

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИБОРОВ В ОТСЕКЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ЭЛЕКТРОРАЗЪЁМАМ ГЕРМОПЛАТ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

© 2023

А. А. Беляков инженер-конструктор III категории;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва,
г. Королёв;
post@rsce.ru

В. И. Приходько ведущий инженер-конструктор;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва,
г. Королёв;
post@rsce.ru

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

Предлагается метод автоматизированного размещения бортовой аппаратуры в отсеке космического аппарата, которая связана с внешними устройствами через гермопереходники посредством трасс бортовой кабельной сети. Цель работы заключается в создании программы, позволяющей размещать часть бортовой аппаратуры в отсеке автоматизированным способом с учётом существующих практических принципов разработки схем размещения приборов, одним из которых является минимизация массы бортовой кабельной сети. Математическая модель описывается при помощи матрично-топологического метода компоновки в процедурной форме, а также в численной форме для расчёта координат размещения приборов и оценки количества циклов для поиска окончательного решения. Приводятся рекомендации для обеспечения учёта всего спектра технических требований в дальнейшем. Представлена укрупнённая блок-схема алгоритма метода с поддержкой на высокоуровневом языке программирования Python. Программная реализация метода осуществлена с эмуляторами. Тестирование проведено на примере отсека одного из перспективных космических аппаратов. Эффективность метода оценивается сравнением количества циклов для получения результата и общего времени, затраченного на компоновку, относительно контрольных данных, известных из хронометражей работ.

Бортовая аппаратура; отсек космического аппарата; компоновка приборов; схема размещения бортовой аппаратуры; бортовая кабельная сеть; гермопереходник; гермоплата; моделирование

Цитирование: Беляков А.А., Приходько В.И., Шулепов А.И. Метод автоматизированного размещения приборов в отсеке космического аппарата с учётом подключения к электро разъёмам гермоплат бортовой кабельной сети // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 7-24. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-7-24

Введение

На сегодняшний день задача размещения элементов бортовой аппаратуры (БА) на внешних сторонах отсеков космических аппаратов (КА) автоматизирована на этапах предварительного, эскизного и технического проектирования в объёме основных работ по подбору, расчёту и оптимизации проектных характеристик, однако формирование проектного облика по-прежнему происходит в интерактивном режиме силами инженера либо того программного обеспечения, которое написано под конкретную модель КА и не предполагает трансформации под иные изделия, то есть не обладает гибкостью и адаптивностью. Очевидно, что это касается и последующей стадии разработки рабочей конструкторской документации. Если предприятие занимается серийными КА или раз-

рабатывает КА на основе универсальной космической платформы, то отсутствие унифицированных моделей и методов автоматизированного размещения БА не является обременительным.

В частности, для АО «РКЦ «Прогресс» была разработана и апробирована на модельных примерах методика по выбору мест установки и пространственной ориентации внешних устройств КА, основанная на имитационном моделировании его разворотов с учётом целевого функционирования и варьирования проектных параметров [1]. Относительно моделирования расположения приборов предложенные алгоритмы опираются на изменения значений параметров размещения оборудования через диалоговые окна методом перебора компоновок без явного взаимодействия со средой твердотельного моделирования [2 – 4].

Как правило, рассматриваемая система имеет составные части, которые должны устанавливаться на внешних поверхностях корпусов отсеков или даже выносных элементах, а также части, которые следует устанавливать внутри корпуса КА. Взаимодействие между частями, которые разделены в пространстве (не скомплексированы в блоки), обеспечивается бортовой кабельной сетью (БКС) через предназначенные для этого гермопереходники, которые вместе с кронштейнами образуют систему крепления узлов и агрегатов на внешней и внутренней поверхностях корпуса отсека, как это показано на рис. 1, 2. Здесь и далее под БА будут подразумеваться исключительно приборы внутри отсека, связанные с внешними устройствами по БКС через гермопереходники в гермоплатах на обечайках корпуса КА.

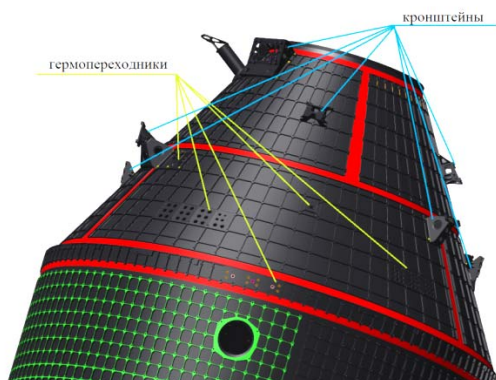


Рис. 1. Кронштейны для крепления внешних устройств и гермопереходники на поверхности отсека

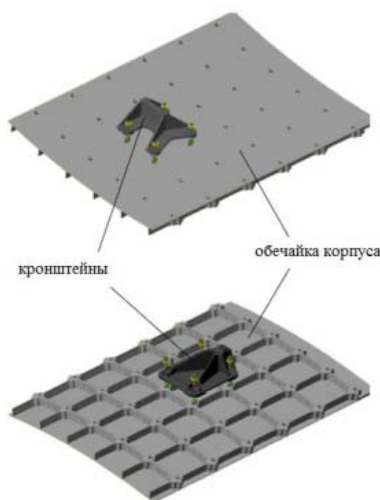


Рис. 2. Элементы системы крепления прибора на внешней и внутренней поверхностях отсека

По результатам проведённого анализа исследований, посвящённых методам автоматизированной компоновки [5 – 14], можно сделать вывод, что при их адаптации под отсеки КА это конструкторское решение не будет учитываться в моделях и алгоритмы подходят для этапов аванпроекта и начала эскизного проекта, но не далее. Фактор функциональных связей для приборов может игнорироваться при ранней разработке компоновок отсеков, но по мере проработки конструкции его влияние начинает возрастать, так как от этого зависит длина трасс БКС и, как следствие, комплектность необходимого крепежа, что влечёт за собой создание соответствующего перечня мероприятий в технологическом процессе монтажа этих приборов и прокладки БКС.

Поэтому видится перспективным предложить методику для автоматизированного размещения приборов с учётом их функциональных связей.

С этой целью в ходе исследования решаются следующие задачи: математическое описание схемы размещения приборов систем внешних устройств внутри отсека, выбор исходных данных для проведения тестирования, валидация разработанных моделей, анализ результатов, выводы по применимости.

Допущения при размещении приборов в отсеке

Используемые АО «РКЦ «Прогресс» математические модели и алгоритмы [1] позволяют размещать внешние устройства на корпусах КА с учётом его целевых характеристик и улучшением частных показателей эффективности [2 – 4], с помощью которых определяются оптимальные зоны размещения и углы ориентации БА. В параметры эффективности решения не входит отклонение массово-центровочных и инерционных характеристик КА от заданных значений. Делается это для таких проектных схем размещения БА, которые предназначены для взаимной увязки по расположению и обеспечению зон обзора, излучения и приёма антенн, чувствительных элементов, оптических устройств, солнечных батарей [15]. Следовательно центровка КА должна обеспечиваться внутренней компоновкой отсеков и балансировочными грузами.

Согласно статистике [14 – 16] массовая доля приборов внешних устройств в общей массе БА внутри отсека невелика, поэтому для них поиск решения по критерию минимума отклонения центра масс КА также не является приоритетным. Взамен обычно применяется критерий минимума длины БКС, характеризующей функциональные взаимосвязи внутренней компоновки таких приборов. Однако так как на практике БКС прокладывается по поверхностям корпуса КА или по стержням приборных рам, вычисление длин пространственных кривых с трассировкой и учётом конструктивных требований является процессом с высокой трудоёмкостью. Тем не менее, в ПАО «РКК «Энергия» эта задача была успешно решена [17]. Согласно сложившейся практике разработки КА задача автоматизированного размещения БА предшествует задаче автоматизированного размещения БКС. Поэтому в данном случае допускается в качестве критерия принять минимум расстояния между центрами масс размещаемых в отсеке приборов внешних устройств определённых бортовых систем [18].

Геометрические модели отсеков и приборов описываются поверхностями не выше второго порядка и прямоугольными параллелепипедами соответственно [19]. Это допущение позволяет облегчить процесс моделирования.

Координаты центров масс внешних устройств считаются достоверно известными на основании результатов, полученных по имеющимся методикам расчётов [1].

Кроме того, как и в рассмотренных выше работах [5 – 14], в математической модели компоновки БА изначально решено не учитывать весь спектр технических требований (виброударно-акустические, термодинамические, эргономические, по электромагнитной совместимости и т.д.), так как в приоритете находится общая разработка методики, а эти дополнения вводятся позже при тестировании для оценки первичных

результатов и коррекции благодаря принципу регуляризации, который был описан в работах [18; 20].

Также предполагается, что количество гермоплат, на которых группируются все гермопереходники для протяжки жгутов БКС, равно количеству этих жгутов и известно по результатам размещения внешних устройств. Эти жгуты БКС могут состоять из нескольких кабелей, для каждого из которых может быть предусмотрено отдельное гнездо, если штекеры подключаются на разнесённые разъёмы в корпусе отсека КА, но ввиду близости таких разъёмов данное допущение остаётся в силе из-за малых расстояний между ними в масштабе габаритов отсека, так что к рассмотрению принимается гнездо центрального кабеля от конкретного жгута в каждом случае.

Математические модели и методы размещения приборов в отсеке

Комбинаций приборов может быть большое количество, ведь помимо взаимного расположения существует возможность менять позиции БА независимо с определённым шагом, и чем он меньше, тем больше этих вариантов. Общее число возможных перестановок может составлять:

$$C = \prod_{j=1}^N C_j = \prod_{j=1}^N N_j N_{Xj} N_{Yj} N_{Zj} N_{MXj} N_{MYj} N_{MZj}, \quad (1)$$

где $j = \overline{1, N}$ – порядковый номер внешнего устройства; N – количество внешних устройств; C_j – количество вариантов размещения приборов j -го устройства; N_j – количество приборов j -го устройства; N_{Xj}, N_{Yj}, N_{Zj} – количество смещений приборов j -го устройства вдоль осей OX, OY, OZ ; $N_{MXj}, N_{MYj}, N_{MZj}$ – количество поворотов приборов j -го устройства относительно осей OX, OY, OZ .

Учитывая, что внешних устройств может быть несколько десятков, поиск удачной компоновки БА методом перебора может затянуться, потому что автоматизированные пересчёты всех вариантов зависят от величины шага смещения по оси и по углу. Область возможных решений сужается за счёт фильтраций благодаря накопленному опыту, требованиям и ограничениям к расположению БА, но таких вариантов остаётся всё равно немало. Поэтому, чтобы увеличить производительность обработки исходных данных и вычислительную эффективность алгоритмов, далее предлагается рассмотреть матрично-топологический метод размещения БА, который предназначен для описания логики согласования компоновки БА с имеющимися техническими требованиями и позволяет на основании этого синтезировать соответствующие уравнения и впоследствии искать их решение [21].

Сначала задаётся исходная проектная схема размещения БА, которую требуется преобразовать, чтобы получить допустимое решение. Математическая модель переходов между разными неповторяющимися вариантами компоновок будет иметь вид:

$$A_{t+1}(r_{t+1}; \mathcal{G}_{t+1}; \gamma_{t+1}) = F[A_t(r_t; \mathcal{G}_t; \gamma_t)], \quad (2)$$

где r – вектор координат центра масс компоновки БА; \mathcal{G}, γ – углы Эйлера для ориентации БА в отсеке; A – компоновка БА; t – порядковый номер процедуры отображения (шаг конвертации); F – оператор пошагового отображения компоновки БА в отсеке (конвертор).

В зависимости (2) не рассматривается третий угол ориентации прибора в отсеке для плоскости, перпендикулярной образующей обечайки отсека, потому что это положение контролируется при проверке пересечения граней прибора с отсеком.

Исходя из оценки по формуле (1), можно заключить, что количество возможных отображений ограничено сверху числом перестановок, то есть $0 \leq t \leq C$. Тогда задача сводится к тому, чтобы найти такой инвариантный оператор F , при котором количество шагов конвертации t будет наименьшим и решение при этом ещё не станет частным:

$$t(F) \rightarrow \min . \quad (3)$$

Эту задачу можно трактовать следующим образом:

– пусть имеется замкнутое пространство отсека, которое содержит множество центров масс БА и инвариантное множество гермоплат на своих границах, с топологией в виде условий непересечения и гарантированных монтажных зазоров;

– пусть существует полный граф компоновки, тогда две любые вершины такого графа из множества центров масс БА или из сочетания этого множества с множеством гермоплат соединяются точно одним ребром;

– пусть множеству рёбер введённого полного графа соответствует множество расстояний между неодинаковыми центрами масс БА и между центрами масс БА и гермоплатами;

– тогда решением целевой функции (3) будет такой конвертор, при котором полный граф компоновки становится уникальным в результате наложения множества центров масс БА и множества гермоплат на множество его рёбер.

В соответствии со сделанными ранее допущениями модель любого прибора может быть описана замкнутой оболочечной моделью:

$$\Gamma_i = \Gamma(a_i; b_i; c_i): \begin{cases} b_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\kappa_i} k a_{ik} \\ c_i = 2 - (a_i - b_i), \end{cases} \quad (4)$$

где $i = \overline{1, N_j}$ – порядковый номер прибора; a_i – количество вершин прибора; b_i – количество рёбер прибора; c_i – количество граней прибора; $k = \overline{1, \kappa_i}$ – индекс, обозначающий количество рёбер, сходящихся в вершине; κ_i – максимальное количество рёбер, сходящихся в вершине.

Гарантированные монтажные зазоры могут быть учтены при описании габаритов приборов:

$$l_i = (l_{xi} + h_{mi} \quad l_{yi} + h_{mi} \quad l_{zi} + h_{mi})^T, \quad (5)$$

где l_{xi}, l_{yi}, l_{zi} – габариты прибора; h_{mi} – монтажный зазор прибора.

Оценка пересечения БА со стенками отсека КА и между собой проводится при помощи логической модели, описанной в работе [19]. С дополнением её геометрическими моделями (4) и (5) описывается топология пространства отсека КА.

Для учёта конструктивного требования на минимум расстояния между приборами, соединяющимися через БКС, целевой функции (3) ставится в соответствие новая целевая функция, состоящая из двух матриц:

$$\rho(\Gamma_i; \Gamma_j) \wedge \rho(\Gamma_{i-1}; \Gamma_i) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $\rho(\Gamma_i; \Gamma_j)$ – прямоугольная матрица расстояний между приборами и гермоплатами; $\rho(\Gamma_{i-1}; \Gamma_i)$ – квадратная нижнетреугольная матрица расстояний между приборами в отсеке; $\Gamma_j = \Gamma(a_j)$ – точечные модели гермоплат.

Так как матрично-топологический метод в общем виде (2) опирается на метод последовательно-одиночного размещения, когда компоновка заранее не сгенерирована, то конвертор для целевой функции (6) должен искать решения по размещению каждого прибора по отдельности. Для этого из матрицы $\rho(\Gamma_i; \Gamma_j)$ выбирается строка, а из матрицы $\rho(\Gamma_{i-1}; \Gamma_i)$ выбирается соответствующий столбец, которые объединяются в систему и решаются совместно для каждого прибора по порядку.

Поскольку на основании электрических схем известно, какие приборы в отсеке подключаются между собой и с какими внешними устройствами, то это функциональное требование может быть учтено. Следовательно из целевой функции (6) должны быть удалены элементы, не соединяемые по БКС.

Исходя из таких действий, количество уравнений в конверторе будет равно:

$$N(F) = N_j N + \sum_{i=1}^{N_j} (i-1) - N_1 - N_2 : \begin{cases} N_1 \leq N_j (N-1), \\ N_2 \leq \sum_{i=1}^{N_j} (i-1) - (N_j - 1). \end{cases} \quad (7)$$

Для поддержки принятия решения о размещении БА инженером-конструктором конвертор достаточно описать с помощью алгебры высказываний. Это позволит с помощью средств вычислительной техники получать рекомендации, что будет полезно при недостатке опыта оператора. С этой целью используются две переменные строкового типа (Strings as Immutable sequences):

$$\begin{cases} PC(X) = \text{"рядом с"} X, \\ HPPM(X; Y) = \text{"на равном расстоянии между"} X; Y. \end{cases}$$

Тогда справедлив следующий предикат:

$$PC(j) \wedge PC(i) = HPPM(j; i). \quad (8)$$

Высказывание (8) означает, что если есть требование одновременно разместить в отсеке $(i+1)$ -ю БА рядом с j -й гермоплатой и рядом с любым ранее размещённым i -м прибором для минимизации длины БКС, то оптимальным является размещение данного $(i+1)$ -го прибора на равном расстоянии между ними.

Если следующая на очереди к размещению БА должна соединяться по БКС с одной гермоплатой и несколькими уже размещёнными приборами, то это можно записать предикатом вида:

$$\bigwedge_{i=1}^{N_j} [PC(j) \wedge PC(i)] = \bigwedge_{i=1}^{N_j} HPPM(j; i) = HPPM(j; HPPM(i_{\min}; i_{\max})). \quad (9)$$

Высказывание (9) означает, что следующий прибор надо размещать на равном расстоянии между гермоплатой и точкой, относительно которой длина БКС до любого из связанных приборов будет минимальной (геометрический центр связей блока рассматриваемых приборов).

Аналогично можно записать предикат для случая, когда БА должна быть подключена к нескольким гермоплатам и нескольким приборам в отсеке:

$$\begin{aligned} \bigwedge_{j=1}^N \bigwedge_{i=1}^{N_j} [PC(j) \wedge PC(i)] &= \bigwedge_{j=1}^N \bigwedge_{i=1}^{N_j} HPPM(j; i) = \\ &= HPPM(HPPM(j_{\min}; j_{\max}); HPPM(i_{\min}; i_{\max})). \end{aligned} \quad (10)$$

Так как приборы размещаются последовательно, то крайними приборами в блоке будут те, которые имеют минимальный и максимальный порядковые номера. Это позволяет обеспечивать инвариантность нумерации при решении задачи размещения автоматизированным способом с помощью предикатов (8) – (10) применительно к целевой функции (6) со структурой системы уравнений ранга (7).

Соответствующий такому алгоритму конвертор имеет вид:

$$F = \bigwedge_t F_t = \bigwedge_t HPPM_t(HPPM_t(j_{\min}; j_{\max}); HPPM_t(i_{\min}; i_{\max})). \quad (11)$$

Стоит отметить, что решение вида (11) не предусматривает группирование БА по системам, так как приборы разных систем могут соединяться между собой в произвольных комбинациях. И так как оно носит рекомендательный характер, то непересечение объектов, их углы пространственной ориентации, монтажные зазоры контролируются оператором визуально на модели в системе автоматизированного проектирования. При необходимости корректировки проводятся вручную промерами по предполагаемым координатам и углам в базовой системе координат отсека в его файле сборки.

При таком подходе решение целевой функции (3) будет иметь вид:

$$t(F) = \sum_{j=1}^N N_j + N(F_t), \quad (12)$$

где $N(F_t)$ – количество изменений, которые пришлось внести для коррекции решения.

Если изменения связаны с изменениями конструкции приборов, то они не будут засчитываться в уравнении (12) в том случае, если габариты и углы пространственной ориентации остаются прежними. Если изменения связаны с переоснащением отсека по причине смены задачи КА, то задачу размещения потребуется перерешать полностью или в объёме приборов, которые такие изменения затронули, если электрические схемы для остальных приборов остались теми же.

Автоматизированное решение задачи размещения на уровне рекомендаций может быть расширено до уровня принятия решений, если в соответствии высказываниям (8) – (11) поставить конвертор, позволяющий рассчитывать координаты размещения БА относительно целевой функции (6).

Общее уравнение для вычисления координат центра масс БА, которая соединяется через БКС с несколькими гермоплатами и уже размещёнными в отсеке приборами, имеет вид:

$$r(\Gamma_i) = \frac{1}{4} \left[r(\Gamma_{i_{\min}}) + r(\Gamma_{i_{\max}}) + r(\Gamma_{j_{\min}}) + r(\Gamma_{j_{\max}}) \right]. \quad (13)$$

Принцип обработки нумерации соответствует описанному для высказывания (10). Чтобы найти решение, рекомендуемое высказыванием (9), надо положить $j_{\min} = j_{\max}$. Для решения, рекомендуемого высказыванием (8), – аналогично $i_{\min} = i_{\max}$.

В редких случаях, когда прибор соединяется лишь с гермопереходником, расчёт по уравнению (13) будет давать координаты средних точек на векторах координат разъёмов гермоплат. Поэтому предусматривается производить пересчёт:

$$\bar{r}(\Gamma_i) = 0,95 \dots 0,97 r(\Gamma_j). \quad (14)$$

Числовой коэффициент в уравнении (14) учитывает габариты приборов и для повышения точности расчёта может корректироваться по результатам тестирования.

Конвертор, обеспечивающий бóльшую автоматизацию решения за счёт формул (13) и (14), учитывающих функциональные требования целевой функции (6), имеет вид:

$$F = \bigwedge_i F_i = \bigwedge_i \left[r_i(\Gamma_i) \vee \bar{r}_i(\Gamma_i) \right]. \quad (15)$$

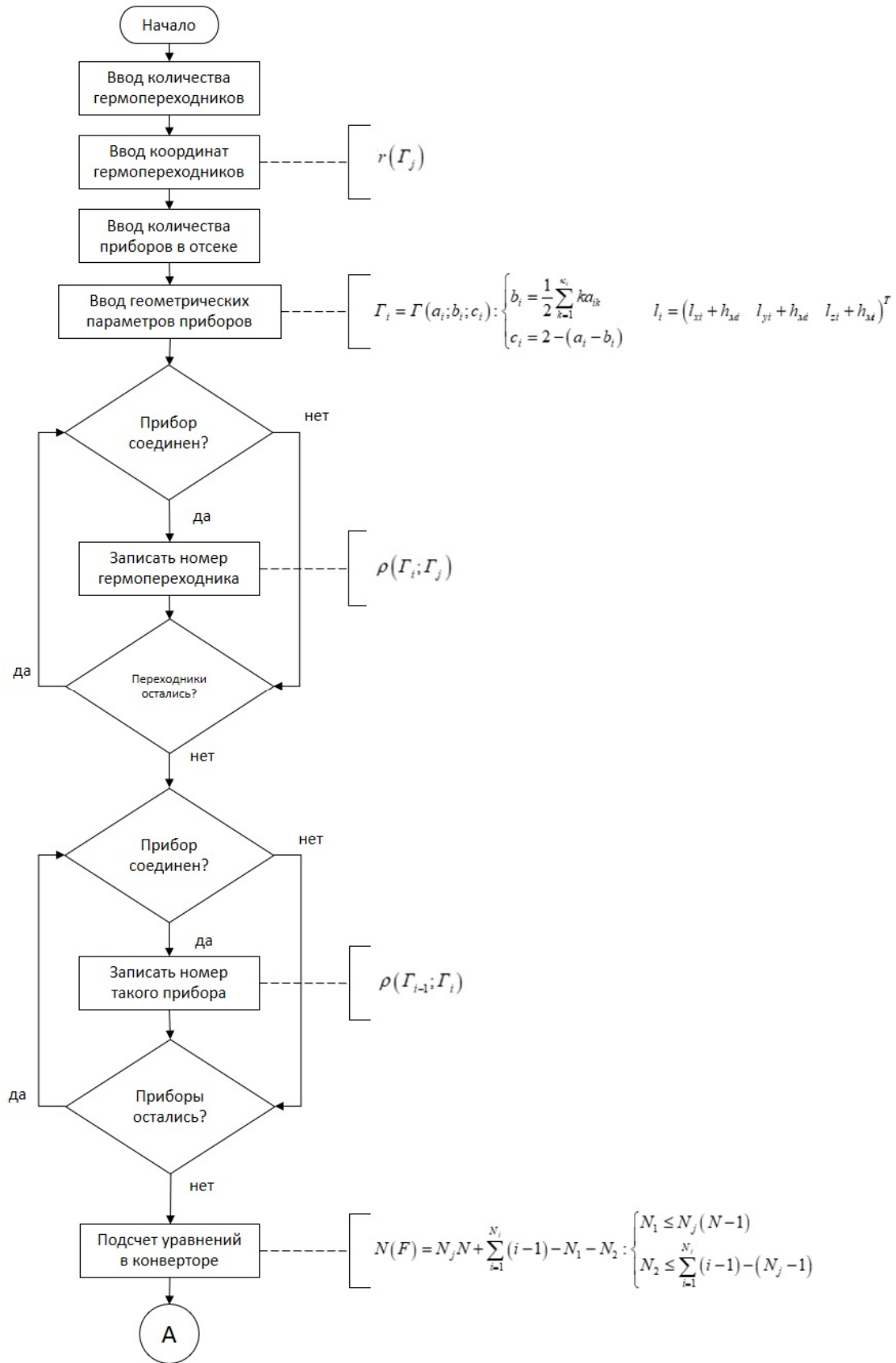
Оценка габаритных и монтажных требований проводится по методике из работы [19] для моделей приборов вида (4) и (5). Расчёт углов ориентации приборов требует при этом более глубокой проработки.

Если существуют дополнительные требования к размещению, то они могут быть обеспечены путём корректировки полученной схемы размещения. Для оценки влияния тепловых полей и электромагнитной совместимости в алгоритм должны быть добавлены соответствующие разделы, что будет рассмотрено в дальнейшем. Это же касается виброударного и акустического воздействия на приборы со стороны отсека. Поэтому при описываемом далее тестировании временно учёт этих требований ведётся по проектным и экспериментальным методикам из литературы [14 – 16].

Решение целевой функции (3) сохраняет вид уравнения (12). Эффективность от применения средств вычислительной техники с целью автоматизации размещения БА оценивается путём сравнения результата тестирования с общим количеством перестановок (1) при работе инженера-конструктора вручную.

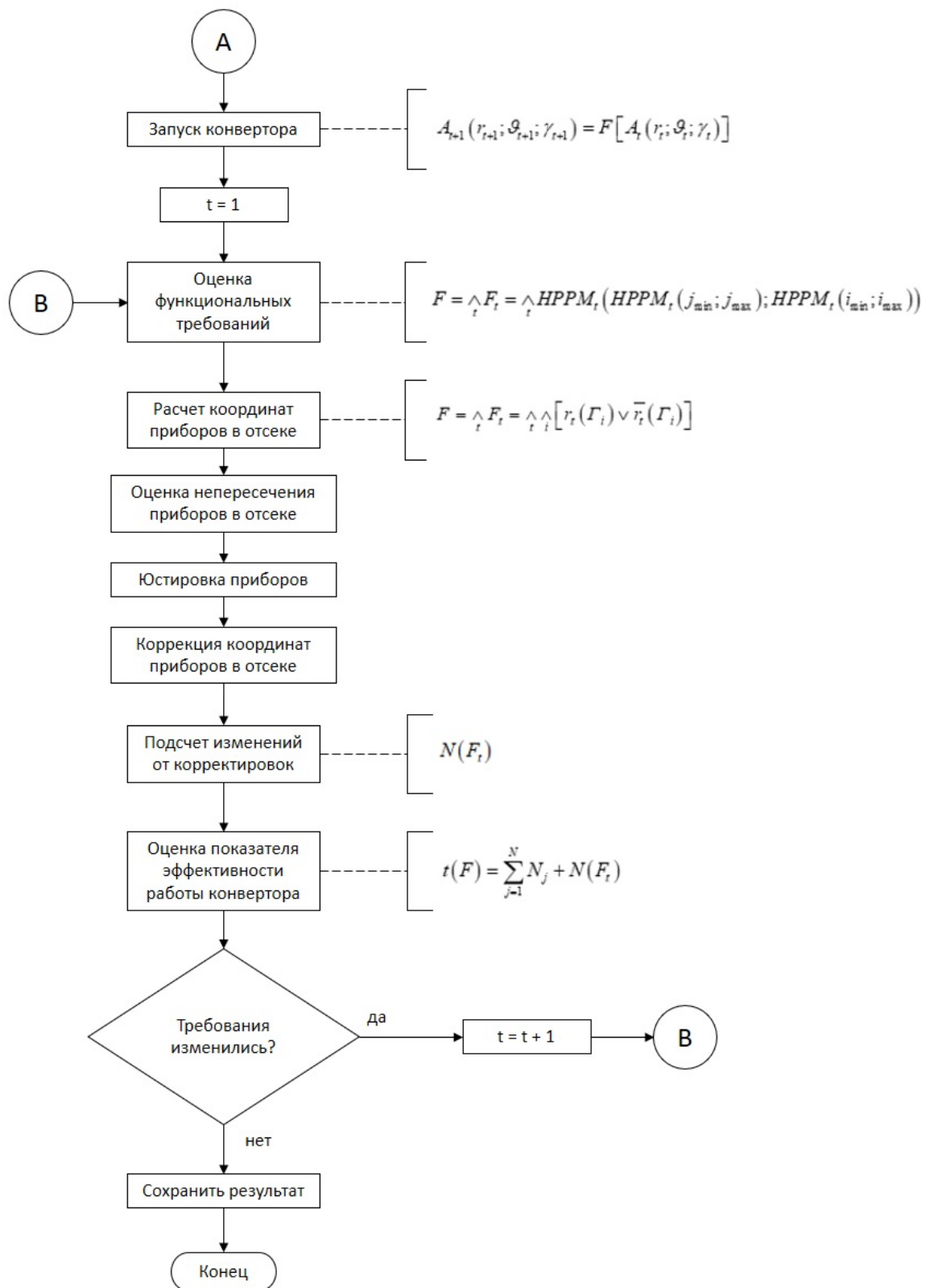
Программное обеспечение алгоритма размещения приборов в отсеке

На основании рассмотренных топологий, описанных при помощи математической модели процедурно уравнениями (2) – (11) и численно уравнениями (12) – (15), построена блок-схема для программной реализации алгоритма, представленная на рис. 3. Код поддерживается на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python с динамической строгой типизацией в его интегрированной среде PyCharm Community Edition версии 2022.2.2.



a

Рис. 3. Принципиальная блок-схема алгоритма автоматизированного размещения приборов:
a – начало блок-схемы



б

Рис. 3, б – окончание блок-схемы

Тестовая версия программы с целью сокращения времени разработки без потери качества предполагает использование следующих эмуляторов:

1. PTC Creo Parametric Global Interference – для оценки пересечения приборов и для их юстировки в отсеке КА.

2. MS Office Excel Inquire – для контроля допускаемых значений теплового, вибрационного, ударно-импульсного, акустического воздействий, а также проверки электромагнитной совместимости.

Организация и проведение тестирования

Тестирование предложенного алгоритма проводилось как в процедурном (2) – (11), так и в численном (12) – (15) форматах на примере отсека одного из перспективных КА. Форма отсека является сферической. Внутренний диаметр отсека КА составил 2825 мм. Количество гермоплат и приборов было 12 и 9 соответственно.

Исходные данные для тестирования подбирались таким образом, чтобы охватить наиболее широких круг систем КА и подразделений, откуда эти данные поступают. По причине децентрализованного хранения состава компоновки основным фактором, который влияет на корректность работы алгоритма, является время (или частота) передачи исходных данных для задачи размещения БА. Поэтому помимо проверки принципиальной работоспособности алгоритма важным аспектом тестирования была проверка возможности использования алгоритма при изменении данных во времени.

Исходные данные по габаритам приборов представлены в табл. 1. Базовая система координат отсека КА привязана к шпангоуту одного из люков. Гермоплаты заранее размещены, как показано на рис. 4.

Таблица 1. Габариты приборов

i	$l_{xi}, \text{ мм}$	$l_{yi}, \text{ мм}$	$l_{zi}, \text{ мм}$
1	255	173	187
2	255	173	187
3	255	173	187
4	255	173	187
5	255	173	187
6	255	173	187
7	128	129	106
8	188	140	107
9	246	128	69

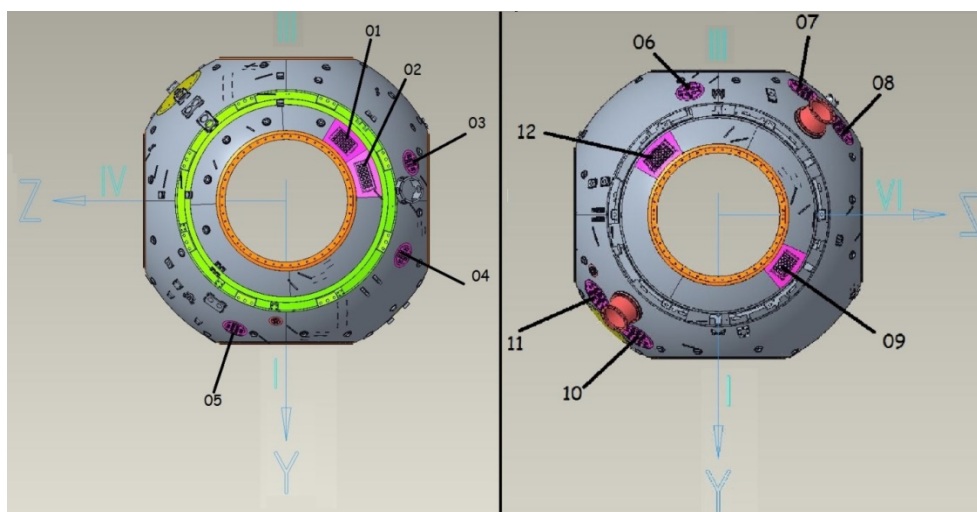


Рис. 4. Распределение гермоплат на корпусе отсека

Целевая функция вида (6) для данного примера относительно гермоплат равна:

$$\begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} & \rho_{14} & \rho_{15} & 0 & 0 & \rho_{18} & 0 & \rho_{110} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{27} & 0 & 0 & 0 & \rho_{211} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{38} & 0 & \rho_{310} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{47} & 0 & 0 & \rho_{411} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{58} & 0 & \rho_{510} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{67} & 0 & \rho_{68} & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{93} & 0 & 0 & \rho_{96} & 0 & 0 & \rho_{99} & 0 & 0 & \rho_{912} \end{pmatrix} \rightarrow \min .$$

Целевая функция вида (6) для данного примера относительно приборов равна:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{51} & 0 & \rho_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{62} & 0 & \rho_{64} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{91} & \rho_{92} & \rho_{93} & \rho_{94} & \rho_{95} & \rho_{96} & 0 & \rho_{98} & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \min .$$

Таким образом, количество уравнений в конверторе (7) составило 36. В качестве оператора выступал инженер-конструктор, работа которого связана с разработкой компоновок отсеков, но при этом ранее он не привлекался к участию в разработке компоновки рассматриваемого в данном примере отсека КА. Оператор обладал навыком работы в PTC Creo Parametric Global Interference и в общем пакете MS Office Excel 2010 на момент тестирования.

Процесс тестирования складывался из последовательности следующих действий:

1. Получение задания на разработку компоновки приборов в отсеке.
2. Оценка количества приборов и количества гермоплат.
3. Определение связей приборов и гермоплат с помощью электрических схем или (при их отсутствии) по опыту и статистике подключения приборов.
4. Внесение исходных данных (количество, координаты гермоплат, габариты приборов) в расчётный модуль.
5. Настройка связей для формирования целевой функции в виде матриц.
6. Подбор числовых коэффициентов для уравнений пересчёта.
7. Запуск расчёта и контроль за получением результатов.
8. Ввод координат размещения приборов при их добавлении в модель отсека.
9. Оценка пересечений приборов между собой и со стенками отсека.
10. Оценка необходимости юстировки приборов.
11. Корректировки проектной схемы размещения.

12. Оценка значений монтажных зазоров.
13. Корректировки проектной схемы размещения.
14. Оценка эргономических требований из габаритных чертежей приборов.
15. Корректировки проектной схемы размещения.
16. Проверка выполнения прочих требований.
17. Корректировки проектной схемы размещения.
18. Принятие решения о присвоении схеме размещения статуса рабочей.

В результате нескольких подготовительных расчётных циклов было установлено, что числовой коэффициент для уравнения (14) на шаге 6 подобран корректно. Перенос результатов расчёта на твердотельную модель осуществлялся инженером-конструктором на шаге 8 в диалоговом режиме. В общем случае была возможность вводить как длину вектора размещения, так и его проекции по осям базовой системы координат КА. В описанной последовательности действий между шагами 9 и 10 корректировка не проводилась, потому что данные процедуры выполнялись совместно средствами РТС Creo Parametric Global Interference. Изменение проектной схемы размещения приборов на шаге 11 в части юстировки обеспечивалось за счёт базирования по предусмотренной привалочной плоскости и имеющимся крепёжным отверстиям. Оценка значений монтажных зазоров на шаге 12 была реализована путём промеров расстояний между вершинами компланарных рёбер моделей приборов. Оценка эргономических требований на шаге 14 проводилась по установленным инженерным методикам ПАО «РКК «Энергия». Проверка ранее описанных прочих требований проводилась при помощи MS Office Excel Inquire. Так как цель тестирования заключалась в верификации основной модели (2) – (15), то на шаге 16 проверка делалась в первом приближении. В результате тестирования расчётного модуля разработанного алгоритма получена компоновка приборов в отсеке КА, представленная на рис. 5.

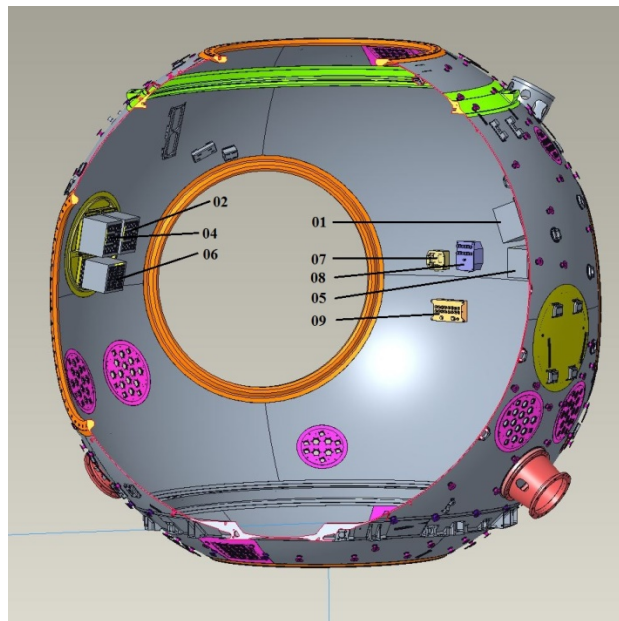


Рис. 5. Компоновка приборов в отсеке по результатам тестирования

Анализ результатов

Из сделанных вначале допущений (контроль критериев допускаемой центровки отсека не в приоритете, модели приборов – параллелепипеды, гермоплаты переведены в точки) ни одно не понизило качество решения. Это связано с небольшим количеством приборов и большими расстояниями между ними.

Общее время (без учёта затрат на получение исходных данных) на решение задачи размещения приборов автоматизированным способом составило 3 часа в тестовом режиме с привлечением эмуляторов, что для выбранного примера сэкономило 5 часов по сравнению с имеющимися данными хронометража разработки модели этого фрагмента общей компоновки отсека КА. При этом количество шагов конвертации схемы размещения равно 42, что меньше в $2,25 \cdot 10^{11}$ раз по сравнению с возможным количеством шагов полного перебора по формуле (1) с интервалом в 10 мм (град).

При использованном в ходе тестирования количестве приборов зафиксировано 5 случаев возникновения пересечений приборов между собой и 1 – с отсеком КА. Эту статистику в будущем следует развивать на более масштабных компоновках.

По результатам эргономической оценки схемы на шаге 14 было скорректировано положение приборов 7 – 9 (рис. 5), чтобы обеспечить доступ пользователям. К остальным блокам дополнительных коррекций не требовалось, т.к. они уже удовлетворяли требованиям.

Проверка разнородных технических требований в MS Office Excel Inquire показала, что по тепловым требованиям не прошли приборы 1 – 6, по электромагнитной совместимости и по виброударно-акустическим воздействиям неудовлетворительных результатов не возникало. Для обеспечения центровки отсека приборы 1, 3, 5 и 2, 4, 6 были разнесены на противоположные зоны размещения относительно продольной оси.

Для отвода тепла с приборов 1 – 6 и выполнения соответствующих требований они были установлены на термоплаты. В частности, для приборов 2, 4, 6 координаты размещения пришлось на термоплату, совпав с контрольным решением, с которого была взята «пустая» модель отсека КА. Для остальных приборов были найдены новые места для установки, исходя из обеспечения заданных групп требований.

Среди основных преимуществ разработанного алгоритма можно выделить более высокую вычислительную эффективность по критериям количества циклов и времени, снижение трудоёмкости процесса размещения приборов, систематический контроль обеспечения разнородных требований, простоту освоения пользователем.

Среди недостатков алгоритма можно выделить временное отсутствие подробных разделов по комплексной оценке групп различных требований, временное отсутствие возможности автоматически переносить результаты расчёта на твердотельную модель, необходимость ручного ввода большого количества исходных данных при отсутствии процессов их предварительной системной подготовки и автоматической загрузки.

Заключение

В результате проведённого исследования обобщены и переработаны в цифровую модель основные практики, к которым прибегает инженер-конструктор при создании компоновки отсека КА. Благодаря этому разработан и протестирован на контрольном примере алгоритм автоматизированного размещения приборов, которые подключаются к гермоплатам для связи с внешними устройствами.

Автоматизированная реализация функций проверки непересечения приборов, их юстировки, более точного учёта всего спектра требований, передачи результатов расчёта в модель является перспективным направлением развития предложенного алгоритма, который удалось верифицировать по результатам тестирования. Дополнительно стоит проверить возможность использования данного алгоритма для размещения приборов, не связанных с гермоплатами. Таким образом, целесообразно продолжить данное исследование, чтобы перейти от эмуляторов к профессиональному программированию полноценной версии программы, что может позволить получить ещё более эффективное решение задачи автоматизированного размещения приборов в отсеке КА.

Библиографический список

1. 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.
2. Ахметов Р.Н., Шилов Л.Б., Куренков В.И., Якищук А.А. Методика размещения внешних устройств космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом целевого функционирования // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 4. С. 38-48. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-38-48
3. Ахметов Р.Н., Куренков В.И., Стратилатов Н.Р., Шилов Л.Б., Гордеев А.И. Выбор мест установки антенн навигационной системы на корпусе космического аппарата ДЗЗ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 4 (42). С. 59-69. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-59-69
4. Ахметов Р.Н., Куренков В.И., Стратилатов Н.Р., Федоренко О.Г., Шилов Л.Б. Выбор мест и углов установки звёздных координаторов космических аппаратов наблюдения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 4 (35). С. 11-17. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-4(35)-11-17
5. Верхотуров М.А., Верхотурова Г.Н., Ягудин Р.Р. Управление размещением трёхмерных геометрических объектов в системах компоновки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, № 8 (53). С. 45-51.
6. Волоцуев В.В., Ткаченко И.С., Сафронов С.Л. Выбор проектных параметров универсальных платформ малых космических аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 2 (33). С. 35-47. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-2(33)-35-47
7. Вышинский В.В., Кисловский А.О., Колчев С.А. Упрощённая математическая модель компоновки малоразмерного летательного аппарата // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 19, № 6. С. 86-94.
8. Клягин В.А., Петров И.А., Серебрянский С.А., Лаушин Д.А. Методика решения задачи автоматизированной компоновки блоков БРЭО последовательными приближениями на основе дискретной модели их размещения на базовых плоскостях отсеков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 54. С. 78-89. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.07
9. Маркин Л.В., Корн Г.В., Куи М.Х., Е В.Т. Дискретные модели геометрического моделирования компоновок авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86.
10. Образцов А.А., Панченко С.В. Разработка алгоритмов автоматизированной компоновки оборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 3-4. С. 41-50.
11. Резникова С.Ю., Шевченко Л.П. Объектно-ориентированные технологии в автоматизации решения задачи размещения // Радиоэлектроника и информатика. 1999. № 4 (9). С. 115-119.
12. Коваленко А.А., Романова Т.Е. Математическое моделирование ограничений на минимально и максимально допустимые расстояния в задачах балансной

компоновки // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. 2014. № 169. С. 54-62.

13. Ягудин Р.Р. Оптимизация компоновки трёхмерных геометрических объектов на основе годографа вектор-функции плотного размещения // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3 (21). С. 206-217.

14. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов: учеб. пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 572 с.

15. 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.

16. 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.

17. Агафонов Д.В., Воробьёв Ю.А., Осокин Ю.В. Метод оптимизации монтажа бортовой кабельной сети на изделиях ракетно-космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 1 (70). С. 88-94.

18. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 136 с.

19. Шулепов А.И., Лу Цзя. Об одной задаче размещения грузов в спускаемом аппарате // Сб. трудов XVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов (18-20 июня 2014 г., Самара). Ч. I. Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2015. С. 187-190.

20. 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.

21. 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

METHOD OF AUTOMATED ARRANGEMENT OF DEVICES IN A SPACECRAFT COMPARTMENT TAKING INTO ACCOUNT CONNECTION TO INTERFACE CONNECTORS OF FEED-THROUGH PLATES OF AN ON-BOARD CABLE SYSTEM

© 2023

A. A. Belyakov Design Engineer;
S.P. Korolyov Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolyov, Moscow Region, Russian Federation;
post@rsce.ru

V. I. Prihodko Lead Design Engineer;
S.P. Korolyov Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolyov, Moscow Region, Russian Federation;
post@rsce.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 proposes a method for automated arrangement of on-board equipment in the spacecraft compartment, connected to external devices through sealed adapters by the on-board cable system routes. The purpose is to create a program that allows automated placing of a part of the on-board equipment in the compartment, taking into account the existing practical principles for developing instrument placement schemes, one of which is to minimize the mass of the on-board cable system. The mathematical model is described using the matrix-topological layout method in a procedural form, as well as in a numerical form for calculating the coordinates of the placement of devices and estimating the number of cycles to find the final solution. Recommendations are provided to ensure that the full range of technical requirements is taken into account in the future. An outline flowchart of the method algorithm is presented with support in the high-level Python programming language. The software implementation of the method was carried out with emulators. Testing was carried drawing on the example of a compartment of one of the advanced space vehicles. The effectiveness of the method is evaluated by comparing the number of cycles needed to obtain the result and the total time spent on the layout relative to the control data known from the job statistics.

On-board equipment; space vehicle compartment; equipment layout; on-board equipment accommodation layout; on-board cable system; sealed adapter; feed-through plate; modeling

Citation: Belyakov A.A., Prihodko V.I., Shulepov A.I. Method of automated arrangement of devices in a spacecraft compartment taking into account connection to interface connectors of feed-through plates of an on-board cable system. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 7-24. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-7-24

References

1. 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.
2. Akhmetov R.N., Shilov L.B., Kurenkov V.I., Yakishik A.A. Procedure of accomodation of earth remote sansing satellite external devices with regard for the satellite target operation. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 4. P. 38-48. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-38-48
3. Akhmetov R.N., Kurenkov V.I., Stratilatov N.V., Shilov L.B., Gordeev A.I. Choosing the place for the installation of navigation system aerials on the ERS spacecraft body. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 4 (42). P. 59-69. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-59-69
4. Akhmetov R.N., Kurenkov V.I., Stratilatov N.V., Fedorenko O.G., Shilov L.B. Selection of sites and angles for placing star coordinators of remote sensing satellites. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 4 (35). P. 11-17. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-4(35)-11-17
5. Verkhoturov M.A., Verkhoturova G.N., Yagudin R.R. Three-dimensional geometric objects nesting control in assembly systems. *Vestnik UGATU*. 2012. V. 16, no. 8 (53). P. 45-51. (In Russ.)
6. Volotsuev V.V., Tkachenko I.S., Safronov S.L. Choice of design parameters of universal platforms of small space vehicles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 2 (33). P. 35-47. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-2(33)-35-47
7. Vyshinsky V.V., Kislovskiy A.O., Kolchev S.A. Simplified mathematical model of small sized unmanned aircraft vehicle layout. *Civil Aviation High Technologies*. 2016. V. 19, no. 6. P. 86-94. (In Russ.)
8. Klyagin V.A., Petrov I.A., Serebryansky S.A., Laushin D.A. The method for solving the problem of avionics blocks arrangement by successive approximations based on a discrete

model of their installation on the virtual planes. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2018. No. 54. P. 78-89. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.07

9. Markin L.V., Korn G.V., Kui M.H., Ye V.T. Discrete models of aircraft equipment layout geometric modeling. *Trudy MAI*. 2016. No. 86. (In Russ.)

10. Obratsov A.A., Panchenko S.V. Development of algorithms for automated equipment layout. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2008. No. 3-4. P. 41-50. (In Russ.)

11. Reznikova S.Yu., Shevchenko L.P. Object-oriented technologies in automating the solution of the placement problem. *Radioelektronika i Informatika*. 1999. No. 4 (9). P. 115-119. (In Russ.)

12. Kovalenko A.A., Romanova T.E. Mathematical modeling of restrictions on the minimum and maximum allowable distances in problems of balanced layout. *Avtomatizirovannyye Sistemy Upravleniya i Pribory Avtomatiki*. 2014. No. 169. P. 54-62. (In Russ.)

13. Yagudin R.R. Optimization of the layout of three-dimensional geometric objects based on the hodograph of the dense packing vector function. *Engineering Journal of Don*. 2012. No. 3 (21). P. 206-217. (In Russ.)

14. Tumanov A.V., Zelentsov V.V., Shcheglov G.A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov: ucheb. posobie* [Basics of spacecraft onboard equipment accommodation layout]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2018. 572 p.

15. 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.

16. Kurenkov V.I. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov optiko-elektronnoy 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.

17. Agafonov D.V., Vorobiev Yu.A., Osokin Yu.V. Method for harness deployment optimization onboard rocket and space technology objects. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2013. No. 1 (70). P. 88-94. (In Russ.)

18. Gavrilov V.N. *Avtomatizirovannaya komponovka pribornykh otsekov letatel'nykh apparatov* [Automated arrangement of aircraft instrument compartments]. M.: Mashinostroenie Publ., 1988. 136 p.

19. Shulepov A.I., Lu Tszya. Ob odnoy zadache razmeshcheniya gruzov v spuskaemom apparate. *Sb. trudov XVII Vserossiyskogo seminar po upravleniyu dvizheniem i navigatsii letatel'nykh apparatov (June, 18-20, 2014, Samara)*. Part I. Samara: ANO «Izdatel'stvo SNTs» Publ., 2015. P. 187-190. (In Russ.)

20. 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.)

21. 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. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24