

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.022

Расчет перемещений для коррекции мест установки приборов при превышении лимитов массы в зонах размещения в отсеке

А.А. Беляков

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

Calculation of displacements to correct the mounting locations of devices when the mass limits are exceeded in the placement zones in compartment

A.A. Belyakov

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia

При разработке компоновки приборов летательного аппарата требуется обеспечить определенное положение центров масс отсеков и добиться минимальных длин и масс кабелей, соединяющих приборы. Эту задачу можно решить экспертным методом (эвристическим), однако необходимость учета многих других факторов при оптимизации компоновки требует создания расчетной методики. Проработан вопрос определения направления и значения перемещений приборов для выполнения массо-центровочных и инерционных требований к компоновке бортовой аппаратуры внутри отсека космического аппарата. Разработаны математические модели для расчета перемещения одного и нескольких приборов, в том числе при наличии нескольких равнодоступных зон размещения. Составлен общий алгоритм определения перемещений бортовой аппаратуры, приведены примеры его отработки. Анализ полученных данных показал, что геометрические ограничения оказывают существенное влияние на результаты расчета и в некоторых случаях должны быть проработаны дополнительно. Также выявлены случаи, когда для обеспечения центровки отсека не удастся избежать увеличения расстояний между функционально связанными приборами, и требуется выполнить перекомпоновку приборов в отсеке.

EDN: BDZZTS, <https://elibrary/bdzzts>

Ключевые слова: центр масс, момент инерции, космический аппарат, бортовая аппаратура, компоновка приборов, центровка отсека

When designing the aircraft devices layout, it is necessary to ensure a specific position of the compartments' centers of mass while minimizing the lengths and masses of the cables connecting the devices. This problem can be solved using expert methods (heuristically), but when optimizing the layout, many other factors must be taken into account. Therefore, a computational approach is essential for providing the systematic development of layout solutions. The issue of determining the direction and magnitude of devices movements to en-

sure the fulfillment of mass centering and inertial requirements for the layout of on-board equipment inside the spacecraft compartment has been researched. Mathematical models have been developed for cases of displacement of one instrument and several instruments, including in the presence of several equally accessible placement zones. A general algorithm of actions has been built, and examples of its development are given. An analysis of the results showed that geometric constraints have a significant impact on the calculation results and, in some cases, require additional consideration. There may also be situations where increasing the distances between functionally connected devices is unavoidable to ensure compartment alignment, and such devices layout needs to be rearranged.

EDN: BDZZTS, <https://elibrary/bdzzts>

Keywords: center of gravity, moment of inertia, spacecraft, on-board equipment, devices layout, compartment centering

Обеспечение определенных координат центра масс (ЦМ) и моментов инерции летательных аппаратов, в том числе космических (КА), является одним из основных технических требований на проектирование. Превышение допускаемых отклонений приводит к росту расхода топлива КА на маневры и к накоплению ошибок в системе управления.

Чтобы достичь необходимой центровки КА, разрабатывают подходящую компоновку бортового оборудования [1]. Если приборный состав изменяется, то центровку КА стараются обеспечить корректировкой размещения бортовой аппаратуры (БА) внутри отсеков [2]. Когда не удастся добиться нужного результата, прибегают к балансировке отсеков специальными методами [2–4] при разработке КА и стендов [5–8] при общей сборке КА. Для обеспечения динамической устойчивости КА стремятся снизить центробежные моменты до нуля.

К основным критериям эффективности оптимизации компоновки БА в отсеках КА относятся минимальные отклонения координат ЦМ и моментов инерции КА от допускаемых значений. Принимая эти критерии эффективно за главные, задачу оптимизации решают при весовом проектировании на ранних стадиях разработки КА [9, 10]. В результате получают закон и эпюры распределения массы по отсекам.

На дальнейших стадиях при определении координат размещения БА необходимо найти компромисс с другим критерием эффективности — минимумом массы кабелей. Для этого применяют метод последовательно-одиночного размещения БА и вычисляют координаты размещения очередного прибора с учетом электрических связей, а затем проверяют лимит массы в зоне размещения, найденный по ре-

зультатам весового проектирования. Если он превышен, то прибор перемещают в другую ближайшую зону размещения. Такой подход позволяет контролировать массу БА в отсеках КА и согласовывать результаты оптимизации компоновки БА по остальным критериям.

Наименее изученным остается вопрос, каким образом переместить часть приборов с учетом оптимизации по массе кабелей, чтобы обеспечить требуемую центровку и динамическую устойчивость КА при известных габаритных ограничениях.

Цель исследования — разработка методики перемещения БА с обеспечением минимальных отклонений ЦМ и моментов инерции КА при минимальном приращении массы кабелей относительно теоретически оптимального значения.

Математические модели и алгоритм определения перемещения БА. Пусть по критерию минимума массы кабелей координаты размещения БА определяются согласно методике [11], причем с учетом результата весового проектирования КА [9, 10] по критериям минимумов отклонений ЦМ и моментов инерции КА, а также с разбивкой по установочным группам в зонах размещения [12] и проверкой лимитов массы. При этом пусть в некоторых зонах размещения возникают превышения лимитов массы. Необходимо определить направления и значения векторов перемещений приборов в другие зоны размещения.

Лимиты массы в зонах размещения приборов определяются рекуррентно из уравнения

$$\mathbf{r}_Z = \frac{1}{\delta M_Z} \left[\left(\sum_{k=1}^{Z-1} M_k + \delta M_Z \right) \mathbf{r}_0 - \sum_{k=1}^{Z-1} M_k \mathbf{r}_C \right], \quad (1)$$

где Z — порядковый номер зоны размещения; M_Z — масса в зоне размещения, кг; δM_Z —

вариация массы в зоне размещения, кг; $\mathbf{r}_0$ — вектор координат заданного положения ЦМ КА, м; $\mathbf{r}_c$ — вектор координат текущего положения ЦМ КА, м; $\mathbf{r}_z$ — вектор координат положения ЦМ зоны размещения, м.

Формула (1) подходит для поиска глобальных экстремумов на эпюрах распределения массы по отсекам КА. Для нахождения локальных экстремумов и промежуточных значений массы, распределяемой по отсеку, следует применять метод конечных элементов. Методика весового проектирования подробно рассмотрена в работах [9, 10].

Модель компоновки БА в общем виде описывается как [13]

$$\mathbf{A}_{t+1}(\mathbf{r}, \varphi) = \mathbf{F}[\mathbf{A}_t(\mathbf{r}, \varphi)], \quad (2)$$

где $\mathbf{A}_{t+1}$ и $\mathbf{A}_t$ — компоновка БА на процедуре отображения (шаге конвертации) $t + 1$ и t ; $\mathbf{r}$ — вектор координат размещения ЦМ БА, м; φ — вектор углов пространственной ориентации БА, рад; $\mathbf{F}$ — оператор отображения компоновки БА в отсеке КА (конвертор).

Электронная габаритная модель прибора имеет вид [11]

$$\mathbf{MP}_i = (m_i, \mathbf{l}_i, \Gamma_i), \quad (3)$$

где i — порядковый номер прибора, $i = \overline{1, n}$ (n — общее количество приборов); m_i — масса i -го прибора, кг; $\mathbf{l}_i$ — габаритные размеры i -го прибора, м; Γ_i — топология i -го прибора.

Рассмотрены три случая перемещения приборов.

Первый случай — перемещение одного прибора в одну ближайшую доступную зону размещения. Чтобы обеспечить минимум приращенной массы кабелей, прибор следует переместить на границу этой зоны с учетом конструктивно-го зазора:

$$\mathbf{F}: \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_z + \text{sign}(\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_i^*) \max(h_{\Gamma i}, h_{m i}, h_{\Gamma i}), \quad (4)$$

где $\mathbf{r}_i$ и $\mathbf{r}_i^*$ — вектор координат размещения прибора после и до пересчета, м; $h_{\Gamma i}$, $h_{m i}$ и $h_{\Gamma i}$ — габаритный, монтажный и тепловой зазор соответственно, м; $\text{sign}(\cdot)$ — функция знака.

В формуле (4) габаритный, монтажный тепловой зазоры определяются по методикам, приведенным в работах [11], [14] и [15] соответственно. При выявлении пересечений электронной габаритной модели прибора с электронной геометрической моделью конструкции необходимо провести смещение прибора, как описано в статье [16].

Второй случай — перемещение нескольких приборов в одну ближайшую доступную зону их размещения. Этот случай возможен, если максимальное допускаемое расстояние между приборами по длине кабелей строго задано в технических требованиях электрической схемы на бортовую систему КА. Следовательно, перемещение БА должно быть выполнено так, чтобы обеспечить минимальную массу электрических связей между приборами. Тогда перемещение (передвижение) БА — это такое отображение компоновки БА (2) на себя, при котором сохраняются расстояния между точками и ЦМ приборов, и электрических разъемов. Таким образом, задача сводится к синтезу конвертора для выполнения преобразования модели (2) над моделями (3).

Центральная и осевая симметрии будут подходящим решением, если однозначно определены точка и ось симметрии соответственно. Например, приборный отсек КА не содержит запретных зон, и приборы находятся в окрестности его продольной оси.

Тогда при перемещении приборов координаты пересчитываются по формуле аффинного преобразования

$$\mathbf{F}: \mathbf{r}_i = \mathbf{E}_i \mathbf{r}_i^* + \mathbf{r}_{0i}, \quad (5)$$

момент инерции для центральной симметрии — по формуле Лагранжа [17]

$$J_i = J_i^* + m_i \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^*\|^2, \quad (6)$$

а момент инерции для осевой симметрии — по формуле Гюйгенса — Штейнера [17]

$$J_i = J_i^* + m_i \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i^*\|^2, \quad (7)$$

где $\mathbf{E}_i$ — матрица коэффициентов симметрии i -го прибора; $\mathbf{r}_{0i}$ — координаты точки симметрии i -го прибора, м; J_i^* — момент инерции i -го прибора до пересчета, кг·м².

Зеркальная симметрия относительно границ зон размещения является подходящим решением лишь отчасти, так как обеспечивает сохранение длин кабелей между перемещаемыми приборами, но не гарантирует минимальное расстояние между этой частью приборов и остальными, оставшимися на своих местах. Поэтому ее следует дополнить переносом.

Предложенную композицию, называемую переносной симметрией, можно использовать

в качестве конвертора для модели (2), если границы зон размещения приборов являются плоскостями. Иначе вместо переноса следует ввести поворот, тогда конвертор будет описываться композицией зеркальной симметрии и поворота, называемой поворотной симметрией:

Если границы зон размещения приборов являются плоскостями,

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_r \circ \mathbf{F}_z, \quad (8)$$

а если они не являются плоскостями,

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_\phi \circ \mathbf{F}_z, \quad (9)$$

где $\mathbf{F}_r$ — преобразование переноса на вектор перемещения прибора; $\mathbf{F}_z$ — преобразование зеркальной симметрии относительно границы зоны размещения; $\mathbf{F}_\phi$ — преобразование поворота на угол около зеркальной точки ЦМ прибора.

Координаты приборов в выражениях (8) и (9) пересчитываются для зеркальной симметрии по формуле аффинного преобразования (5), для поворота согласно методике [15], а для переноса — по выражению

$$\mathbf{F}_r: \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i^{**} + \text{sign}(\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_i^{**}) \times \left[\mathbf{r}_z - \frac{\mathbf{l}_i}{2} - \max(h_{ri}, h_{mi}, h_{ti}) \right], \quad (10)$$

где $\mathbf{r}_i^{**}$ — вектор координат перемещения прибора при зеркальной симметрии, м.

При обнаружении пересечений с электронной геометрической моделью конструкции отсека или с электронными габаритными моделями приборов необходимо выполнять смещения согласно методике [16].

Момент инерции перемещаемых приборов относительно их общего ЦМ следует рассчитывать по формуле Якоби [17]

$$J_{\text{Спер}} = \frac{\sum_j \sum_{k \neq j} m_j m_k \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k\|^2}{\sum_j m_j}, \quad (11)$$

где m_j, m_k — массы перемещаемых приборов, кг; $\mathbf{r}_j, \mathbf{r}_k$ — векторы их координат, м.

Возрастание момента инерции после перемещения приборов указывает на увеличение длин кабелей между приборами.

Третий случай — перемещение нескольких приборов в одну из нескольких равноудаленных ближайших доступных зон размещения. Отличие от второго случая заключается в дополне-

нии решения проверкой специального условия методом Куна — Куэнна [12]. Необходимо определить, в какой из равноудаленных доступных зон размещения масса кабелей, соединяющих перемещаемые приборы с оставшимися в исходной зоне приборами, будет наименьшей. Для этого в каждой доступной зоне размещения вычисляются координаты общего ЦМ перемещаемых приборов [18]

$$\mathbf{r}_{\text{Спер}}^{Z(t+1)} = \frac{\sum_j \sum_{k \neq j} \frac{\mathbf{T}_{jk} \mathbf{g}_{jk} \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k\|}{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k\| - \mathbf{r}_{\text{Спер}}^{Z(t)}}}{\sum_j \sum_{k \neq j} \frac{\mathbf{T}_{jk} \mathbf{g}_{jk}}{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k\| - \mathbf{r}_{\text{Спер}}^{Z(t)}}}, \quad (12)$$

где $\mathbf{T}_{jk}$ — логические функции связей между приборами; $\mathbf{g}_{jk}$ — погонная масса кабеля между приборами, кг/м; $\mathbf{r}_{\text{Спер}}^{Z(t)}$ — вектор координат перемещаемых приборов в зоне размещения Z на шаге конвертации t , м.

Результат расчета по формуле (12) используется для определения координат и моментов инерции перемещаемых приборов по формулам (5)–(11) и для последующей оценки массы кабелей согласно методике [11]. Координаты по формуле (12) вычисляются итерационно до тех пор, пока разница между оценками массы кабелей не станет меньше одного грамма. После этого выбирается та зона размещения, в которой удалось найти точку общего ЦМ перемещаемых приборов, обеспечивающую наименьшую массу кабелей. В случае возникновения пересечений электронных габаритных моделей приборов (3) с конструктивной обстановкой следует выполнить смещения согласно методике [16].

Блок-схема алгоритма определения перемещений приборов для трех рассмотренных случаев приведена на рис. 1.

Возможен случай, когда на стадии разработки рабочей конструкторской документации изменяется приборный состав КА, и возникает необходимость перекомпоновки БА в отсеках. Это также требует решения задачи перемещения приборов. Результаты исследования методов приведены в работе [2].

Следует отметить, что обеспечение выполнения массоцентровочных и инерционных требований к компоновке БА путем перемещения некоторых приборов в другие зоны размещения приводит к смещению координат ЦМ КА в соответствии с неравенством Чебышева [17]

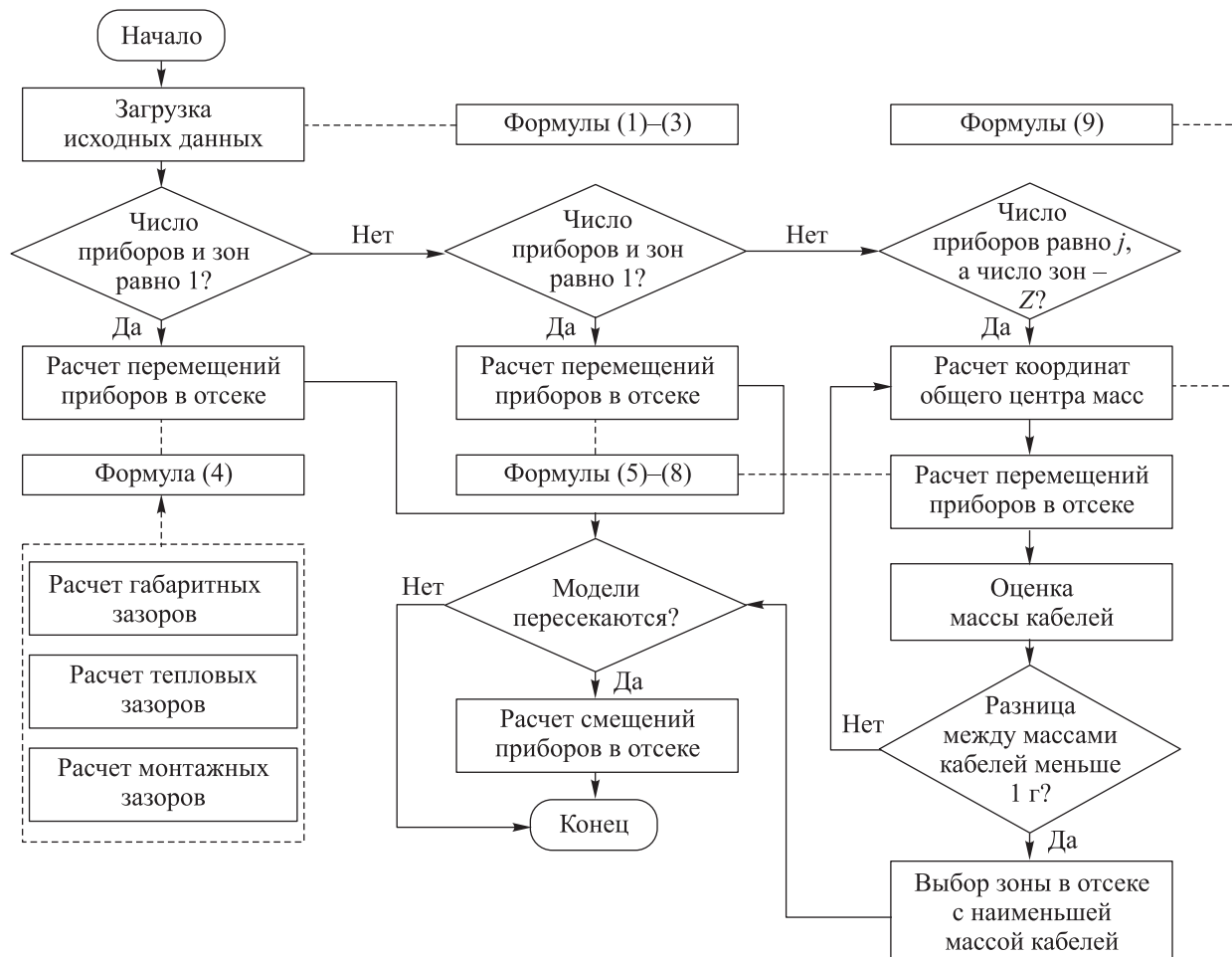


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения перемещений приборов

$$\left(\sum_Z \delta_Z \mathbf{r}_Z \right) \cdot \left(\sum_Z \delta_Z M_Z \right) \geq \sum_Z \delta_Z M_Z \mathbf{r}_Z, \quad (13)$$

где δ_Z — вектор коэффициентов изменения компоновки БА в зоне размещения.

Коэффициенты изменения компоновки БА характеризуют изменения массы и координат ЦМ зон размещения в отсеке КА из-за изменения приборного состава бортовых систем. При перемещении массы (отдельных приборов) из одной зоны в другую ЦМ КА будет смещаться в направлении общего вектора перемещений. Если этого необходимо избежать, то следует обеспечить минимальное количество перемещений приборов.

Тогда решение задачи перекомпоновки БА будет характеризоваться правой частью неравенства (13). В этом случае конвертор для модели (2) над моделями (3) можно описать преобразованием подобия, представляющим собой композицию гомотетии и поворота мо-

делей (3) в модели (2) в зависимости от положения ЦМ КА:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_\phi \circ \mathbf{F}_H, \quad (14)$$

где $\mathbf{F}_H$ — преобразование гомотетии с центром в точке ЦМ КА.

Для каждого прибора центр поворота (ЦП) определяется следующим образом:

$$\mathbf{F}_H: \mathbf{r}_{\text{ЦП}i} = \mathbf{K}_i \mathbf{E}_i \mathbf{r}_i^* + \mathbf{r}_C, \quad (15)$$

где $\mathbf{K}_i$ — матрица коэффициентов гомотетии с центром в точке ЦМ КА.

Значения координат ЦП, вычисленные по выражению (15), согласно формуле (14) используются для определения координат размещения приборов через углы поворотов, рассчитываемые согласно методике [15]. Схема расчета перемещений приборов при перекомпоновке БА показана на рис. 2.

Для обеспечения решения задачи перекомпоновки БА в виде правой части неравенства Че-

бышева (13) принципиально важно определять ЦП (15) для каждого прибора индивидуально. Попытка сокращения вычислительной сложности путем нормирования параметров приводит к завышенному результату в соответствии с неравенством Коши — Буняковского [17]

$$\sum_{i=1}^n M_i \mathbf{r}_i \leq \left(\sum_{i=1}^n M_i^2 \sum_{i=1}^n \|\mathbf{r}_i\| \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Результат вычисления координат ЦМ зоны размещения будет решением в виде правой части неравенства (16), если моделировать случайную величину массы вновь вводимых в компоновку приборов. Для детерминированного расчета, когда массы новых приборов достоверно известны, решение будет характеризоваться левой частью неравенства (16).

Приведенные положения справедливы, если в зонах размещения при замене приборов не превышены лимиты массы. Безусловно, при использовании конвертора (14) в качестве ограничений следует учитывать функциональные и эргономические требования по угловому положению БА.

Возможны исключительные случаи, когда перемещения приборов приводят к такому увеличению массы кабелей, что в зоне размещения снова превышает лимит массы (из-за малости свободного запаса). Тогда целесообразно выполнять перекомпоновку БА в отсеке КА и применять другие меры согласно принятым техническим решениям.

Примеры отработки алгоритма. Для проверки разработанного алгоритма на адекватность проведено тестирование по трем рассмотренным случаям.

Результат моделирования перемещения одного прибора в ближайшую доступную зону размещения показан на рис. 3, а. Здесь и на рисунках для других случаев элементы отсека и креплений погашены, рамы показаны условно. Видно, что у прибора изменилась только координата по оси OZ. Направление перемещения показано стрелкой. Так как пересечений с окружением не произошло, дополнительных смещений прибора не потребовалось.

Результат моделирования перемещения нескольких приборов в ближайшую доступную зону размещения показан на рис. 3, б. Зеркальная симметрия выполнена относительно оси, проведенной через центр рамы параллельно ее граням. Для обеспечения наименьшей длины и

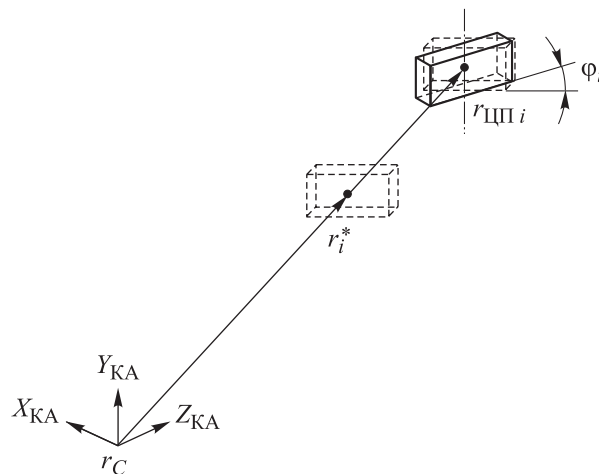


Рис. 2. Схема расчета перемещений приборов при перекомпоновке БА

массы кабелей осуществлен перенос этих приборов по осям OX и OZ. Однако возникли пересечения с рядом стоящими электронными габаритными моделями приборов, поэтому два прибора сместили по оси OX и один — по оси OZ. Также проведено вращательное смещение двух приборов на 180°, чтобы изменить положение электрического разъема. Направления изменения положения приборов в целом показаны стрелками.

Результат моделирования перемещения нескольких приборов в одну из ближайших доступных зон размещения показан на рис. 3, в. Для обеспечения наименьшей массы кабелей, которые должны их соединить с двумя приборами в нижней части рисунка, приборы сместили в зону размещения справа, так как в левой зоне размещения приборы расположены дальше от связанных приборов из-за большего количества смещений. По предварительной оценке, общая масса кабелей между рассматриваемыми приборами составила 0,704 кг. Однако приборы размещены встык, что требует согласования по прочности их корпусов. Варианты направлений изменения положения приборов в целом показаны стрелками, крестом помечен выбранный вариант.

Проведено сравнение результатов отработки методики с эвристическим решением задачи перемещения приборов инженером-конструктором. К инженеру-конструктору предъявлялись следующие требования: опыт разработки компоновки (установки) приборов не менее трех лет, уверенные навыки работы в системе автоматизированного проектирования и пакете Microsoft Office Excel.

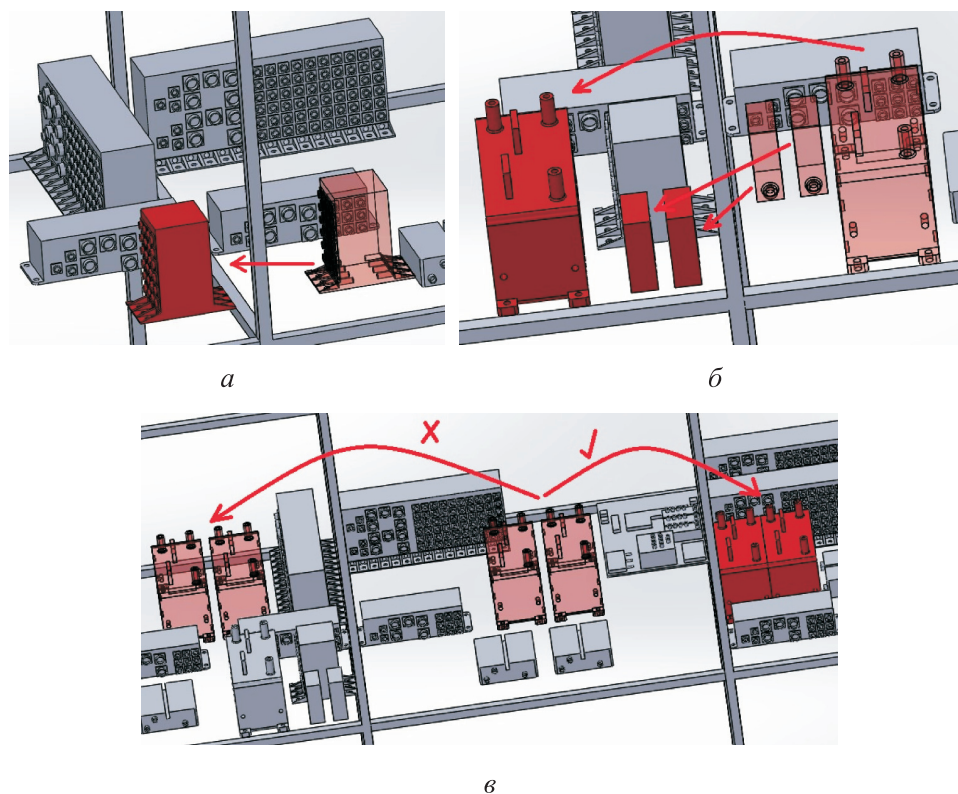


Рис. 3. Результаты моделирования трех случаев перемещений:
 а и б — одного и нескольких приборов в ближайшую доступную зону размещения;
 в — нескольких приборов с выбором зоны размещения по критерию минимума массы кабеля

К программно-аппаратным средствам особые требования не предъявлялись.

Эвристический поиск решения задачи инженером-конструктором включал в себя следующие шаги:

1) визуальная оценка объема свободного пространства в ближайшей доступной зоне размещения при перемещении одного или нескольких приборов в электронной геометрической модели установки приборов;

2) перемещение приборов путем изменения сопряжений электронных габаритных моделей;

3) визуальная оценка наличия пересечений моделей приборов между собой и с окружением;

4) повторение п. 1–3 при наличии пересечений;

5) определение в первом приближении длины возможных трасс бортовой кабельной сети (БКС) путем измерения по прямой расстояния между точками исходного и конечного положений приборов при наличии нескольких доступных зон размещения; выбор варианта с наименьшей длиной БКС.

Теплообмен приборов в результате их перемещения инженер-конструктор не оценивал.

Для определения перемещения приборов согласно предложенному алгоритму (см. рис. 1) инженер-конструктор использовал заранее подготовленный excel-файл, куда вносил данные по массе, габаритным размерам, исходным координатам и электрическим связям приборов. Далее он задавал в системе автоматизированного проектирования координаты приборов в соответствии с результатами расчета.

Анализ результатов. По полученным данным установлено, что разработанные математические модели дают адекватные результаты моделирования перемещения приборов. Однако необходимо учитывать следующее:

- если существует требование привязки (обеспечения сопряжения типа совпадения) прибора к установочной плоскости, то перемещения следует рассчитывать по заданным степеням свободы его корпуса;

- используемые для перемещений приборов преобразования симметрии пересчитывают координаты ЦМ БА и не влияют на углы пространственной ориентации, поэтому при необходимости приходится осуществлять вращательные смещения приборов дополнительно;

Результаты решения задачи перемещения БА

Вариант перемещения приборов	Отклонение ЦМ отсека, мм	Масса БКС, кг
Первый	25/25	0,346/0,346
Второй	22/23	0,553/0,785
Третий	19/27	0,704/1,117
<i>Примечание.</i> В числителе дроби указаны значения, полученные по разработанной методике, в знаменателе — эвристическим методом.		

- расчет габаритных зазоров не учитывает запасы пространства под места изгиба кабелей вблизи разъемов, что может потребовать дополнительных смещений приборов на этапе моделирования;

- расчет тепловых зазоров компоновки приборов обладает высокой вычислительной сложностью, поэтому его следует выполнять с помощью специализированных программ как отдельную задачу;

- при перемещении группы приборов из одной зоны в другую может увеличиться расстояние между ними из-за смещений отдельных приборов для устранения пересечений с окружением, что приведет к росту общего момента инерции этих приборов;

- если один из приборов в группе смещается дальше от границ зоны размещения остальных (неперемещаемых) соединяемых с ним приборов, то последние также станут смещаться дальше от границ зоны размещения и могут вызвать пересечения с окружением, вследствие чего алгоритм может заикнуться на вычислениях;

- в процедурах алгоритма для второго и третьего вариантов перемещения приборов многократно используются формулы (5)–(12), поэтому рекомендуется разработать программное обеспечение для снижения трудоемкости вычисления коэффициентов симметрии, тепловых зазоров, координат общего ЦМ перемещаемых приборов и предварительной оценки массы кабелей, соединяющих приборы.

Результаты решения задачи перемещения БА по предложенной методике и эвристическому методу приведены в таблице, где значения отклонения ЦМ отсека указаны по модулю, без разложения по осям координат. Значения отклонения моментов инерции отсека в таблице не приведены, так как оказались незначительными (ввиду того, что масса перемещенных приборов пренебрежимо мала по сравнению с массой отсека).

Сравнение полученных результатов показывает, что в сложных случаях, когда необходимо переместить несколько приборов, задачу перемещения БА эффективнее решать по разработанной методике, чем эвристическим методом. Это связано с влиянием человеческого фактора на визуальную оценку вариантов перемещения приборов, что является основным недостатком эвристического метода решения многокритериальных задач. Например, для третьего варианта (см. рис. 3, в) инженер-конструктор выбрал левую зону размещения вместо правой для перемещения приборов, что привело к значительному увеличению массы БКС и отклонения ЦМ отсека КА.

Выводы

1. Разработанные математические модели расчета перемещения БА для обеспечения массоцентрировочных и инерционных требований к компоновке БА внутри отсеков КА позволяют моделировать положение одного или нескольких приборов, в том числе при доступности нескольких равноудаленных зон их размещения. Эффективность решения задачи с помощью предложенной методики растет накопительным итогом, т. е. чем больше приборов требуется переместить, тем больше случаев увеличения массы БКС и отклонений ЦМ и моментов инерции отсека КА от допускаемых значений можно избежать.

2. Для снижения трудоемкости расчета перемещения БА можно разработать программное обеспечение на основе предложенного алгоритма, а для уменьшения вычислительной сложности отдельных процедур — облегчить некоторые части математических моделей.

3. Дальнейшие исследования будут направлены на решение вопросов, выявленных при анализе результатов отработки алгоритма.

Литература

- [1] Стоян Ю.Г., Кулиш Е.Н. *Автоматизация проектирования компоновки оборудования летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1984. 192 с.
- [2] Гаврилов В.Н. *Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1988. 137 с.
- [3] Беляков А.А. Автоматизированное решение задачи размещения балансировочных грузов в отсеках космических аппаратов. *Космическая техника и технологии*, 2024, № 3, с. 14–27. EDN: DXTEHO
- [4] Ключников А.В. Численный алгоритм оптимизации процесса уравнивания конической летающей модели на вертикальном динамическом балансировочном стенде. *Вестник СибГАУ*, 2016, т. 17, № 2, с. 309–317.
- [5] Виденкин Н.А. Автоматизированные стенды измерительного контроля параметров геометрии масс. *Вестник НПО «Техномаш»*, 2017, № 1, с. 41–42.
- [6] Беляков И.Т., Зернов И.А. и др. *Технология сборки и испытаний космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1990. 352 с.
- [7] Горячев А.С. *Балансировка агрегатов летательных аппаратов*. Куйбышев, КуАИ, 1982. 70 с.
- [8] Абышев Н.А., Ключников А.В. К вопросу оптимизации выбора стендового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*, 2020, № 3, с. 77–85.
- [9] Вышинский Л.Л., Флеров Ю.А., Широков Н.И. Автоматизированная система весового проектирования самолета. *Информатика и ее применение*, 2018, т. 12, № 1, с. 18–30, doi: <https://doi.org/10.14357/19922264180103>
- [10] Кантимиров С.А., Серебрянский С.А. Весовое проектирование летательного аппарата на цифровой платформе в едином информационном пространстве жизненного цикла изделия. *Труды конференции MLSD*. Москва, ИПУ РАН, 2021, с. 1151–1161, doi: <https://doi.org/10.25728/2486.2021.63.53.001>
- [11] Беляков А.А., Шулепов А.И., Папазов В.М. и др. Методика определения координат размещения бортовой аппаратуры с предварительной оценкой массы бортовой кабельной сети. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2024, т. 23, № 4, с. 7–24, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-4-7-24>
- [12] Беляков А.А., Шулепов А.И., Папазов В.М. Размещение бортовой аппаратуры с учетом заданных зон прокладки бортовой кабельной сети внутри отсека космического аппарата. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2025, т. 24, № 4, с. 7–25, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2025-24-4-7-25>
- [13] Беляков А.А., Приходько В.И., Шулепов А.И. Метод автоматизированного размещения приборов в отсеке космического аппарата с учетом подключения к электроразъемам гермоплат бортовой кабельной сети. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2023, т. 22, № 4, с. 7–24, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2023-22-4-7-24>
- [14] Беляков А.А., Шулепов А.И., Прокопьев Е.В. и др. Методика предварительной эргономической оптимизации компоновки бортовой аппаратуры в отсеках пилотируемых космических аппаратов и космических станций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, № 7. EDN: RLOPKG
- [15] Беляков А.А., Шулепов А.И., Папазов В.М. Алгоритм совместного учета тепловых, монтажных и габаритных требований при разработке компоновки приборов внутри отсеков космических аппаратов. *Вестник МАИ*, 2025, т. 32, № 1, с. 82–91. EDN: ANSHUD
- [16] Беляков А.А. Расчет смещений для коррекции мест установки приборов при их пересечении с окружением в отсеке. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2025, т. 68, № 2, с. 95–99, doi: <https://doi.org/10.26162/LS.2025.98.39.014>
- [17] Балк М.Б., Болтянский В.Г. *Геометрия масс*. Москва, Наука, 1987. 160 с.

- [18] Kuhn H.W., Kuenne R.E. An efficient algorithm for the numerical solution of the generalized weber problem in spatial economics. *J. Reg. Sci.*, 1962, vol. 4, no. 2, pp. 21–33, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1962.tb00902.x>

References

- [1] Stoyan Yu.G., Kulish E.N. *Avtomatizatsiya proektirovaniya komponentov oborudovaniya letatelnykh apparatov* [Automation of the design of aircraft equipment layout]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 192 p. (In Russ.).
- [2] Gavrilov V.N. *Avtomatizirovannaya komponentka pribornykh otsekov letatelnykh apparatov* [Automated layout of aircraft instrument compartments]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 137 p. (In Russ.).
- [3] Belyakov A.A. Automated solution for the problem of arranging balancing weights in spacecraft compartments. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2024, no. 3, pp. 14–27. EDN: DXTEHO (In Russ.).
- [4] Klyuchnikov A.V. Numerical algorithm for optimization of a process of conical flying model equilibration on a vertical balancing stand. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SIBSAU], 2016, vol. 17, no. 2, pp. 309–317. (In Russ.).
- [5] Videnkin N.A. Automated test stands for measuring mass geometry parameters. *Vestnik NPO «Tekhnomash»*, 2017, no. 1, pp. 41–42. (In Russ.).
- [6] Belyakov I.T., Zernov I.A. et al. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft assembly and testing technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p. (In Russ.).
- [7] Goryachev A.S. *Balansirovka agregatov letatelnykh apparatov* [Balancing aircraft assemblies]. Kuybyshev, KuAI Publ., 1982. 70 p. (In Russ.).
- [8] Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V. Optimizing the selection of test-bench equipment for aircraft balancing. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»* [Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation], 2020, no. 3, pp. 77–85. (In Russ.).
- [9] Vyshinskiy L.L., Flerov Yu.A., Shirokov N.I. Computer-aided system of aircraft weight design. *Informatika i ee primeneniye* [Informatics and Applications], 2018, vol. 12, no. 1, pp. 18–30, doi: <https://doi.org/10.14357/19922264180103> (in Russ.).
- [10] Kantimirov S.A., Serebryanskiy S.A. [Aircraft weight design on a digital platform in a unified information space for the product lifecycle]. *Trudy konferentsii MLSD* [Proc. MLSD Conf.]. Moscow, IPU RAN Publ., 2021, pp. 1151–1161, doi: <https://doi.org/10.25728/2486.2021.63.53.001> (in Russ.).
- [11] Belyakov A.A., Shulepov A.I., Papazov V.M. et al. Methodology of calculating on-board equipment arranging coordinates with preliminary estimate of on-board cable system mass. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2024, vol. 23, no. 4, pp. 7–24, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-4-7-24> (in Russ.).
- [12] Belyakov A.A., Shulepov A.I., Papazov V.M. On-board equipment arrangement taking into account the zones given for on-board 13 cable system routing inside spacecraft compartment. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2025, vol. 24, no. 4, pp. 7–25, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2025-24-4-7-25> (in Russ.).
- [13] 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 Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2023, vol. 22, no. 4, pp. 7–24, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2023-22-4-7-24> (in Russ.).
- [14] Belyakov A.A., Shulepov A.I., Prokopyev E.V. et al. Methodology of preliminary ergonomic optimization of on-board equipment layout in compartments of the manned spacecraft and space stations. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2024, no. 7. EDN: RLOPKG (In Russ.).

- [15] Belyakov A.A., Shulepov A.I., Papazov V.M. An algorithm for conjoint thermal, mounting and size requirements considering while instruments layout development inside the spacecraft compartments. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2025, vol. 32, no. 1, pp. 82–91. EDN: ANSHUD (In Russ.).
- [16] Belyakov A.A. Calculation of bias for devices mounting places correction when they interference with environment in compartment. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2025, vol. 68, no. 2, pp. 95–99, doi: <https://doi.org/10.26162/LS.2025.98.39.014> (in Russ.).
- [17] Balk M.B., Boltyanskiy V.G. *Geometriya mass [Geometry of masses]*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 160 p. (In Russ.).
- [18] Kuhn H.W., Kuenne R.E. An efficient algorithm for the numerical solution of the generalized weber problem in spatial economics. *J. Reg. Sci.*, 1962, vol. 4, no. 2, pp. 21–33, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1962.tb00902.x>

Статья поступила в редакцию 28.02.2026

Информация об авторе

БЕЛЯКОВ Андрей Алексеевич — аспирант, инженер-конструктор второй категории. ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 4а, e-mail: post@rsce.ru).

Information about the author

BELYAKOV Andrey Alekseevich — Postgraduate, Design Engineer of the 2nd Category. S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (141070, Korolev, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4a, e-mail: post@rsce.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Беляков А.А. Расчет перемещений для коррекции мест установки приборов при превышении лимитов массы в зонах размещения в отсеке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 7, с. 114–124.

Please cite this article in English as:

Belyakov A.A. Calculation of displacements to correct the mounting locations of devices when the mass limits are exceeded in the placement zones in compartment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 7, pp. 114–124.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Алгоритмы управления аэрокосмическими летательными аппаратами и коррекции навигационных комплексов с использованием моделей с повышенными качественными характеристиками»

Авторы: Ху Юйхуэй, К.А. Неусыпин, М.С. Селезнева

Рассмотрены качественные характеристики математических моделей, используемые в системах управления и обработки информации различных летательных аппаратов. Представлены критерии степени управляемости и наблюдаемости переменных состояния линейных нестационарных и нелинейных систем. Изложена оригинальная концепция динамического системного синтеза, позволяющая формировать модели с желаемыми свойствами в процессе функционирования навигационных комплексов и летательных аппаратов.

Для специалистов в области систем управления и навигации.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>