

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ РАЗМЕЩЕНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКОЙ МАССЫ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

© 2024

- А. А. Беляков** инженер-конструктор III категории;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
post@rsce.ru
- А. И. Шулепов** кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
shulepov-al@mail.ru
- В. М. Папазов** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
post@rsce.ru
- В. И. Приходько** начальник сектора;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
post@rsce.ru
- А. В. Федосов** инженер-конструктор I категории;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
post@rsce.ru

Предлагается методика для оптимизации компоновки бортовой аппаратуры в отсеках космических аппаратов по критерию минимума массы бортовой кабельной сети. Цель работы заключается в создании единой методики размещения приборов и проверки выполнения технических требований. Приведены методические выкладки, касающиеся учёта подключений приборов между собой и с прочими элементами систем, а также предварительной оценки массы бортовой кабельной сети, как задачи вариационного исчисления с элементами топологической оптимизации. Представлен алгоритм размещения приборов на основе схемы их подключений с возможностью контроля выполнения эргономических, монтажных, габаритных, массо-центровочных требований к компоновке. Тестирование проведено на примере космического аппарата с отсеком цилиндрической формы. Оно было организовано в несколько этапов, чтобы проследить изменение массы бортовой кабельной сети при смещениях приборов для выполнения эргономических, монтажных, габаритных требований. Результаты тестирования позволили усовершенствовать процедуры определения координат размещения приборов с заданным положением и значений габаритных зазоров, а также сравнить полученную массу кабелей с данными из статистики.

Бортовая аппаратура; бортовая кабельная сеть; компоновка приборов; отсек космического аппарата; электрическая схема; задача размещения; задача трассировки

Цитирование: Беляков А.А., Шулепов А.И., Папазов В.М., Приходько В.И., Федосов А.В. 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: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-7-24

Введение

Прокладка трасс бортовой кабельной сети (БКС) в отсеках космических аппаратов (КА) вдоль обечаек корпуса и по основным конструктивным составным частям приборных рам способствует вариативности конструкторских решений, вследствие че-

го отслеживать рациональность монтажей становится затруднительно. В качестве критерия эффективности решения задачи трассировки БКС обычно принимается масса БКС или её длина. Образующееся в ходе разработки монтажей множество конфигураций БКС, как правило, содержит варианты с существенно различающейся топологией и техническими требованиями к монтажу. В связи с этим определённое развитие получили методы, автоматизирующие трассировку и оптимизацию длины и массы БКС, которые позволяют добиться приемлемой производительности труда от инженера-конструктора при решении данной задачи. Наибольшую популярность на предприятиях получили методы, построенные на основе теории множеств и теории графов, которые с разной точностью позволяют описывать модели монтажных пространств в отсеке, составных частей кабелей, габаритных ограничений и т.д. Некоторые из этих методов [1 – 4] предполагают построение множества возможных трасс только в диалоговом режиме, другие же [5 – 8] методически предусматривают автоматическую генерацию путей минимальной длины и массы. Все эти методы сводятся к решению задачи линейного программирования или задачи Штейнера [9], например, при помощи алгоритма Краскала [10], или алгоритма Дейкстры [11], или метода случайного поиска.

Однако, стоит обратить внимание, что для решения задачи оптимизации БКС в качестве исходных данных используется компоновка бортовой аппаратуры (БА). Следовательно, прокладка трасс зависит от схемы размещения БА и в некотором смысле предопределяется ею. Исходя из этого, можно заключить, что возможности по оптимизации коммуникаций в отсеке неявно геометрически ограничены. Чтобы расширить область решений по массе и длине БКС, видится достаточно перспективным исследовать задачу рационального размещения БА в отсеке КА и обеспечить более качественные компоновочные решения с точки зрения функциональных требований к размещению БА, что и является основной целью настоящей работы. В свою очередь актуальность работы выражается в том, что на текущий момент перед предприятиями космического машиностроения стоят задачи импортозамещения и развития систем автоматизированного проектирования и повышения производительности труда в конструкторских бюро. Переход с прежних программных продуктов компаний Siemens AG, PTC Plc., Autodesk Plc. требует развития отечественных расчётных модулей. Задачами данной работы являются совершенствование математического обеспечения методики оптимизации компоновки БА в развитие работы [12], доработка алгоритма размещения БА в отсеках КА, а также отработка алгоритма в части выполнения функциональных требований к компоновке БА.

Подключение приборов по кабелям

Монтаж кабелей должен быть обеспечен в соответствии с конструктивной схемой деления изделия и схемной конструкторской документацией на системы. В случае, когда разработкой конструкторской документации на электрические схемы, кабели и монтажи занимаются разные подразделения предприятия, для сокращения сроков рекомендуется организовывать централизованное наполнение базы данных по БА и её подключениям. Со временем приборный состав изделий совершенствуется, поэтому такая база данных должна постоянно поддерживаться в актуальном состоянии. В противном случае сбор и обработка исходных данных задерживаются до момента выпуска электрических схем. Подробнее о процессе разработки БКС рекомендуется ознакомиться в исследовании [13].

Также стоит отметить, что в контексте данной задачи при моделировании трасс не требуется детализация соединителей кабелей, пломб, бирок и предохранительных крышек, так как цель заключается в разработке компоновки приборов, а не монтажа БКС. То же касается анализа форм переплетений и перекручиваний кабелей.

Таким образом, предварительное моделирование трасс сводится к созданию бинарных связей между моделями приборов и заданию системы геометрических пространственных ограничений, которые определяют границы зон размещения БА и при необходимости зарезервированные под крепёж БКС точки. Связи могут быть заданы как между приборами, так и между приборами и некими опорными элементами, в качестве которых могут выступать гермопереходники, контрольные точки для установки датчиковой аппаратуры и т.п. В работе [12] это было формализовано в виде конъюнкции:

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

где $\rho(\Gamma_i; \Gamma_j)$ – прямоугольная матрица подключений между приборами и опорными элементами; $\rho(\Gamma_{i-1}; \Gamma_i)$ – квадратная нижнетреугольная матрица подключений между приборами в отсеке; $\Gamma_j = \Gamma(a_j)$ – точечные модели опорных элементов; $i = \overline{1, n}$ – порядковый номер прибора; $j = \overline{1, N}$ – порядковый номер опорного элемента; N – количество опорных элементов; n – количество приборов; Γ – топология геометрического объекта.

Из формулы (1) следует, что связи БА характеризуются топологией приборов и опорных элементов на основании электрических схем. И если последние определяются точечными моделями, то топология каждого из приборов описывается замкнутой оболочечной моделью [12]:

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

где 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.

Топология прибора (2), дополненная данными о его массе и габаритах, формирует электронную габаритную модель такого прибора, размещением которой и занимается инженер-конструктор в системе автоматизированного проектирования. Поэтому будет целесообразно описать эту модель параметрами:

$$(m_i; l_i; \Gamma_i), \quad (3)$$

где m_i – масса прибора; $l_i = (l_{xi} \quad l_{yi} \quad l_{zi})^T$ – габариты прибора.

Расстояниям между БА ставятся в соответствие бинарные связи БА по БКС, содержащиеся в матрицах подключений (1), элементы которых могут быть заданы булевыми функциями через предикаты:

$$\rho(\Gamma_{i-1}; \Gamma_i) = [T_{ii}]: T_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{если связь есть} \\ 0, & \text{если связи нет} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\rho(\Gamma_i; \Gamma_j) = [T_{ij}]: T_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если связь есть} \\ 0, & \text{если связи нет} \end{cases}.$$

Координаты размещения приборов и масса кабелей

Модель компоновки БА в матрично-топологической форме имеет вид [12]:

$$A_{t+1}(r) = F[A_t(r)], \quad (5)$$

где r – вектор координат центра масс компоновки БА; A – компоновка БА; t – порядковый номер процедуры отображения (шаг конвертации); F – оператор пошагового отображения компоновки БА в отсеке КА (конвертор).

Наиболее распространённой геометрической формой модели прибора (3) является прямоугольный параллелепипед. Практика компоновочных работ показывает, что рёбра корпусов приборов в большинстве случаев должны быть параллельны осям отсека КА. На основании этого принято решение не учитывать в модели (5) углы пространственной ориентации приборов в пространстве отсека – по вопросу юстировки БА будет проведена отдельная работа в дальнейшем.

Принимая за основной критерий эффективности минимум массы БКС, задачу оптимизации компоновки БА (5) в рамках настоящего исследования можно свести к вычислению координат размещения приборов, исходя из функциональных требований, отраженных в матрицах подключений (1) предикатами (4). В таком случае конвертор для оптимизации компоновки БА (5) имеет вид [12]:

$$F_{БКС} = \bigwedge_i F_{БКСi} = \bigwedge_i \bigwedge_i [r_i(\Gamma_i) \vee \bar{r}_i(\Gamma_i)]. \quad (6)$$

Подробнее о допущениях, критериях эффективности и требованиях к компоновке приборов, учитываемых в разрабатываемой методике оптимизации, рекомендуется ознакомиться в работе [12]. Там же предлагался минимаксный подход, согласно которому координаты вновь размещаемого прибора вычисляются рекуррентно по координатам геометрически крайних приборов и опорных элементов в компоновке, имеющих минимальные и максимальные порядковые номера. Это обеспечивает инвариантность нумерации при подготовке исходных данных, но требует перестройки матриц подключений (1) на каждом очередном шаге конвертации компоновки БА (5) таким образом, чтобы экстремальным векторам координат присваивались первый и последний порядковые номера. Принимая во внимание, что из-за этой процедуры значения векторов будут варьироваться, можно заключить, что изменение порядка размещения приборов приводит к образованию экстремали в пространстве отсека КА. Следовательно, пространство компоновки БА (5) является функциональным, потому что его элементами являются векторы координат размещения – функции от координат и нумерации. Тогда целевую функцию массы БКС формально можно представить в виде следующего функционала:

$$M_{БКС} = \int_1^n A\left(i, r(\Gamma_i), \frac{dr(\Gamma_i)}{di}\right) di \rightarrow \min. \quad (7)$$

Важно обратить внимание, что в функционал (7) входит лишь функция вектора координат размещения приборов, т.к. координаты опорных элементов зафиксированы. Поэтому для оценки массы БКС необходимо и достаточно, чтобы данный функционал приобретал определённое значение для каждого вектора координат БА на множестве порядковых номеров размещения.

Несмотря на то, что компоновку БА (5) по критерию минимума массы БКС неявно можно получить, воспользовавшись формулами (1), (4), (6), вычисление целевой функции (7) затруднительно: требуется подтвердить дифференцируемость векторов ко-

ординат размещения БА, установить достаточные условия экстремума, исследовать методы решения системы дифференциальных уравнений Эйлера и т.д. Представление векторов через годографы функции плотного размещения в форме функций Рвачёва (R-функций) и решение задачи многопараметрическим методом Ньютона и затем методом Гаусса-Зайделя позволяет эти затруднения преодолеть [14; 15]. Однако, такой подход обеспечивает лишь нахождение локального экстремума на каждом шаге конвертации, так как область допустимых решений является многосвязной, а подынтегральная функция в формуле (7) многоэкстремальна и имеет «овражный» характер [6]. В итоге общую массу БКС нельзя получить простым суммированием этих результатов, потому что приращение связей является случайной величиной. Кроме того, даже если элементам матриц подключений (1) поставить в соответствие погонные массы кабелей, выбор оптимального порядка размещения БА, строго минимизирующего массу БКС, путём перестройки матриц невозможен [6], а для допускаемых решений алгоритм не позволяет пересчитать массу БКС, если приборы будут смещаться для устранения пересечений между собой и с обстановкой. Поэтому видится целесообразным определять координаты размещения приборов в конверторе (6) напрямую по матрицам подключений (1) следующим образом:

$$r(\Gamma_{i+1}) = \frac{\sum_{i=1}^{ni < i+1} T_{ii} r(\Gamma_i) + \sum_{j=1}^N T_{ij} r(\Gamma_j)}{\sum_{i=1}^{ni < i+1} T_{ii} + \sum_{j=1}^N T_{ij}}. \quad (8)$$

Формула (8) применима для приборов, имеющих связи с другими приборами и опорными элементами. Если для каких-то приборов существуют требования по размещению вблизи определённых опорных элементов, то координаты рекомендуется определять иначе:

$$\bar{r}(\Gamma_i) = (1 \pm C_i) r(\Gamma_j), \quad (9)$$

где $r(\Gamma_j)$ – вектор координат опорного элемента; $C_i = (C_{xi} \ C_{yi} \ C_{zi})^T$ – коэффициент, учитывающий габариты и ограничения по конструкции отсека КА в окрестности места установки прибора.

В формуле (9) знак «–» выбирается при расчёте по функциональным требованиям, а знак «+» выбирается при расчёте по эргономическим требованиям [16]. Определить общее для всех приборов значение коэффициента C_{cp} можно как среднее значение от коэффициентов, подобранных для пяти любых приборов. Если для каждого прибора требуется определять координаты размещения точнее, то это можно сделать альтернативным способом:

$$\bar{r}(\Gamma_i) = r(\Gamma_j) \pm h_{\Gamma_i}, \quad (10)$$

где $h_{\Gamma_i} = h_i l_i$ – габаритный зазор; h_i – относительная средняя величина зазора.

Выбор знака в формуле (10) осуществляется аналогично (9). Данная формула определяет координаты размещения прибора относительно опорного элемента через габаритный зазор, пропорциональный габариту прибора по расчётной оси. Величина габаритного зазора необходима для выполнения габаритных требований по отсутствию пересечений БА с окружением.

Из равенства выражений (9) и (10) можно вывести формулу коэффициента C_i для отдельно взятого прибора:

$$C_i = \frac{h_i l_i}{r(\Gamma_j)}. \quad (11)$$

Учитывая, что начало системы координат отсека КА традиционно задаётся на его днище, а продольная ось коллинеарна его максимальному габариту, физический смысл формулы (11) заключается в том, что чем ближе к опорному элементу (обечайке отсека, гермоплате, панели интерьера, шпангоуту и т.п.) нужно размещать прибор, тем больший габаритный зазор следует обеспечивать, чтобы избежать пересечений с конструкцией. В таком контексте коэффициент C_i по формуле (11) возможно трактовать в качестве количественной меры конструктивной совместимости приборов. Чем ниже значение коэффициента C_i , тем выше конструктивная совместимость прибора с обстановкой в отсеке, т.к. тогда соотношение габаритов прибора будет более равномерное, поэтому образуются меньшие габаритные зазоры, отчего плотность компоновки БА повышается. С теоретическими основами понятия конструктивной совместимости приборов можно ознакомиться в материалах [17].

Поскольку координаты размещения прибора, как и приращение связей, являются случайной величиной, то для приборов с различающимися габаритами при большом их количестве и большом разбросе (дисперсии) габаритов относительная средняя величина зазора определяется согласно работе [6]:

$$h_i = h_{0i} + (c_r - h_{0i}) \exp\left(-\frac{0,02l_i^3}{\sigma^2 \max L}\right); h_{0i} = \frac{\max L}{l_i} - \text{Trunc}\left(\frac{\max L}{l_i}\right), \quad (12)$$

где σ^2 – дисперсия габаритов приборов; $\max L = \max\{L_x, L_y, L_z\}$ – максимальный габарит отсека КА; $\text{Trunc}(\bullet)$ – функция целой части результата вычислений; $c_r \in (0; 0,5]$ – коэффициент компенсации, зависящий от способа размещения приборов.

Если в конструкторском бюро предприятия созданы и поддерживаются в актуальном состоянии библиотеки электронных габаритных моделей приборов, то найти дисперсию габаритов приборов в пределах приборного состава КА не составляет труда. Подбор коэффициента компенсации рекомендуется осуществлять пропорционально h_{0i} . Если для применения формулы (12) затруднительно найти часть исходных данных, то относительную среднюю величину зазора допускается принимать равной 0,5 из соображений исключения пересечения (вложения) моделей приборов.

Возможны случаи, когда непосредственно между прибором и опорным элементом должна присутствовать конструкция крепления (кронштейн или балка приборной рамы). Тогда в формуле (10) к габаритному зазору следует прибавлять ещё монтажный зазор, который определяется согласно работе [16]:

$$h_{mi} = \begin{cases} 25 \text{ мм, если } m_i < 6 \text{ кг} \\ \frac{1}{20} m_i (101 - 20 \ln m_i) \left[1 + \exp\left(-\frac{3}{20} m_i^{\frac{29}{40}}\right) \right], \text{ если } 6 \text{ кг} \leq m_i \leq 35 \text{ кг} \\ 60 \text{ мм, если } m_i > 35 \text{ кг} \end{cases} \quad (13)$$

Зависимость монтажного зазора от массы прибора (13) является статистической, поэтому со временем её необходимо уточнять по мере разработки новой конструкции крепления (установок) приборов в отсеках КА.

Если в пространстве отсека зарезервированы зоны под составные части изделия (баки, арматуру и агрегаты, интерьер, оптический комплекс и т.п.), то для размещения приборов они являются запретными. Тогда формулы (8) – (10) следует использовать при ограничениях вида:

$$|r(\Gamma_i)| \leq |r_z|, \quad (14)$$

где Z – порядковый номер зоны размещения; r_z – вектор координат границ зоны размещения.

Если ограничение (14) выполняется для всех трёх координат размещения прибора, то их нужно пересчитать по формуле (10) с бóльшим коэффициентом компенсации по формуле (12), чтобы перевести вектор в область допускаемых решений. Стоит отметить, что необходимость переопределения вектора координат размещения может возникать из эргономических требований (чаще в герметичных отсеках для пилотируемых КА) для массивных приборов или блоков приборов. Потребность пересчёта определяется через условие отсечки:

$$\lim_{m_i \rightarrow \max} r(\Gamma_i) \rightarrow \max. \quad (15)$$

Координаты размещения прибора пересчитываются по формулам (9) или (10), если его масса превышает предельную величину, заданную в условии отсечки (15). Также это условие может быть использовано для переноса прибора в другой отсек, если задача оптимизации компоновки БА (5) решается для нескольких отсеков КА одновременно.

Возвращаясь к вопросу оценки массы БКС, на основе содержащихся в конверторе (6) векторов координат размещения приборов и их нумерации, полученных по формулам (8) – (15), появляется возможность перейти от вычисления функционала (7) к метрикам Минковского [7]. Выбор вида метрики опирается на инженерный подход, использующийся в конструкторском бюро конкретного предприятия при разработке монтажей БКС внутри отсеков КА. В частности, для компоновок БА высокой плотности и для наноспутников подходит евклидова метрика, а для отсеков малых и средних КА – манхэттенская метрика, которая пригодна и для крупногабаритных отсеков тяжёлых КА, если кабельные трассы не идут по обечайкам под произвольными к осям отсека углами наклона. Если к компоновке БА предъявляются повышенные требования по электромагнитной совместимости, то тогда рекомендуется выбирать метрику Чебышёва с учётом ограничений на экранирование. Применение прочих видов метрик Минковского подлежит отдельному исследованию с учётом результатов исследований [2; 4; 7; 13].

В контексте данного исследования наибольший интерес представляет подход, при котором монтаж БКС ведётся по приборным рамам, гермопереходам и линейным зонам прокладки жгутов большого диаметра. Из матриц подключений (1) естественным образом следует, что бинарные связи БА по БКС, записанные через предикаты (4), являются метрикой Хэмминга (также одна из разновидностей метрики Минковского). Следовательно, при обратном переходе от бинарных связей к расстояниям между БА ей соответствует манхэттенская метрика, которую предлагается записать в следующей форме:

$$M_{БКС} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i=1}^{ni < i} G(\Gamma_i) g_{ii} T_{ii} |r(\Gamma_i) - r(\Gamma_{i-1})| + \sum_{j=1}^N G(\Gamma_j) g_{ij} T_{ij} |r(\Gamma_i) - r(\Gamma_j)| \right), \quad (16)$$

где $g_{ii}; g_{ij}$ – погонные массы кабелей между приборами и опорными элементами соответственно; $G(\Gamma_i); G(\Gamma_j) \geq 1$ – коэффициенты, учитывающие разветвлённость БКС вблизи приборов и опорных элементов соответственно.

Манхэттенская метрика в форме (16) не зависит от путей прокладки кабелей, так как сумма ортогональных участков трасс сохраняется. Причём алгоритмы Краскала [10], Дейкстры [11], Пауэлла [18], Прима [19] требуют для оценки массы БКС задания координат промежуточных монтажных точек, которые будут известны лишь при решении задачи трассировки. Потому они не могут быть применимы при решении предшествующей ей задачи размещения приборов. Применение же формулы (16) лишено этого недостатка.

Предложенная форма манхэттенской метрики (16) обладает свойствами нормы в векторном пространстве координат размещения приборов над полем точек внутри отсека и за счёт этого порождает топологию функционала (7), базовым элементов которой являются области размещения приборов в виде шаров. Гомеоморфные отображения в прямоугольные параллелепипеды или другие выпуклые многогранники (2) не влияют на результат вычисления массы БКС по этой причине в задаче разработки и оптимизации компоновки БА (5). Тем не менее, поправочные коэффициенты могут быть полезны для поздних стадий разработки. Данный вывод не относится к решению задачи трассировки и оптимизации монтажа БКС, где от точности описания габаритных моделей приборов зависит выбор координат электрических разъёмов и промежуточных монтажных точек.

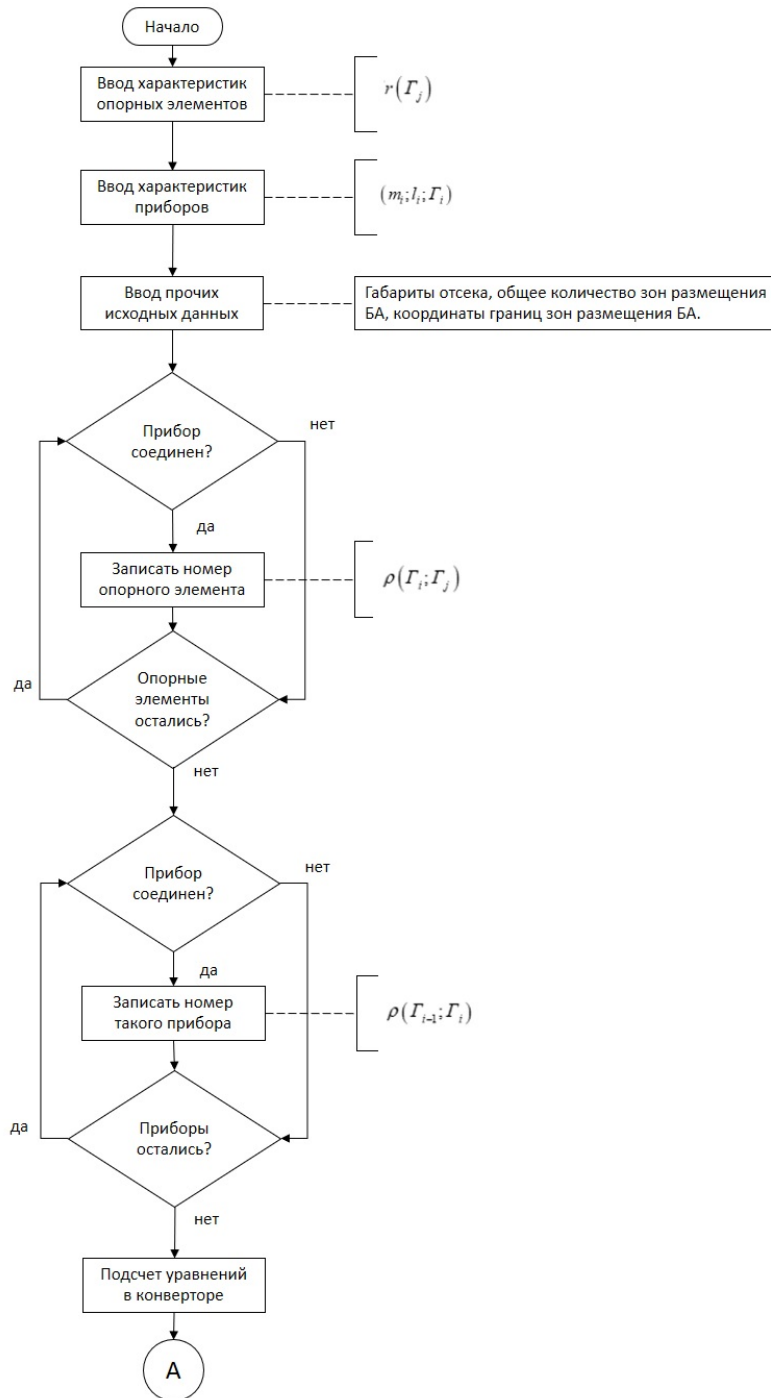
Применение в функционале сумматора (16) вместо интеграла (7) не лишает топологическое пространство отсека КА свойства непрерывности, т.к. для отображения множества длин кабелей во множество их масс и обратно необходимо и достаточно лишь одной операции умножения, которая не изменяет общие границы области допускаемых значений. Причём, если определять метрику Хэмминга в качестве отрезка на числовой оси, то его образом для топологического (метризуемого) пространства отсека КА будет манхэттенская метрика, описывающая трассу кабеля, т.е. кривая Жордана по определению [13].

Стоит отметить, что оценка массы БКС при помощи манхэттенской метрики (16) является предварительной, потому что на этапе разработки и оптимизации компоновки БА зачастую ещё не выпущена конструкторская документация на кабели. Поэтому здесь допускается не учитывать вариации толщин кабелей и радиусов изгиба, отклонения для размерных цепей, вероятные формы переплетений и перекручивания кабелей. Позже масса БКС уточняется по результатам трассировки и затем выпуска конструкторской документации на кабели и монтажи этих кабелей.

Таким образом, для оптимизации компоновки БА (5) по критерию минимума массы БКС вместо решения вариационной задачи (7) для конвертора вида (6) координаты размещения приборов ищутся по формуле (8) или, если есть особые функциональные требования, по формуле (9) или с более высокой точностью по формуле (10) через габаритный зазор с учётом (12) или монтажный зазор (13) в зависимости от требований. Связи БА задаются в матрицах подключений (1) предикатами (4). Моделирование БА в отсеке КА осуществляется с применением электронных габаритных моделей приборов (3), снабжённых топологией (2). Попадание прибора в зону размещения контролируется условием (14). Необходимость перевода массивных приборов в определённые участки зон контролируется условием (15). Предварительная оценка массы БКС осуществляется по формуле (16).

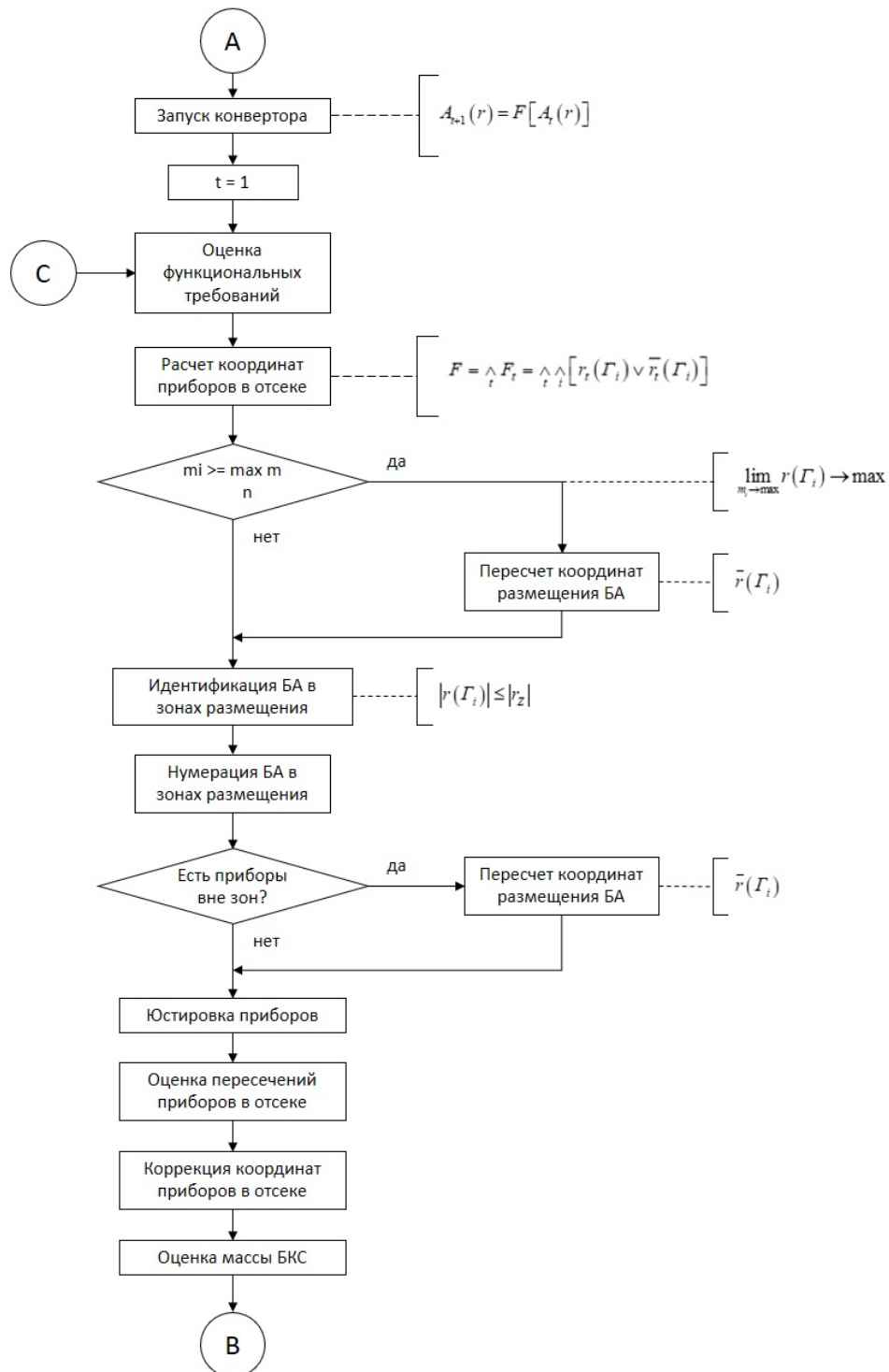
Алгоритм размещения приборов и тестирование

Моделирование компоновки БА предполагает многократные вычисления векторов координат центров масс приборов с последующей оценкой выполнения наложенных требований, поэтому расчёты производятся при помощи программного обеспечения. Для алгоритма, предложенного в работе [12], были сделаны доработки, в результате которых его блок-схема приобрела вид, представленный на рис. 1. С подробностями блока оценки выполнения эргономических требований можно ознакомиться в работе [16].



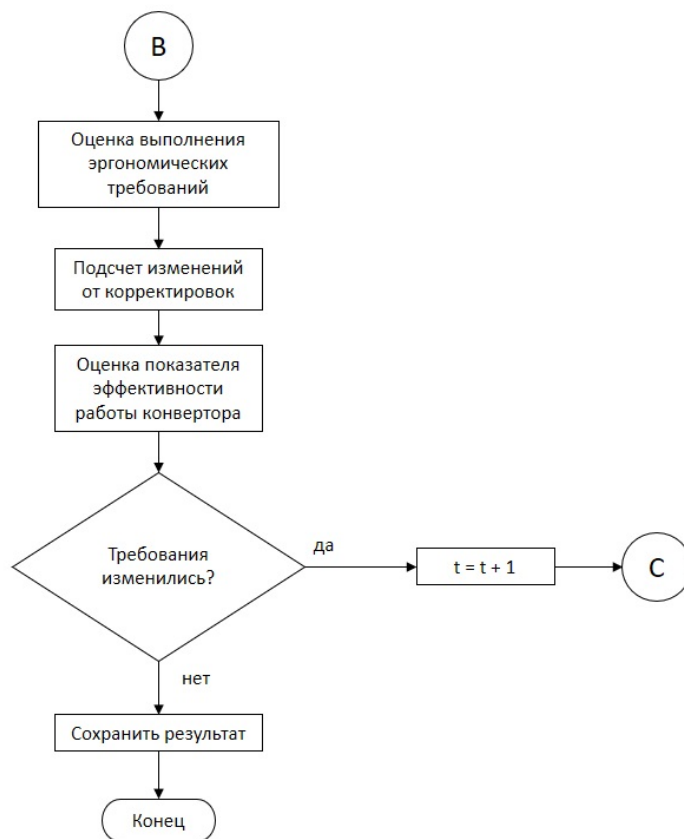
а

Рис. 1. Принципиальная блок-схема алгоритма размещения приборов внутри отсека:
а – начало блок-схемы



б

Рис 1, б – продолжение блок-схемы



6

Рис. 1, в – окончание блок-схемы

Для валидации методики было проведено тестирование алгоритма. В качестве тестового был определён цилиндрический отсек КА длиной 9000 мм, диаметром 4380 мм и массой около 4100 кг. Требовалось разместить в нём 69 приборов. Все они имели форму прямоугольного параллелепипеда. Их окончательная юстировка осуществлялась в диалоговом режиме по причинам, обозначенным ранее. С внешними устройствами приборы сообщались через гермоплаты. Также для некоторых приборов (акселерометры, вибропреобразователи, датчики абсолютного давления) были заданы конкретные места их установки. Таким образом, общее количество опорных элементов составило 24 штуки при 228 уравнениях в конверторе (6).

При первичном определении координат размещения БА в отсеке была проведена начальная оценка массы БКС по формуле (16). Результат был равен 51,932 кг. Затем были выявлены пересечения, для устранения которых 44 прибора были смещены, и тогда масса БКС составила 60,961 кг. После этого была проведена проверка выполнения эргономических, монтажных, габаритных требований по методике из работы [16], по результатам которой потребовалось сместить 63 прибора. Окончательная оценка массы БКС равнялась 85,874 кг. Для полученной компоновки БА была проведена трассировка БКС, суммарная масса кабелей в которой составила 91,382 кг, что на 6% больше, чем расчётная оценка по предложенной методике. На рис. 2 представлена электронная геометрическая модель полученной компоновки БА, размещённые приборы выделены прямоугольными рамками, корпус отсека КА и подкрепляющие рамы показаны условно.

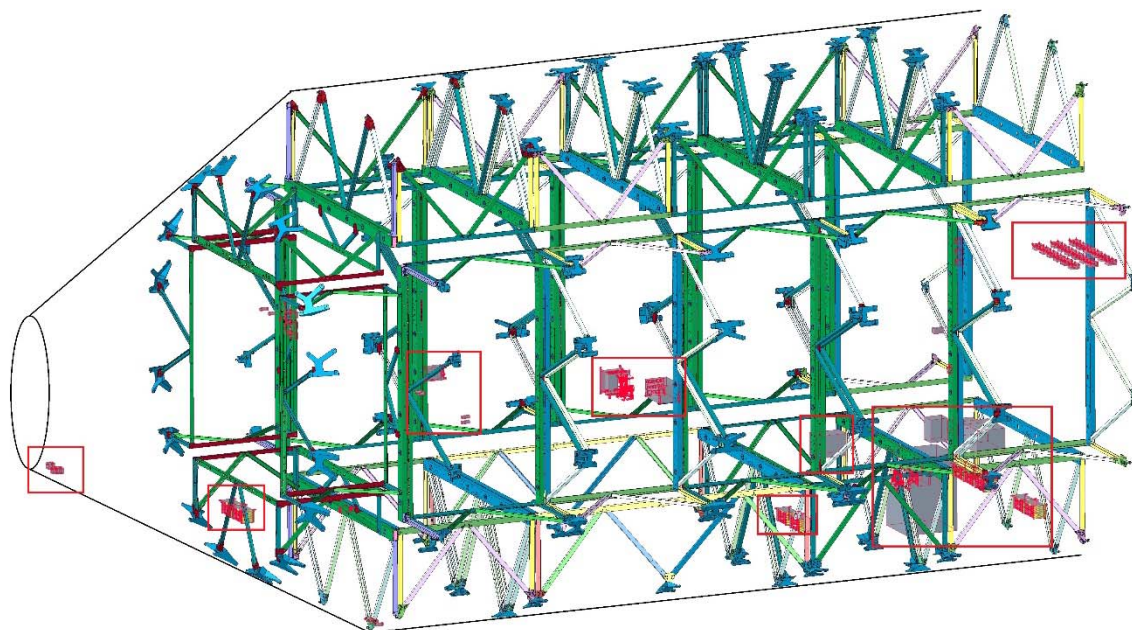


Рис. 2. Компоновка бортовой аппаратуры внутри отсека космического аппарата (контур корпуса отсека и подкрепляющие рамы показаны условно)

Анализ результатов

Графики проекций экстремали $r(\Gamma_i)$ для оптимизированной компоновки БА представлены на рис. 3. На них можно видеть, что при постоянных координатах приборов по осям OX или OY колебания координат по другим двум осям синхронные. Это свидетельствует о высокой плотности компоновки данных приборов. Пределы для варьирования координат приборов по осям OY и OZ составляют соответственно диапазоны $(-600; 2000)$ мм и $(-2000; 1500)$ мм.

Конфигурация проекций экстремали зависит от матриц подключений (1), причём для приборов со схожими схемами подключений поведение кривых на графике будет одинаковым, отличаясь лишь шагом на величину габаритного и монтажного зазоров. Чем больше постоянных участков на проекции экстремали, тем больше приборов будет попадать в симметричные зоны размещения. Для двух проекций экстремали, у которых одновременно поддерживаются постоянные участки, это будет означать, что приборы попадают в одну и ту же зону размещения. Следовательно, возникает возможность организовать порядок размещения БА по установочным группам, а не по системам, что благоприятствует выполнению массо-центровочных и инерционных требований. При таком подходе представляет интерес изучить каким образом необходимо формировать матрицы подключений (1), исходя не только из функциональных, но также и из массо-центровочных требований. Этот вопрос подлежит отдельному исследованию. Таким образом, для более рационального размещения приборов разработчик компоновки БА и разработчик бортовой системы должны действовать сообща при поиске решения задачи размещения БА.

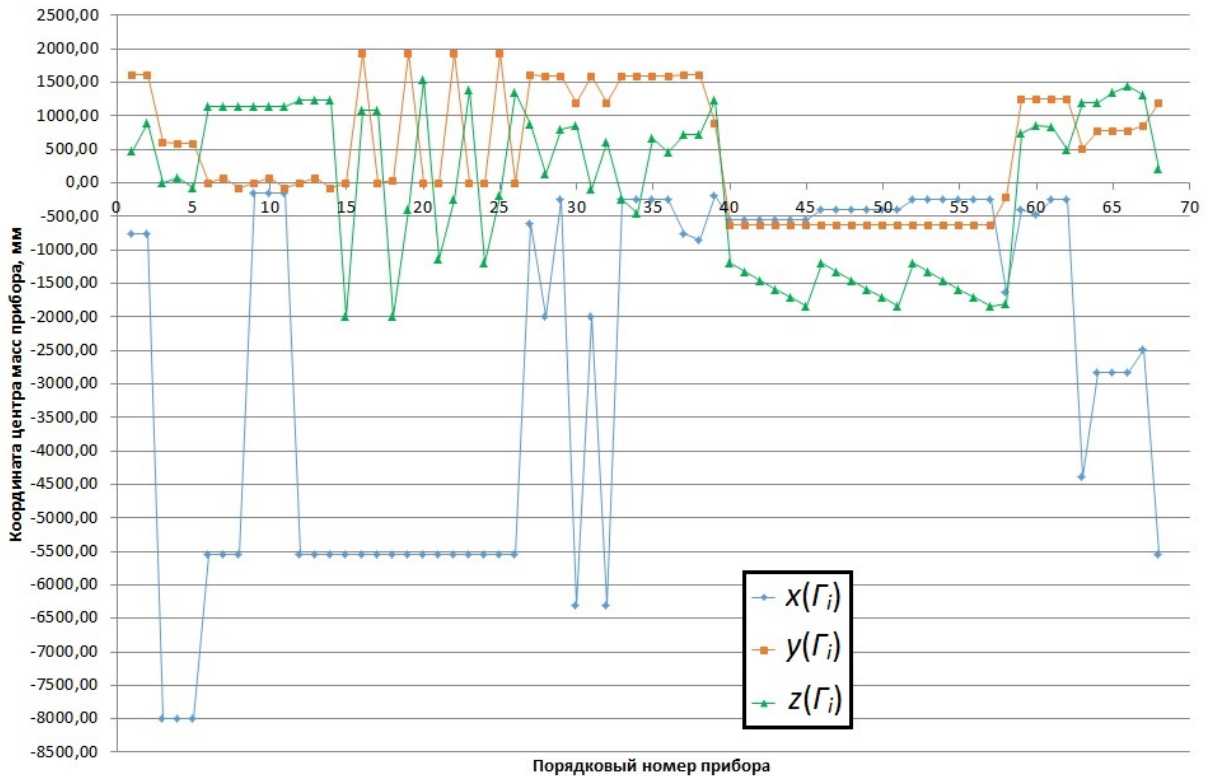


Рис. 3. Проекция экстремали в пространстве отсека космического аппарата

Расчёт относительной средней величины зазора по формуле (12) для определения габаритного зазора в формуле (10) показал, что при количестве приборов больше 10 штук и диапазоне габаритов от 20 мм до 600 мм результат определяется лишь величиной коэффициента компенсации c_r при требуемой точности расчётов. Дополнительная проверка данного обстоятельства на приборах, использовавшихся в работах [12] и [16], подтвердила, что величину габаритного зазора достаточно определять согласно следующему правилу:

$$h_{\Gamma_i} \approx \lim_{h_i \rightarrow \max} h_i l_i = l_i \lim_{\sigma^2 \rightarrow \infty} \left[h_{0i} + (c_r - h_{0i}) \exp\left(-\frac{0,02l_i^3}{\sigma^2 \max L}\right) \right] = c_r l_i.$$

Также было установлено, что формула (9) определяет некорректные координаты размещения приборов, направление осей которых должно совпадать с осями координат отсека КА. Поэтому предпочтительнее пользоваться формулой (10). Данный вывод не исключает необходимости исследования конструктивной совместимости приборов при помощи формулы (11).

При тестировании алгоритма для большинства приборов в формуле (10) помимо габаритного зазора потребовалось учитывать монтажный зазор по формуле (13), потому что иначе приборы размещаются «впритык» к корпусу, а это приводит к невыполнению монтажных, габаритных, вибрационных требований. Ещё одним необходимым условием для предотвращения этого является то, что все координаты опорных элементов должны принадлежать внутренней поверхности корпуса отсека. Следовательно, некорректно задавать в качестве опорных элементов внешние устройства, а также точки конструкции в запретных зонах внутри отсека (например, в зонах размещения арматуры и агрегатов пневмогидравлических систем). В итоге наиболее рациональным спосо-

бом задания координат опорных элементов является их назначение и считывание с электронной геометрической модели изделия, потому что сбор и обработка данных с бумажных габаритных чертежей и общих видов занимает много времени и повышает риск влияния человеческого фактора на результат.

Отдельной проработки требует вопрос о сведении матриц подключений (1), если задача размещения БА решается в несколько этапов, когда разработка электрических схем (подготовка исходных данных) на разные системы КА распределена во времени. Также необходимо проработать процедуру определения координат приборов, у которых связи идентичны, чтобы не происходило их наложения. Одним из решений этого вопроса является смещение приборов после проверки габаритных требований.

Для отработки алгоритма размещения БА с целью верификации формулы (16) для предварительной оценки массы БКС в дальнейших исследованиях планируется провести оптимизацию трасс по методике из исследования [1] и сравнить результаты. Для этого потребуется осуществить программную интеграцию с САПР КС и САПР МБКС. Также не исключается проверка достоверности результатов при применении следующих программных продуктов – САПР МАКС, ElectricCS Pro, T-FLEX Электротехника, PTC Creo Cabling. Стоит отметить, что коэффициенты в формуле (16) могут принимать значения меньше единицы, если кабели объединяются в кабельные сборки.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации компоновки бортовой аппаратуры в отсеке космического аппарата по массе бортовой кабельной сети, отдельные положения которой требуют развития. Руководствуясь предложенной в настоящей работе последовательностью действий, инженер-конструктор способен разработать более рациональную компоновку приборов по критерию массы бортовой кабельной сети (или длины бортовой кабельной сети), что подтверждается результатами тестирования. Вспомогательными инструментами служат программное обеспечение, ускоряющее вычисления координат центров масс приборов, габаритных и монтажных зазоров и проверки выполнения требований, а также встроенные в используемую систему автоматизированного проектирования средства оценки пересечений геометрических объектов и вычисления массо-центровочных и инерционных характеристик изделия.

Библиографический список

1. Агафонов Д.В., Воробьев 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.

2. Бодрышев С.В. Методы пространственной компоновки на основе функциональных зависимостей эксплуатационных параметров. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2006. 172 с.

3. 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: 10.15593/2224-0082/2018.54.07

4. Петров И.А. Методика автоматизированной компоновки блоков бортового радиоэлектронного оборудования и трассировки коммуникаций на этапах разработки ЛА. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 147 с.

5. Кулиш Е.Н., Михайлов К.А., Тихомиров В.А. О минимизации связывающей сети при прямоугольной трассировке // Сборник ВИМИ. 1976. № ВМ Д02753. 6 с.
6. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 137 с.
7. Калинин Б.В. Автоматизация синтеза топологии и размещения коммуникационных сетей. Дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1985. 274 с.
8. Головастикова Е.В. Методы и средства автоматизации структурно-пространственного проектирования бортовой кабельной сети летательных аппаратов. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 1993. 180 с.
9. Иванов А.О., Тужилин А.А. Задача Штейнера на плоскости или плоские минимальные сети // Математический сборник. 1991. Т. 182, № 12. С. 1813-1844.
10. Kruskal J.B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem // Proceedings of the American Mathematical Society. 1956. V. 7, Iss. 1. P. 48-50. DOI: 10.1090/S0002-9939-1956-0078686-7
11. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. 1959. V. 1, Iss. 1. P. 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390
12. Беляков А.А., Приходько В.И., Шулепов А.И. Метод автоматизированного размещения приборов в отсеке космического аппарата с учётом подключения к электроразъёмам 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
13. Мясников А.Ю. Теоретические аспекты проектирования компонентов бортовой кабельной сети летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 86-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-86-98
14. Лазарев И.В. Математические методы оптимального проектирования конструкций: уч. пособие. Новосибирск: Сибирская государственная академия путей сообщения, 1995. 295 с.
15. Рвачёв В.Л. Геометрические приложения алгебры логики. Киев: Техніка, 1967. 212 с.
16. Беляков А.А., Шулепов А.И., Шестеряков С.И., Приходько В.И., Кабушев И.С., Прокопьев Е.В., Мурадов А.А. Выполнение эргономических, монтажных, габаритных требований при автоматизированном размещении приборов в отсеках изделий ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2023. № 133.
17. Беляков А.А., Шулепов А.И., Папазов В.М. Конструктивная совместимость бортовой аппаратуры в отсеке, способы обеспечения, оптимизация компоновки и связей по бортовой кабельной сети // Материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения», посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва (08-10 ноября 2023 г., Красноярск). Ч. 1. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, 2023. С. 11-12.
18. Powell M.J.D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives // The Computer Journal. 1964. V. 7, Iss. 2. P. 155-162. DOI: 10.1093/comjnl/7.2.155
19. Prim R.C. Shortest connection networks and some generalizations // Bell System Technical Journal. 1957. V. 36, Iss. 6. P. 1389-1401. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1957.tb01515.x

METHODOLOGY OF CALCULATING ON-BOARD EQUIPMENT ARRANGING COORDINATES WITH PRELIMINARY ESTIMATE OF ON-BOARD CABLE SYSTEM MASS

© 2024

- A. A. Belyakov** Third Category Design Engineer;
Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev, 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
- V. M. Papazov** Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher;
Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev, Russian Federation;
post@rsce.ru
- V. I. Prihodko** Head of Section;
Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev, Russian Federation;
post@rsce.ru
- A. V. Fedosov** First Category Design Engineer;
Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev, Russian Federation;
post@rsce.ru

The article proposes a method for optimizing the layout of on-board equipment in spacecraft compartments according to the criterion of the minimum mass of the on-board cable system. The purpose of the work is to create a unified methodology for placing devices and verifying compliance with technical requirements. Methodological calculations are presented regarding the accounting of connections between devices and with other elements of systems, as well as a preliminary estimate of the mass of the on-board cable system, as a problem of variational calculus with elements of topological optimization. An algorithm for placing devices is based on their connection diagram with the ability to control the implementation of ergonomic, installation, size, mass centering requirements for the layout. Testing was carried out using the example of a spacecraft with a cylindrical compartment. It was organized in several stages in order to trace the change in the mass of the on-board cable system when the devices were displaced to meet the ergonomic, installation, and size requirements. The results of the tests made it possible to improve the procedure for determining the coordinates of instrument arrangement and the values of overall clearances. They also made it possible to compare the resulting mass of cables with statistics. The proposed methodology continues to be used in experimental testing by design engineers; some of its provisions will be developed in further research.

On-board equipment; on-board cable system; equipment layout; spacecraft compartment; electric schematics; task of arrangement; routing task

Citation: Belyakov A.A., Shulepov A.I., Papazov V.M., Prihodko V.I., Fedosov A.V. Methodology of calculating on-board equipment arranging coordinates with preliminary estimate of on-board cable system mass. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 4. P. 7-24.
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-7-24

References

1. Agafonov D.V., Vorobiev Yu.A., Osokin Yu.V. Method for harness deployment optimization onboard rocket and space technology objects. *Kosmonavtika i Raketostroenie*. 2013. No. 1 (70). P. 88-94. (In Russ.)
2. Bodryshev S.V. *Metody prostranstvennoy komponovki na osnove funktsional'nykh zavisimostey ekspluatatsionnykh parametrov. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods of spatial arrangement based on functional relations of operational parameters. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Moscow, 2006. 172 p.

3. 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: 10.15593/2224-0082/2018.54.07.
4. Petrov I.A. *Metodika avtomatizirovannoy komponovki blokov bortovogo radioelektronnogo oborudovaniya i trassirovki kommunikatsiy na etapakh razrabotki LA. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Method of automated arrangement of on-board equipment and cable laying at the stage of aircraft design. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Moscow, 2019. 147 p.
5. Kulish E.N., Mikhaylov K.A., Tikhomirov V.A. O minimizatsii svyazyvayushchey seti pri pryamougol'noy trassirovke. *Sbornik VIMI*. 1976. № VM D02753. 6 p. (In Russ.)
6. Gavrilov V.N. *Avtomatizirovannaya komponovka pribornykh otsekov letatel'nykh apparatov* [Automated arrangement of aircraft instrument compartments]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 137 p.
7. Kalinin B.V. *Avtomatizatsiya sinteza topologii i razmeshcheniya kommunikatsionnykh setey. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Automated synthesis of topology and cable network laying. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Kuybyshev, 1985. 274 p.
8. Golovastikov E.V. *Metody i sredstva avtomatizatsii strukturno-prostranstvennogo proektirovaniya bortovoy kabel'noy seti letatel'nykh apparatov. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods and means of automation of structural and spatial design of aircraft on-board cable system. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Samara, 1993. 180 p.
9. Ivanov A.O., Tuzhilin A.A. The steiner problem in the plane or in plane minimal nets. *Mathematics of the USSR-Sbornik*. 1993. V. 74, Iss. 2. P. 555-582. DOI: 10.1070/SM1993v074n02ABEH003362
10. Kruskal J.B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical Society*. 1956. V. 7, Iss. 1. P. 48-50. DOI: 10.1090/S0002-9939-1956-0078686-7
11. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. 1959. V. 1, Iss. 1. P. 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390
12. 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. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-7-24
13. Myasnikov A.Yu. Theoretical aspects of designing the components of an aircraft onboard cable network. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 86-98. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-86-98
14. Lazarev I.V. *Matematicheskie metody optimal'nogo proektirovaniya konstruksiy: uch. posobie* [Mathematical methods of optimal structural design]. Novosibirsk: Siberian State Academy of Railways Publ., 1995. 295 p.
15. Rvachev V.L. *Geometricheskie prilozheniya algebry logiki* [Geometric applications of logical algebra]. Kiev: Tekhnika Publ., 1967. 212 p.
16. Belyakov A.A., Shulepov A.I., Shesteryakov S.I., Prihodko V.I., Kabushev I.S., Prokopiev E.V., Muradov A.A. Ergonomic, mounting, size requirements implementation while automatically arranging devices in compartments of rocket and space vehicles. *Trudy MAI*. 2023. No. 133. (In Russ.)
17. Belyakov A.A., Shulepov A.I., Papazov V.M. Structural compatibility of on-board equipment in compartment, reaching procedures, optimization of layout and leads using the on-board cable system. *Materialy XXVII Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy*

Konferentsii «Reshetnevskie Chteniya», Posvyashchennoy Pamyati General'nogo Konstruktora Raketno-Kosmicheskikh Sistem Akademika M.F. Reshetneva (08-10 noyabrya 2023 g., Krasnoyarsk). Chast' 1. Krasnoyarsk: Reshetnev University Publ., 2023. P. 11-12. (In Russ.)

18. Powell M.J.D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*. 1964. V. 7, Iss. 2. P. 155-162. DOI: 10.1093/comjnl/7.2.155

19. Prim R.C. Shortest connection networks and some generalizations. *Bell System Technical Journal*. 1957. V. 36, Iss. 6. P. 1389-1401. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1957.tb01515.x