

На правах рукописи



Петров Иван Алексеевич

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОМПОНОВКИ БЛОКОВ  
БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И  
ТРАССИРОВКИ КОММУНИКАЦИЙ НА ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ ЛА**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.07.02

«Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»

Москва 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Клягин Виктор Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника НИО филиала ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого».

Официальные оппоненты: Долженков Николай Николаевич – доктор технических наук, генеральный конструктор АО «Группа Кронштадт»;  
Киселев Михаил Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэродинамики, конструкции и прочности ЛА Московского государственного технического университета гражданской авиации.

Ведущая организация: АО «РСК» «МиГ», г. Москва.

Защита состоится 24 октября 2019 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте организации [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=105338](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=105338)

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.10,  
кандидат технических наук, доцент



Денискина А.Р.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### ***Актуальность темы исследования***

Задача компоновки блоков оборудования летательных аппаратов (ЛА) является важной частью их создания. При этом трудоёмкость решения такой задачи значительно возрастает с ростом сложности и числа систем размещаемого на ЛА оборудования. Например, можно проследить, что среднее количество блоков бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) на современных самолетах увеличилось в 1,5 – 2 раза по сравнению с самолетами 50-х годов.

Следует отметить, что при выполнении компоновки элементов БРЭО вручную существуют следующие недостатки:

- результат работы сильно зависит от квалификации и личных качеств компоновщика;
- количество прорабатываемых вариантов значительно уменьшается в связи с высокой трудоёмкостью и низкой производительностью ручного труда.

Автоматизация процесса наряду с устранением этих недостатков может предоставить конструктору возможности выбора среди большего числа отранжированных вариантов компоновки и более детального их сравнения, что приведет к значительному повышению качества и совершенству конструкторских решений.

### ***Степень разработанности темы***

Разработке теоретических аспектов автоматизации процесса компоновки ЛА и размещения БРЭО посвящено большое количество трудов. Среди работ отечественных ученых необходимо отметить работы, выполненные в Московском авиационном институте: под руководством Мальчевского В.В. – по направлению матрично-топологической компоновки, Маркина Л.В. – по использованию рецепторных моделей для компоновки БРЭО и трассировки, Лисейцева Н.К., Егера С.М., Куприкова М.Ю., Пащенко О.Б. и др. – в этой и смежных областях. Кроме этого необходимо отметить работы харьковской

школы раскроя-упаковки на базе годографа плотного размещения академика Стояна Ю.Г. Большой вклад в вопросы компоновки БРЭО внес Кербер Л.Л., систематизировавший основные требования и способы установки оборудования, что позволило в будущем создать ряд эвристических алгоритмов. Среди работ по авиационной тематике также необходимо отметить исследования Гаврилова В.Н. по автоматизации компоновки отсеков сложной формы.

Анализ этих работ показал, что в них не учитываются требования современных стандартов, а также требования снижения стоимости эксплуатации ЛА за счет рационального размещения оборудования, обеспечивающего удобство обслуживания блоков БРЭО.

Кроме представителей авиационной отрасли вопросами компоновки занимались: Мухачева Э. А., Мартынов В. В., Верхотуров М. А., Картак В. М., Валеева А.Ф. на базе Уфимского государственного авиационного института; Егоров С.Я. в области компоновки цехов; Канторович Л.В. в области компоновки заготовок и раскроя материала; ученые института технической кибернетики (ИТК АН БССР) в области компоновки печатных плат и радиоэлектронных компонентов; Руднев А.С. в области упаковки двумерных примитивов в полосу.

Анализ литературы показал, что существуют задачи, смежные с задачами автоматизации компоновки (АК) БРЭО. Их можно разделить на две основные группы:

1. Производственные (компоновка печатных плат, раскрой материала и др.). Например, для минимизации коммуникаций могут быть полезны алгоритмы трассировки печатных плат.

2. Задачи комбинаторной оптимизации (упаковка 1, 2, 3D примитивов, размещение объектов сложной формы и т.п.).

Особое место в этой области занимают работы зарубежных ученых, таких как Martello S. по решению задач двумерной упаковки, Дейкстра Э. в области алгоритмов трассировки на графах.

Отметим, что фундаментальные алгоритмы решения общих задач оптимизированы для ЭВМ, в работах рассмотрены типовые задачи компоновки и предложены оптимальные для ЭВМ алгоритмы их решения, однако они не учитывают особенности компоновки блоков БРЭО на ЛА.

### ***Цели и задачи исследования***

*Целью* исследования является разработка методики автоматизированной компоновки БРЭО и трассировки коммуникаций на этапах аванпроекта и эскизно-технического проекта с учетом современных требований размещения БРЭО и достижений в области ЭВМ и комбинаторной оптимизации.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Систематизировать накопленный опыт компоновки БРЭО и трассировки жгутов.
2. Проанализировать современные требования к размещению БРЭО.
3. Предложить новую модель (способ представления) компоновки БРЭО.
4. Разработать методику автоматизированной компоновки БРЭО и трассировки коммуникаций. Для этого необходимо:
  - формализовать задачу автоматизированной компоновки БРЭО (АК БРЭО) и выбрать оптимизационный метод решения задачи;
  - на основании выбранного метода оптимизации и представления компоновки создать алгоритм решения;
  - разработать программное обеспечение для реализации алгоритма и отработки методики;
  - провести верификацию разработанного ПО;
  - провести апробацию методики на реальной проектной задаче и выполнив сравнительный анализ результатов с традиционным решением;

Разработанная методика может стать основой для создания ПО, позволяющего на этапах аванпроекта и эскизно-технического проекта (ЭТП) автоматизировать часть работы конструктора, сократить время на разработку

вариантов компоновки, увеличить количество прорабатываемых вариантов компоновки, и, как следствие, повысить качество компоновки.

### ***Научная новизна***

Разработана новая методика автоматизированной компоновки блоков БРЭО, основанная на декомпозиции процесса на два основных этапа (одномерный и плоский), между которыми возможен отбор результатов человеком. При этом впервые показано, что для каждого из этапов существуют подобные задачи из области комбинаторной оптимизации. Эти задачи получили широкое распространение со множеством отработанных алгоритмов решения, что позволило выбрать и применить наиболее рациональные из них.

### ***Теоретическая и практическая значимость работы***

*Теоретическая значимость* работы заключается в разработке новой методики решения задачи АК БРЭО, учитывающей современные ограничения при размещении бортового оборудования. Кроме этого проведено сравнение, и показано сходство формализованной задачи компоновки комплекса БРЭО и типовых задач комбинаторной оптимизации, что позволяет в полной мере использовать возможности ЭВМ.

*Практическая значимость* заключается в разработанных алгоритмах и программной реализации решения задачи АК БРЭО, которые позволяют при проектировании ЛА:

- снизить массу межотсечных связей;
- повысить качество компоновки за счет увеличения прорабатываемых вариантов, а также уменьшить зависимость от человеческого фактора;
- сократить сроки разработки за счет распараллеливания процесса;
- снизить удельную стоимость разработки варианта за счет автоматизации.

В ходе апробации ПО удалось снизить массу межотсечных коммуникаций на этапе эскизного проекта программы перспективного среднего военно-транспортного самолета на ~37%.

В рамках работы была собрана статистика, и проведен анализ размещения БРЭО на различных типах самолетов.

### ***Методология и методы исследования***

*Объект исследования:* процесс компоновки (нахождение взаимного расположения) блоков БРЭО ЛА и трассировка коммуникаций между ними.

*Предмет исследования:* методика автоматизации компоновки блоков БРЭО и трассировки коммуникаций на этапах аванпроекта и ЭТП. Оптимизация по критериям минимума массы и использования внутреннего объема отсеков под размещение блоков БРЭО.

В ходе исследования применялись: моделирование, формализация, декомпозиция, методы поэтапного решения и последовательных приближений. На основе этого задача АК блоков БРЭО приведена к известным задачам комбинаторной оптимизации, для решения которых применяются специализированные методы комбинаторной оптимизации, например, метод ветвей и границ.

### ***Положения, выносимые на защиту***

1. Дискретная модель, представляющая компоновку БРЭО как размещение двумерных объектов (лицевая поверхность блока) на плоскостях (лицевая поверхность отсека), расположенных в трехмерном пространстве. При этом межотсечные коммуникации размещаются в зонах прохода электрожгутов, который представляется в виде графа.

2. Методика автоматизированной компоновки БРЭО и трассировки коммуникаций, основанная на предложенной дискретной модели. Особенностью методики является то, что она состоит из двух этапов (одномерный и плоский), между которыми осуществляется коррекция человеком хода решения.

3. Утверждение о подобии проблемы АК БРЭО и распространенных задач комбинаторной оптимизации (задачи о рюкзаке, задачи трассировки на графах, упаковка в полуограниченную полосу).

4. Алгоритм автоматизированной компоновки, основанный на методах и алгоритмах решения указанных выше задач комбинаторной оптимизации.

### ***Степень достоверности и апробация результатов***

Результаты работы опубликованы в научных трудах МАИ, журналах «Полет и «Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника».

Работа рассмотрена и получила положительный отзыв на 3-х международных конференциях. Результаты неоднократно докладывались и обсуждались на кафедре «Проектирование и сертификация ЛА» МАИ.

Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы в ПАО «Ил», подтверждающий практическую ценность.

### *Структура и объем диссертации*

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка используемых источников из 115 наименований. Общий объем – 147 страниц, включая 59 рисунков и 22 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении**, содержащем все формально необходимые положения, дано описание предмета исследования с обоснованием новизны и актуальности, определены цели, задачи и методологические основы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Описана проблематика предметной области и приведены сведения об апробации и публикациях по теме.

**Первая глава** посвящена формализации задачи и требованиям, предъявляемым к методам ее решения. Описан общий процесс компоновки ЛА с определением в нем места компоновки БРЭО. Показано, что этот процесс является итеративным, состоящим из нескольких последовательных этапов, и может быть автоматизирован. На основании этого выполнена математическая постановка задачи АК БРЭО, сформулированная как многокритериальная задача дискретной оптимизации:

Пусть имеется  $N$  компонуемых объектов  $T_i (i = \overline{1, N})$  и  $K$  областей их размещения  $\Omega_j (j = \overline{1, K})$ . Требуется разместить эти объекты в областях  $\Omega_j$  с учётом заданных ограничений:

- 1) все варьируемые элементы размещались внутри отведенных зон для компоновки:  $T_i \cup \Omega = V_i$ , где  $\forall i = [1 \dots n]$ ;
- 2) ни один из них не пересекался с граничными условиями или другими элементами:  $\forall T_i \cap \forall T_j = \emptyset$ , где  $(i \in [1, n]) \& (j \in [1, n])$ ;



3) действия в отсеке (вибрация, электромагнитная совместимость и др.) не превышают максимальных значений для функционирования блока, размещенного в этом отсеке  $K_{доп}(T_i) > K_{возд}(\Omega)$ , где  $\forall i = [1 \dots n]$ ;

4) суммарное тепловыделение в отсеке не превышает макс. для любого отсека  $QTmax_m(\Omega) > \sum_{i=1}^n QT_i$ ;

таким образом, чтобы функция цели компоновки  $\Phi(X)$  достигала экстремума:

$$\text{Extr } \Phi(X) \text{ при } X \in \Omega.$$

В качестве функции цели применяются: на 1-м этапе (одномерном): минимальная масса межотсечной коммуникаций; на 2-м этапе (плоскостном): коэффициент оптимальности компоновки.

*Зафиксированы основные требования к разрабатываемой методике:*

- должен использоваться метод, гарантирующий точное решение (например, полный перебор или его вариации). В случае невозможности допускается применение «жадных» алгоритмов;

- разбиение на этапы должно обеспечивать возможность промежуточного контроля и корректировки решения, а также уточнение по ходу работы граничных условий и критериев;

- результатом должно быть отранжированное множество решений;

- должно выполняться исключение невозможных комбинаций;

- применяемые алгоритмы должны обеспечивать высокую скорость и стабильность работы ПО.

С учетом этих требований рассмотрены способы решения оптимизационных задач. За основу взяты методы комбинаторной оптимизации как наиболее подходящие для реализации на ЭВМ и удовлетворяющие другим требованиям. Классификация алгоритмов решения задач представлена в табл. 1.

*Табл. 1 – Классификация алгоритмов комбинаторной оптимизации*

Алгоритмы решения задач комбинаторной оптимизации					
Точные алгоритмы		Приближенные алгоритмы		Стахостатические методы	Комбинированные методы
Полный перебор и его вариации		«Жадные» алгоритмы	Эвристические алгоритмы	Случайный поиск и его модификации	Генетические алгоритмы
Полный перебор	Метод ветвей и границ	Алгоритм Дейкстры, Ли, Флойда и пр.	Частные случаи с заданными эвристиками	Различные вариации случайного поиска	Различные вариации под конкретные задачи

Эвристические алгоритмы и некоторые другие методы не являются оптимальными для использования в современной деятельности конструктора, основанной на применении ЭВМ. Рационально рассмотреть подходы решения задачи на основе полного перебора и его вариаций, которые наиболее полно удовлетворяют всем предъявленным требованиям. Например, при определенных ограничениях и допущениях «жадные» алгоритмы могут отвечать таким требованиям.

**Вторая глава** посвящена разработке методики автоматизированной компоновки на основе методов комбинаторной оптимизации. Для этого предложена новая дискретная модель компоновки БРЭО. Для ее разработки выполнен анализ нормативной документации на компоновочные схемы, электронные макеты и др. конструкторские документы, рассмотрены требования к размещению БРЭО (технологические, обеспечение доступа, подход коммуникаций, особенности 3D макетирования и др.). Показано, что существует множество ограничений на размещение, обосновывающих следующие допущения:

- каждый элемент модели имеет 1, 2, 3-х мерное представления;
- стандартные типоразмеры блоков (рис. 1);
- требования по размещению БРЭО напротив люков для обеспечения доступа (блоки размещаются в плоскостях люков);
- дискретный шаг установочных конструкций (профили, амортизаторы, монтажные рамы (рис. 2);

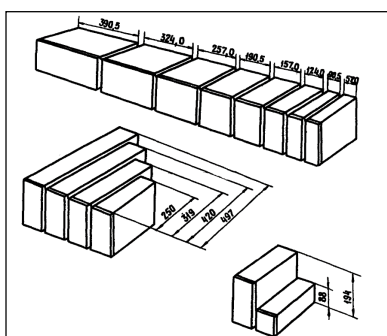


Рис. 1 – Стандартные типоразмеры блоков

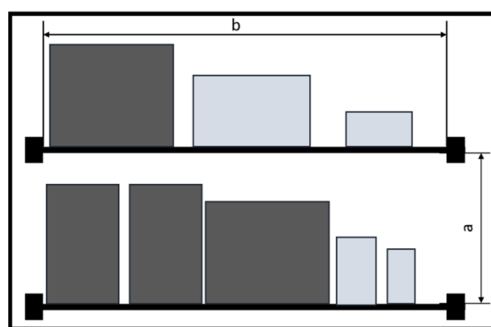
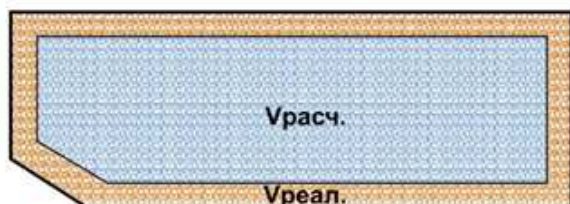


Рис. 2 – Упрощенная 2D модель отсека

- уровень вибрационных, температурных, электромагнитных и др. воздействий в отсеке постоянен. Блоки имеют допустимый порог воздействия, т.е. не работают при его превышении;

- заданные зазоры для подвода коммуникаций и воздуха (исходя из радиусов изгиба жгутов и труб), монтажа и обслуживания блоков и др. задаются за счет оффсета от поверхности блока (рис. 3);
- коммуникации прокладываются по зонам разрешенных проходов, которые могут быть представлены в виде графа (рис. 4).

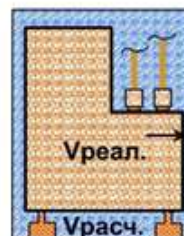
**Объем отсека в одномерной задаче:**



$$K = \frac{V_{\text{реал.}}}{V_{\text{расч.}}} - \text{коэффициент использования объема отсека}$$

$V_{\text{расч.}} < V_{\text{реал.}}$

**Объем блока в одномерной задаче:**



$D_{\text{min}}$  - минимально необходимое расстояние от поверхности блока

$V_{\text{расч.}} > V_{\text{реал.}}$

Рис. 3 – Представление потребных зазоров

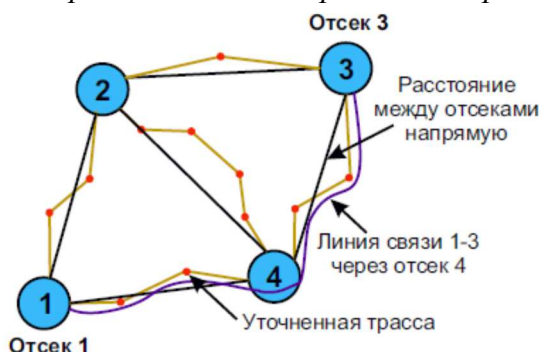


Рис. 4 – 2D представление трасс коммуникаций

Исходя из сделанных допущений компоновку блоков БРЭО ЛА можно представить в 2-х взаимосвязанных представлениях:

1. Одномерное представление (рис. 5). Каждый размещаемый блок и отсек имеют только одну размерность – объем. Распределение по ним храниться в матрице принадлежности. Каждая коммуникационная цепь представляется в виде условной линии, связывающей два блока оборудования. Каждая линия связи может проходить по маршруту, заданному набором точек (графом). Ценность ребра графа равна 3D расстоянию.

2. Плоское представление (рис. 6). Отсеки в ЛА упрощаются в виде направляющих плоскостей, на которых размещаются блоки на стеллажах. У каждой плоскости есть заданные параметры (координаты, ширина и высота). У каждого блока также выделяется направляющая (лицевая сторона, представляющая прямоугольник), которая имеет длину и ширину. Блоки размещаются как прямоугольники на плоскости с целью нахождения минимальной высоты – минимизации высот стеллажей.

Из 3-х мерной компоновки за счет первой группы допущений получается плоское, из плоской – одномерное. Причем, если вариант компоновки не существует в одномерном представлении, то и в плоском он также невозможен.

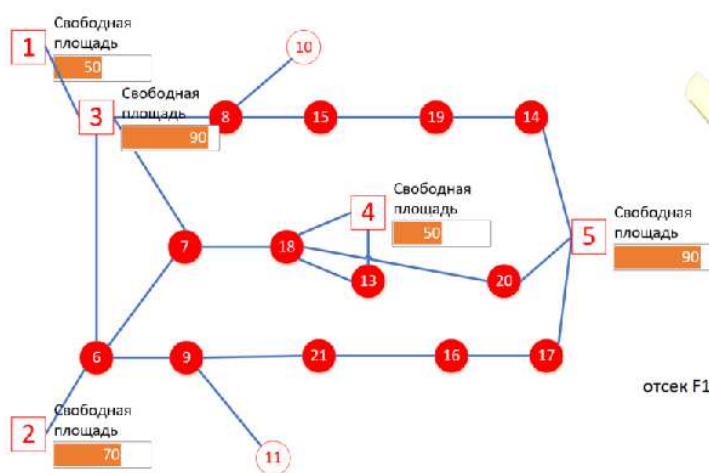


Рис. 5 – Одномерное представление

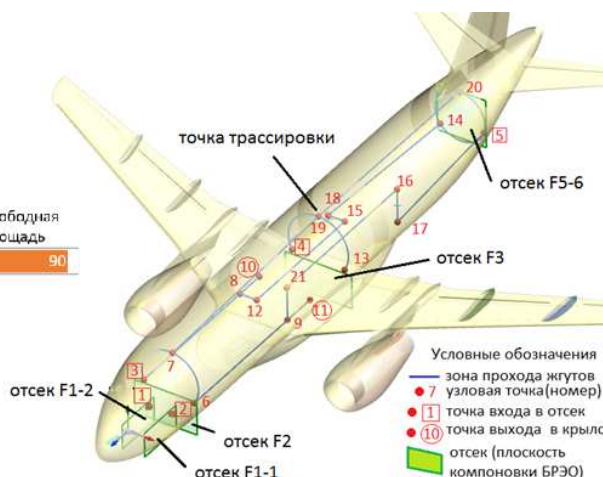


Рис. 6 – Плоское представление

Для подтверждения возможности использования предлагаемой модели проведен анализ размещения БРЭО на боевых самолетах 2-й половины XX века, показавший, что в большинстве случаев БРЭО размещается на стеллажах или линейных направляющих (рис. 7). Тогда задачу можно разделить на несколько этапов, каждый из которых представляет собой реализацию частной задачи дискретной оптимизации.

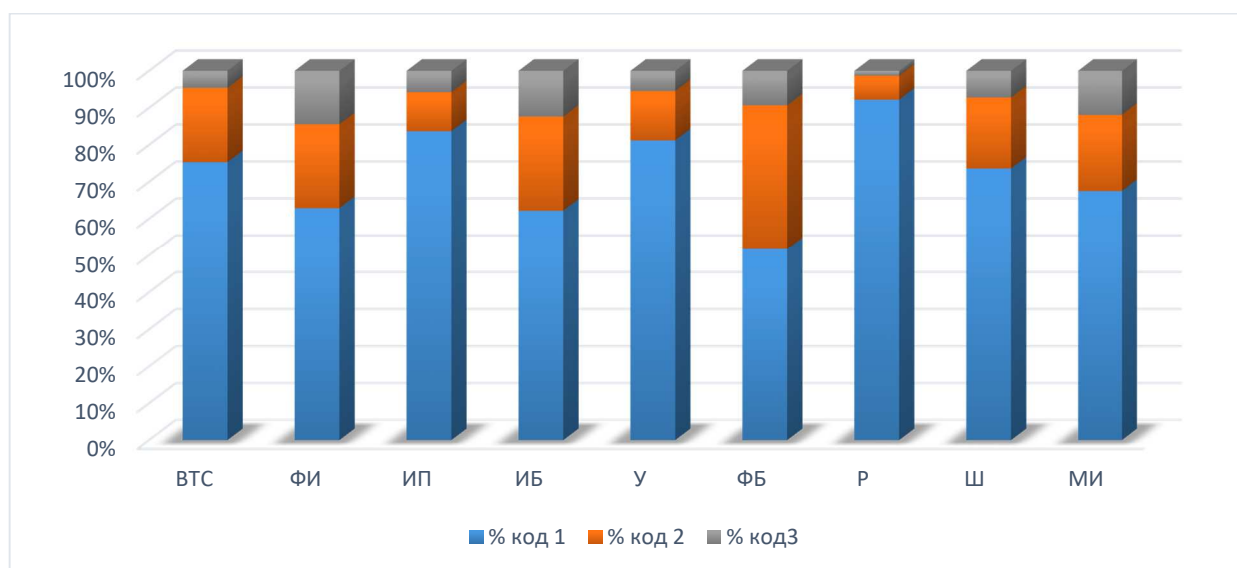
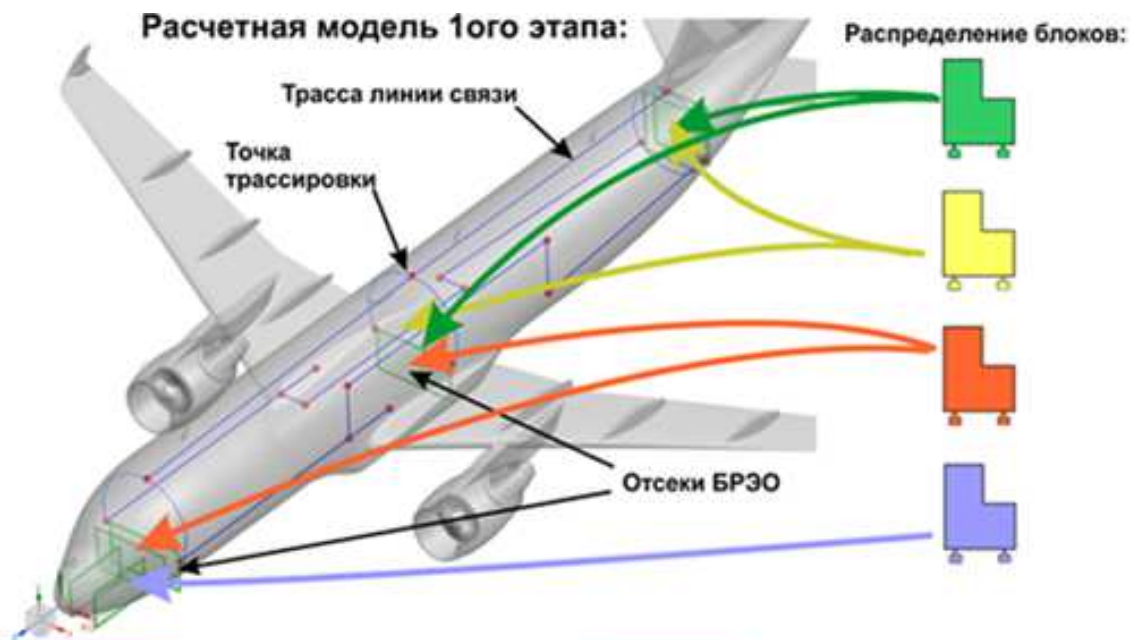


Рис. 7 – Диаграмма размещения блоков БРЭО от типа ЛА (код 1 – стеллаж, код 2 – линейная направляющая, код 3 – одиночное размещение)

Суть предлагаемого метода заключается в декомпозиции на две подзадачи: распределения блоков по отсекам, компоновки в отсеке на плоскости для получения стеллажей (рис. 8). Для первоначального этапа используется одномерная постановка (рис. 9). В целом задача сводится к поиску такого варианта комбинации распределения тел определенных объемов, связанных линиями связи, по отсекам определенного объема, чтобы суммарная масса линий связи между ними была минимальной. Для этого необходимы перебор и оценка всех вариантов. Таким образом, параллельно решается задача трассировки цепей коммуникаций с приближением до уровня «отсек - точка маршрута - отсек». Для перебора используется метод ветвей и границ (рис. 10). Полученные рациональные варианты оцениваются человеком и передаются для обработки на следующий этап.



Рис. 8 – Структура решаемой задачи



**Задача 1.1. Распределение блоков по отсекам**

**Тип задачи:**  
Дискретная одномерная  
NP-полная задача

- Предварительный отсев вариантов:**
- по геометрическим ограничениям
  - по технологическим ограничениям
  - по эксплуатационным ограничениям
  - по совместимости систем и блоков
  - по экономическим ограничениям
  - по статистическим данным

**Задача 1.2. Трассировка межотсечных связей компонентов блоков**

**Примечания:**  
• Трассировка по заранее определенным вариантам расположения коробов

**Тип задачи:**  
Задача поиска в графе  
P-класса сложности

- Методы трассировки:**  
• Алгоритм Дейкстры
- Учитываемые факторы:**  
• ЭМС линий связей

Рис. 9 – Задачи первого этапа

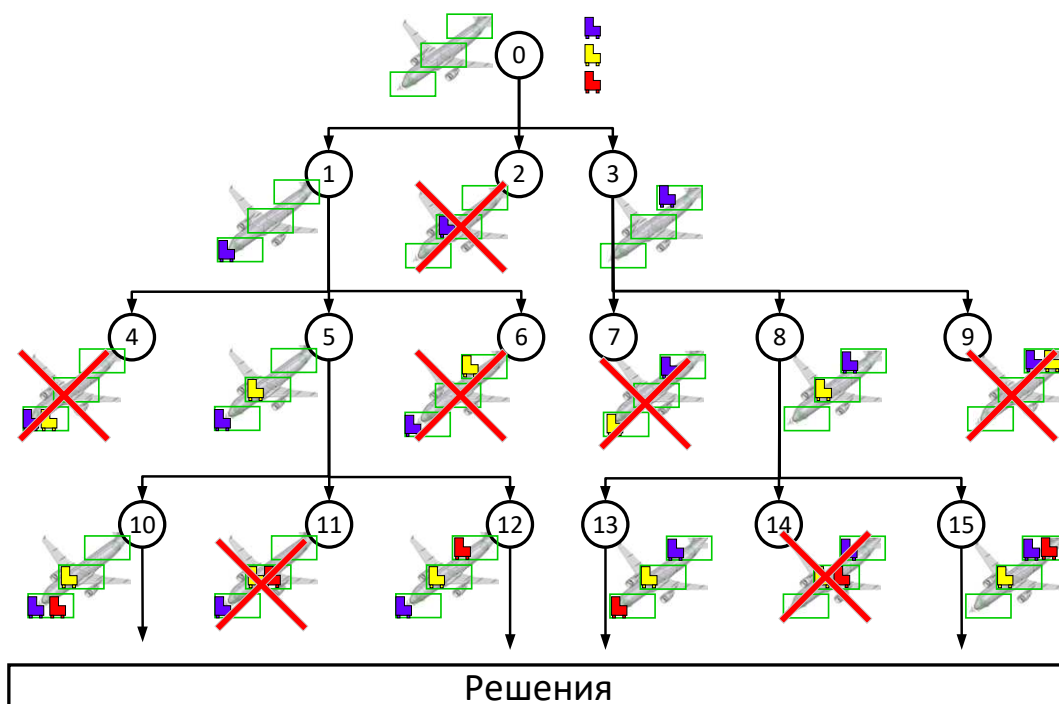


Рис. 10 – Метод решения задачи перебора блоков

На следующем этапе используется плоская постановка (рис. 11). Задача сводится к последовательной компоновке всех отсеков, которая является частной задачей упаковки прямоугольников в полуограниченную полосу. Исходными данными является матрица принадлежности блоков к отсекам.

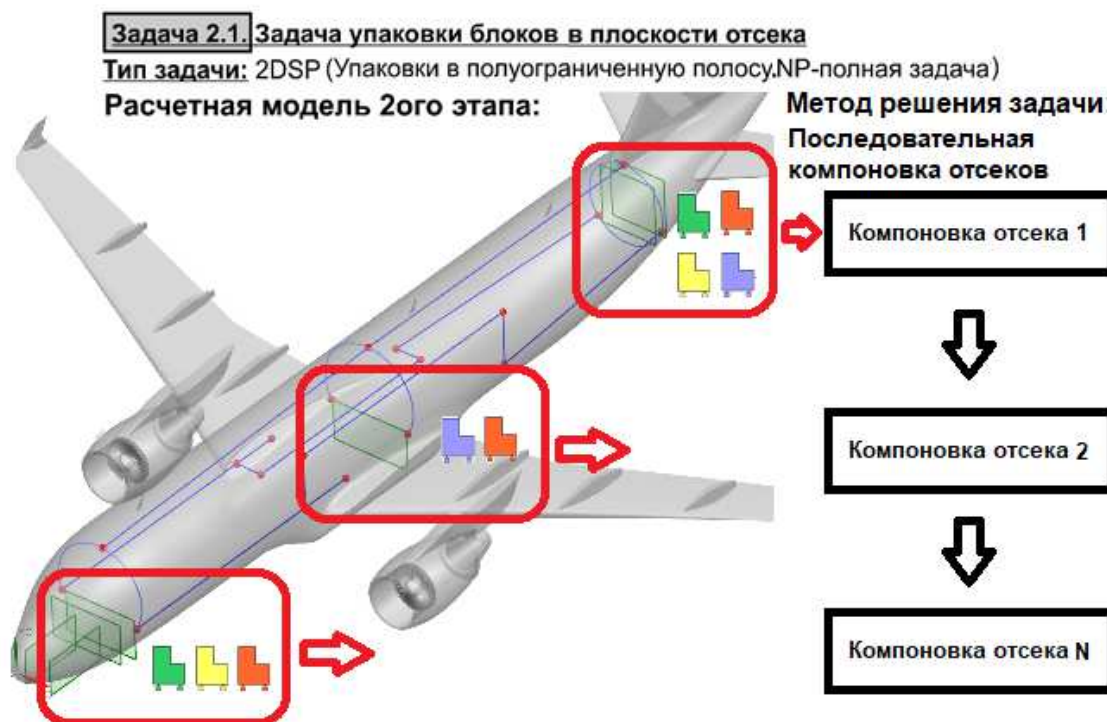


Рис.11 – Задача второго этапа и ее метод решения

В третьей главе описан выбор наиболее подходящих алгоритмов комбинаторной оптимизации и их модификация для применения при решении текущей задачи. На рис. 13 представлена схема общего алгоритма автоматизированной компоновки БРЭО, основанного на предлагаемой методике. Как было показано во 2-й главе, первый этап состоит из двух подзадач (рис. 14):

1. Перебор вариантов распределения. Используется метод ветвей и границ, являющийся частным случаем полного перебора (ПП).
2. Трассировка. Используется алгоритм Дейкстры как достаточно надежный при очень высокой скорости по сравнению с ПП.

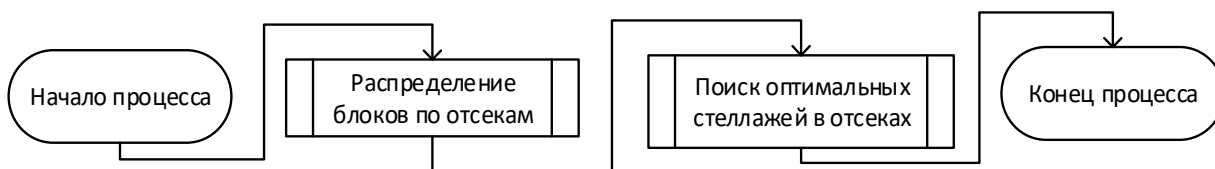


Рис. 13 – Общий алгоритм решения задачи автоматизированной компоновки БРЭО

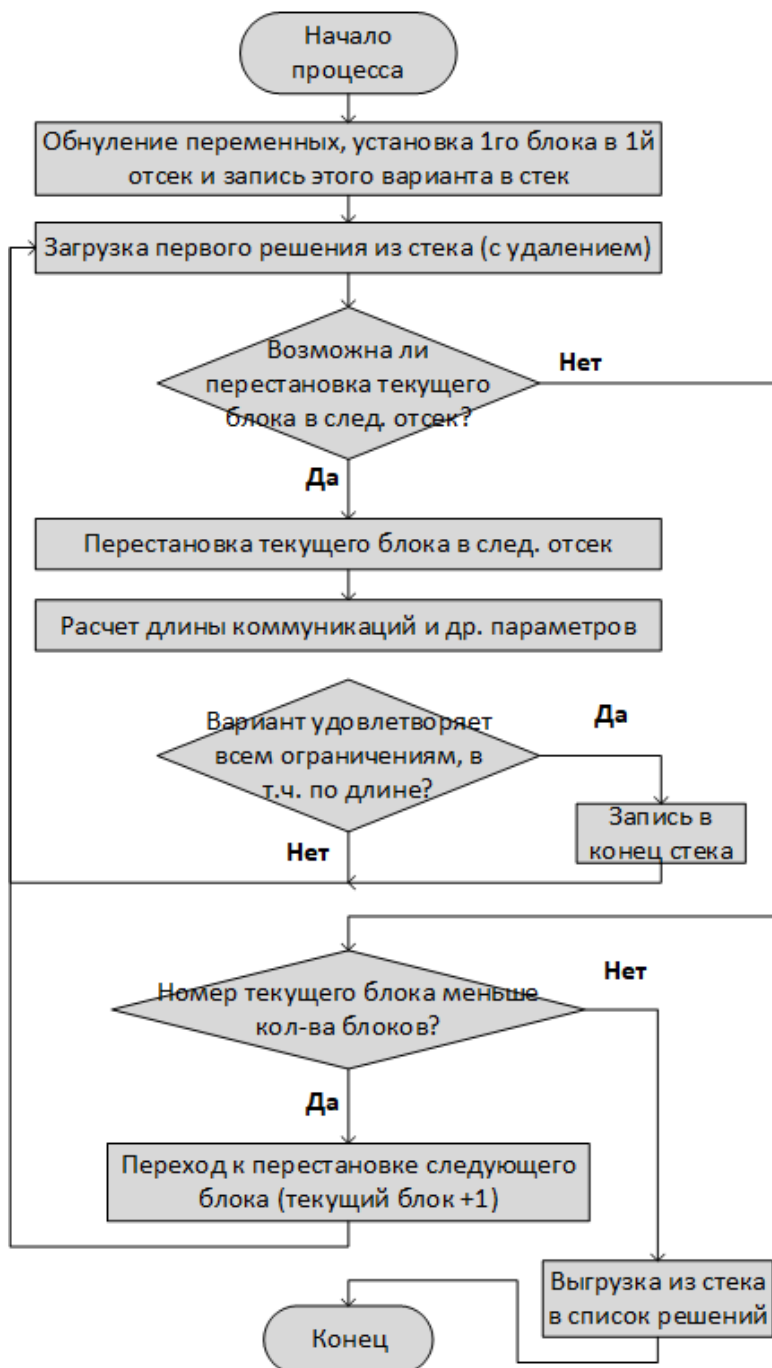


Рис. 14 – Схема алгоритма полного перебора блоков

Большое внимание уделено выбору алгоритма второго этапа. Рассмотрено 22 алгоритма (из них 14 рассчитаны на изменяющиеся исходные данные), которые апробированы на условной задаче по размещению 32-х стандартных



блоков на плоскости размером 3200x800 мм. Результаты 5-ти наилучших представлены на рис. 15.

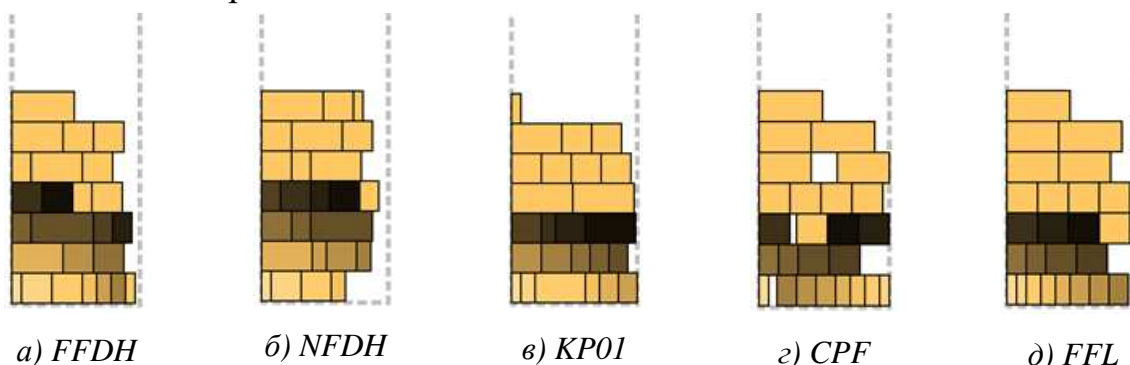


Рис. 15 – Сравнение алгоритмов упаковки

Для 2-го этапа выбран алгоритм FFDH, принцип работы которого показан на рис.16, а блок-схема – на рис. 17.

Описывается программная реализация алгоритмов. Программа имеет модульную архитектуру. После завершения выполнения модуля каждого из этапов осуществляется переход в главный модуль, где пользователь может выбрать дальнейшие действия, например, выбрать наиболее рациональные решения для продолжения расчета или изменить исходные данные. За счет этого обеспечивается возможность ручной корректировки процесса.

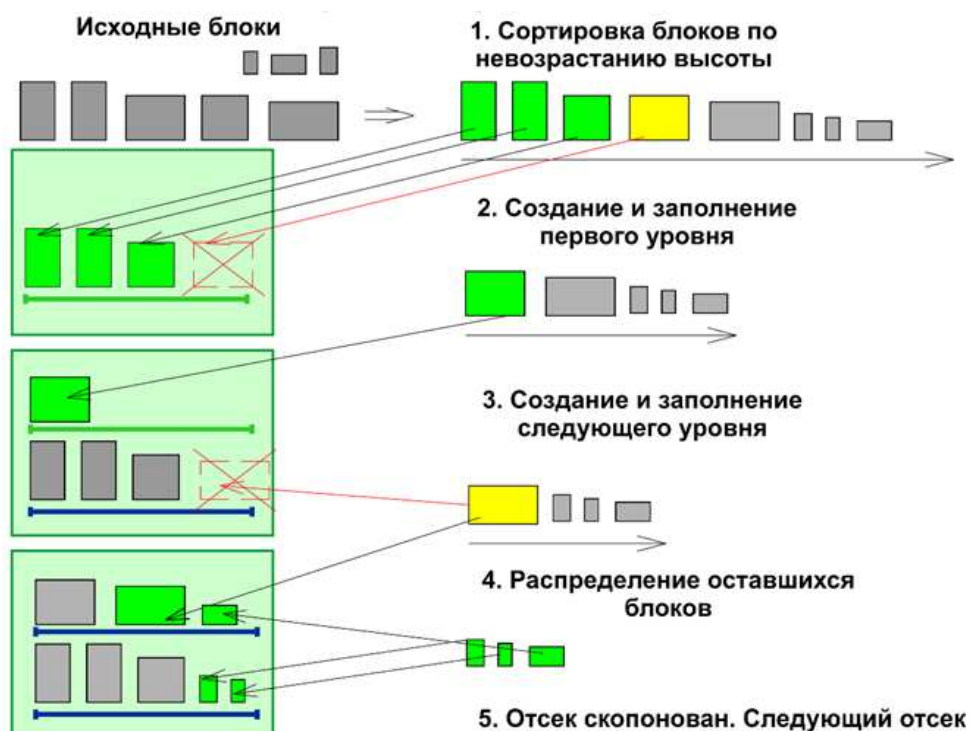


Рис. 16 – Принцип работы алгоритма FFDH

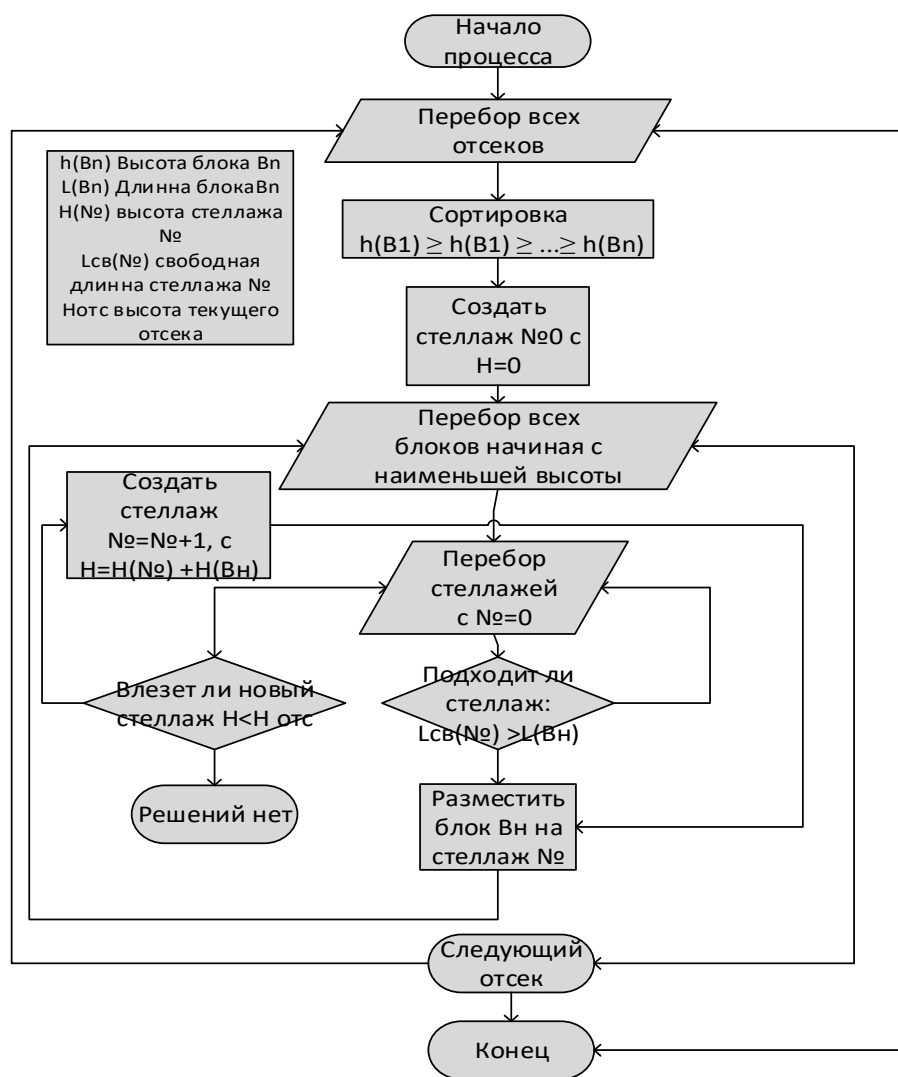


Рис. 17 – Алгоритм решения плоского этапа

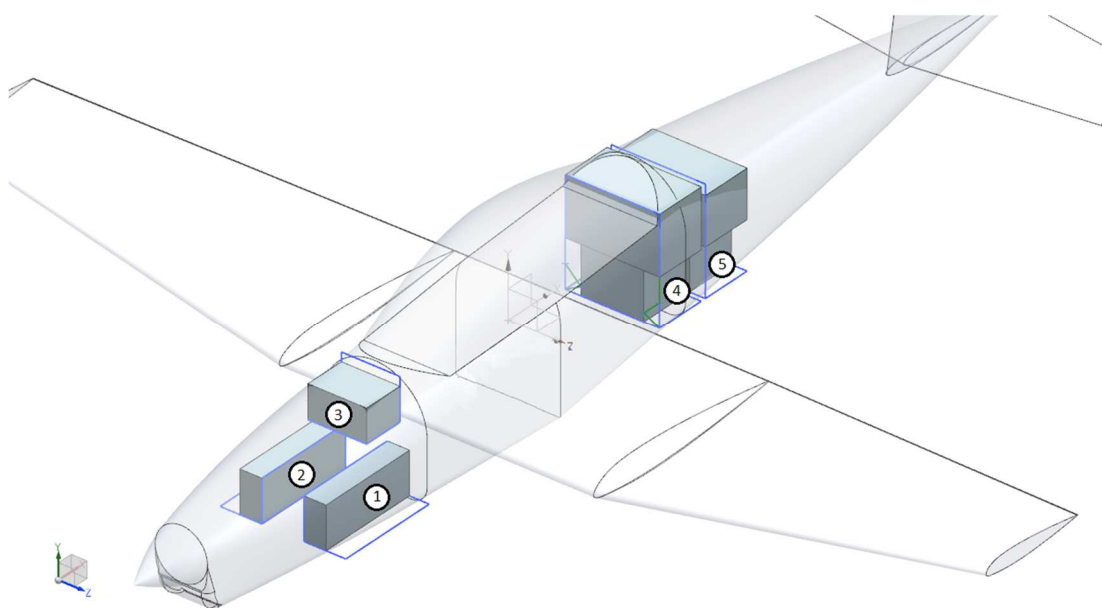
**Четвертая глава** посвящена верификации, тестированию и апробации разработанного ПО. Подтверждение работоспособности методики и программной реализации производилось с помощью решения контрольных задач, очевидных и понятных естественному интеллекту.

Были выбраны 3 задачи:

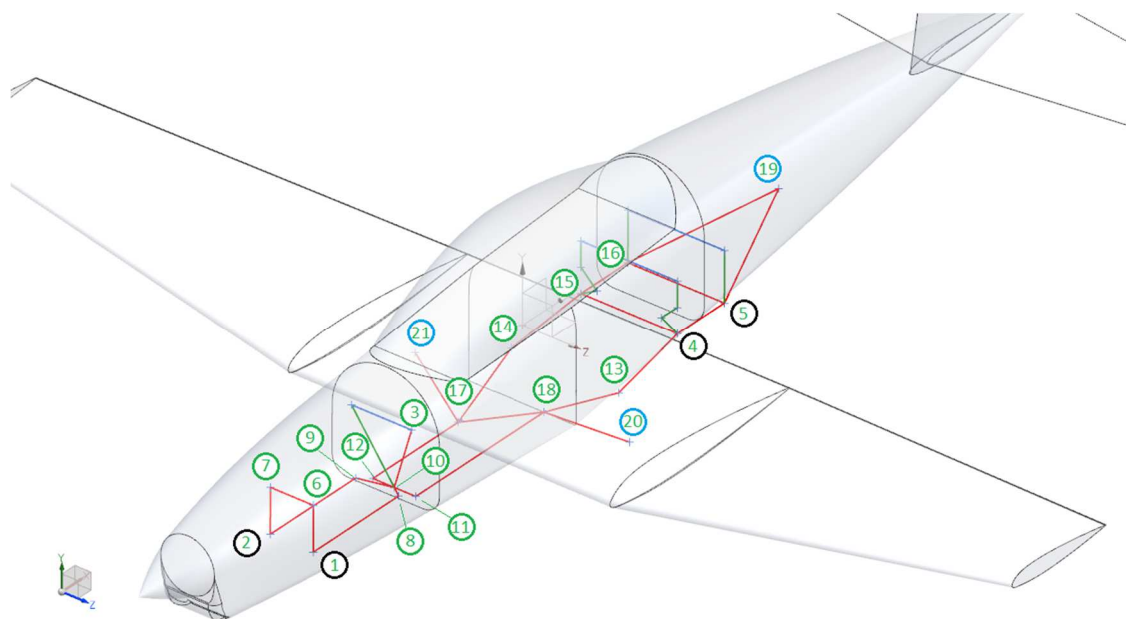
1. *Трассировка маршрутов кабельной сети по зонам разрешенных проходов.* Задача показывает корректность работы алгоритма трассировки, способность его находить как кратчайший путь, так и правильность решения в целом. Состоит из графа, в котором 5 конечных точек (точечных источников). Задача алгоритма проложить путь и рассчитать длину для 5-ти жгутов из разных точек.

2. *Компоновка типовых блоков в плоскости отсека (2D постановка).*  
Задача показывает корректность упаковки в полуограниченную полосу. Состоит из 1-го отсека, в котором размещаются 11 типовых блоков. Задача алгоритма упаковать блоки и найти минимальную высоту.
3. *Распределение блоков по отсекам исходя из минимума межотсечных коммуникаций (1D постановка)* – состоит из 4-х отсеков, соединенных паутиной, а также 8-ми связанных между собой блоков. Задача алгоритма распределить таким образом блоки, чтобы масса межотсечных связей был минимальна.

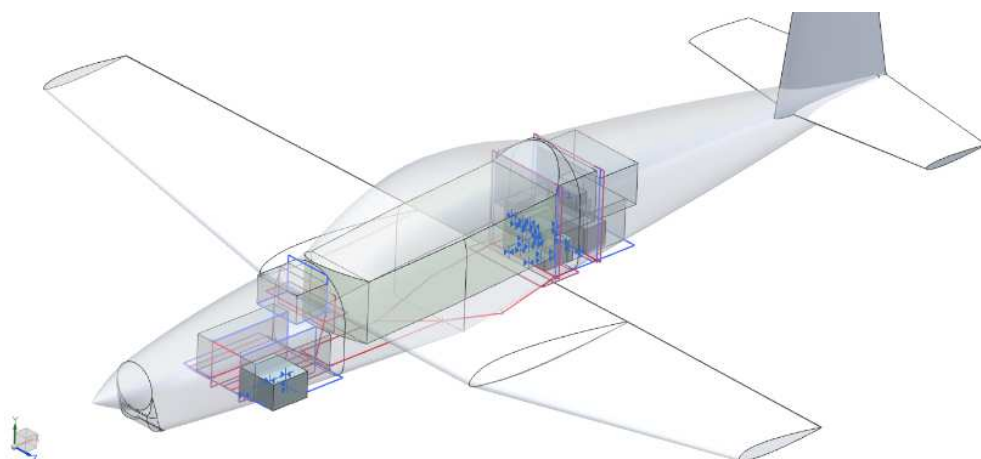
Тестирование проводилось на компоновке условного учебно-тренировочного самолета. Размерность данной задачи сопоставима с реальными объектами. Схематичное изображение расчетной модели отсеков приведена на рис. 18, схема коробов коммуникаций – на рис. 19. Пример решения – на рис. 20. На рисунках красными линиями обозначены зоны прохода жгутов, зеленым – обычные точки, голубым – точки доступа к оборудованию в ОЧК и антеннам в ХЧФ, черным – точки входа в отсек, а серыми параллелепипедами – резервируемые объемы отсеков или блоков.



*Рис. 18 – Технические отсеки расчетной модели*



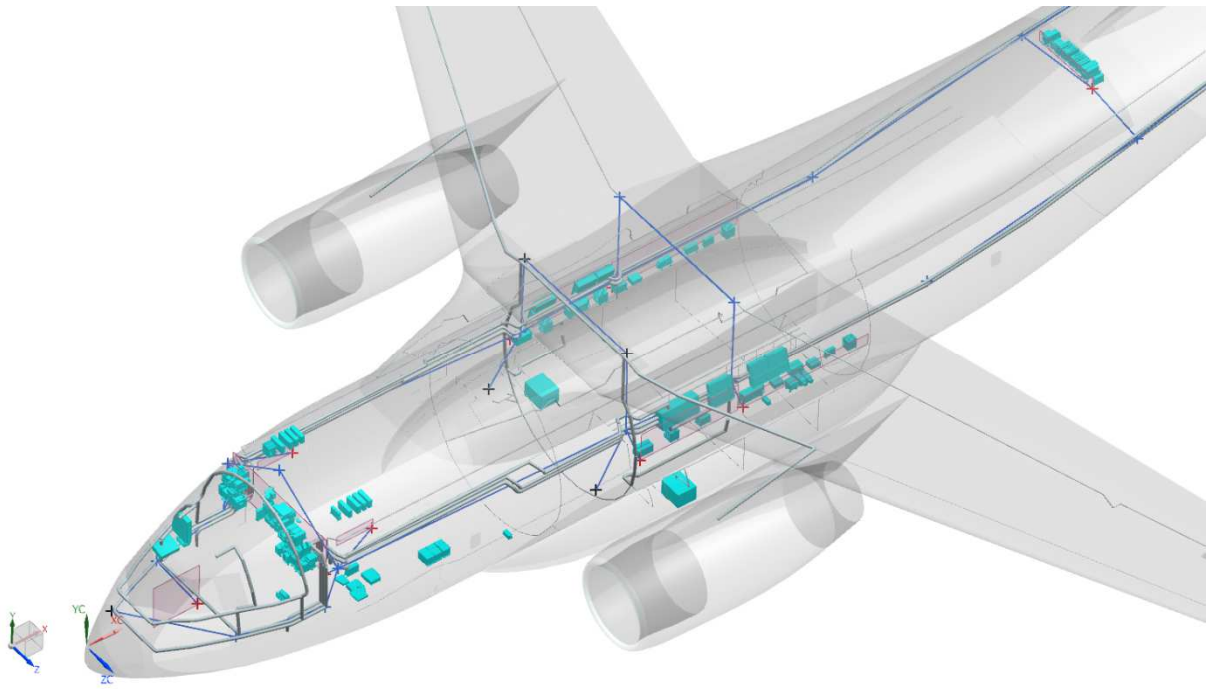
*Рис. 19 – Стеллажи и короба коммуникаций расчетной модели*



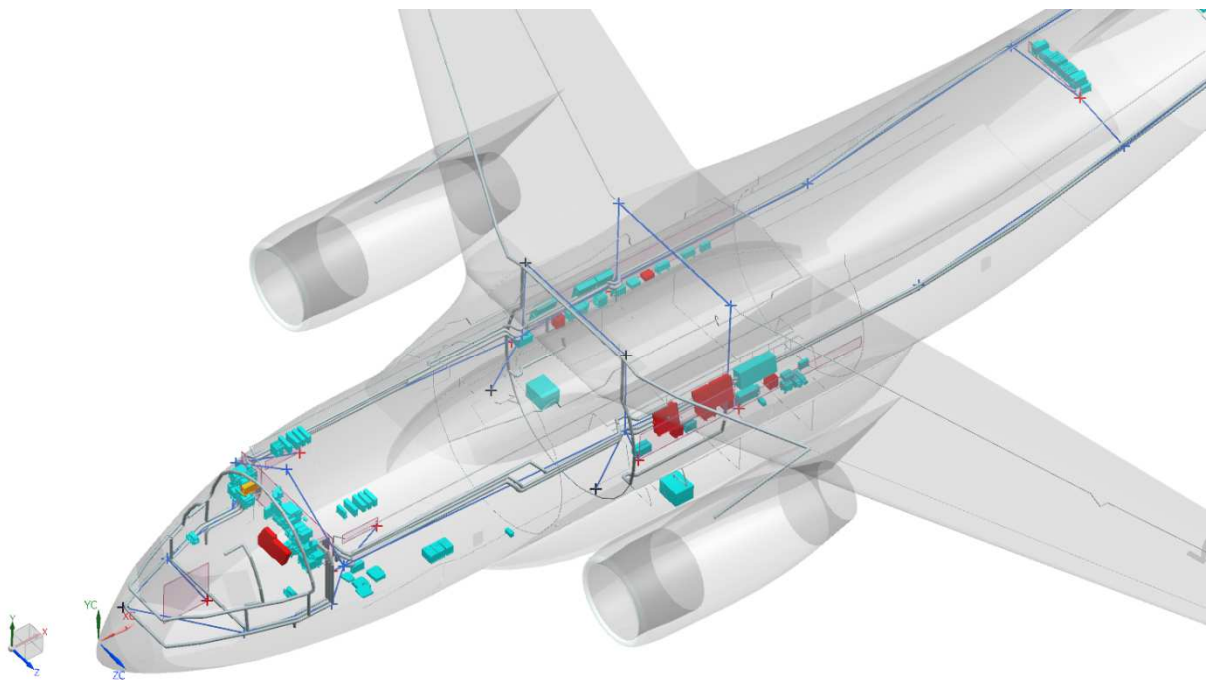
*Рис. 20 – Наилучший вариант компоновки БРЭО для 1-го тестового случая*

Апробация разработанной методики проведена на авиационном предприятии при разработке эскизного проекта перспективного среднего транспортного самолета. Получен акт внедрения. На рис. 21 и 22 представлены базовый и оптимизированные компоновки БРЭО. Оптимизированный вариант был успешно скомпонован. Суммарный коэффициент оптимальности компоновки по отсекам незначительно улучшился относительно базового варианта (~ 2...3%). За счет перестановки 11-ти блоков удалось сократить длину связей на 37%.

Тестирование всех вышеописанных способов АК БРЭО проводилось на ЭВМ, оснащенной центральным процессором Intel 3940QM (3,6 ГГц) с 32Гб оперативной памяти под управлением ОС Microsoft Windows 7.



*Рис. 21 – Базовый вариант компоновки перспективного транспортного самолета*



*Рис. 22 – Оптимизированный вариант компоновки перспективного транспортного самолета*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика поэтапного решения задачи АК БРЭО, между которыми проводится процедура отбора человеком. Этапы методики:

– одномерный: нахождение всевозможных вариантов распределения блоков по отсекам с последующим ранжированием по массе межотсечных связей;

– плоский: каждый отобранный вариант компоуется в плоскостях отсеков с последующей переоценкой, что позволяет получить решение с трехмерными координатами.

Кроме этого необходимо отметить:

1. Проведен анализ существующих методов решения задачи АК БРЭО по результатам которого отмечено, что реализованные алгоритмы (эвристические, аналитические, комбинаторные) не учитывают достижения научно-технического прогресса, не отвечают современным требованиям и не могут быть оперативно модифицированы для решения реальных задач.

2. Выполненный в работе анализ размещения блоков БРЭО на современных самолётах показал, что большинство блоков БРЭО стандартизированы по размерам и размещаются с учётом ограничений в стеллажах (плоскостях) на линейных направляющих с дискретным шагом, а коммуникации прокладываются в заранее отведенных зонах.

3. На основании ограничений и особенностей процесса компоновки предложен новый способ представления трехмерной компоновки как множества плоскостей, соединенных зонами прохода жгутов. Блоки представлены плоскостями и размещаются в плоскостях отсеков. При этом показано, что можно упростить и далее до одномерной модели.

4. Математически задача АК БРЭО сформулирована как многокритериальная задача оптимизации. В работе показана связь задачи компоновки БРЭО с типовыми задачами комбинаторной оптимизации, такими как задача о рюкзаке, трассировка на графах и упаковка в полуограниченную полосу. Поэтому для ее решения выбраны методы из данной области.

5. Создан общий алгоритм поэтапного решения задачи, который основан на известных алгоритмах комбинаторной оптимизации (ветвей и границ для задачи о рюкзаке, алгоритм Дейкстры для трассировки на графах и FFDH для упаковки в полуограниченную полосу).

6. Реализована технология поэтапного решения задачи АК БРЭО и трассировки коммуникаций в программе на C++. Корректность работы ПО и заложенных в него алгоритмов подтверждена решением верификационных задач.

7. Разработаны верификационные задачи, сложность которых позволяет вручную гарантированно найти наилучшее решение. Решение данных задач показало корректность работы ПО и заложенных в него алгоритмов.

8. Решена практическая задача по компоновке блоков БРЭО транспортного самолёта, результат решения которой по массе межотсечных связей на ~37% лучше человеческого решения, что подтверждено актом реализации.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

- 1 Клягин, В.А., Петров, И.А., Шкурин, М.В. Анализ размещения блоков бортового радиоэлектронного оборудования на самолетах / В.А. Клягин, И.А. Петров, М.В. Шкурин // Труды МАИ. – 2017. – № 95. – 22 с.
- 2 Петров, И.А., Клягин, В.А. Дискретная модель компоновки БРЭО для ранних этапов проектирования ЛА/И.А. Петров, В.А. Клягин // Полет. – 2017. – № 9.
- 3 Петров, И.А., Клягин, В.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 /И.А. Петров, В.А. Клягин, С.А. Серебрянский, Д.А. Лаушин // Вестник ПНИПУ. – 2018. – № 54.

### ***Статьи в других изданиях:***

- 1 Клягин, В.А., Петров, И.А. Математическая модель для автоматизированной компоновки блоков бортового радиоэлектронного оборудования на ранних этапах проектирования ЛА / В.А. Клягин, И.А. Петров / в сб.: Гагаринские чтения – 2016 XLII Международная молодежная научная конференция: сборник тезисов докладов. Том 3. – М.: МАИ. – 750 с.
- 2 Петров, И.А., Клягин, В.А. Оптимизация методики автоматизированной компоновки блоков БРЭО в 1D постановке за счёт отсечения по предельной длине межотсечных коммуникаций / В.А. Клягин, И.А. Петров // Гагаринские чтения XLIV Международная молодежная научная конференция: сборник тезисов докладов. Том 1. – М.: МАИ, 2018. – 393 с.
- 3 Клягин, В.А., Петров, И.А. Выбор критериев для решения задачи АК БРЭО / В.А. Клягин, И.А. Петров / в сб.: 14-я Международная конференция «Авиация и Космонавтика-2015». – М.: Люксор, 2015. – 520 с.