



УДК/UDC 629.7.02

DOI: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-68-75>

EDN: BHDCLG

Научная статья/Original article

КОНСТРУКТИВНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИБОРОВ

А. А. Беляков

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва»,
Россия, 141070, г. Королёв, ул. Ленина, 4а

post@rsce.ru

В исследовании изучается вопрос влияния характеристик приборов на результат оптимизации их компоновки в отсеках космических аппаратов. С указанной целью определены конкретные характеристики приборов, управление которыми может позволить эффективнее разрабатывать и оптимизировать компоновку таких приборов.

В статье была определена модель для оценки влияния характеристик приборов на результат оптимизации их компоновки. Далее были рассмотрены способы оптимального соотношения характеристик приборов и была разработана концептуальная схема этого процесса, состоящая из следующих этапов: задание общих требований к формам корпусов и пространственной ориентации приборов; применение методов комплексирования и агрегатирования; обеспечение применимости приборов для универсальных космических платформ.

Также автором была проведена тестовая оптимизация компоновки приборов по критерию минимума общей массы. В результате было установлено, что наибольший эффект достигается при выполнении всех этих этапов, а выполнение каждого из них обеспечивает снижение массы бортовой кабельной сети, массы конструкции креплений приборов, массы средств терморегулирования, массы защиты приборов от электромагнитных помех и ионизирующего излучения.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, прибор, компоновка приборов, конструкция, технологичность, космический аппарат

Для цитирования: Беляков А. А. Конструктивная совместимость приборов. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 2. С. 68–75. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-68-75>. EDN: BHDCLG.



© Беляков А. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STRUCTURAL COMPATIBILITY OF DEVICES

А. А. Belyakov

PJSC "Rocket and Space Corporation "Energia" named after S. P. Korolev",
Lenin St., 4A, Korolev, 141070, Russia

post@rsce.ru

The research examines the issue of the influence of instrument features on the result of optimising its configuration in spacecraft compartments. For this purpose, specific features of the devices have been identified, the control of which can provide a more efficient way to develop and improve the configuration of such devices.

The article defines a model for evaluating the effect of device features on the result of optimising their configuration. Further, the author considers the methods of optimal correlation of instrument features and develops a conceptual scheme of this process, consisting of the following stages: setting general requirements for body shapes and spatial orientation of instruments; applying methods of integration and aggregation; ensuring the applicability of instruments for universal space platforms.

The author also conducts a test optimisation of the device configuration according to the criterion of minimum total mass. As a result, the greatest effect is achieved by performing all these steps, and the implementation of each of them reduces the mass of the on-board cable network, the mass of the device mounting structure, the mass of temperature control, the mass of protection of devices from electromagnetic interference and ionising radiation.

Keywords: on-board equipment, device, devices configuration, structure, processability, spacecraft

For citation: Belyakov A. A. Structural compatibility of devices. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(2):68–75. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-68-75>. EDN: BHDCLG. (In Russ.).



© Belyakov A. A., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

При проектировании автоматических и пилотируемых космических аппаратов (КА) особое внимание уделяется макетированию, результаты которого должны подтвердить принятые инженерные решения при конструировании его составных частей, чтобы достичь наилучших технических характеристик КА. Многообразие технических параметров и требований является основной причиной высокой трудоёмкости и вычислительной сложности алгоритмов комплексной проверки инженерных решений. Как правило, основные процедуры излагаются в программе и методике испытаний, а результаты отражаются в актах. После проведения анализа делаются выводы и, в случае невыполнения требований, принимаются технические решения об изменениях составных частей КА. Такой процесс систематически проявляется для компоновки приборов в отсеках КА, поэтому её разработка осуществляется итерационно [1–4]. Анализ возможных причин показывает, что во многом это явление связано с исполнением приборов. Поэтому одним из актуальных остаётся вопрос совершенствования их характеристик.

На стадии рабочей документации принятые компоновочные решения в определённой мере обеспечивают рациональность компоновки приборов. Известно, что перебор и сравнение вариантов имеет смысл лишь для небольшого количества приборов в виде геометрических примитивов [5]. Во многом результат оптимизации компоновки приборов зависит от качества исходных данных. В частности, количество средств защиты от воздействия внешних факторов, средств терморегулирования и кабелей зависят не только от месторасположения приборов, но и от их характеристик.

Цель исследования — определить, как влияют характеристики приборов на результат оптимизации их компоновки внутри отсеков КА.

Задачи исследования:

1. Определить характеристики приборов, которые влияют на результат оптимизации их компоновки внутри отсеков КА.
2. Разработать модель для оценки влияния характеристик приборов на результат оптимизации их компоновки внутри отсеков КА.
3. Изучить способы обеспечения оптимального соотношения характеристик приборов и предложить соответствующий алгоритм действий.
4. Провести тестовую оптимизацию компоновки приборов за счёт совершенствования их характеристик.

Объектами исследования являются электронные приборы бортовых систем, применяемых в пилоти-

руемых и автоматических КА. Совокупность электронных приборов на борту КА принято именовать бортовой аппаратурой (БА).

Предметом исследования является соотношение характеристик приборов, влияющих на результат оптимизации компоновки БА внутри отсеков КА.

Известно, что «интегральным» свойством является технологичность конструкции приборов, которая характеризует взаимовлияние составных частей изделия с точки зрения производства и эксплуатации. В том числе это относится и к компоновке БА, для чего разрабатываются и согласовываются компоновочные схемы.

В отраслевых стандартах и научно-технической литературе существует перечень рекомендаций для разработки компоновочных схем и конструкции отдельных приборов. Межгосударственные стандарты требуют отрабатывать на технологичность компоновку и конструкцию приборов на этапе технологической подготовки производства и в процессе макетно-конструкторских испытаний. Качество результата этих мероприятий зависит от того, по какому принципу и насколько эффективно принимаются инженерные (в том числе компоновочные) решения.

Поиск оптимальных компоновочных решений

Компоновочное решение геометрически описывается схемой размещения приборов, характеризующейся следующими параметрами относительно базовой системы координат отсека КА:

- координаты размещения БА;
- углы пространственной ориентации БА.

Задача оптимизации компоновки БА внутри отсеков КА является многокритериальной, так как за счёт размещения приборов необходимо обеспечить минимальную массу бортовой кабельной сети, конструкции креплений, минимальные отклонения центра масс и моментов инерции отсеков КА, избежать перегрева приборов и воздействия на них помех и радиации. Для минимизации избыточных воздействий внешних факторов могут быть использованы параметры температуры взаимного нагрева приборов, пиковые изменения напряжённостей электрического и магнитного полей, суммарные поглощённые дозы ионизирующего излучения приборами. В конечном счёте минимизация влияния внешних факторов на компоновку БА за счёт оптимального размещения выражается в сокращении количества средств защиты приборов от них, то есть в сокращении общей массы этих средств, поэтому число критериев эффективности может быть снижено.

Таким образом, оптимальными будут считаться те компоновочные решения, которые одновременно обеспечивают минимальную массу: бортовой кабельной сети, конструкции установки приборов, балансировочных грузов, средств терморегулирования, защиты от внешнего воздействия при минимальных отклонениях центра масс и моментов инерции отсека КА, минимальных энергетических затратах на диагностику, демонтаж и ремонт БА.

С учётом этой конкретики задача оптимизации компоновки БА внутри отсеков КА может быть математически описана целевой функцией минимизации массы:

$$M = M_{\text{БА}} + M_{\text{БКС}} + M_{\text{К}} + M_{\text{БГ}} + M_{\text{Т}} + M_{\text{Е}} + M_{\text{Н}} + M_{\text{Д}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $M_{\text{БА}}$ — общая масса БА внутри отсека КА; $M_{\text{БКС}}$ — масса бортовой кабельной сети внутри отсека КА; $M_{\text{К}}$ — масса конструкции установки БА; $M_{\text{БГ}}$ — общая масса балансировочных грузов; $M_{\text{Т}}$ — общая масса средств терморегулирования компоновки БА; $M_{\text{Е}}$ — общая масса средств защиты компоновки БА от избыточного воздействия электростатического поля внутри отсека КА; $M_{\text{Н}}$ — общая масса средств защиты компоновки БА от избыточного воздействия магнитного поля внутри отсека КА; $M_{\text{Д}}$ — общая масса средств защиты компоновки БА от избыточного ионизирующего воздействия внутри отсека КА.

Прочие параметры (минимум массы средств снижения воздействия шума и вибраций и т. д.) в рамках данного исследования не перечисляются, так как вносят несущественный вклад при оптимизации компоновки БА по сравнению с обозначенными выше параметрами.

В соответствии с техническими требованиями к компоновке БА оптимальное значение целевой функции (1) следует искать при ограничениях на отклонения центра масс отсека КА и центробежных моментов инерции, а также при ограничениях на энергетические затраты оператора на демонтаж БА.

Согласно концепции адаптивизации оптимальными будут считаться только такие компоновочные решения, которые получены исходя из оперативного реагирования на изменение условий задачи размещения в процессе её моделирования. Следовательно, адаптивная задача оптимизации компоновки БА сводится к отысканию таких значений целевых функций, которые обеспечат решение эффективнее заданного допустимого, которое ниже предельного, что можно выразить ограничениями вида:

$$\begin{cases} \xi < [\xi] < \lim \xi \\ \epsilon_j < [\epsilon_j] < \lim \epsilon_j, \\ P < [P] < \lim P \end{cases}$$

где ξ — отклонение центра масс отсека КА; ϵ_j — отклонение центробежных моментов инерции отсека КА; P — энергетические затраты оператора на де-

монтаж БА; $[X]$ — заданное допускаемое значение; $\lim X$ — заданное предельное значение.

Конструктивная совместимость приборов

Характеристики приборов бортовых систем КА довольно разнообразны в зависимости от решаемых задач [2, 6, 7]. Применительно к предмету данного исследования интерес представляют характеристики приборов, которые находят своё отражение в их конструкции. Оптимальное соотношение значений данных характеристик называется конструктивной совместимостью приборов¹.

Конструктивная совместимость приборов влияет на технологичность конструкции и компоновки БА в части увязки и результата совместного выполнения функциональных, эргономических, монтажных, габаритных, массоцентровочных и инерционных, тепловых, радиационных, электромагнитных требований к компоновке. В этом смысле исследование соотношения характеристик приборов сводится к синтезу алгоритма действий и моделей, включающих массогабаритные параметры приборов. Создание таких моделей направлено на обеспечение поиска оптимальных компоновочных решений за счёт изменений характеристик приборов. Стоит отметить, что это возможно только для вновь разрабатываемых приборов.

Как отмечается в изданиях [1, 3, 5, 6, 8–10], для решения задачи размещения БА достаточно использовать электронные габаритные модели приборов, чьи характеристики описываются следующими данными [11]:

$$MP_i = (m_i; l_i; \Gamma_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $i = \overline{1, n}$ — порядковый номер прибора; n — общее количество приборов; m_i — масса прибора; $l_i = (l_{xi} \ l_{yi} \ l_{zi})$ — габариты прибора; $\Gamma_i = (a_i \ b_i \ c_i)$ — топология прибора; a_i — количество вершин корпуса прибора; b_i — количество рёбер корпуса прибора; c_i — количество граней корпуса прибора.

Само по себе количественное соотношение массы, габаритов, топологии приборов неинформативно, так как номенклатура их типоразмеров, назначение, варианты эксплуатации (условия окружающей среды, типоразмеры отсеков КА и места размещения в них) слишком разнообразны. Поэтому целесообразно проводить качественную оценку исходя из анализа полноты мероприятий, выполненных при разработке приборов в обеспечение оптимальности их компоновки в отсеках КА по критериям эффективности из формулы (1) в дальнейшем.

Модель для оценки влияния характеристик (2) приборов на результат оптимизации компоновки БА внутри отсеков КА (1) предлагается описать формально математической структурой вида:

$$\langle A(MP_i); Q(MP_i); F \rangle, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $A(MP_i)$ — область допускаемых значений характеристик приборов для компоновки в пределах габаритов отсека; $Q(MP_i)$ — формула для оценки конструктивной совместимости приборов (степени

¹ 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 // XXVII Международная научно-практическая конференция «Решетнёвские чтения», посвящённая памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнёва. 2023. Ч. 1. С. 11–12.

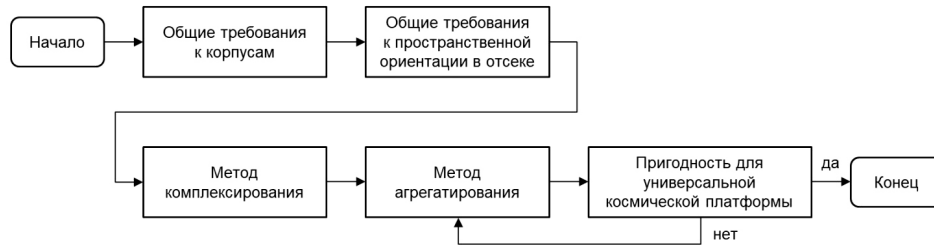


Рис. 1. Схема алгоритма обеспечения конструктивной совместимости приборов

Fig. 1. Scheme of the algorithm of the structural devices compatibility

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

оптимальности соотношения характеристик приборов); F — оператор пошагового отображения (конвертации) схемы размещения приборов.

Важно обратить внимание, что в модели (3) формула $Q(MP_i)$ должна быть истинной при выборе любого прибора MP_i на $A(MP_i)$, ведь только тогда возможно существование модели (3) для формулы $Q(MP_i)$. Чтобы определить её вид, необходимо изучить пути и способы обеспечения конструктивной совместимости приборов.

Обеспечение конструктивной совместимости приборов — это функция разработчика конструкторской документации на приборы, в которой должно отражаться взаимосвязанное решение задач, направленных на снижение занимаемого объёма, количества пустот в отсеке, массы бортовой кабельной сети, массы защиты и трудоёмкости монтажа приборов. Участие разработчика технологической документации является обязательным. Далее разработчик конструкторской документации на установку приборов использует эти данные при отработке конструкции креплений на технологичность.

Конструктивную совместимость приборов возможно обеспечить при задании общих требований к формам корпусов всех приборов и к условиям их ориентации в отсеке. Эти требования должен формулировать разработчик конструкторской документации на изделие.

Наиболее распространёнными для приборов являются корпуса прямоугольной и цилиндрической форм с большим количеством разъёмов для подсоединения к ним кабелей. Например, в работе [6] показано, как форма корпуса и пространственная ориентация прибора влияют на его доступность и легкосъёмность при испытаниях или эксплуатации КА.

Кроме того, на этапе разработки компоновки БА могут быть использованы методы предварительной оценки её эргономичности для оптимизации [12, 13].

Технически обеспечение конструктивной совместимости для нескольких произвольно рассматриваемых приборов выражается в том, что снижается трудоёмкость диагностики, доступа к составным частям изделия, их замены, а также сокращается расход материала для креплений и снижается занимаемый приборами объём пространства внутри отсека изделия.

На практике для достижения этого применяют метод комплексирования и метод агрегатирования. Например, в работе [7] отмечается, что метод комплексирования приборов позволяет объединять функции нескольких типов приборов в один прибор, который легче и компактнее нескольких самостоятельных приборов. Также в работе² отмечено, что метод агрегатирования приборов позволяет объединять их в функциональные блоки, за счёт чего сокращается масса кабелей и занимаемый объём.

Для снижения трудоёмкости разработки компоновки БА в развитие данных методов создают универсальные космические платформы по модульному принципу, на базе которых можно комплектовать КА всеми необходимыми бортовыми системами и целевыми нагрузками. Такой способ обеспечения конструктивной совместимости приборов видится наиболее эффективным при создании вариантов КА на основе совершенствования состава прототипов. Модульный принцип также может применяться для агрегатов и бортовых систем. Подробнее с методическими вопросами разработки универсальных космических платформ рекомендуется ознакомиться в изданиях [2, 7, 14–16].

Из приведённых выше положений следует, что задача обеспечения конструктивной совместимости приборов, равно как и более общие задачи обеспечения технологичности конструкции приборов и оптимизации компоновки БА, может быть решена только за счёт комплекса мероприятий, которые сводятся к совершенствованию состава и материалов электронной компонентной базы. Применительно к оценке влияния характеристик приборов на результат оптимизации их компоновки достаточно использовать данные электронных габаритных моделей (2) приборов, так как совершенствование состава и материалов электронной компонентной базы выражается в изменении массы и габаритов, а также топологии приборов. Применительно к производству приборов следует проводить анализ характеристик, которые перечислены в ГОСТ 14.201–83³ и отраслевых стандартах.

Таким образом, алгоритм обеспечения конструктивной совместимости приборов имеет вид последовательности действий, представленный схемой на рис. 1.

С учётом сделанных ранее комментариев к модели (3) на основе схемы предлагается представить формулу для оценки конструктивной со-

² Рожков В. Н., Чернышев А. В. Вопросы диагностики бортовых систем. Москва: МАТИ, 1975. 81 с.

³ ГОСТ 14.201–83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования. Введ. 01-01-1984. Москва: Стандартинформ, 1983. 9 с.

Таблица 1. Функции для оценки влияния характеристик приборов на результат оптимизации их компоновки
Table 1. Functions for evaluation of the devices features influence on the result of their layout optimization

Функция	Содержание
$Q_1 = Q_1(MP)$	«Общие требования к формам корпусов приборов MP соблюдены»
$Q_2 = Q_2(MP)$	«Общие требования к пространственной ориентации приборов MP соблюдены»
$Q_3 = Q_3(MP)$	«Приборы MP разработаны с помощью метода комплексирования»
$Q_4 = Q_4(MP)$	«Приборы MP разработаны с помощью метода агрегатирования»
$Q_5 = Q_5(MP)$	«Приборы MP пригодны для универсальной космической платформы»
$Q_6 = Q_6(MP)$	«Приборы MP обладают конструктивной совместимостью»
$Q_4(MP) \wedge \neg Q_6(MP) \Rightarrow \neg Q_5(MP)$	«Если приборы MP разработаны методом агрегатирования и при этом не обладают конструктивной совместимостью, то тогда они не пригодны для универсальной космической платформы»

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

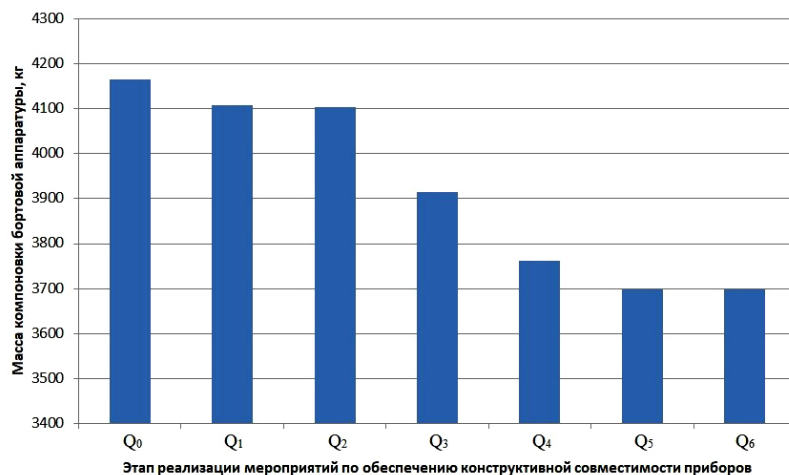


Рис. 2. Изменение массы компоновки бортовой аппаратуры в результате обеспечения конструктивной совместимости приборов

Fig. 2. Mass change of the on-board equipment layout because of the structural devices compatibility

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

вместимости приборов в виде многоместного предиката:

$$Q = \forall m_i \forall I_i \forall \Gamma_i \exists Q_6 \times \left[Q_1 \wedge Q_2 \wedge Q_3 \wedge Q_4 \wedge \exists I_{\text{отс}} Q_5 \wedge \wedge (Q_4 \wedge \neg Q_6 \Rightarrow \exists I_{\text{отс}} \neg Q_5) \right], \quad (4)$$

где $I_{\text{отс}}$ — габариты отсека КА; $Q_{1...6}$ — функции для оценки влияния характеристик приборов на результат оптимизации их компоновки.

Используемые в формуле (4) функции являются переменными строкового типа, содержание для которых указано в табл. 1. Функции могут принимать значения 1 или 0 в зависимости от того, соответствует ли конструкция прибора содержанию той или иной функции. Если все функции имеют значение 1, то можно считать, что такие приборы обладают конструктивной совместимостью, то есть соотношение их характеристик является наилучшим для получения результата оптимизации компоновки БА внутри отсеков КА. Это положение обусловлено тем фактом, что по отдельности мероприятия, соответствующие содержанию функций из формулы (4), снижают массу компоновки БА за счёт изменения массы, габаритов, топологии отдельных приборов. Как уже говорилось ранее, комплекс этих мероприятий обеспечивает кумулятивный эффект.

Результаты тестовой оптимизации компоновки БА внутри отсека КА по критерию минимума массы за счёт совершенствования характеристик приборов

В качестве тестового примера был рассмотрен герметичный отсек перспективного КА и 336 приборов различных бортовых систем, из которых была сформирована компоновка. Для каждого прибора был проведён анализ характеристик в части выполнения мероприятий из табл. 1, после чего были определены значения оценочных функций из формулы (4). Было установлено, что Q_1 было выполнено для 266 приборов; Q_2 — для 303 приборов; Q_3 — для 75 приборов; Q_4 — для 57 приборов; Q_5 — для 0 приборов. Следовательно, ни один из приборов изначально не обладал конструктивной совместимостью с остальными. Масса компоновки БА составила 4165,47 кг.

В обеспечение конструктивной совместимости для 156 вновь разрабатываемых приборов поэтапно выполнялся комплекс мероприятий в соответствии со схемой на рис. 1, и затем формировалась новая компоновка. На рис. 2 показан график изменений массы компоновки БА: при выполнении Q_1 для этих приборов масса компоновки БА составила 4108,72 кг; при выполнении Q_2 — 4103,45 кг; при выполнении Q_3 для 23-х из этих приборов — 3915,43 кг; при выполнении Q_4 для 141-го из этих

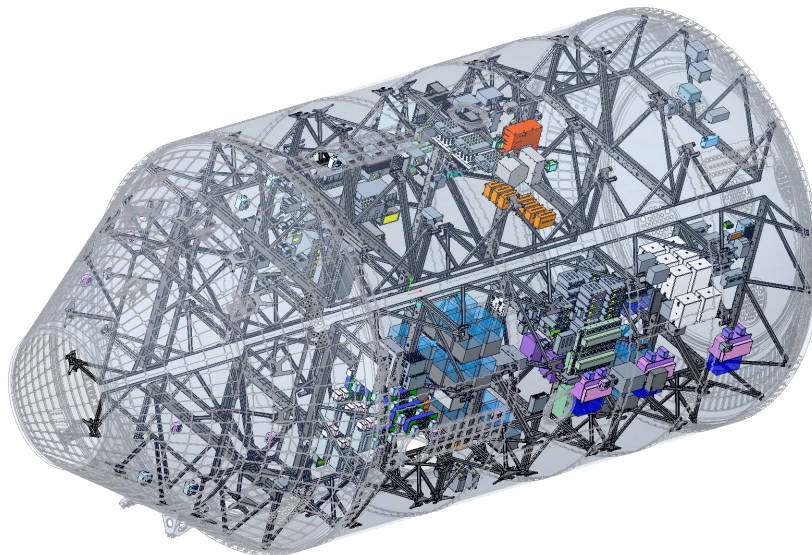


Рис. 3. Электронная геометрическая модель компоновки бортовой аппаратуры внутри отсека космического аппарата после тестовой оптимизации

Fig. 3. Electronic geometric model of the on-board equipment layout inside the spacecraft compartment after the testing optimization

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

приборов — 3761,24 кг; при выполнении Q_5 для девяти из этих приборов — 3697,06 кг. Значение массы компоновки БА при Q_6 не изменяется, так как на этом этапе лишь делается заключение о конструктивной совместимости приборов.

В качестве общего требования к корпусам вновь разрабатываемых приборов реализована форма в виде прямоугольного параллелепипеда, как наиболее подходящая для геометрии имеющихся зон размещения в отсеке КА. Масса компоновки БА была снижена за счёт снижения массы приборов и массы конструкции их крепления.

В качестве общего требования к пространственной ориентации вновь разрабатываемых приборов реализована параллельность граней корпусов этих приборов базовым плоскостям отсека КА. Масса компоновки БА была снижена за счёт снижения массы конструкции их крепления.

При помощи метода комплексирования 23 приборами системы управления бортовым комплексом системы управления движением и навигации, бортовой радиотехнической системы, системы бортовых измерений были функционально объединены в блоки. Например, это моноблок активной фазированной антенной решётки, блок управления бортовым комплексом, бортовая цифровая вычислительная машина, блоки навигации. Масса компоновки БА была снижена за счёт снижения массы приборов, массы бортовой кабельной сети, массы конструкции креплений приборов, массы экранов от электромагнитных помех и ионизирующего излучения.

При помощи метода агрегатирования 141 прибор с идентичными наборами электрических связей был конструктивно объединён. Например, это те же блоки управления бортовым комплексом: акселерометры, трёхосевые волновые измерители угловых скоростей, датчики атмосферного давления, релейные переключатели, коммутаторы широкополосной системы связи. Масса компоновки БА была снижена за счёт снижения массы бортовой кабельной сети, массы конструкции креплений, массы (количества) средств терморегулирования.

Пригодность для применения в составе универсальной космической платформы оценена исходя из функционального назначения, формы и габаритов конструкции приборов. Такие приборы в основном оказались свойственны системе бортовых измерений. Основы подхода описаны в работе [14]. Оценка состояла в том, чтобы подтвердить возможность применения рассматриваемых приборов без изменений в компоновках семейства КА, разрабатываемых в развитие возможностей образца перспективного КА. Масса компоновки БА была снижена за счёт конструктивных решений в целях унификации приборов и, как следствие, снижения их массы.

На рис. 3 представлена электронная геометрическая модель компоновки БА внутри отсека КА, оптимизированная за счёт совершенствования характеристик отдельных приборов.

Выводы и заключение

В результате тестовой оптимизации компоновки БА внутри отсека КА установлено, что изменение массы, габаритов, топологии приборов может снижать общую массу компоновки, если выполнять комплекс мероприятий по обеспечению их конструктивной совместимости в соответствии с табл. 1, причём наибольший эффект достигается при выполнении всех этапов предложенного алгоритма действий.

Этапы $Q_1 - Q_4$ помогают снизить массу конструкции креплений приборов. Этапы Q_1, Q_3, Q_5 помогают снизить массу отдельных приборов. Этапы Q_3, Q_4 позволяют снизить массу бортовой кабельной сети. Также на этапе Q_3 реализуемые мероприятия помогают снизить массу средств терморегулирования и защиты от электромагнитных помех и ионизирующего излучения.

На этапе Q_6 делается вывод об обеспечении конструктивной совместимости приборов (о достижении оптимального соотношения характеристик приборов, при котором достигается наибольший эффект оптимизации компоновки БА по критерию минимума массы).

Предложенный подход по работе с исходными данными (характеристиками приборов) для оптимизации компоновки БА внутри отсеков КА отличается от известных тем, что регламентирует сквозной процесс оптимизации от стадии аванпроекта до стадии рабочей документации.

Необходимость оценки конструктивной совместимости приборов обуславливается тем, что, благодаря комплексу мероприятий при разработке конструкции приборов, есть возможность положительно влиять на результат оптимизации компоновки этих приборов. Представленную на рис. 1 схему процесса и, следовательно, формулу (4) можно расширять, добавляя альтернативные пути поиска инженерных решений, если на каком-либо этапе мероприятия не могут быть выполнены. В настоящем исследовании даны концептуальные положения для наиболее общей схемы процесса обеспечения конструктивной совместимости приборов.

В частности, общие требования к формам корпусов и пространственной ориентации приборов должны формироваться на основе информации о форме корпуса отсека КА и схемы размещения БА. Комплексирование приборов должно обеспечивать уменьшение их массы и габаритов, в том числе за счёт внутренней коммутации вместо прокладки внешних кабелей. Агрегатирование приборов должно осуществляться на основе конструктивно-силовой схемы КА, а также преследовать цель снижения массы благодаря «сращиванию» конструкции БА и конструктивных элементов её установок. Более того, необходимо обладать исходными данными о величине и конфигурации доступных объёмов пространства в зонах размещения приборов и о количестве разрешённых посадочных (установочных) мест.

Список источников / References

1. Гаврилов В. Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов: монография. Москва: Машиностроение, 1988. 137 с.
2. Gavrilov V. N. Avtomatizirovannaya komponovka pribornykh отсеков letatel'nykh apparatov. Moscow, 1988. 137 p. (In Russ.).
3. Козлов Д. И., Аншаков Г. П., Агарков В. Ф. [и др.]. Конструирование автоматических космических аппаратов: монография. Москва: Машиностроение, 1996. 448 с. ISBN 5-217-02657-X.
4. Kozlov D. I., Anshakov G. P., Agarkov V. F. [et al.]. Konstruirovaniye avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov. Moscow, 1996. 448 p. ISBN 5-217-02657-X. (In Russ.).
5. Клягин В. А., Петров И. А., Серебрянский С. А. [и др.]. 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. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.54.07>. EDN: YLRFHV.
6. Klyagin V. A., Petrov I. A., Serebryanskiy S. A. [et al.]. 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. *Vestnik PNRPU. Aerospace Vehicles*. 2018;54:78–89. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.54.07>. EDN: YLRFHV. (In Russ.).
7. Lau V., Luis de Sousa F., Luiz Galski R. [et al.]. A multidisciplinary design optimization tool for spacecraft equipment layout conception. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2014;6(4):431–446. <https://doi.org/10.5028/jatm.v6i4.399>.

8. Cong W., Zhao Y., Du B. [et al.]. A spacecraft equipment layout optimization method for diverse and competitive design. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2023;136(1):621–654. <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.025143>.
9. Стоян Ю. Г., Кулиш Е. Н. Автоматизация проектирования компоновки оборудования летательных аппаратов: монография. Москва: Машиностроение, 1984. 192 с.
10. Stoyan Yu. G., Kulish E. N. Avtomatizatsiya proyektirovaniya komponovki oborudovaniya letatel'nykh apparatov. Moscow, 1984. 192 p. (In Russ.).
11. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения: монография. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 336 с. ISBN 5-7038-2178-9. EDN: QNQUMR.
12. Mikrin E. A. Bortovyye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami i proyektirovaniye ikh programmnoy obespecheniya. Moscow, 2003. 336 p. ISBN 5-7038-2178-9. EDN: QNQUMR. (In Russ.).
13. Chen X., Xia Y., Zhou W. [et al.]. An ILP-assisted two-stage layout optimization method for satellite payload placement. *Space Science & Technology*. 2022. 15 p. <https://doi.org/10.34133/2022/9765260>.
14. Cagan J., Degentesh D., Yin S. A simulated annealing-based algorithm using hierarchical models for general three-dimensional component layout. *Computer-Aided Design*. 1998;10(30):781–790.
15. 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. EDN: BHKEID.
16. Petrov I. A. Metodika avtomatizirovannoy komponovki blokov bortovogo radioelektronnogo oborudovaniya i trassirovki kommunikatsiy na etapakh razrabotki LA. Moscow, 2019. 147 p. EDN: BHKEID. (In Russ.).
17. 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. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-4-7-24>. EDN: CQJZEK.
18. Belyakov A. A., Shulepov A. I., Papazov V. M. [et al.]. Methodology of on-board equipment arranging coordinates calculation with on-board cable system mass preliminary evaluation. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024;4(26):7–24. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-4-7-24>. EDN: CQJZEK. (In Russ.).
19. Е Вин Тун. Оценка эргономичности компоновки отсека оборудования летательного аппарата: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2020. 166 с.
20. Ye Win Tun. Otsenka ergonomichnosti komponovki отсека oborudovaniya letatel'nogo apparata. Moscow, 2020. 166 p. (In Russ.).
21. 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 (151). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2024-7-2371>. EDN: RLOPKG.
22. Belyakov A. A., Shulepov A. I., Prokopiev E. V. [et al.]. Methodology of preliminary ergonomic optimization of on-board equipment layout in compartments of the manned spacecraft and space stations. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2024;7. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2024-7-2371>. EDN: RLOPKG. (In Russ.).
23. Волощев В. В., Ткаченко И. С., Сафронов С. Л. Выбор проектных параметров универсальных платформ малых космических аппаратов // Вестник СГАУ. 2012. № 2 (33). С. 35–47. EDN: PWOBOD.
24. Volotsuev V. V., Tkachenko I. S., Safronov S. L. Choice of design parameters of universal platforms of small space

vehicles. *Vestnik SSAU*. 2012;2(33):35–47. EDN: PWOBOD. (In Russ.).

15. Кириллов А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В. [и др.]. Опыт-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2017. 324 с. ISBN 978-5-93424-785-1.

Kirillov A. N., Akhmetov R. N., Shakhmatov E. V. [et al.]. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat "AIST-2D"*. Samara, 2017. 324 p. ISBN 978-5-93424-785-1. (In Russ.).

16. Лопота В. А., Ермаков П. Н., Фролов И. В. Перспективы развития автоматических космических систем и космических аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2011. № 1 (82). С. 5–16. EDN: NDXJHT.

Lopota V. A., Ermakov P. N., Frolov I. V. Perspectives of the development of automated space systems and spacecraft. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011;1(82):5–16. EDN: NDXJHT. (In Russ.).

Информация об авторе:

БЕЛЯКОВ Андрей Алексеевич, аспирант, инженер-конструктор 2-й категории ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва», г. Королёв.

SPIN-код: 7266-6590

AuthorID (РИНЦ): 1070564

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5789-8048>

e-mail: post@rsce.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в пред-

ставленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Information about the author:

BELYAKOV Andrey Alekseyevich, Postgraduate, Design Engineer of the 2nd category, PJSC "Rocket and Space Corporation "Energia" named after S. P. Korolev", Korolev.

SPIN-code: 7266-6590

AuthorID (RSCI): 1070564

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5789-8048>

e-mail: post@rsce.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 23.03.2026; accepted for publication 15.06.2026.