам теории поиска и принятия решений далеко не всегда поддаются оцифровке и, следовательно, автоматизации. В связи с этим в настоящей работе рассматривается переход от аналитической геометрии в область более общей, но оттого и более абстрактной науки – топологии, где внимание уделяется

тем свойствам тел, которые не меняются при таких преобразованиях, как деформации без разрывов.

Вербально топологические свойства отсека и компоновки БА в нём описать довольно просто, но если попытаться провести над ними математическое исчисление, то потребуется перейти к терминам, формализация которых затруднена даже для базовых понятий. Решение этого вопроса рассматривается в данной статье. Применение полученных выкладок продемонстрировано на примере космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Янтарь-2к» (КА ДЗЗ «Янтарь-2к»).

Основные положения

Разработка компоновки БА в отсеках КА подразумевает получение рабочей схемы размещения (РСР), которая синтезируется путём моделирования проектной схемы размещения (ПСР) с помощью различных методов, технологии реализации которых в ранее проведённом исследовании [1,2] были классифицированы на классические, численные и топологические.

Суть топологической технологии создания РСР элементов БА заключается в структурном синтезе решения таким образом, чтобы отклонение вектора положения центра масс (ЦМ) отсека КА стремилось к нулю, а плотность компоновки оборудования внутри него сохранялась максимальной при выполнении заданных требований к размещению. С точки зрения топологии для разрабатываемой модели не имеет значения, какой геометрической формой обладает элемент БА и с помощью каких уравнений описывается его поверхность при том, что его объём конечен и общая компоновка ограничена поверхностями оболочки отсека. Важнейшим свойством является, например, наличие и характер образования пустот при размещении, и для возможности манипулирования ими используется соответствующий инструментарий. В связи с этим на передний план выступают параметры самого пространства и его элементов, а функции координат не являются единственными определяющими связями проектных параметров.

Топологическая модель компоновки отсека

Пусть РСР представляется в виде некоторой гиперповерхности A , для которой существует отображение F в РСР, являющейся гиперповерхностью вида B . Оно считается непрерывным в точке ЦМ отсека, потому что всякая часть РСР после отображения в РСР переходит в новое положение и при этом остаётся внутри оболочки отсека, тем самым сохраняя близость к скорректированному ЦМ отсека. То есть для отсека заданного радиуса существует область допустимых значений центровок такая, что для любого вектора координат ЦМ БА в ПСР и любого вектора координат ЦМ БА в РСР, разница между которыми не превышает заданного допуска, поперечные габариты компоновки на любом шаге конвертации не превышают величины диаметра миделя сечения отсека. Это можно записать логически:

$$\forall R > 0; \exists \delta > 0: \forall r_0 \in A(r) \wedge \forall r_t \in B(r): \|r_t - r_0\| < \delta \Rightarrow |F[A(r)] - B(r)| < 2R \Rightarrow \Rightarrow \exists F: A(r) \rightarrow B(r) \Leftrightarrow B(r) = F[A(r)]: \lim_{r_0 \rightarrow r_t} A(r) - B(r) < 2R, \quad (1)$$

где r – вектор координат центра масс любой БА и самого отсека; r_0 – вектор координат центра масс любой БА в ПСР; r_t – вектор координат центра масс любой БА в РСР; t – номер процедуры отображения (шаг конвертации); R – радиус отсека; $A(r)$ – ги-

перповерхность ПСР; $B(r)$ – гиперповерхность РСР; F – оператор пошагового отображения ПСР в РСР (конвертор); δ – вариация координат положения БА при её отображении из ПСР в РСР.

Запись (1) можно толковать как условие непересечения элементов конструкции БА с элементами конструкции обшивки отсека КА.

Необходимо отметить, что гиперповерхности элементов БА могут геометрически деформироваться, как связные подпространства, но разъединять их можно только тогда, когда формат конечной конфигурации объекта обладает теми же свойствами, что и до данной операции, то есть не существует строгих ограничений к операторам, за счёт которых производится конвертирование. Например, если на начальном шаге объект БА находился в некотором заданном положении, затем в процессе моделирования условно «был разобран» и распределён по массе в пространстве, то на последнем шаге он уже «был склеен» и снова имел исходные топологические свойства и занял такое положение, которое обеспечивает оптимальную центровку отсека КА. Но этого нельзя сказать про гиперповерхности ПСР и РСР с технической точки зрения натурной реализации, потому что процессы монтажно-сборочных и погрузочно-разгрузочных работ в отсеке не предполагают параллельную перестановку отдельного элемента БА или ПН, а характеризуются единственными операциями начального жёсткого закрепления и разового открепления. Однако на уровне модели можно допустить промежуточные деформации ПСР. Поэтому отображение (1) является гомеоморфизмом, то есть оно взаимно однозначно и взаимно непрерывно как для отсека, так и для элемента БА, что можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \exists F : A(r) \rightarrow B(r) \\ \exists F^{-1} : B(r) \rightarrow A(r) \end{array} \right\} \wedge \left\{ \begin{array}{l} \lim_{r_0 \rightarrow r_i} A(r) - B(r) < 2R \\ \lim_{r_i \rightarrow r_0} B(r) - A(r) < 2R. \end{array} \right. \quad (2)$$

В составленном логическом выражении (2) первая система является условием взаимной однозначности, а вторая – взаимной непрерывности.

Свойства гиперповерхностей $A(r)$ и $B(r)$, не изменяющиеся при гомеоморфизмах $F[A(r)]$ и $F^{-1}[B(r)]$, называются топологическими инвариантами. К ним можно отнести ограничения задачи конструирования компоновки, являющиеся частными критериальными характеристиками, с помощью которых производится выбор лучшего варианта размещения из представленных альтернатив. При данном подходе сюда относятся [2 – 4]:

- центровка отсека (положение ЦМ конструкции) – чем меньше отклонение от исходного положения, тем меньше масса резервного топлива для корректирующей двигательной установки и тем меньше масса самого КА;
- средняя плотность компоновки элементов БА – чем она больше, тем меньше габариты и, следовательно, масса отсека и КА в целом;
- линии тока теплового поля в отсеке – являются определяющим критерием для расположения некоторых видов элементов БА;
- длина кабельных линий – чем они короче между функционально взаимосвязанными видами оборудования, тем ниже масса конструкции КА;
- зазоры между элементами БА – обеспечивают доступ ко всем видам оборудования при монтаже.

Необходимо уточнить, что гомеоморфные гиперповерхности $A(r)$ и $B(r)$ компоновок элементов БА изотопны топологическому пространству P отсека КА, потому

что существует такой гомеоморфизм P на себя, при котором A переходит в B . Проще говоря, изотопией называется тот факт, что сам отсек никак не меняется при конвертации ПСР в РСР. Это справедливо и для отдельных видов элементов БА. Свойство изотопии компоновок выглядит в виде равенства конверторов так:

$$\exists F[P(A)] = F^{-1}[P(B)]; B(r) = F[A(r)]. \quad (3)$$

Далее элемент БА в задаче размещения описывается не оболочечной моделью (поверхностью), а каркасной – совокупностью дуг и точек их пересечений. Тогда каждому изделию в отсеке можно поставить в соответствие конечный граф [5]:

$$\Gamma_i = \Gamma(a_i; b_i); b_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\kappa_i} ka_{ik}; (i = \overline{1, n}), \quad (4)$$

где Γ – конечный граф каркасной модели элементов БА; i – порядковый номер элементов БА; n – общее количество элементов БА; a_i – число вершин каркасной модели i -го элемента БА; b_i – число рёбер каркасной модели i -го элемента БА; k – индекс, обозначающий количество рёбер, сходящихся в вершине; κ_i – максимальное число рёбер, сходящихся в вершине каркаса i -го элемента БА.

Аналогично с помощью выражения (4) можно описать отсек (3) и синтезируемую компоновку в целом.

Полным графом будет называться конечный граф контура компоновки элементов БА без петель, у которого две любые вершины соединяются точно одним ребром. В данном случае под рёбрами следует понимать переходы от размещённого i -го элемента БА к размещаемому $(i+1)$ -му элементу БА, а вершинами графа являются их центры масс. Если возможно организовать процедуру расположения так, что при отображении ПСР в РСР образуется не более двух вершин нечётного индекса k , то описывающий компоновку элементов БА граф называется уникальным. Наличие этого топологического инварианта позволяет вместо итерационного цикла создать линейную процедуру автоматического конструирования типа «вход-выход». Однако при исполнении компоновки по данной модели необходимо перестроить вычислительные процедуры таким образом, чтобы можно было оценивать взаимное размещение приборов с учётом показателей их функционирования.

Совокупность замкнутых цепочек рёбер элементов БА делает контур компоновки связным. Но если строить компоновку не по габаритам элементов БА, а по их центрам масс, то конечный граф компоновки на стадии ПСР может не быть уникальным. Чтобы его конвертировать в конечный граф, дающий гомеоморфную РСР, надо дополнить его в каждом месте незамкнутых вершин рёбрами-перемычками, число которых равно [5]:

$$\overline{b_B} = 1 - \chi(A), \quad (5)$$

где $\overline{b_B}$ – число рёбер-перемычек, дополняющих гиперплоскость ПСР $A(a_A; b_A)$, построенную по центрам масс элементов БА, и позволяющих сделать гомеоморфизм в гиперплоскость РСР $B(a_B; b_B)$; $\chi(A) = a_A - b_A$ – эйлерова характеристика графа гиперплоскости ПСР $A(a_A; b_A)$.

Контроль габаритных ограничений

В процессе отображения может возникнуть не только пересечение элементов БА со стенками отсека, что контролируется по определению (1), но и пересечение их между собой. Чтобы выяснить, находится точка внутри или снаружи каркасной модели соседнего элемента БА, нужно из данной точки провести луч, пересекающий его, и рассчитать индекс пересечения [5]:

$$J(c_{\alpha ij}; \Gamma_j) = \begin{cases} 1 \Rightarrow \alpha \in \Gamma_j \\ 2 \Rightarrow \alpha \notin \Gamma_j \end{cases}; (\alpha = \overline{1, a_i}), \quad (6)$$

где $\alpha = \overline{1, a_i}$ – порядковый номер вершины конечного графа рассматриваемого i -го элемента БА; j – порядковый номер конечного графа соседнего элемента БА по отношению к i -му элементу БА; $c_{\alpha ij}$ – луч из вершины α графа i -го элемента БА, пересекающий граф соседнего j -го элемента БА.

Если индекс пересечения (6) равен единице, то вершина контура i -го элемента БА находится внутри контура j -го элемента БА, а если двойке, то снаружи. Отсюда следует условие непересечения объектов между собой на плоскости и в пространстве:

$$\bigwedge_{\alpha=1}^{a_i} J(c_{\alpha ij}; \Gamma_j) = \begin{cases} 1 \Rightarrow \Gamma_i \subset \Gamma_j \\ 2 \Rightarrow \Gamma_i \not\subset \Gamma_j \end{cases}. \quad (7)$$

Согласно (7), если для всех вершин контура i -го элемента БА индекс пересечения J с контуром j -го элемента БА равняется одному, то i -й элемент БА вложен в j -й элемент БА. Если для всех вершин индекс пересечения равняется двум, то контуры элементов БА не пересекаются. Следовательно, если не для всех вершин $J(c_{\alpha ij}; \Gamma_j) = 2$, то данный i -й элемент БА пересекается с соседними контурами элементов БА во всех вершинах, у которых $J(c_{\alpha ij}; \Gamma_j) = 1$.

Альтернативная топологическая модель компоновки отсека

Процедуру размещения элементов БА по центрам масс также можно представить в качестве последовательного перемещения по точкам без возвратов (то же можно сделать и для траектории колебаний ЦМ отсека КА). В отсеке будет образована пространственная кривая, которая обладает проекцией на плоскость чертежа. Причём вокруг неё можно описать куб, гомеоморфный пространству P отсека КА и изотопный при конформации ПСР в РСР. Тогда существует гомеоморфизм набора элементов БА в эту пространственную кривую, называемую «путь размещения», а её проекция на конструктивно-компоновочную схему при увеличении количества элементов БА до бесконечности в пределе станет представлять собой путь, заполняющий весь квадрат, – такая проекция называется «кривая Пеано» [5], логическая запись которой выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \exists Q: & \left\{ \begin{array}{l} \exists F: Q_A \rightarrow Q_B \\ \exists F[P(A)] = F^{-1}[P(B)] \end{array} \right\} \wedge \left\{ \begin{array}{l} \exists F_Q: (i = \overline{1, n}) \rightarrow S(i): S(i) \subset Q \subset P \\ \exists F_Q: (i = \overline{1, n}) \rightarrow S(i) \wedge \mathcal{C}(Q): \mathcal{C}(Q) \subset Q \subset P \end{array} \right\} \quad (8) \\ \Rightarrow \exists \Pi: & S(i) \wedge \mathcal{C}(Q) \rightarrow \mathcal{C}(Q); n \rightarrow \infty, \end{aligned}$$

где $S(i)$ – путь размещения элементов БА в отсеке КА; Q – куб, описывающий путь размещения элементов БА; Q_A, Q_B – куб до и после конвертации ПСР в РСР; F_Q – оператор гомеоморфного отображения набора элементов БА в путь его размещения в отсеке; F_q – оператор гомеоморфного отображения набора элементов БА в проекцию пути размещения на плоскость конструктивно-компоновочной схемы; $\mathcal{C}(Q)$ – плоскость конструктивно-компоновочной схемы (чертёж сечения отсека); $S(i) \wedge \mathcal{C}(Q)$ – проекция пути размещения в пространстве отсека на плоскость конструктивно-компоновочной схемы; Π – оператор гомеоморфного отображения проекции пути размещения элементов БА на куб.

Из определения (8) получена формула:

$$\Pi(i) = \lim_{n \rightarrow \infty} [S(i) \wedge \mathcal{C}(Q)] = \lim_{n \rightarrow \infty} F_q(i) = \mathcal{C}(Q) : F[\mathcal{C}(Q_A)] = F^{-1}[\mathcal{C}(Q_B)], \quad (9)$$

где $\Pi(i)$ – кривая Пеано.

Выражение (9) имеет важное значение, потому что топологическим инвариантом $\Pi(i)$ является наличие у неё положительной площади. Если описывать элемент БА не только точкой ЦМ, но и её окрестностью, соизмеримой с габаритами, то кривая Пеано на плоскости чертежа изобразит проекцию пространственного пути размещения элементов БА, обеспечивающего максимум плотности компоновки и удовлетворяющего условиям непересечения (7). Это позволяет визуализировать полученную схему размещения без применения внешних систем автоматизированного проектирования.

Также с помощью отображения (9) можно сформулировать условие удовлетворения массово-центровочных характеристик отсека: центровка выполняется, если конец кривой Пеано $\Pi_{Ц}(i)$, построенной для траектории колебаний ЦМ отсека КА, содержится в области допустимого отклонения $\delta_{Ц}$.

Стоит отметить, что проверить решение на допустимость можно с помощью индекса пересечения (6) кривой и области допуска, который всегда будет чётным либо для малых колебаний имеет место $J(\Pi_{Ц}(i); \delta_{Ц}) = 0$.

Наконец, чтобы учесть монтажные зазоры между элементами БА, достаточно увеличить их габариты на величину зазоров h_m . Тогда вершины составленных конечных графов (4) контуров элемента БА лежат на рёбрах, являющихся средними линиями этих зазоров, по которым могут быть проложены кабельные линии минимальной длины.

Что касается учёта линий тока теплового поля в отсеке, то его можно реализовать на этапе выбора порядка размещения элементов БА, то есть сразу определить, какие виды оборудования технически могут находиться рядом, а какие нет, и задать допуск h_T .

Верификация моделей

Ниже приводится пример автоматизированной компоновки бортовой аппаратуры для КА ДЗЗ «Янтарь-2к». Рассмотрена компоновка системы электропитания (СЭП).

СЭП КА построена с использованием солнечных и аккумуляторных батарей (СБ и АБ). Она предназначена для питания бортовых систем КА во время предстартовой подготовки, на участке выведения, в орбитальном полёте и при спуске. Её действие рас-

пространяется на агрегатный отсек (АО), приборный отсек (ПО), спускаемый аппарат (СА) и спускаемые капсулы (СпК) [6]. Состав элементов СЭП указан в табл. 1.

Таблица 1. Состав системы электропитания

Наименование элемента	Обозначение элемента	Количество элементов	Место установки элемента
Панель солнечной батареи	ПСБ	2	АО
Буферная батарея	ББ	4	АО
Батарея специальных систем	БСС	1	АО
Блок питания потенциометров обратной связи	БПОС	1	АО
Блок коммутации системы электропитания	БК СЭП	1	ПО
Блок контроля источников питания	БКИП	1	ПО
Зарядный блок батареи специальной системы	ЗБС	1	ПО
Счётчик ампер-часов	САЧ	1	ПО
Резервная батарея	РБ	2	СА
Батарея спускаемого аппарата	БСА	1	СА
Блок измерения потребления	БИП	1	СА
Батарея спускаемой капсулы	БСК	2	СпК

Чтобы определиться с прокладкой кабельных линий, далее приводится описание функциональных взаимосвязей между элементами БА СЭП [6]:

1. СБ и ББ питают обеспечивающие системы КА на освещённых и затенённых участках орбиты и восполняют уровень зарядки ББ;

2. БКИП контролирует напряжение на шинах ББ и выдачу сигналов управления зарядно-разрядным режимом ББ;

3. САЧ контролирует и регистрирует текущий уровень заряда ББ;

4. БСС питает элементы БА по шинам спецсистем;

5. ЗБС преобразует энергию ББ и восполняет израсходованные ёмкости БСС, а также контролирует напряжение по шине спецсистем с выдачей сигналов управления режимами заряда-разряда БСС и формирует признаки работы БСС;

6. БК СЭП поддерживает электрическую связь источников ББ, БСС и образует выходные шины, обеспечивающие и специальные системы с общей плоской шиной, также управляет режимами заряда-разряда ББ, БСС и выдаёт в бортовую центральную вычислительную машину сформированные признаки работы системы по управляющим сигналам БКИП, САЧ, ЗБС;

7. РБ питает системы СА на участке спуска и после приземления;

8. БИП контролирует токи разряда РБ;

9. БСА, БСК, БПОС являются автономными источниками тока для питания систем СА, СпК и датчиков потенциометров обратной связи привода СБ соответственно.

СЭП КА построена с учётом разделения питания по цепям обеспечивающих систем и спецаппаратуры для исключения их взаимовлияния. Из табл. 1 видно, что элементы БА расположены в разных отсеках, поэтому плотность компоновки достигается только на уровне структурных групп, а между ними пространство заполняется элементами БА других систем КА, что видно на рис. 1, где представлена конструктивно-компоновочная схема СЭП.

Для данного набора элементов БА необходимо выполнить схему размещения, удовлетворяющую максимуму плотности компоновки с учётом функциональных, термодинамических, виброакустических и монтажных требований к отсекам. При этом

конструкция корпуса КА принимается неизменяющейся; проверяется условие на непересечение объектов. Контролируется допустимая центровка КА.

Основное назначение алгоритма – это нахождение компонентов вектора положения центра масс каждого прибора $r(\Gamma_i) = (x_i; y_i)^T$ и всей компоновки. В то же время сама матрично-топологическая модель предназначена для описания логики согласования компоновки с техническими требованиями и синтеза на основании этого уравнений, обеспечивающих допусковое решение. Габариты БА задаются векторами $(l_{xi}; l_{yi}; l_{zi})^T$. Каждому прибору присваивается относительная масса μ_i .

Сначала предлагается разделить пространство P внутри КА по отсекам, так что P_1 – АО, P_2 – ПО, P_3 – СА, P_4 – СпК. Тогда ПСР и РСР будут обозначаться соответственно через $A_{1,2,3,4}$ и $B_{1,2,3,4}$. Элементы набора элементов БА индексируются согласно табл. 2. Каждый из них имеет проекцию прямоугольника на плоскость чертежа, поэтому конечный граф (4) для всех каркасных моделей будет записываться одинаково:

$$\Gamma_i = \Gamma(4; 4); i = \overline{1, 18}.$$

Таблица 2. Индексация бортовой аппаратуры системы электропитания

i	Обозначение элемента	Количество элементов	i	Обозначение элемента	Количество элементов
1-2	ПСБ	2	11	ЗБС	1
3-6	ББ	4	12	САЧ	1
7	БСС	1	13-14	РБ	2
8	БПОС	1	15	БСА	1
9	БК СЭП	1	16	БИП	1
10	БКИП	1	17-18	БСК	2

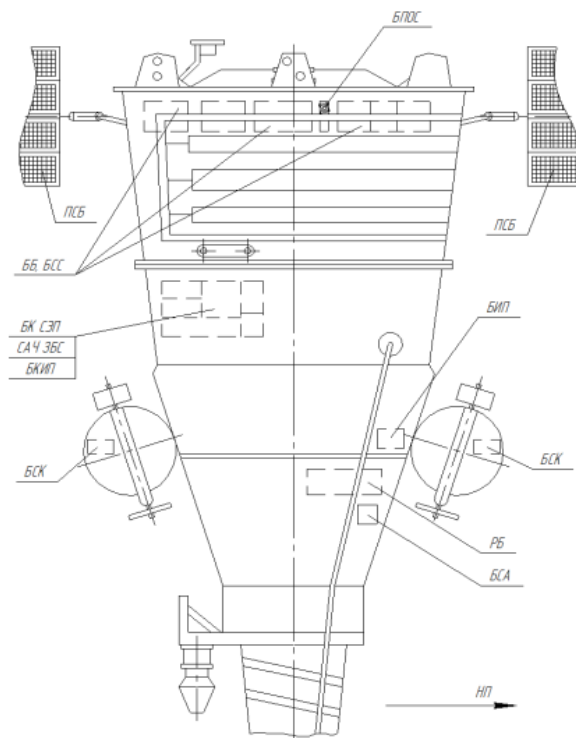


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема системы электропитания КА ДЗЗ «Янтарь-2к» (НП – направление полёта)

Совместно с контурами проекций элементов БА учитываются зазоры, обеспечивающие возможность монтажа, поэтому их средние линии являются рёбрами графов Γ_i .

Далее фиксируется система уравнений изотопии компоновок:

$$\begin{cases} F_1[P_1(A_1)] = F_1^{-1}[P_1(B_1)], \\ F_2[P_2(A_2)] = F_2^{-1}[P_2(B_2)], \\ F_3[P_3(A_3)] = F_3^{-1}[P_3(B_3)], \\ F_4[P_4(A_4)] = F_4^{-1}[P_4(B_4)]. \end{cases}$$

Затем компоновочное решение находится отдельно для каждого отсека. Для АО считается, что находящиеся здесь элементы БА не имеют термодинамических ограничений на совместное размещение. Из описания функциональных взаимосвязей следует, что расстояние ρ между ПСБ должно быть максимальным для характерной площади сечения их размаха относительно корпуса КА, а между СБ и ББ оно должно быть минимальным. БПОС является автономным и не имеет конструктивных особенностей. При этом необходимо выдержать симметрию сборки и минимизировать отклонение ЦМ АО. Эти три условия можно представить в виде четырёх функциональных уравнений:

$$\begin{cases} \rho(\Gamma_1; \Gamma_2) = 2R_{AO}, \\ \rho(\Gamma_1; \Gamma_3) = \rho(\Gamma_2; \Gamma_6) \rightarrow \min, \\ \rho(\Gamma_3; \Gamma_4) = \rho(\Gamma_5; \Gamma_6) \rightarrow \min, \\ F_1[A_1(\Gamma_8)] = F_1^{-1}[B_1(\Gamma_8)]. \end{cases}$$

Тогда оптимальными будут следующие конструкторские действия: ПСБ разместить симметрично по наибольшему диаметру отсека $2R_{AO}$, также симметрично разместить по одному элементу ББ у каждой батареи, затем аналогично к ним присоединить по одной из оставшихся ББ. Для снижения отклонения ЦМ АО расстояние между полученной парой узлов следует приравнять к сумме габаритов БСС, БПОС и размеров под зазоры для монтажа. Все элементы БА выровнять по одной местной оси. Это решение можно описать гомеоморфным отображением набора первых восьми элементов БА в ПСР:

$$F_1 : \begin{cases} \rho(\Gamma_1; \Gamma_2) = 2R_{AO}, \\ \rho(\Gamma_1; \Gamma_3) = \rho(\Gamma_2; \Gamma_6), \\ \rho(\Gamma_3 + \Gamma_4) = \rho(\Gamma_5 + \Gamma_6), \\ \rho(\Gamma_7 + \Gamma_8) = \min \rho[(\Gamma_1 + \Gamma_3 + \Gamma_4); (\Gamma_5 + \Gamma_6 + \Gamma_2)]. \end{cases}$$

Результаты решения этой системы в развёрнутом виде описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}
 r(\Gamma_1) &= (0; -R_{AO}), \\
 r(\Gamma_2) &= (0; R_{AO}), \\
 r(\Gamma_3) &= \left(0; -R_{AO} + \frac{l_{y1} + l_{y3}}{2} + h_m\right), \\
 r(\Gamma_4) &= \left(0; -R_{AO} + \frac{l_{y1} + l_{y4}}{2} + l_{y3} + h_m\right), \\
 r(\Gamma_5) &= \left(0; R_{AO} - \frac{l_{y2} + l_{y5}}{2} - l_{y6} - h_m\right), \\
 r(\Gamma_6) &= \left(0; R_{AO} - \frac{l_{y2} + l_{y6}}{2} - h_m\right), \\
 r(\Gamma_7) &= \left(0; -R_{AO} + \frac{l_{y1} + l_{y7}}{2} + l_{y3} + l_{y4} + h_m\right), \\
 r(\Gamma_8) &= \left(0; R_{AO} - \frac{l_{y2} + l_{y8}}{2} - l_{y5} - l_{y6} - h_m\right).
 \end{aligned}$$

Полученная компоновка описывается кривой Пеано (9) в виде полосы, соблюдающей условия центровки, а также непересечения (1) и (7):

$$\Pi_1(i) = \lim_{\delta_{\Pi} \rightarrow 0} \bigcup_{i=1}^8 \Gamma_i = \rho(\Gamma_1 + \Gamma_3 + \Gamma_4 + \Gamma_7 + \Gamma_8 + \Gamma_5 + \Gamma_6 + \Gamma_2) = 2R_{AO}.$$

В развёрнутом виде это уравнение плотной компоновки для проверки координат:

$$\sum_{i=1}^8 [l_{yi} + (i-1)h_m] = 2R_{AO}.$$

Собранный блок БА размещается симметрично продольной оси КА на расстоянии технологического допуска $x_{\text{тех}}$ с базированием по внешней поверхности донного среза корпуса отсека относительно расстояния от его центра масс до миделя $x(x_{\text{ЦМ}}^{AO}; x_{\text{дон}}^{AO})$:

$$\begin{cases} x_{B1} = x(x_{\text{ЦМ}}^{AO}; x_{\text{дон}}^{AO}) - x_{\text{тех}}, \\ y_{B1} = 0. \end{cases}$$

Для ПО также считается, что находящиеся здесь элементы БА не имеют термодинамических ограничений на совместное размещение. Из описания функциональных взаимосвязей следует, что БК СЭП, БКИП, ЗБС, САЧ сообщаются через шины, длина и, следовательно, масса которых должны быть минимальны, то есть компоновка должна быть максимально плотной. Это можно выразить функциональным уравнением

$$\Pi_2(9;10;11;12) \rightarrow \max.$$

Тогда гомеоморфное отображение будет иметь вид:

$$F_2 : [\rho(\Gamma_9; \Gamma_{10}) \quad \rho(\Gamma_9; \Gamma_{11}) \quad \rho(\Gamma_9; \Gamma_{12}) \quad \rho(\Gamma_{10}; \Gamma_{11}) \quad \rho(\Gamma_{10}; \Gamma_{12}) \quad \rho(\Gamma_{11}; \Gamma_{12})]^T \rightarrow \min .$$

Решение этой целевой функции в развёрнутом виде выглядит так:

$$\begin{aligned} r(\Gamma_9) &= \left(l_{x12} - \frac{l_{x9}}{2}; \quad l_{y12} + \frac{l_{y9}}{2} + h_m \right), \\ r(\Gamma_{10}) &= \left(l_{x12} - l_{x9} - \frac{l_{x10}}{2} - h_m; \quad l_{y12} + \frac{l_{y10}}{2} + h_m \right), \\ r(\Gamma_{11}) &= \left(l_{x10} + \frac{l_{x11}}{2} + h_m; \quad l_{y12} + l_{y9} + \frac{l_{y11}}{2} + 2h_m \right), \\ r(\Gamma_{12}) &= \left(\frac{l_{x12}}{2}; \quad \frac{l_{y12}}{2} \right). \end{aligned}$$

Решение достигается, если при конструировании каркасы элементов БА будут попарно соприкасаться хотя бы по двум рёбрам с уменьшением монтажных зазоров h_m . Полученная компоновка описывается кривой Пеано (9) в виде площади *Area* уникального графа, составленного из конечных графов моделей БА:

$$P_2(i) = \lim_{h_m \rightarrow 0} \bigcup_{i=9}^{12} \Gamma_i = Area(\Gamma_9 + \Gamma_{11} + \Gamma_{10} + \Gamma_{12}).$$

В развёрнутом виде это уравнение плотной компоновки для проверки координат:

$$(l_{x10} + l_{x12} + h_m)l_{y12} = (l_{x9} + l_{x11} + l_{x12} + 2h_m)(l_{y10} + l_{y11} + h_m) = \sum_{i=9}^{12} (l_{xi}l_{yi}) + \sum_{i=9}^{11} (l_{yi}h_m) + l_{x10}h_m.$$

Координаты установки данного блока приборов будут рассчитаны ниже.

Для СА нужно учитывать, что РБ выделяют тепло, в связи с чем кроме монтажного расстояния необходимо выдержать по контуру температурную границу h_T . Из описания функциональных взаимосвязей следует, что расстояние ρ между РБ и БИП должно быть одинаковым. При этом у образующей отсека большой угол наклона, а крепиться данный узел должен рядом с СпК, так как БИП взаимодействует с БСК и расстояние ρ между БИП и БСК нужно свести к минимуму. БСА и БСК являются автономными и не имеют конструктивных особенностей. Следовательно отдельное решение для P_4 можно не рассматривать. Эти четыре условия соответствуют четырём функциональным уравнениям:

$$\begin{cases} \rho(\Gamma_{13}; \Gamma_{16}) + h_T = \rho(\Gamma_{14}; \Gamma_{16}) + h_T \rightarrow \min, \\ \rho(\Gamma_{16}; \Gamma_{17}) \vee \rho(\Gamma_{16}; \Gamma_{18}) \rightarrow \min, \\ F_3[A_3(\Gamma_{15})] = F_3^{-1}[B_3(\Gamma_{15})], \\ F_4[A_4(\Gamma_{17})] = F_4[A_4(\Gamma_{18})] = F_4^{-1}[B_4(\Gamma_{17})] = F_4^{-1}[B_4(\Gamma_{18})]. \end{cases}$$

Тогда начать сборку можно от СпК, приняв её зафиксированной. Положение БИП подбирается таким образом, чтобы не было пересечения с отсеком СА. Далее располагаются РБ с учётом угла наклона γ образующей боковой поверхности отсека, а после них и БСА. Описанное гомеоморфное отображение имеет вид:

$$F_3 : \begin{cases} P_3 \supset [\{\Gamma_{17} \vee \Gamma_{18}\} + \Gamma_{16}] = \min \rho(\Gamma_{16}; P_4), \\ \rho(\{\Gamma_{13} \vee \Gamma_{14}\}) = \rho(\{\Gamma_{17} \vee \Gamma_{18}\} + \Gamma_{16} + h_T), \\ \rho(\Gamma_{15}) = \rho(\{\Gamma_{17} \vee \Gamma_{18}\} + \Gamma_{16} + h_T + \{\Gamma_{13} \vee \Gamma_{14}\} + h_T). \end{cases}$$

Базой для поиска координат являются точки узлов крепления подвесов СпК $(x_{CnK}; y_{CnK})^T$, которые имеют радиус R_{CnK} . Результаты решения составленной системы в развёрнутом виде следующие:

$$\left. \begin{cases} r(\Gamma_{13}) = \left(x_{CnK} + \frac{l_{x13} + l_{x16}}{2} + 2h_m + h_T; y_{CnK} - \frac{l_{y13}}{2} - \left(l_{x13} + \frac{l_{x16}}{2} + 2h_m + h_T \right) \operatorname{tg} \gamma - h_m - h_T \right), \\ r(\Gamma_{14}) = \left(x_{CnK} + \frac{l_{x13} + l_{x16}}{2} + 2h_m + h_T; -y_{CnK} + \frac{l_{y13}}{2} + \left(l_{x13} + \frac{l_{x16}}{2} + 2h_m + h_T \right) \operatorname{tg} \gamma + h_m + h_T \right), \\ r(\Gamma_{15}) = \left(x_{CnK} + l_{x13} + \frac{l_{x15} + l_{x16}}{2} + 3h_m + 2h_T; y_{CnK} - \frac{l_{y15}}{2} - \left(l_{x13} + l_{x15} + \frac{l_{x16}}{2} + 3h_m + 2h_T \right) \operatorname{tg} \gamma - h_m \right), \\ r(\Gamma_{16}) = \left(x_{CnK}; y_{CnK} - \frac{l_{y16}}{2} (1 + \operatorname{tg} \gamma) - h_m \right), \\ r(\Gamma_{17}) = \left(x_{CnK} + \frac{R_{CnK}}{2}; y_{CnK} + \frac{3R_{CnK}}{2} \right), \\ r(\Gamma_{18}) = \left(x_{CnK} + \frac{R_{CnK}}{2}; -y_{CnK} - \frac{3R_{CnK}}{2} \right). \end{cases} \right\}$$

Полученная компоновка описывается кривой Пеано (9) в виде ступенчатой касательной полосы к боковой стенке отсека l_{P_3} , удовлетворяющей условиям непересечения (1) и (7):

$$\Pi_3(i) = \lim_{\rho(\Gamma_i; P_3) \rightarrow 0} \bigcup_{i=13}^{18} \Gamma_i = \rho(\{\Gamma_{17} \vee \Gamma_{18}\} + \Gamma_{16} + h_T + \{\Gamma_{13} \vee \Gamma_{14}\} + h_T + \Gamma_{15}) = \Pi_4(i) + l_{P_3} \cos \gamma.$$

В развёрнутом виде это уравнение плотной компоновки для проверки координат:

$$x_{15} - x_{16} + x_{17} = l_{x13} + \frac{l_{x15} + l_{x16}}{2} + 3h_m + 2h_T + \frac{R_{CnK}}{2}.$$

В осях базовой системы координат КА этот блок имеет координаты:

$$\begin{cases} x_{B3} = x_{CnK} + \sum_{i=13}^{16} \mu_i x_i, \\ y_{B3} = y_{CnK} - \sum_{i=13}^{16} \mu_i y_i. \end{cases}$$

Далее производится размещение элементов БА АО на месте миделя сечения отсека, элементов БА СА вблизи одной из СпК и элементов БА ПО. Так создана ПСР БА СЭП. Она описывается по точкам ЦМ графом $\Gamma_A = \Gamma(3;2)$ и не проходит по массово-центровочным ограничениям, поэтому её надо конвертировать. Для этого нужно Γ_A дополнить рёбрами-перемычками (5) в количестве $\bar{b}_B = 1$. Затем при зафиксированных компоновках БА в АО $\Pi_1(i)$ и СА $\Pi_3(i)$ выставить компоновку БА в ПО $\Pi_2(i)$ на равном расстоянии от них со смещением левее продольной оси КА X , как показано на рис. 2. При таком отображении не выполняется условие непересечения (1) со стенками отсеков, потому что индекс пересечения (6) не для всех вершин Γ_A равен $J(c_{\alpha AP}; P) = 1$. Также на рис. 2 показано, что все четыре точки имеют $J(c_{\alpha AP}; P) = 2$, то есть находятся вне корпуса КА. Чтобы это устранить, узел перемещается за счёт уменьшения расстояний до продольной оси КА $\rho(\Pi_2; X)$ и до АО $\rho(\Pi_2; \Pi_1)$. Кроме того, компоновку $\Pi_2(i)$ надо переориентировать, чтобы ЗБС, САЧ, БК СЭП размещались ближе в сторону ББ и БСС. В результате получаем компоновку рёбра модели которой соответствуют кабельным линиям минимальной длины. Она принимается за РСР, потому что обеспечивает максимум плотности компоновки при заданных функциональных, массово-центровочных, термодинамических, монтажных требованиях к отсекам. Это было сделано за два шага конвертации ПСР в РСР $t = 2$. В итоге общий гомеоморфизм имеет вид:

$$F : \left\{ (t=1) : \begin{cases} \text{fix}(\Pi_1), \\ \text{fix}(\Pi_3), \\ \rho(\Pi_1; \Pi_2) = \rho(\Pi_3; \Pi_2), \\ J[\rho(\Pi_3; \Pi_2); X] = 1, \end{cases} \Rightarrow (t=2) : \begin{cases} \rho(\Gamma_9; \Pi_1) \\ \rho(\Gamma_{11}; \Pi_1) \\ \rho(\Gamma_{12}; \Pi_1) \\ \rho(\Pi_2; \Pi_1) \\ \rho(\Pi_2; X) \end{cases} \rightarrow \min \right\}.$$

В этой системе на втором шаге конвертации первые три уравнения оператора служат для поворота блока приборов в положение, когда длина трассы БКС между БК СЭП, ЗБС, САЧ и первым блоком станет минимальной при их установке в ПО. Благодаря оставшимся двум уравнениям определяются координаты размещения этого блока БА:

$$\begin{cases} x_{B2} = H_{AO} + \sum_{i=9}^{12} \mu_i y_i + h_m, \\ y_{B2} = -R_{ПО} + \sum_{i=9}^{12} \mu_i x_i + (l_{y10} + l_{y11} + 2h_m) \text{tg} \gamma, \end{cases}$$

где H_{AO} – высота агрегатного отсека; $R_{ПО}$ – радиус приборного отсека.

Таким образом, РСР БА СЭП приобретает вид, показанный на рис. 2.

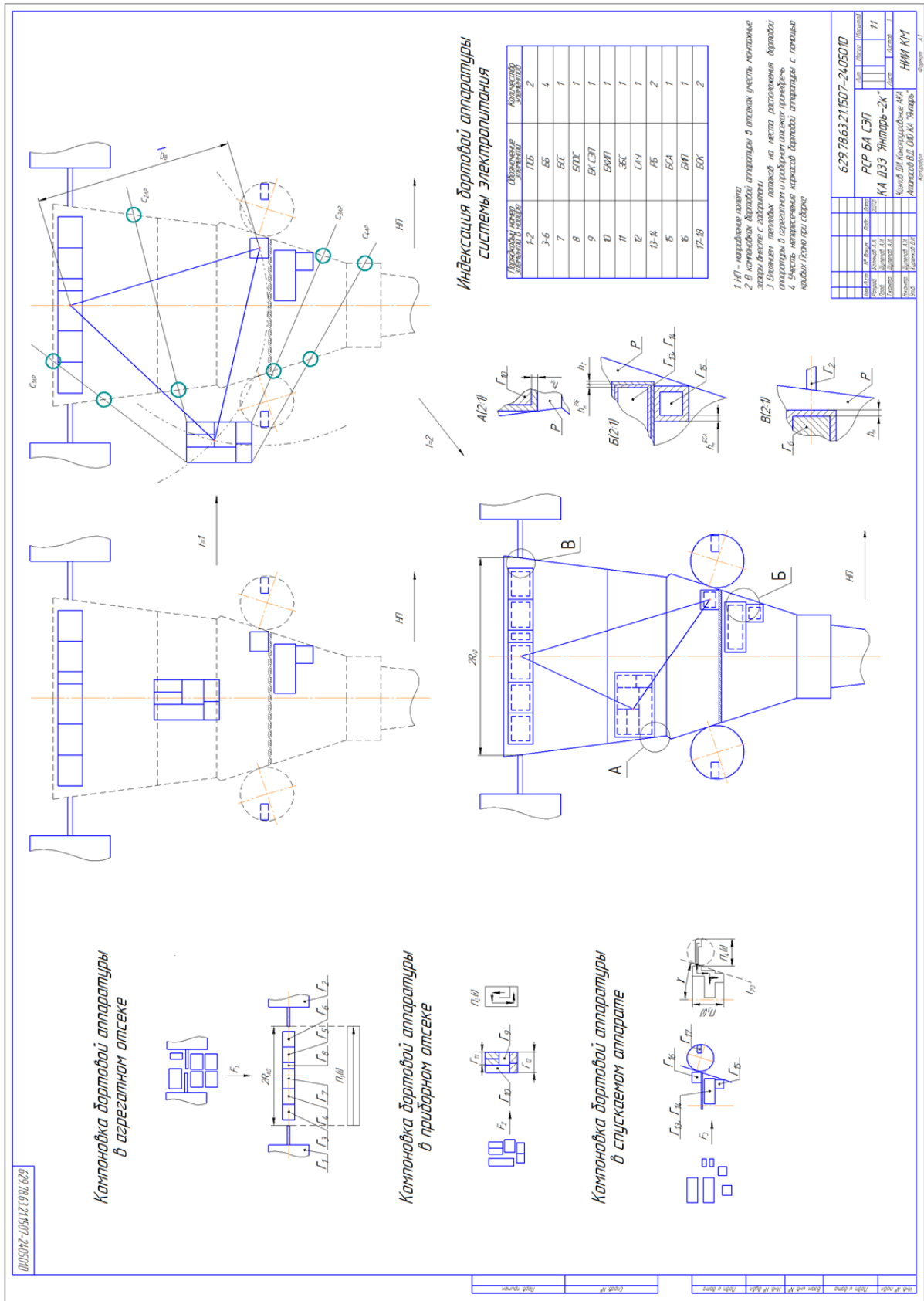


Рис. 2. Конфигурации проектной схемы размещения бортовой аппаратуры системы электропитания до рабочей схемы размещения за два шага отображения

Также можно заметить, что РСР на рис. 2 тождественна конструктивно-компоновочной схеме, представленной на рис. 1, что позволяет считать найденное топологическим моделированием решение успешным.

Заключение

На основе результатов проведённого исследования представляется возможным создать специализированное программное обеспечение для автоматизированной компоновки БА. Совершенствования требует ядро модели – алгоритм, с помощью которого решается матрично-топологическая система уравнений относительно координат приборов. Изложенная концепция в терминах топологии требует дальнейшего расширения и обобщения на случай трёхмерного пространства. Она может быть формализована совместно с другими работами в данной области [7 – 12]. С практическими вопросами, которые возникают в ходе автоматизации процессов деятельности инженера-конструктора, можно ознакомиться в статьях [13 – 14].

Библиографический список

1. Беляков А.А., Шулепов А.И. Анализ схемы размещения бортовой аппаратуры на примере блока выведения «Волга» // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VII Козловские чтения) (31 августа 2021 г., Самара). Самара: СамНЦ РАН, 2021. С. 64-73.
2. Шулепов А.И., Гаврилов В.Н., Мятишкин Г.В. Автоматизированное решение задачи размещения грузов на борту транспортных космических систем // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2003. № 1 (3). С. 47-49.
3. 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.
4. Аншаков Г.П., Бирюк В.В., Васильев В.В., Салмин В.В. Численное моделирование теплового состояния на космическом аппарате «Фотон» // Труды V Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (5-7 октября 2004 г., Самара). Вып. 5. Самара: СГАУ, 2004. С. 9-16.
5. Болтянский В.Г., Ефремович В.А. Наглядная топология. М.: Наука, 1982. 160 с.
6. Атамасов В.Д., Беляев С.Г. Системы исполнительных органов космического аппарата «Янтарь»: учеб. пособие. СПб: БГТУ, 2013. 135 с.
7. Маркин Л.В., Корн Г.В., Куи Мин Хан, Е Вин Тун Дискретные модели геометрического моделирования компоновок авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. <https://trudymai.ru/published.php?ID=66465>
8. Бодрышев С.В. Методы пространственной компоновки на основе функциональных зависимостей эксплуатационных параметров. М.: МАИ, 2006. 167 с.
9. Пикулин С.А., Красилова Е.В. Применение топологической оптимизации при проектировании беспилотных космических аппаратов // Материалы XXII Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения» (12-16 ноября 2018 г., Красноярск). Ч. 1. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2018. С. 48-49.
10. Беляков А.А., Шулепов А.И. Разработка алгоритма размещения грузов в отсеках транспортного космического аппарата // Вестник Амурского государственного

университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2020. № 91. С. 19-30. DOI: 10.22250/jasu.4

11. Беляков А.А. Топологические методы описания геометрических моделей бортовой аппаратуры в задаче её размещения на борту космического аппарата // Труды XIII Общероссийской молодёжной научно-технической конференции «Молодёжь. Техника. Космос» (19-23 апреля 2021 г., Санкт-Петербург). Т. 1. СПб: БГТУ., 2021. С. 165-169.

12. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семёнов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 4 (51). С. 51-61. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05

13. Мартынюк В.А., Ныннырова А.С. Стандарты проектирования при разработке геометрических моделей изделия // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8, № 6 (37). <http://naukovedenie.ru/PDF/125TVN616.pdf>

14. Беляков А.А., Шулёпов А.И. Проблемы реверс-инжиниринга космических аппаратов // Материалы XXV Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения», посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва (10-12 ноября 2021 г., Красноярск). Ч. 1. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2021. С. 8-9.

BASIC ASPECTS OF TOPOLOGICAL TECHNOLOGY OF AUTOMATED ON-BOARD EQUIPMENT LAYOUT IN SPACE VEHICLE COMPARTMENTS USING THE EXAMPLE OF “YANTAR-2K” EARTH REMOTE SENSING SPACE VEHICLE

© 2022

A. A. Belyakov Student;
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 article presents the theoretical foundations of automated design of on-board equipment layout in spacecraft compartments in terms of topology. The purpose of the work is to create a flexible arrangement model that would allow solving the problem for any configuration of the structure, taking into account the engineering and operational restrictions imposed on the objects located in a limited space. The technology is formalized according to the methods of the foundations of topology and in this work is demonstrated for a two-dimensional case by comparing it with a reference design-layout scheme. The functional, installation, dimensional, thermal, vibroacoustic requirements are taken into account with the mass-centering restrictions of the layout. In the course of the study, a new approach to describing the design process of assembling on-board equipment was obtained, which can be fully digitized and then integrated into known computer-aided design systems. It has been verified using the example of the power supply system of the “Yantar-2k” spacecraft.

Spacecraft; on-board equipment; topology; space vehicle compartment; arrangement scheme; equipment layout; product design in mechanical engineering

Citation: Belyakov A.A., Shulepov A.I. Basic aspects of topological technology of automated on-board equipment layout in space vehicle compartments using the example of “Yantar-2k” Earth remote sensing space vehicle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 4. P. 7-24.
DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24

References

1. Belyakov A.A., Shulepov A.I. Analysis of on-board equipment layout on example of rocket stage «Volga». *Materialy 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.)
2. Shulepov A.I., Gavrilov V.N., Miatishkin G.V. Automated cargo accommodation aboard transport space vehicles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2003. No. 1 (3). P. 47-49. (In Russ.)
3. 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 general design characteristics and design concept of observation spacecraft: Study guide]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2007. 160 p.
4. Anshakov G.P., Biryuk V.V., Vasil'ev V.V., Salmin V.V. Chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya na kosmicheskom apparate «Foton». *Trudy V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Pratsessy Goreniya, Teploobmena i Ekologiya Teplovykh Dvigatelye» (October, 5-7, 2004, Samara)*. Iss. 5. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2004. P. 9-16. (In Russ.)
5. Boltyanskiy V.G., Efremovich V.A. *Naglyadnaya topologiya* [Intuitive topology]. Moscow: Nauka Publ., 1982. 160 p.
6. Atamasov V.D., Belyaev S.G. *Sistemy ispolnitel'nykh organov kosmicheskogo apparata «Yantar'»: ucheb. posobie* [Systems of effectors of «Yantar» spacecraft: study guide]. SPb: Baltic State Technical University Publ., 2013. 135 p.
7. Markin L.V., Korn G.V., Kyi Mi Han., E Vin Tun Discrete models of aircraft equipment layout geometric modeling. *Trudy MAI*. 2016. No. 86. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=66465>
8. Bodryshev S.V. *Metody prostranstvennoy komponovki na osnove funktsional'nykh zavisimostey ekspluatatsionnykh parametrov* [Methods of spatial arrangement based on functional relationship of operating parameters]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2006. 167 p.
9. Pikulin S.A., Krasilova E.V. Usage of topology optimization in the design of unmanned spacecrafts. *Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Reshetnevskie Chteniya» (November, 12-16, 2018, Krasnoyarsk)*. Part 1. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University Publ., 2018. P. 48-49. (In Russ.)
10. Belyakov A.A., Shulepov A.I. Development of algorithm of load distribution in cargo modules of space transportation vehicle. *Vestnik Amurskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye i Ekonomicheskie Nauki*. 2020. No. 91. P. 19-30. (In Russ.). DOI: 10.22250/jasu.4
11. Belyakov A.A. Topologicheskie metody opisaniya geometricheskikh modeley bortovoy apparatury v zadache ee razmeshcheniya na bortu kosmicheskogo apparata. *Trudy XIII Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Molodezh'. Tekhnika. Kosmos» (April, 19-23, 2021, Saint Petersburg)*. V. 1. SPb: Baltic State Technical University Publ., 2021. P. 165-169. (In Russ.)
12. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. Topology optimization methods in aerospace industry. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017. No. 51. P. 51-61. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05
13. Martynyuk V.A., Nynnyrova A.S. Design standards for working out geometric models of products. *Internet Journal «Naukovedenie»*. 2016. V. 8, no. 6 (37). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/125TVN616.pdf>

14. Belyakov A.A., Shulepov A.I. Problems of spacecraft reverse engineering practice. *Materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Reshetnevskie Chteniya», posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva (November, 10-12, 2021, Krasnoyarsk). Part 1.* Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University Publ., 2021. P. 8-9. (In Russ.)