

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Петров Иван Алексеевич

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

Специальность: 05.07.02 - Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Клягин Виктор Анатольевич

кандидат технических наук, доцент

Москва 2019

## Оглавление

Введение.....	4
1 Анализ задачи и текущего состояния проблемы автоматизации компоновки оборудования современных ЛА.....	10
1.1 Связь компоновки бортового радиоэлектронного оборудования и проектирования самолета.....	10
1.2 Формализация процесса компоновки ЛА.....	11
1.3 Математическая постановка задачи.....	14
1.4 Выбор основных методов решения.....	17
1.5 Постановка задачи на исследование.....	24
2 Разработка методики автоматизированного решения задачи компоновки радиоэлектронного оборудования.....	27
2.1 Анализ существующих ограничений при компоновке бортового радиоэлектронного оборудования для разработки дискретной модели.....	27
2.2 Дискретная модель компоновки радиоэлектронного оборудования.....	28
2.3 Анализ применимости разработанной модели.....	33
2.4 Методика автоматизированного решения задачи компоновки радиоэлектронного оборудования.....	35
2.5 Связь с задачами комбинаторной оптимизации.....	45
3 Алгоритм автоматизированной компоновки бортового радиоэлектронного оборудования и его программная реализация.....	48
3.1 Общий алгоритм поэтапного решения решения.....	48
3.2 Алгоритм первого этапа.....	48
3.3 Алгоритм второго этапа.....	53
3.4 Программная реализация.....	61
4 Тестирование, верификация и апробация.....	70
4.1 Описание верификационных задач.....	71
4.2 Тестовые задачи.....	94
4.3 Апробация на реальной задаче.....	103
Заключение.....	109
Список литературы.....	111
Приложение А. Акт внедрения.....	124
Приложение Б. Координаты точек трассировки для тестовых задач.....	125

Приложение В. Списки блоков для тестовых задач .....	128
Приложение Г. Списки связей для тестовых задач .....	130
Приложение Д. Отсеки для тестовых задач .....	134
Приложение Е. Эталонные решения 1го этапа для тестовых задач .....	136
Приложение Ж. Эталонные решения 2го этапа для тестовой задачи №4.....	139
Приложение И. Пример реализации Journal файла .....	140

## Введение

### *Актуальность темы исследования*

Задача компоновки блоков оборудования самолета является важной частью создания ЛА. Трудоёмкость её решения возрастает с ростом сложности и числа систем размещаемого на нем оборудования, например, из [66] можно проследить, что среднее количество блоков БРЭО на современных самолетах увеличилось в 1,5 - 2 раза по сравнению с самолетами 50-х годов.

При выполнении компоновки элементов БРЭО вручную можно отметить:

- результат работы сильно зависит от квалификации и личных качеств компоновщика;
- высокая трудоёмкость и низкая производительность ручного труда, что ограничивает количество прорабатываемых вариантов.

Автоматизация данного процесса помимо устранения вышеуказанных недостатков также может предоставить конструктору возможность выбора среди значительно большего числа конкурирующих вариантов компоновки и провести детальное сравнение между ними, тем самым значительно повысив качество и совершенство разработанного конструкторского решения.

### *Степень разработанности темы*

Разработке теоретических аспектов автоматизации процесса компоновки ЛА и размещения БРЭО посвящено большое количество работ среди которых необходимо отметить школы под руководством: проф. каф. 101 Мальчевского В.В. по направлению матрично-топологической компоновки [73, 74, 89, 90, 91, 92 и др.] и проф. каф. 904 Маркина Л.В. на основе использования рецепторных моделей для компоновки БРЭО и трассировки жгутов [75, 76, 77, 10, 69, 70, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 102, 103, 104, 68, 67, 113, 114, 115, 15]. Кроме того, многие др. ученые из МАИ рассматривали данную тему в работах [14, 22, 45, 44, 49, 50, 51, 20, 21, 31, 34, 100, 93 и др.]. Далее необходимо отметить Харьковскую школу раскрытия-упаковки на базе годографа плотного размещения академика Ю. Г. Стояна: Н. И. Гиль и др. на

базе Института проблем машиностроения НАН Украины [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 38, 39, 16, 17 и др.]. Большой вклад в вопросы компоновки БРЭО внес Л.Л. Кербер [63], систематизировавший основные требования и способы установки оборудования, что позволило в будущем создать ряд эвристик. Среди работ по авиационной тематике необходимо упомянуть Проф. СГАУ Гаврилова В.Н. [32, 33], который рассмотрел способы автоматизации компоновки отсеков сложной формы.

Однако данные работы не учитывают требований современных стандартов, а также возможность снижения стоимости эксплуатации за счет рационального размещения оборудования, обеспечивающего удобство обслуживания блоков БРЭО.

Помимо представителей авиационной отрасли, вопросами компоновки занимались:

- школа Э. А. Мухачевой: В. В. Мартынов, М. А. Верхотуров, В. М. Картак, Валеева А.Ф. [78, 79, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 62, 23] на базе Уфимского государственного авиационного технического университета;
- школа Егорова С.Я. [46, 47, 48] в сфере компоновки цехов;
- школа Канторовича Л.В. [59, 60, 61] в области компоновки заготовок и раскроя материала;
- работы ученых ИТК РАН (г. Минск) в области компоновки печатных плат и радиоэлектронных компонентов [35, 36, 37, 52, 53, 54, 55 и др.];
- Петренко А.И. [94, 95] и др.;
- Руднев А.С. [99] в части двумерной упаковки в полосу.

В процессе анализа литературы было выявлено, что существуют задачи, смежные с автоматизацией компоновки БРЭО. Их можно разделить на две основных группы: производственные (компоновка печатных плат, раскрой материала и др.) и из области комбинаторной оптимизации (упаковка 1D...2D...3D примитивов, размещение объектов сложной формы и т.п.). Изучая эти задачи, необходимо отметить некоторые их приложения. Например, для минимизации

коммуникаций могут быть полезны алгоритмы трассировки печатных плат [18, 19, 56, 57, 58, 71, 72]. Особое место занимают работы математиков и ученых в области комбинаторной оптимизации (КО), т.к. их фундаментальные алгоритмы решения общих задач оптимизированы под использование на ЭВМ, среди которых необходимо отметить работы Martello [2, 7, 8, 11] по решению задач 2х мерной упаковки, Э. Дейкстры [4, 5] в области алгоритма трассировки и ряда других иностранных авторов [1, 3, 6, 9].

Данные труды достаточно хорошо рассматривают типовые задачи компоновки и предлагают оптимальные для ЭВМ алгоритмы их решения, однако они не учитывают особенности компоновки блоков БРЭО на ЛА.

### *Цели и задачи исследования*

*Целью* данной работы является разработка методики автоматизированной компоновки БРЭО и трассировки коммуникаций на ранних этапах разработки ЛА (аванпроект и эскизно-технический проект) 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;

В результате разработанная методика может стать основой для создания ПО, позволяющего на этапах аванпроекта и эскизно-технического проекта (ЭТП) автоматизировать часть работы конструктора, сократит время на разработку вариантов компоновки, увеличит число прорабатываемых вариантов компоновки, и как следствие – повысит качество компоновки.

### ***Научная новизна***

*Научная новизна* заключается в разработке новой методики автоматизированного решения задачи компоновки блоков БРЭО, основой которой является декомпозиция процесса на два основных этапа (одномерный и плоский), между которыми возможен отбор решений человеком. При этом, впервые показана связь каждого из этапов несколькими типовыми задачам комбинаторной оптимизации, что дает возможность выбрать наиболее рациональные из существующих алгоритмов и применить их.

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

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

*Практическая значимость* следует из разработанных алгоритмов решения задачи АК БРЭО и реализации их в ПО, которое позволяет на ранних этапах проектирования ЛА:

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

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

Кроме того, 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 бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) летательных аппаратов (ЛА) и трассировка коммуникаций между ними.

**Предмет исследования:** методика автоматизации компоновки блоков БРЭО и трассировки коммуникаций на ранних этапах создания ЛА (этапы аванпроекта и эскизно технического проекта) и их оптимизация по критериям минимума массы и использованию внутреннего объема отсеков под размещение блоков БРЭО

Для выполнения вышеуказанных задач в ходе исследования широко применялось моделирование, формализация, декомпозиция, методы поэтапного решения и последовательных приближений, на основании чего приведено к типовым задачам комбинаторной оптимизации, для решения которых используются специализированные методы комбинаторной оптимизации, например, метод ветвей и границ.



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

1. Дискретная модель компоновки БРЭО, в которой ее можно представить как размещение 2х мерных объектов (лицевая поверхность блока) на плоскостях (лицевая поверхность отсека), расположенных в трехмерном пространстве. При этом межотсечные коммуникации размещаются в зонах прохода электрожгутов, представляемые в виде графа.
2. Методика автоматизированной компоновки БРЭО и трассировки коммуникаций, основанная на предложенной дискретной модели. Особенностью является то, что она состоит из двух этапов (одномерный и плоский), между ними осуществляется отбор человеком;
3. Связь задачи АК БРЭО с задачами 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***

Работа имеет достаточную апробацию, ее результаты были опубликованы в научных трудах МАИ [66], журнале «Полет» [96], а также «Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника» [98]. Указанные журналы входят в перечень ВАК.

Работа рассмотрена и получила положительный отзыв на 3х конференциях [97, 64, 65], научных семинарах кафедры 101 МАИ.

Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы на ПАО «Ил», который подтверждает её практическую ценность.

# 1 Анализ задачи и текущего состояния проблемы автоматизации компоновки оборудования современных ЛА

## 1.1 Связь компоновки бортового радиоэлектронного оборудования и проектирования самолета

По определению в [14], компоновка – конструкторский документ, показывающий расположение всех элементов ЛА относительно друг друга.

Также под компоновкой (решением задачи компоновки) часто подразумевается процесс нахождения расположения элементов, удовлетворяющих заданным критериям. В нем можно выделить 3 основных взаимосвязанных подпроцесса, проходящих параллельно. Их результатами является аэродинамическая компоновка (определяет внешнюю поверхность ЛА), объемно-весовая компоновка (ОВК) (определяет расположение внутренних элементов, за исключением силового набора), а также конструктивно-силовую схему (обеспечивает внешнюю поверхность, а также поддерживает агрегаты систем, грузы и т.п.). Компоновка БРЭО является подпроцессом ОВК наряду с компоновкой топлива, грузов, систем и т.д. (рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Место компоновки БРЭО

Процессы компоновки БРЭО наиболее активно выполняются на этапах проектирования ЛА (особенно – ЭТП, в чуть меньшей степени – на РКД). Далее компоновка выполняется по необходимости при различных доработках ЛА.

Для выполнения процесса компоновки БРЭО необходимо решить следующие задачи: (рис. 1.2)



Рис. 1.2 – Задачи при компоновке БРЭО

## 1.2 Формализация процесса компоновки ЛА

Место и схема процесса создания компоновки для ранних этапов приведена на рис.1.3. Входами в данный процесс являются результаты процессов по разработке состава БРЭО (одномерный документ), а также определения зон для размещения БРЭО на основании анализа ЭМ поверхности ЛА (результат аэродинамической компоновки) и ЭМ конструктивно-силовой схемы. Результат процесса компоновки используется далее как исходные данные при создании ЭМ и выполнении всего этапа ОКР.

Процесс разработки директивной компоновки состоит из 3х подэтапов:

- разработка резервируемого пространства под блоки БРЭО – отдел главного конструктора обозначает поверхностями предполагаемую зону размещения каждого блока;
- разработка ЭМ установки – отдел БРЭО выполняет ЭМ установки каждого блока на основании зарезервированного под них пространства;
- проверка/анализ ЭМ компоновки – выполняется проверка и оценка разработанной ревизии и принимается решение о возможности

использовании этого варианта, а также определяется необходимость следующей итерации.

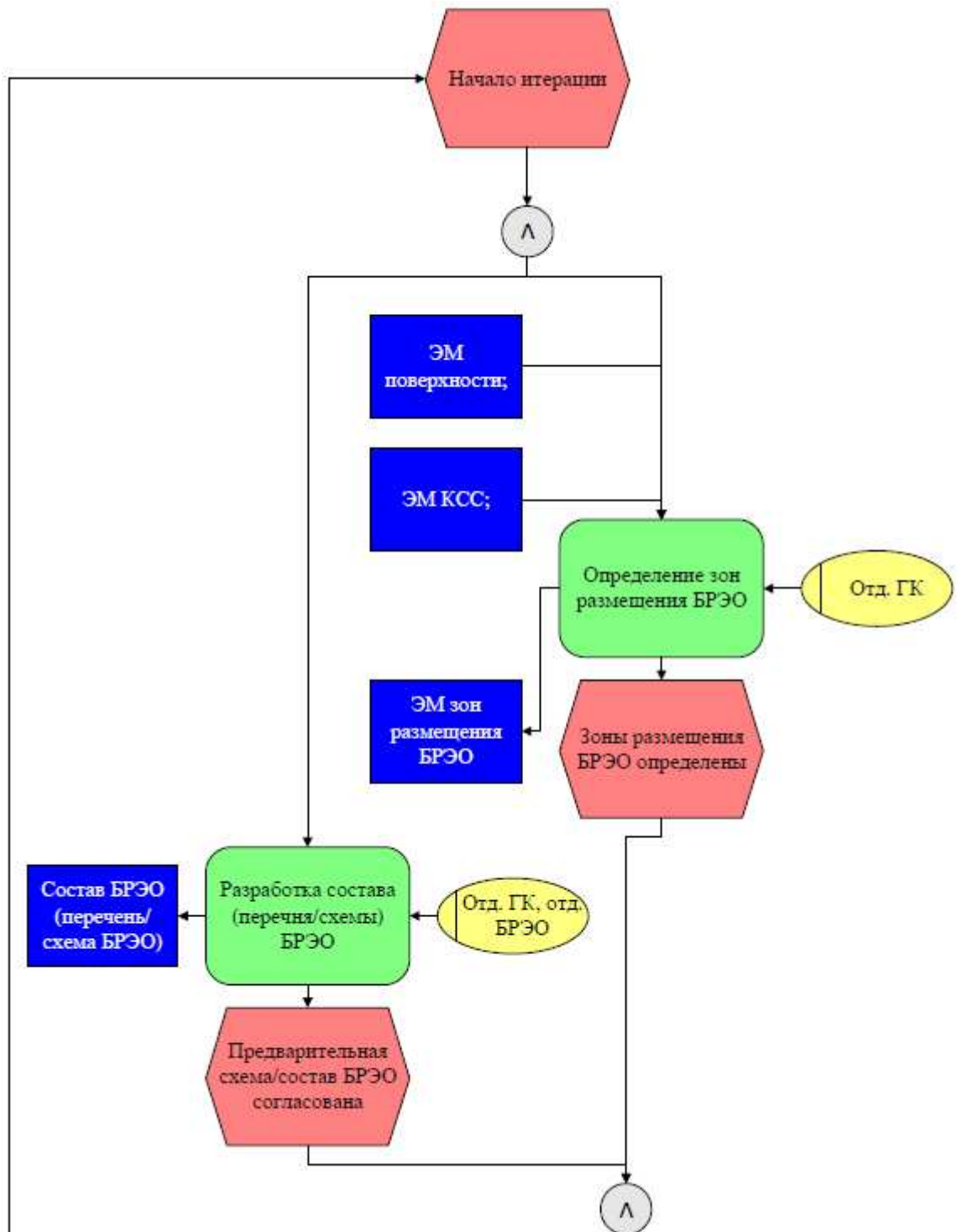


Рис. 1.3 а) – Схема процесса компоновки (1/2)

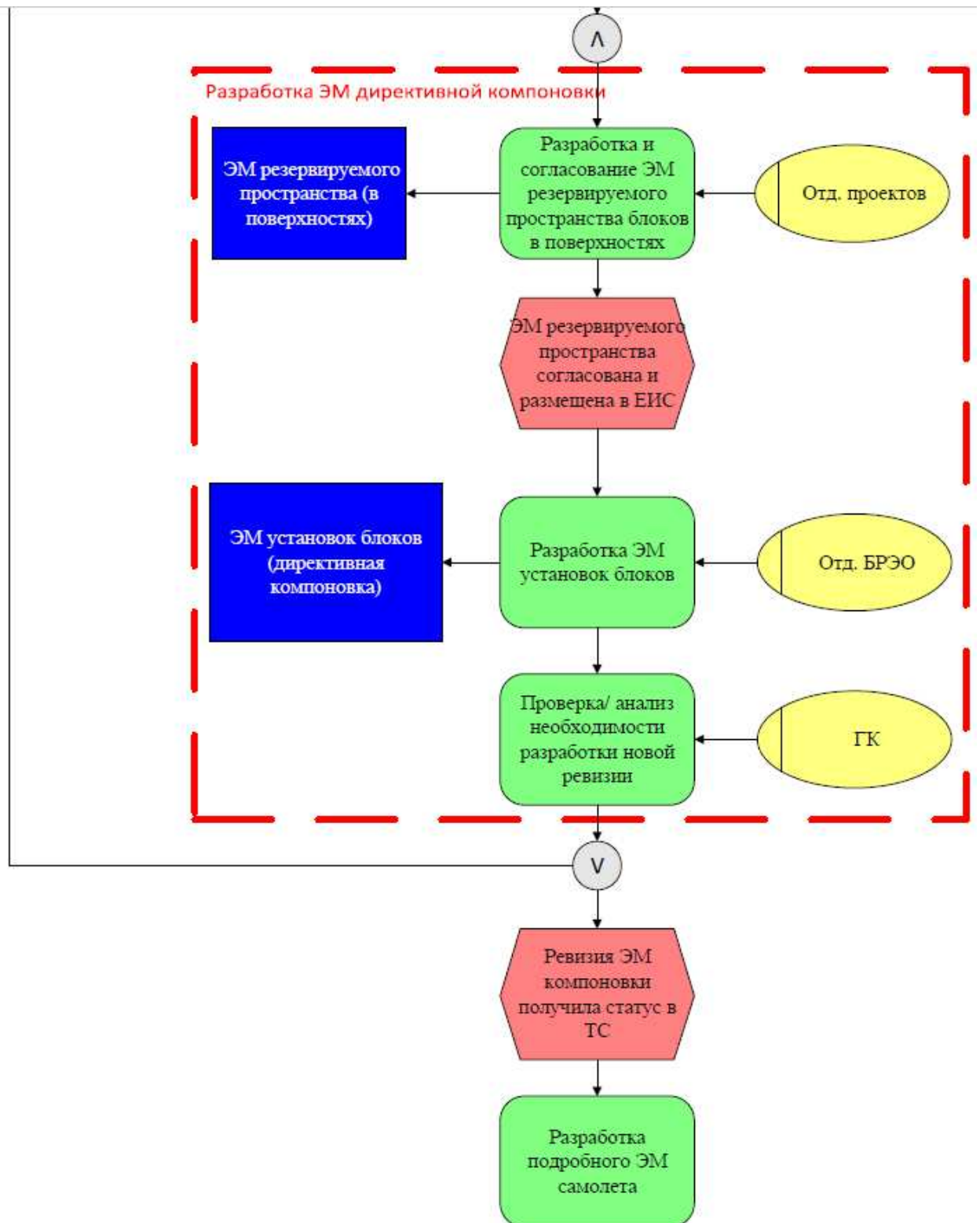


Рис. 1.3 б) – Схема процесса компоновки (2/2)

Процесс разработки директивной компоновки является итеративным, причем в рамках итерации выполняются также обновление перечня БРЭО и мест под его размещение. Процесс характеризуется большим количеством итераций (например,

по причине изменения исходных данных или в связи с развитием других составляющих проекта), а также частым недостатком информации и большим количеством допущений.

Все это объясняет высокую актуальность автоматизации с помощью ЭВМ. Однако, в данный процесс входят операции с эвристиками высокой сложности, что затрудняет его автоматизацию. Поэтому целесообразно создавать «калькулятор» компоновочных решений в помощь человеку, а не на его замену.

### 1.3 Математическая постановка задачи

При автоматизированном размещении блоков БРЭО  $B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_m\}$ , где  $n \in N$  с набором параметров  $\Psi_b$ , соединенных множеством связей между блоками  $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_l\}$ , где  $l \in N$  с набором параметров  $\Psi_c$  на ранних этапах создания ЛА принимается, что аэродинамическая и конструктивно-силовая компоновка заданы, топливо, кабина экипажа и пр. составляющие элементы ОВК не меняются, т.е. есть множество областей  $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_m\}$ , где  $m \in N$  с набором параметров  $\Psi_a$ .

При этом, все элементы и области являются трехмерными объектами, т.е.  $\forall A_m \subset R^3$  и  $\forall B_n \subset R^3$ . Принимается, что область  $\Omega = \sum_1^{m=m} A_{mm}$  является суммой всех областей  $A$ .

Набор параметров для блока  $\Psi_b$  включает, как минимум, следующие:

- $\bar{P}(B_n) \in R^3$  - вектор смещения центра объекта  $B_n$  относительно начала СК
- $\bar{O}(B_n) \in R^3$  - ориентация объекта  $B_n$  по 3 осям относительно центра самого объекта.
- $\bar{G}(B_n) \in R^3$  - размеры объекта  $B_n$  относительно центра самого объекта
- допустимое воздействие  $Z^{b_n}$ ;

- тепловыделение блока  $QT_n$ ;
- класс ЭМС совместимости  $Eb_n$ ;

Набор параметров области  $\Psi_a$  включает минимум следующие:

- $\bar{P}(A_m) \in R^3$  - вектор смещения начальной точки области  $A_m$  относительно начала СК
- $\bar{G}(A_m) \in R^3$  - размеры области  $A_m$ , заданные множеством точек;
- $\bar{O}(A_m) \in R^3$  Ориентация области  $A_m$  по 3 осям относительно начальной точки;
- $L = \{L(A_m; A_1), L(A_m; A_2), L(A_m; A_3) \dots L(A_m; A_{m-1})\}$  - Массив минимальных расстояний от области  $A_m$  до всех областей по разрешенным зонам прокладки жгутов;
- воздействие в отсеке  $Z^a_m$ ;
- класс воздействия по ЭМС  $Ea_m$ ;
- допустимое количество тепла  $QT_{\max_m}$ ;

Набор параметров  $\Psi_c$  для связи между блоками:

- $B_{st}$  – номер начального блока
- $B_{fin}$  – номер конечного блока
- $m_L$  - погонная масса связи

Тогда задача АК БРЭО может быть сформулирована следующим образом:

необходимо найти такое расположение блоков БРЭО  $\bar{P}(B_n) \in R^3$  и ориентацию  $\bar{O}(B_n) \in R^3$ , чтобы функция цели была максимальна (аддитивный критерий согласно [64]):

$W_{\text{э к в}} = \sum_{i=1}^f \lambda_i K_i$ , где  $\lambda_i$  - весовые множители, которые определяются для конкретной целевой функции, а  $K_i$  – значение целевой функции (количественный критерий), выбранные для оценки компоновки,  $f$  – число целевых функций

При этом выполнялись следующие *ограничения*:

1. Все варьируемые элементы размещались внутри отведенных зон для компоновки,  $\forall B_b \Delta \Omega = \emptyset$ , где  $b \in [1, n]$

2. Ни один из них не пересекался с граничными условиями или другими элементами

$$\forall B_i \cap \forall B_j = \emptyset, \text{ где } i \in ([1, n]) \& (j \in [1, n])$$

3. Воздействия в отсеке (вибрация, электромагнитная совместимость и др.) не превышают максимальных значений для функционирования блока, размещенного в этом отсеке

$$K_{\text{доп1}}(B_n) > K_{\text{возд1}}(A_m), \text{ причем: } (\forall n=1, n) \& (B_n \cap A_m)$$

$$K_{\text{доп2}}(B_n) > K_{\text{возд2}}(A_m), \text{ причем: } (\forall n=1, n) \& (B_n \cap A_m)$$

....

$$K_{\text{доп } i}(B_n) > K_{\text{возд } i}(A_m), \text{ причем: } (\forall n=1, n) \& (B_n \cap A_m)$$

4. Суммарное тепловыделение в отсеке не превышает макс. для любого отсека с номером  $m$ :

$$QT_{\text{max } m} < \sum_{i=1}^n QT_n$$

В качестве составляющих целевой функции предлагаются следующие:

$K_1$  - масса межотсечных коммуникаций была минимальной. Согласно [91] может быть представлена:

$$\Phi = \sum_{n=1}^3 m_n(X), \text{ где } m_1(x) - \text{масса жгутов БРЭО } (m_{\text{жг}});$$



Масса жгутов БРЭО может быть представлена следующим образом:

$$m_1 = K_{\text{тех}} \sum_{u=2}^m \sum_{j=1}^{i-1} (g_{ij} |U_i - U_j|) \quad , \quad \text{где } K_{\text{тех}} - \text{технологический коэффициент,}$$

учитывающий особенности прокладки и монтажа коммуникаций (для маневренного самолета  $K_{\text{тех}} \geq 1,3$ );

$g_{ij}$  – погонная масса конструкции между блоками  $i$  и  $j$ ;

$U_i U_j$  – векторы, определяющие координаты блоков

$n$  – число блоков БРЭО на борту ЛА.

$K_2$  - коэффициент оптимальности компоновки

Оценку по коэффициенту оптимальности компоновки можно представить:

$$\Phi = C \cdot \sum_{i=1}^n K_n \cdot \text{где: } \sum_{i=1}^n K_n \cdot \text{суммарное количество дополнительных}$$

эталонных блоков, которые можно разместить в рассматриваемой компоновке;

$C$  – статистический коэффициент, учитывающий ценность критерия свободного объема.

Таким образом, данная задача является оптимизационной и сводится к нахождению условия экстремума функции, а в случае дискретизации переменных – задачей комбинаторной оптимизации.

#### ***1.4 Выбор основных методов решения***

Выше было показано, что особенностью процесса размещения БРЭО является допущение, что аэродинамическая и конструктивно-силовая компоновка заданы, топливо, кабина экипажа и пр. составляющие элементы объемно-весовой компоновки (ОВК) не меняются, а варьируется только расположение блоков БРЭО и размещения коммуникаций.

Тогда в случае представления автоматизированной компоновки как дискретной задачи и применении методов КО существует конечное число всех возможных комбинаций размещения блоков, которое слишком велико для ручной проработки. Необходим полный перебор, т.к. эвристики могут пропускать наилучшие решения из-за сложности описания правил и граничных условий.

Отсюда следуют *основные требования* к разрабатываемой методике:

- полный перебор всех вариантов для гарантии наилучшего решения;
- разбиение на этапы с возможностью промежуточного контроля и корректировки человеком, т.к. количество вариантов слишком велико, а большинство из них явно неоптимальны.

Методика также должна удовлетворять следующим требованиям:

- выдавать в результате отранжированное множество решений;
- выполнять отсев невозможных комбинаций;
- высокая стабильность;
- высокая скорость;
- возможность уточнять по ходу работы граничные условия и критерии.

Для КО существует классификация [87] типовых методов по точности полученного результата:

- точные (например, полный перебор и его вариации);
- приближенные (жадные, эвристические, стохастические и др. алгоритмы);
- комбинированные (например, генетические алгоритмы)

Кроме того, КО есть частный случай оптимизации, к ней могут быть применимы методы и принципы общей оптимизации.

*Точные методы* всегда находят наилучшее решение, т.к. по сути являются вариациями полного перебора, т.е. перебирают все возможные варианты, кроме заведомо невозможных.

Полный перебор заключается в переборе всех возможных вариантов и по определению не может пропустить лучшее решение, однако время работы растет экспоненциально размерности и для задач АК недопустимо велико.

*Метод ветвей и границ* (МВиГ) (англ. branch and bound) [7] — общий алгоритмический метод решения различных задач оптимизации, наиболее эффективный в области дискретной (комбинаторной оптимизации) [87]. Если говорить точнее, то МВиГ представляет собой развитие полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, которые заведомо не оптимальны.

Рассмотрим суть МВиГ на примере (Рис. 1.4) поиска минимума функции  $f(x)$  на множестве допустимых значений (ОДЗ) переменной  $x$ . Для применения МВиГ ОДЗ разбивается на подобласти, после чего их необходимо декомпозировать на еще меньшие подобласти, и т.д. пока это возможно. Иными словами, процесс декомпозиции ОДЗ выполняется рекурсивно. Важно отметить, что при это строится граф возможных вариантов, причем каждая подобласть ОДЗ соответствует узлу графа. Таким образом, новые уровни графа появляются при декомпозиции одной из существующих областей ОДЗ. Если какая-либо ОДЗ не имеет решений, то и ветвление и дальнейшая декомпозиция узла графа и ОДЗ соответственно не осуществляется.



Рис. 1.4 – Пример метода ветвей и границ.

Для задачи о рюкзаке (а также и распределения блоков по отсекам) в качестве ветвления/узлов графа выступает размещение объектов по контейнерам, причем условие перехода на новый уровень – перебор всевозможных положений объекта и переход к перебору следующего. А условие отсека – если хотя бы один из размещенных объектов не удовлетворяет критериям.

Данный метод тоже точно находит наилучшее решение, однако в отличие от полного перебора работает быстрее, но и сложнее в реализации.

Таким образом, МВиГ удовлетворяет поставленным требованиям и его целесообразно рассмотреть.

*Приближённые методы:* Полученное решение может быть не наилучшим, т.к. в отличие от точных, перебирают не все решения. Отсев и выборка производятся по различным критериям.

*Жадный алгоритм* (англ. Greedy algorithm) — общий алгоритмический метод решения задач оптимизации. Метод основан на упрощенном выборе локально оптимальных решений на каждой развилке решений, предполагая, что это локально оптимальное решение также ведет к глобально-оптимальному. Для КО аналогично МВиГ строится граф вариантов решения задачи. Однако, для задач о рюкзаке, которая является подобной задаче размещения блоков по отсекам, выбор локально-оптимального решения на каждой итерации не гарантирует нахождение глобального оптимума. Другими словами, размещение «ценного» блока с большим весом коммуникаций в каком-либо отсеке резко снижает массу связей, но часто это меньше, чем разместить несколько более мелких объектов с меньшей ценностью.

Исходя из определения и особенностей жадного алгоритма, можно заключить, что их применение не удовлетворяет требованиям к решению задачи АК. Об этом также говорит анализ других работ по АК, использующих жадные алгоритмы. Развитие ЭВМ, позволяющее применять точные методы, является одной из причин данной работы.

Однако, необходимо признать, что для задач большой размерности и с чрезвычайно большим временем решения точными методами, жадные алгоритмы могут быть актуальны. Одним из таких примеров является трассировка на графах. По данной группе задач существует множество алгоритмов, доказавших свою эффективность и высокую надежность нахождения точного решения.

*Например: алгоритм Дейкстры, Прима, Крускала и т.п.*

Таким образом, данный метод в общем случае не подходит, кроме частных случаев, таких как например трассировка коммуникаций.

*Эвристический алгоритм* — метод решения оптимизационных задач с применением существующих алгоритмов, основанных на обобщении опыта и других факторов. При этом, корректность алгоритма не доказана для всех возможных случаев, но при этом накоплен достаточный опыт и известно, что он даёт достаточное решение в большинстве случаев. Иными словами, эвристика — это не полностью доказанный и обоснованный, но при этом практически полезный алгоритм.

Эвристический метод часто применяется для задач высокой вычислительной сложности, то есть вместо полного перебора который часто технически невозможен из-за длительности, применяется значительно более быстрый, но недоказанный и необоснованный алгоритм.

Важно понимать, что эвристика, в отличие от корректного алгоритма решения задачи, обладает следующими особенностями:

- не гарантирует нахождение лучшего решения.
- не гарантирует нахождение решения, даже если оно заведомо существует (возможен «пропуск цели»);
- может дать неверное решение в некоторых случаях.

Решение о целесообразности применения эвристического метода для каждой конкретной задачи рационально принимать исходя из соотношения затрат, рисками, статистикой предыдущего использования, потерями в случае ошибки и другими параметрами эвристики. При этом необходимо отметить крайне высокую трудоемкость и риски разработки эвристик для сложных задач, таких как компоновка ЛА. Анализ существующих работ показывает, что задача усложняется быстрее, чем разрабатывается эвристики под нее.

*Метод случайного поиска* – характеризуется применением алгоритмов, варьирование решения у которых осуществляется на основе использования

генераторов случайной величины. Этот метод широко применяется для области нелинейного математического программирования. Он снискал популярность при решении практических инженерных задач, решение которых очень трудоемко и слабо формализуемо. Достоинствами данного алгоритма являются его простота, устойчивость и интуитивная понятность. Недостатками – низкая сходимость, а также тем, что работа по сути своей бесконечна и никогда нельзя выбрать условие останова, гарантирующее точное решение.

Данная группа алгоритмов не удовлетворяет поставленным требованиям, поэтому применение нецелесообразно.

*Генетические алгоритмы* (англ. genetic algorithm) — эвристический метод поиска, использующий механизмы, аналогичные естественному отбору. Варьирование переменных осуществляется методом случайного подбора, комбинирования и вариации искомых величин. Главным отличием генетического алгоритма является упор на использование оператора «скрещивания», позволяющий производить операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой подобна роли скрещивания в природе.

Используется для решения задач по моделированию и оптимизации, с помощью данного вида эволюционных вычислений решаются различные задачи по оптимизации, в том числе с использованием методов естественной эволюции, таких как наследование, мутация, кроссинговер и отбор.

Высокую популярность генетические алгоритмы заработали при решении задач многомерного рюкзака, раскроя и упаковки конструкций сложных форм и т.п. Однако, существует несколько поводов для критики со стороны открытых источников на предмет использования генетического алгоритма в сравнении с другими методами оптимизации:

- каждое решение является оптимальным лишь в сравнении с другими найденными решениями. Как и в алгоритмах случайного поиска, здесь неясны условия останова алгоритма;

- сложность выбора условия для сохранения эволюционировавших частей с высокопригодными решениями от последующей разрушительной мутации, особенно тогда, когда от них необходима хорошая совместимость с другими частями в процессе оценки;
- повторная оценка функции приспособленности (фитнесс-функции) может использовать много ресурсов для решения сложных задач и зачастую является причиной, ограничивающей использование алгоритмов искусственной эволюции. В реальных задачах для произведения необходимых вычислений может потребоваться от нескольких часов до нескольких дней;
- генетические алгоритмы плохо приспособляются под сложность решаемых задач из-за большого количества элементов подверженных мутации при широкой области поиска решений. Это делает применение данной техники крайне трудозатратной при решении реальных задач. Для того чтобы подобные задачи поддавались эволюционным алгоритмам, они должны быть декомпозированы на простейшие представления данных проблем, что возможно не всегда;
- во многих задачах генетические алгоритмы имеют характер сходиться к локальному оптимуму или даже к спорным точкам, вместо глобального оптимума для поставленной задачи. Это значит, что они «не знают», как обеспечить долгосрочную пригодность, путем пожертвования кратковременной высокой пригодностью. Это зависит от формы ландшафта пригодности: отдельные задачи могут иметь выраженное направление к глобальному минимуму, в то время как другие могут быть ориентированы для фитнес-функции на локальный оптимум;

Таким образом, данная группа алгоритмов не удовлетворяет поставленным требованиям, поэтому применение нецелесообразно.

Рассмотрев КО и существующие методы математического программирования, получаем следующую классификацию решения задач КО, приведенную в табл. 1.1

Табл. 1.1 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

По результатам анализа алгоритмов можно сделать следующие выводы:

- выделены общие группы методов решения задач КО;
- данная классификация полна, принципиально других методов на данный момент не известно;
- каждая из этих группы имеет частные методы для решения конкретных типовых задач комбинаторной оптимизации;
- для дальнейшей проработки выбран МВиГ, допускаются жадные алгоритмы.

### 1.5 Постановка задачи на исследование

Основная цель исследования состоит в разработке метода автоматизированного решения проектной задачи АК БРЭО для ранних этапов с применением принципов КО, отвечающего требованиям из п. 1.4. Использование метода позволит достичь следующего эффекта:

- повысить качество компоновки за счет увеличения количества прорабатываемых вариантов компоновочных решений;
- снизить зависимость качества компоновки от человеческого фактора (навыков конкретного компоновщика);
- сократить время разработки за счет распараллеливания процесса;
- уменьшить массу межотсечных коммуникаций;



- синтезировать компоновочную схему размещения БРЭО из множества взаимосвязанных функциональных элементов.

Для достижения поставленных целей исследования необходимо решить ряд подзадач:

- разработать дискретную модель компоновки, которую можно представить в различных размерностях (трехмерное, двухмерное, одномерное);
- определить применимость типовых задач комбинаторной оптимизации и разработать методику АК БРЭО на основании алгоритмов, применяемых для решения этих задач;
- разработать программное обеспечение и средства графической интерпретации компоновочных решений;
- провести сравнительный анализ решения проектных задач разработанным методом и традиционным.

*Таким образом, в заключение первой главы необходимо отметить следующее:*

1. Задача нахождения компоновки занимает одно из центральных мест при проектировании ЛА и решается через несколько взаимосвязанных параллельных процессов, в т.ч. компоновки БРЭО. Этот процесс многократно повторяется (разрабатывается множество вариантов) и может быть автоматизирован.
2. Вербально задача АК БРЭО поставлена, как задача синтеза оптимальной расположения всех элементов БРЭО в отсеках ЛА.
3. Математически задача АК БРЭО сформулирована, как многокритериальная задача дискретной оптимизации, а моделируемый процесс состоит из нескольких последовательных этапов, внутри которых содержатся циклы с большим количеством итераций.
4. Известные непрерывные методы решения задачи АК (аналитические, эвристические и т.д.) не являются оптимальными для использования в современной деятельности конструктора, основанной на применении ЭВМ. Под

современные условия рационально рассмотреть методы решения на основе комбинаторной оптимизации и дискретного представления.

5. Для решения задачи АК БРЭО в современных условиях рационально рассмотреть методы решения на основе комбинаторной оптимизации и дискретного представления. При этом необходимо дать возможность конструктору влиять на ход решения.

## **2 Разработка методики автоматизированного решения задачи компоновки радиоэлектронного оборудования**

### ***2.1 Анализ существующих ограничений при компоновке бортового радиоэлектронного оборудования для разработки дискретной модели***

Задача размещения (компоновки) БРЭО на самолёте сводится к проведению процедур позиционирования данного оборудования в допустимом пространстве основных агрегатов и систем самолёта с учётом ограничений (геометрических, массовых, компоновочно-инфраструктурных и т.д.).

В качестве основных ограничений в работе [96] рассматриваются:

1. Размеры блоков стандартизированы по [40, 41, 88] (см. рис. 2.1) и размещаются на вспомогательных конструкциях (см. рис. 2.2) несколькими основными способами (стеллажное, на направляющем и одиночное размещение).
2. Конструкции стеллажей изготавливаются из стандартных профилей, стеллажи размещаются с дискретным шагом. Кроме того, для удобства монтажа между блоками имеются зазоры [42,43].
3. Блоки размещаются в плоскостях света люков для возможности их снятия/установки [101].
4. При размещении блоков оставляются зазоры для обеспечения радиуса гиба жгутов.
5. Требования 3D макетирования – ЭМ по определению является дискретной моделью, причем для снижения нагрузки на ЭВМ задается определенная точность и выдвигаются особые требования, т.к. как например необходимая степень детализации, напр. не показывается резьба. Но с другой стороны, показываются зоны выхода горячего воздуха и т.п.

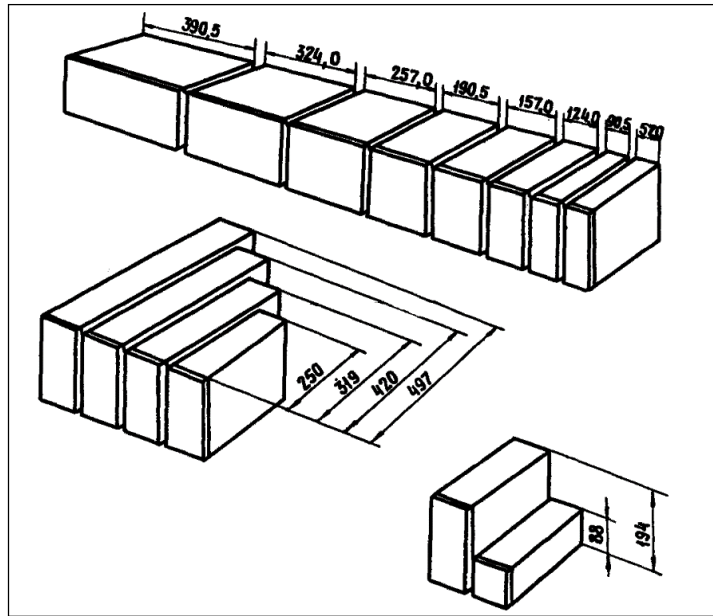


Рис. 2.1 – Типоразмеры корпусов блоков

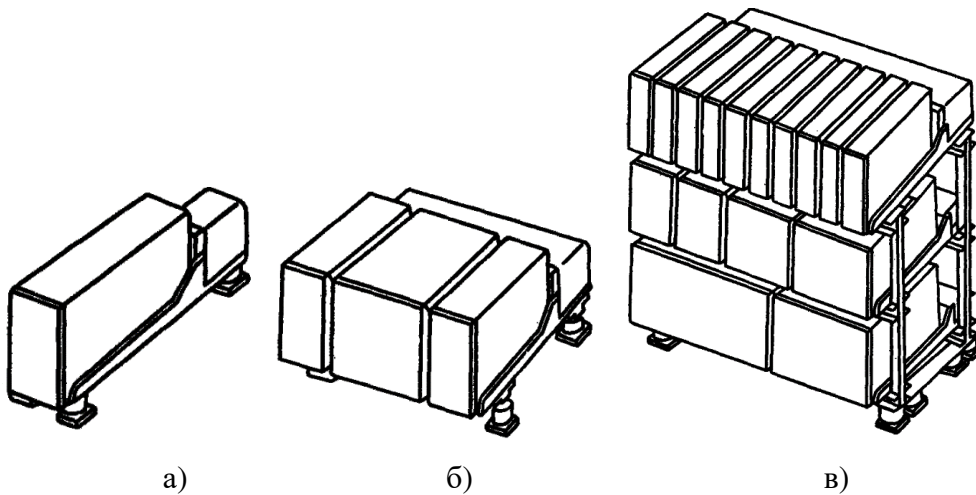


Рис. 2.2 – Варианты установки

## 2.2 Дискретная модель компоновки радиоэлектронного оборудования

По результатам анализа вышеназванных факторов для создания модели были приняты следующие допущения:

- компоновка электронного оборудования на ранних этапах должна явно задавать расположение и форму блоков, элементов крепления и основных трасс и может быть описана дискретной моделью с точностью 0.2 мм. Координаты блоков оптимально задавать с шагом 5 мм;

- каждый элемент модели имеет одномерное, двухмерное и трехмерное представление;
- стандартные типоразмеры блоков;
- требования по размещению БРЭО напротив люков для обеспечения доступа (блоки размещаются в плоскостях люков);
- дискретный шаг установочных конструкций, таких как профили, амортизаторы, монтажные рамы;
- заданные зазоры для подвода коммуникаций и воздуха (исходя из радиусовгиба жгутов и труб);
- уровень вибрационных, температурных, электромагнитных и др. воздействий в отсеке постоянен. Блоки имеют порог воздействия, после которого не работают, иначе–функционируют полноценно [105].

Исходя из этих допущений предлагается следующая модель: компоновка БРЭО состоит из простейших элементов (блок – табл.2.1, отсек – табл. 2.3, точка трасс. – табл. 2.2) и связей между ними.

Табл. 2.1 – Представление блока


Одномерное	Площадь лицевой поверхности с учетом зазоров
Двухмерное	<p>Прямоугольник, габаритные размеры а, b складываются с учетом необходимых зазоров</p> 
Трехмерное	Параллелепипед, габаритные размеры а, b, c с учетом зазоров
Числовые параметры	Допустимое тепловыделение, электромагнитное и физическое воздействие

Табл.2.2 – Представление точки трассировки

Одномерное	Линейная координата на диаграмме (для визуализации результатов)
Двухмерное	Двухмерные координаты на плоскости (плоский граф возможных переходов)
Трехмерное	Трехмерные координаты в самолетной системе координат

Табл. 2.3 – Представление отсека

Одномерное	Площадь лицевой плоскости люка
Двухмерное	Плоскость с местной системой координат, в которой размещается набор параллельных направляющих, размещенных с зазором (координата $a$ ), на которые «нанизываются» блоки (коор-та $b$ ). Хранится последовательность блоков.
Трехмерное	Плоскость задается 3 точками и установка блоков в самолетной системе координат
Числовые параметры	Ссылки на размещенные блоки, действующее тепловыделение, электромагнитное и физическое воздействие в отсеке

Логические связи между блоками задаются в таблице с погонной массой.

Связи между точками образуют зоны прохода коммуникаций и определяются в виде графа разрешенных переходов, где узлы являются точками трассировки в самолетной системе координат. Точки выбираются в соответствии с отведенными местами под прокладку жгутов, как на рис. 2.3.

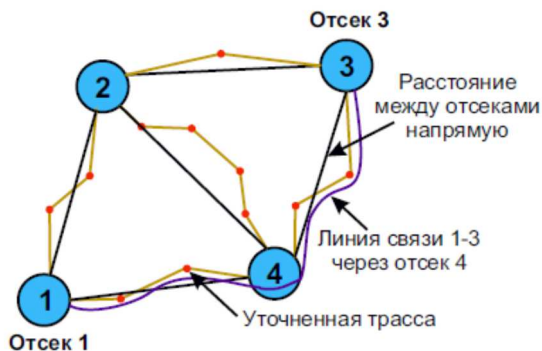


Рис. 2.3 а) – 2D Представление трасс коммуникаций

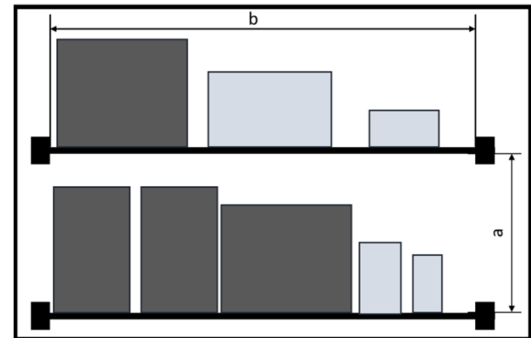


Рис. 2.3 б) – Упрощенная 2D модель отсека

Представление отсека базируется на плоскости люка, через который устанавливается БРЭО. Одна из точек плоскости назначается точкой выхода, которая также должна быть точкой трассировки. Тогда связи между отсеками учитываются в графе разрешенных переходов. Ниже будет более подробно описана дискретная модель исходя из этапности решения задачи. Принадлежность блоков к отсекам на первом этапе хранится в виде матрицы принадлежности. На втором – к стеллажам и в порядке размещения блоков на них.

Точность модели должна быть выбрана таким образом, чтобы удовлетворять всем требованиям к ЭМ, но при этом обеспечивать минимальную вычислительную сложность задачи АК. Аналитические и практические изыскания показывают, что параметр точности визуализации и хранения ЭМ незначительно влияет на вычислительную сложность. Основные изменения – увеличивается объем и время открытия файла. На рис. 2.4 приведены зависимости этих параметров в NX10 для 5 отсеков размерности [1000x400x500] мм, в которых размещается 50 блоков (10 в каждом) типоразмера 3К ~[180x400x200] мм, от параметра tolerance.

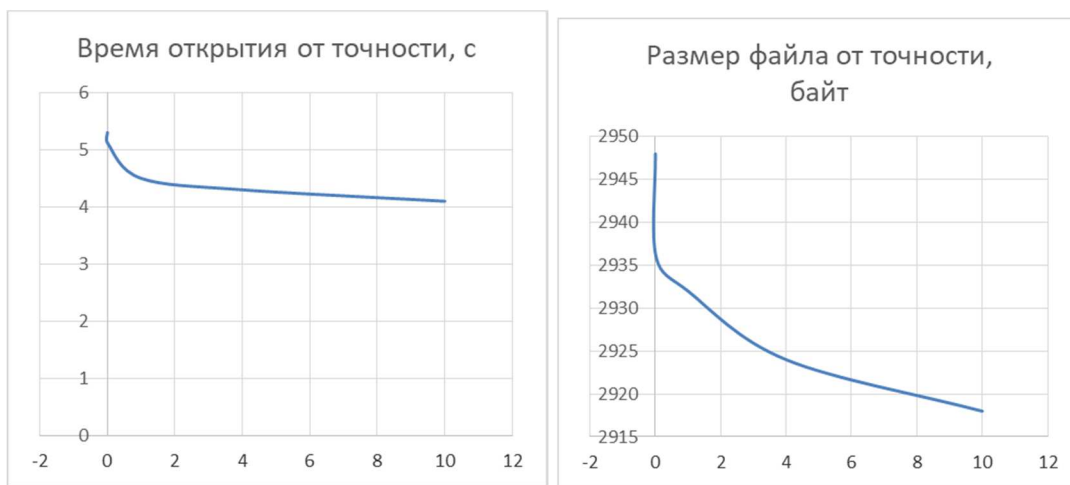


Рис. 2.4 – зависимость объема файла и времени открытия от tolerance

При этом, шаг размещения блоков оказывает очень значительное влияние на вычислительную сложность задачи АК и для переборных задач оптимальное задание точности решает критическое значение.

Для исследования используем следующие ограничения точности:

- 0.05 мм – требование по [43] на этапе РКД для указанных размеров;
- 0.2 мм – требование по [43] на этапе РКД для отклонения от теорконтура;
- 4 мм – выбирается исходя из экономически достижимой точности.

Время будем оценивать через количество перестановок в наихудшем случае для переборного алгоритма, которое можно оценить:  $K = \text{кол-во ячеек в отсеке} * (\text{кол-во свободных ячеек после размещения блока } 1) * \dots * (\text{кол-во свободных ячеек после размещения блока } N)$ . Результаты сведены в табл.2.4

Табл. 2.4 – Зависимость размерности задачи от шага дискретизации

Размеры отсека		Точность	Количество шагов по оси
длина	1000	0,05	20000
глубина	400	0,05	8000
высота	500	0,05	10000
Всего ячеек в отсеке			1,6E+12
Количество перестановок в наихудшем случае			1,312E+120
длина	1000	0,2	5000
глубина	400	0,2	2000
высота	500	0,2	2500
Всего ячеек в отсеке			25000000000
Количество перестановок в наихудшем случае			1,138E+102
длина	1000	4	250
глубина	400	4	100
высота	500	4	125
Всего ячеек в отсеке			3125000
Количество перестановок в наихудшем случае			1,05983E+63

Из таблицы видно, что размерность задачи растет экспоненциально, и поэтому для дискретизации шага координат блоков рационально использовать экономически достижимую точность изготовления. Необходимо отметить, что ввиду невозможности решения задачи переборным алгоритмом без эвристик в реальное время, на практике можно применить его модификации, решающие задачи в приемлемое время. Однако, тенденция зависимости времени решения от шага размещения блоков (размерности сетки) в целом сохраняется.

В результате для современных ЭВМ при хранении макета можно использовать точность моделей 0.2 мм, но при размещении блоков БРЭО предлагается использовать дискретный шаг 5 мм. для минимизации вычислительной нагрузки и решения задач в приемлемое время.

Таким образом, компоновку ЛА можно представить:

- одномерное представление (рис. 2.3 а): отсеки и блоки представлены 1 измерением, распределение по ним – матрицей, а зоны проходов жгутов в виде графа, где ценность ребра = расстоянию в 3D;



- плоское представление (рис. 2.3 б): множество плоскостей, размещенных в 3х мерном пространстве. Плоскости соединены зонами возможных проходов жгутов. Плоские блоки размещаются на плоскостях.

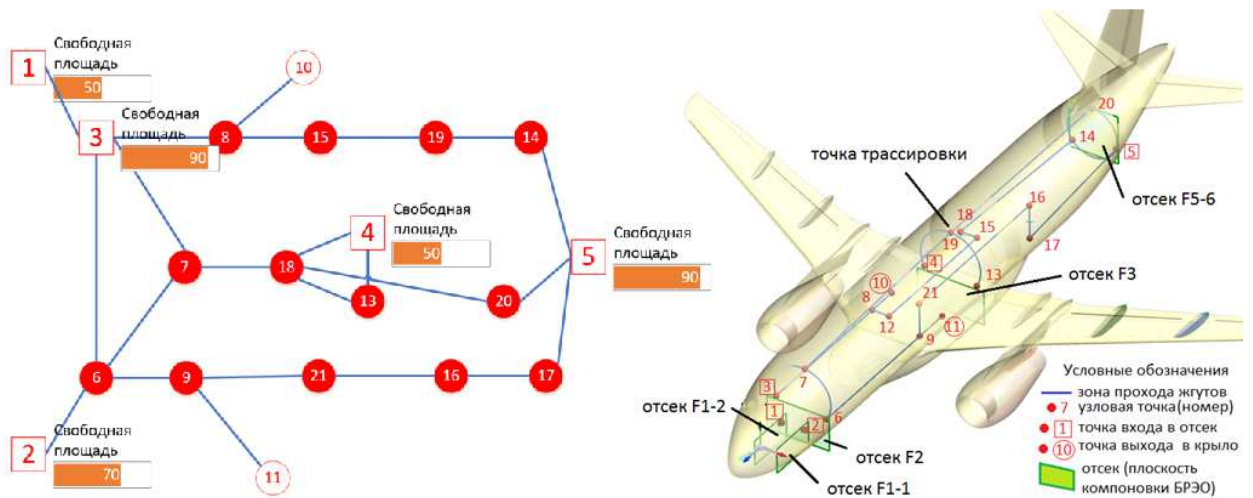


Рис. 2.3.а) одномерное представление

б) плоское представление компоновки

### 2.3 Анализ применимости разработанной модели

Валидация модели заключается в том, что ее основные положения не противоречат реальным объектам в некой определенной области возможных решений. Для нахождения области применения предлагаемой дискретной модели компоновки БРЭО необходимо определить типы ЛА, у которых большинство блоков БРЭО размещаются на стеллажах или линейных направляющих.

В работе [66] был проведен анализ размещения блоков БРЭО для самолетов различных типов. В результате чего была получена база данных по 35 самолетов различных типов: фронтовой истребитель (ФИ), многоцелевой истребитель (МИ), фронтовой бомбардировщик (ФБ), учебный (У), истребитель-бомбардировщик (ИБ), истребитель-перехватчик (ИП), военно-транспортный самолет (ВТС), разведчик (Р), штурмовик (Ш).

На рисунках 2.5 и 2.6 графически представлено распределение типов установки БРЭО в зависимости от типа ЛА и года первого полета, где код 1 – размещение на стеллажах, код 2 – на линейных направляющих, код 3 – одиночное.

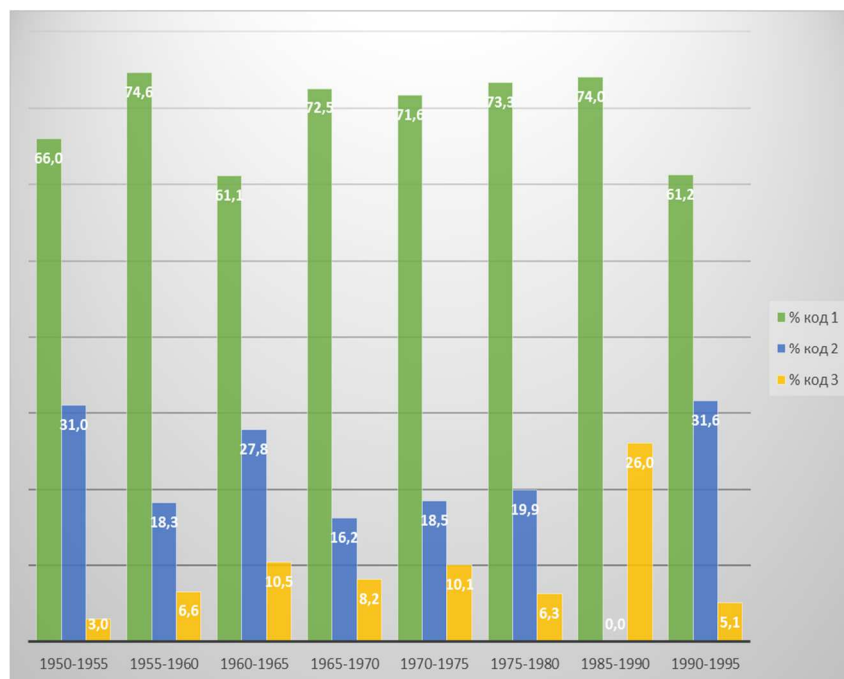


Рис. 2.5 – Относительное распределение типа размещения БРЭО от года первого полета ЛА.

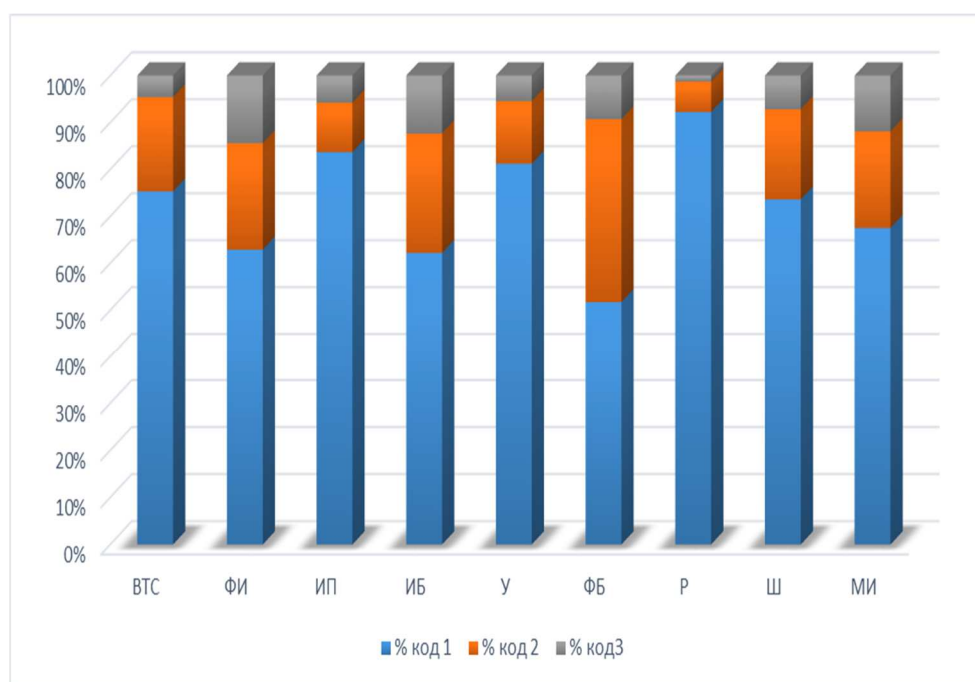


Рис. 2.6 – Относительное распределение типа размещения БРЭО от типа ЛА

По результатам анализа можно отметить следующие закономерности:

- для 30 исследованных самолетов (85,8%) преобладает стеллажное расположение блоков в отсеке, для Mirage III, Saab J-37, F-22 (8,5%) используется размещение «по направляющей» и всего лишь один самолет Saab J-35 (2,3%) – одиночное размещение.

- для самолетов 90-х годов относительное число одиночно-расположенных блоков заметно увеличилось: в период 1965-1990 г. порядка 73% блоков размещено на стеллажах, а после 1990 года снизилось до 61,2%. Это объясняется увеличением сложности компоновки по причине ужесточения требований и развития средств автоматизированного проектирования;
- с увеличением размерности самолета увеличивается количество блоков, установленных на стеллажах: в среднем 75,31% у военно-транспортных самолетов против 62,89% у фронтовых истребителей. Это объясняется наличием больших свободных объемов и меньшими требованиями к плотности компоновки;

Таким образом видно, что стеллажное размещение наиболее распространено и разработанная модель может применяться на большинстве современных ЛА.

#### ***2.4 Методика автоматизированного решения задачи компоновки радиоэлектронного оборудования***

Под указанные в п. 1.4 требования необходимо разработать новый алгоритм, с применением методов комбинаторной оптимизации. Реализация МВиГ основывается на введении последовательных критериев  $K_1 \dots K_N$ . Тогда  $K_1$ , например: физическое непересечение элементов при условии размещения внутри заданного пространства. Все комбинации формируют область решений, включающую в том числе физически невозможные. Подобласть по  $K_1$ , которую мы назовем  $O_1$ , включает также комбинации, недопустимые при введении следующего критерия  $K_2$ , например – требования доступа к оборудованию. Тогда введем область решений  $O_2$ , одновременно удовлетворяющих по  $K_1$  и  $K_2$ . Аналогично, ее подобласть  $O_3$ , которая является следующим этапом уточнения и отбора по критерию  $K_3$  и т.д. Рис. 2.7.

Причем каждой точке – варианту решения из области  $O_1$  соответствует определенное значение критерия эффективности данного решения, например, суммарной массе коммуникаций между отсеками  $L$ , по которому можно отранжировать результаты.

Таким образом, в основе предлагаемой методики лежит МВиГ, являющийся частным случаем *полного перебор всех комбинаций* распределения элементов по отсекам и формирования области  $O1$  по критерию  $K1$ , с дальнейшим отбором вариантов и выявления области решения  $O2$  по  $K2$  и т.д., причем, хотя бы на последнем этапе проводится ранжирование.

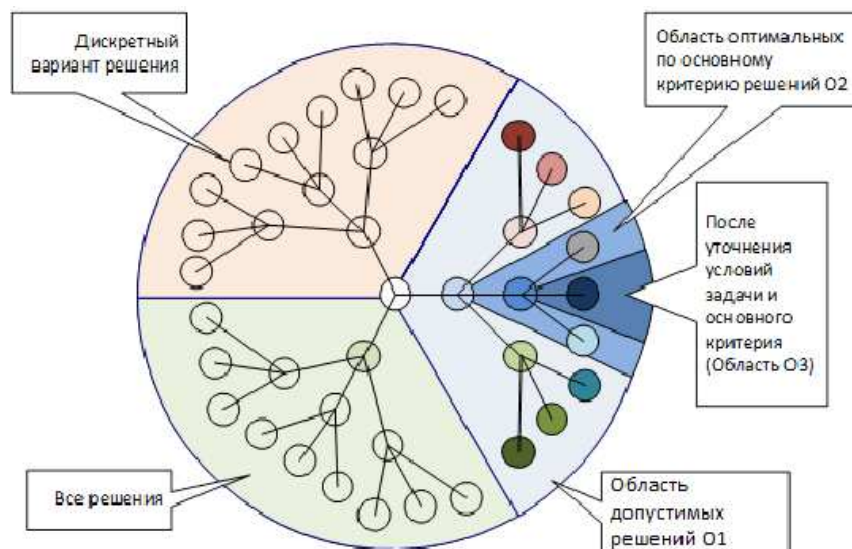


Рис.2.7 – Последовательность решения

Подобный подход к АК имеет следующие преимущества:

- учитываются все возможные решения с отсеком худших, что снижает время;
- возможность усложнять и уточнять критерии по ходу работы;
- на каждом этапе отбора можно проследить, какие комбинации и по какому критерию были отобраны и при необходимости внести корректировки вручную.

В качестве семейства последовательных критериев можно рассмотреть декомпозицию на задачи меньшей сложности (уменьшение кол-ва переменных) и переход между различными размерностями задачи (одномерное, двумерное, трехмерное представление).

Наиболее очевидный способ декомпозиции - за счет размерности сложности задачи. Это основано на допущении, что некоторые блоки и отсеки можно рассматривать как единое целое на ранних стадиях и далее их разделять. Например:

- группировка отсеков в более крупные: если несколько располагаются рядом в одной плоскости, то можно считать единым более крупным отсеком. Очевидно, если в результате система целиком внутри него – в более точной постановке нет смысла проверять ее составляющие в заведомо более дальних зонах размещения.
- группировка блоков: если некоторые из них связаны только друг с другом и они очевидно не нарушают геометрическую компоновку, то нет смысла удалять их в разные места. Тогда несколько сливаются в один, который распределяется в отсек, затем уже внутри него разбивается на несколько для уплотнения компоновки.

Однако, данные способы объединения блоков/отсеков бесперспективны как основа метода, т.к. позволяют снизить вычислительную сложность максимум на порядок. В отличие от них, последовательное представление задачи в разных размерностях позволяет снижать кол-во вычислений на порядки.

Для реализации метода последовательных приближений важно, чтобы каждое последующее приближение полностью включалось в предыдущее. Введем следующие допущения:

1. Любую задачу можно представить в виде задачи другой размерности ( $3D \Rightarrow 2D$ ,  $2D \Rightarrow 1D$ ,  $3D \Rightarrow 1D$  и т.д.) за счет введения доп.условий или ограничений.
2. При помощи сеточной модели любую  $3D$  задачу можно представить как дискретную задачу комбинаторной оптимизации. При этом можно снизить размерность за счет введения кодирующей функции (обратное также верно).
3. Результаты этапа входят в состав исходных данных для следующих. При этом можно применять методы мат. Программирования.

4. На любом этапе можно применить любой алгоритм независимо от других, при условии, что требования к ИД/результатам зафиксированы. В зависимости от применяемого алгоритма изменяется «стоимость» решения.
5. Рост вычислительных мощностей идет постоянно, как следствие нет нерешаемых задач. Однако, в рассматриваемый момент «сложность» метода может быть недопустимо высока.

Тогда, проблема АК представляется как набор задач (рис. 2.8): одномерная постановка, плоская постановка (2,5D), уточнение положения блока в отсеке. Каждый из этапов – следующий критерий отсечения, за счет чего реализуется метод последовательных приближений.

Предложенные этапы могут легко сочетаться и дополнять друг друга в любых комбинациях. Пример диаграммы использования представлен на рис 2.9.

Таким образом, в соответствии с предложениями выше можно выделить 3 этапа перехода размерности, которые рационально использовать как точку отсева вариантов человеком. Для практической реализации необходимо подобрать упрощения, передачу исходных данных и т.д.

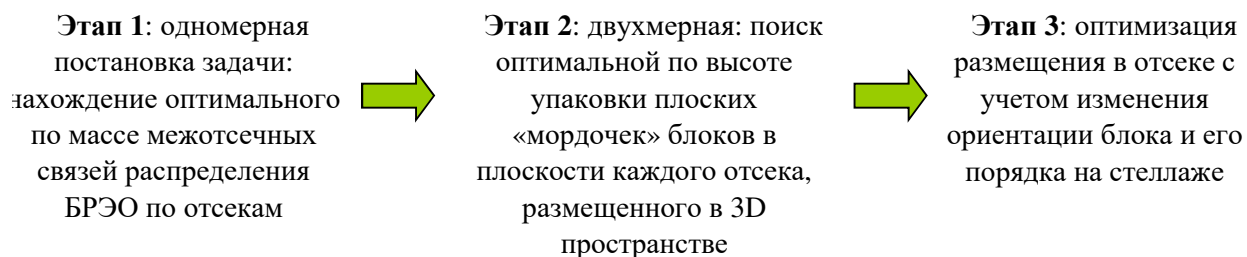


Рис.2.8 – Последовательность решения

В [96] показано, что БРЭО размещается на стеллажах/рамах/контейнерах, конструкцию которых можно представить в виде плоской конструкции, у которой можно выделить лицевую сторону-направляющую плоскость. Направляющая плоскость образована 3мя точками в трехмерном пространстве.

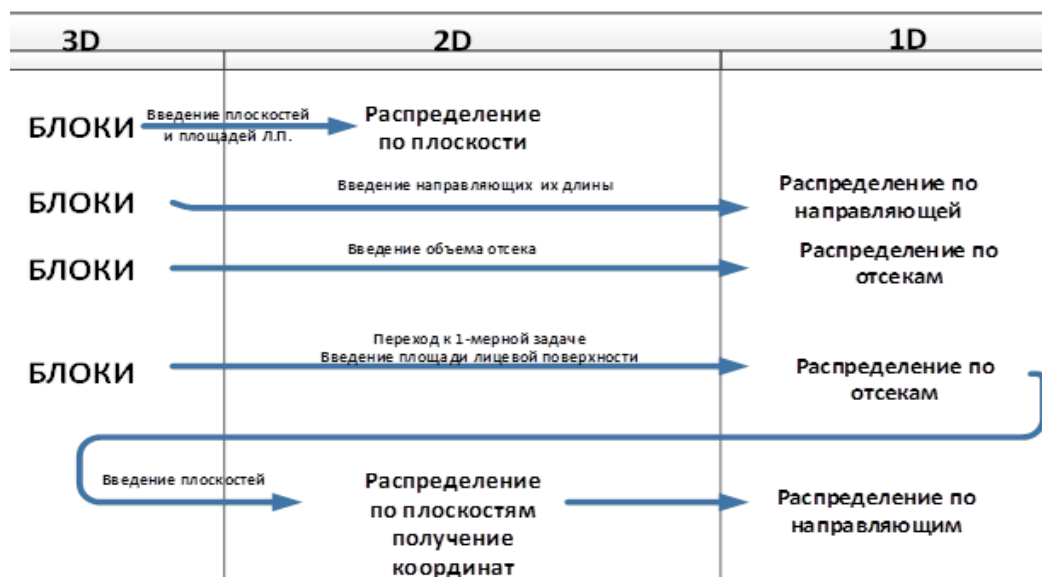


Рис. 2.9 – Диаграмма использования

Каждый блок в двух мерной постановке представляется в виде прямоугольника, который построен на лицевой стороне. Лицевой стороной принимается та, которая обращена (параллельна) направляющей плоскости стеллажа. Тогда процесс компоновки плоских стеллажей можно представить как компоновку прямоугольников в ограниченной плоскости с дополнительными ограничениями по глубине. Эта задача относится к целому классу *задач упаковки*, рассматриваемому в комбинаторной оптимизации.

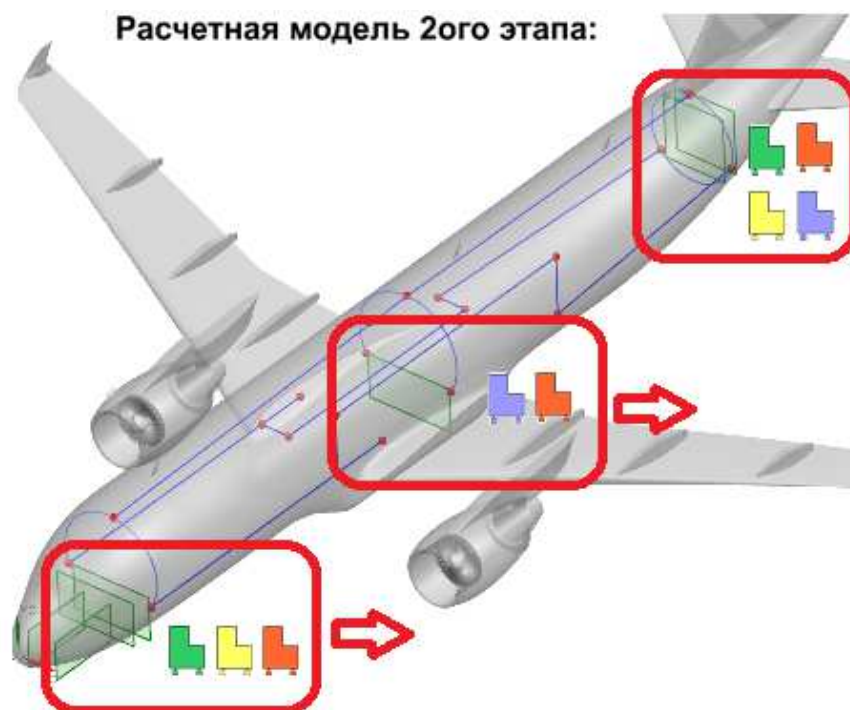
Таким образом, после решения серии 2х мерных задач упаковки в плоскостях отсеков можно перейти к 3х мерному пространству. Решение этой задачи образует плоский этап методики (рис. 2.10)

Однако, для формирования плоских задач необходимо задать распределение блоков по отсекам (плоскостям). Согласно мат. постановке распределение необходимо получить исходя из минимума массы межотсечных связей. Ниже будет показано, что эту задачу можно решать в 1D постановке.

Исходные данные плоского этапа:

- блоки (номер, высота, ширина, Отсек, Путь до 3D модели, Необязательные: название)
- отсеки (номер, высота, ширина, Координаты 3х образующих точек, Необязательные: название).

Результаты: координаты БРЭО. Создаются стеллажи (№ стеллажа, № образующих точки1/точки2, координаты точки, задающей ориентацию стеллажа, ширина, высота, отсек, Необязательные: название), создаются дополнительные точки (номер, координаты, тип).



*Рис.2.10 – Плоский этап методики*

Таким образом отойти от 3х мерной задачи до 2,5х мерной, исходными данными для которой являются результаты одномерного этапа.

Выше было показано, что 3D компоновку можно представить как серию 2D задач упаковки. Для нахождения распределения необходимо в первую очередь проверить физическую возможность размещения блоков в отсеке. Кроме того, в [12] показано, что жгуты проходят по зонам прохода коммуникаций между отсеками, которые можно аппроксимировать ломанными линиями, заданными точками в 3D пространстве.

На основании чего можно сделать несколько допущений и перейти к 1D:

*Первое допущение*, что каждый размещаемый блок, и каждый отсек размещения имеют только одну размерность – их площади, которые берутся аналогично 2х мерному этапу. Значение площади каждого блока умножается на коэффициент запаса для учета необходимых зазоров или сложности формы. Это



позволяет не учитывать геометрию каждого блока или отсека, осуществляется только проверка на физическую возможность размещения определенных блоков на выделенных под их размещение стеллажах с определенной площадью.

*Второе допущение* данного этапа заключается в представлении цепей коммуникаций как *линий связей*, сформированных между блоками. Таким образом, задача абстрагируется точной геометрии трассы цепи. Это позволяет представить каждую цепь в виде условной линии, связывающую два блока оборудования.

Здесь вводится *третье допущение*, связанное с цепями коммуникаций: каждая такая “линия” связывает только 2 блока, а каждое разветвление цепи представляется в виде отдельного блока. В реальной конструкции присутствует значительное число разветвлений цепей, представляющих собой, например, тройник. Но в данной задаче каждый такой «тройник» задается в виде отдельного блока с 3 связями, а в качестве “линий связей” выступают только элементарные участки цепей, имеющих только 2 соединения - выход из первого блока и вход во второй блок.

*Четвертое допущение*, что внутриотсечными связями можно пренебречь исходя из характерных размеров самолета обычно распределение блоков в плоскости/отрезке в меньшей степени влияет на длину связей, нежели распределение блоков по отсекам/плоскостям. Это объясняется большим расстоянием между отсеками, нежели расстояния между блоками в отсеках. Соответственно, перенос блока в соседний отсек вызовет значительно больший прирост длины коммуникаций, нежели перенос блока на соседний стеллаж.

*Пятое допущение*, что зоны прохода коммуникаций, заданные ломанные линиями по точкам в 3D пространстве, можно представить в виде плоского графа (рис. 2.3 а), веса которого соответствуют расстоянию между точками. Тогда длина каждой линии связи между блоками будет равна сумме ребер графа из начальной до конечной точки маршрута. Нахождение такого маршрута относят к классу задач *трассировки на графах* и также изучается в КО.

Таким образом можно перейти от 2-3х мерной задачи до одномерной с ограничениями. Нахождение распределения блоков исходя из минимума массы межотсечных комбинаций будет 1м этапом АК БРЭО(рис. 2.11). Важно отметить, что эта частная задача «задачи о ранце», которая изучается в КО, а применяемые модели межотсечных связей и результаты распределения могут использоваться без изменений в 2D постановке.

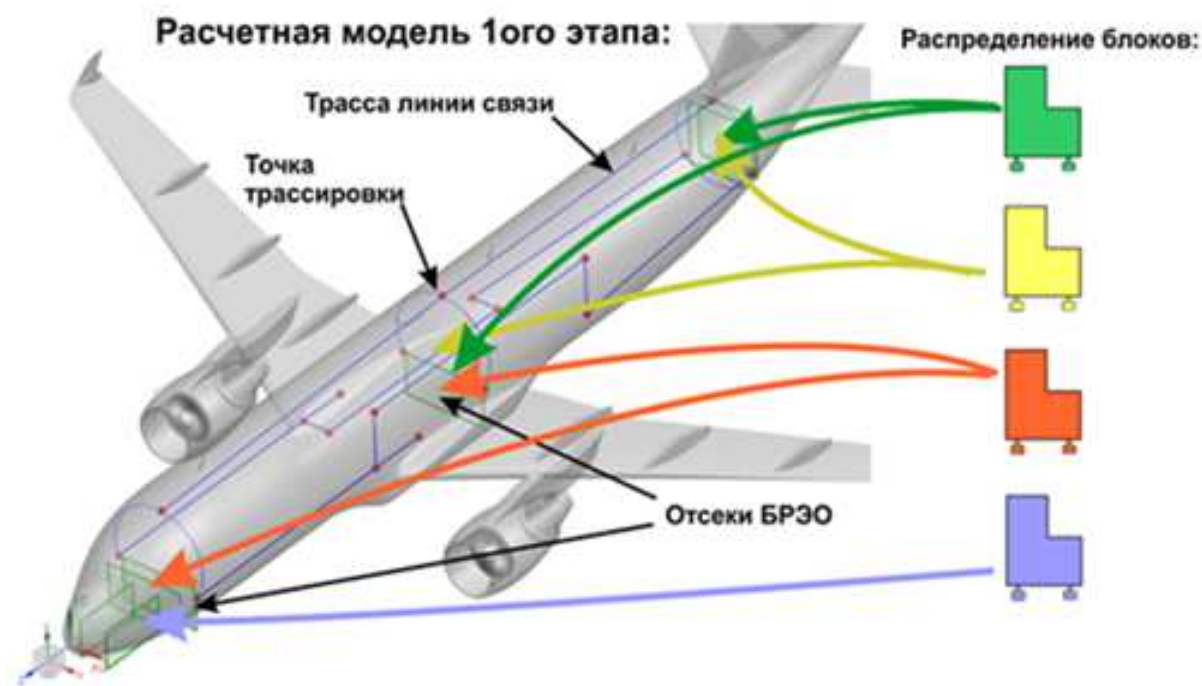


Рис. 2.11 – одномерный этап методики

Исходные данные этапа:

- Блоки (номер, площадь ЛП, Отсек (задан), Необязательные: название, тепловыделение, класс защищенности);
- Отсеки (номер, площадь ЛП, номер точки выхода из отсека, Необязательные: название, тепловое воздействие, вибровоздействия в отсеке)
- Точки трассировки (номер, координаты, тип точки);
- Связи (номер, Тип, Внутренняя(0)/Внешняя(1), № Блока исходного , № Блока/№ Точки целевого, Удельная масса);
- Зоны прохода жгутов (разрешенные переходы между точками, расстояние между точками(если задано), Точечные источники).

Результаты: Длина связей, маршруты трассировки, распределение блоков.

Результаты этапа: Длина связей, маршруты трассировки, распределение блоков по отсекам.

В заключение необходимо отметить, что предложенные этапы взаимосвязаны и можно составить *диаграммы использования данных* (Табл. 2.5).

Табл. 2.5 – Использование данных по этапам

Блоки:									
№ блока/ название	Ширина	Высота	Глубина	Отсек	Стеллаж	Отступы	3D модель	Тепловое влияние	Воздействие
1	рассчитывается S ЛП								
2									
3									

Отсеки:								
№ отсека/ название	Ширина	Высота	Объем	Координаты 3х образующих точек	номер точки выхода из отсека	Тепловое воздействие	Воздействие в отсеке	
1								
2								
3								

Точки трассировки:			
№ Точки	координаты	Тип точки	
1			
2			
3			

Стеллажи:			
№ Стеллажа/ название	№ образующей Точки1	№ образующей Точки2	
1			
2			
3			

Красный = не используется; Синий = результат; Без цвета = используется.

Тогда задачу можно разделить на несколько этапов, каждый из которых представляет собой имплементацию типовой задачи КО. (рис. 2.12)

На первом этапе находятся всевозможные варианты распределения блоков по отсекам, удовлетворяющие всем условиям, что является частным случаем «задачи о рюкзаке». Для каждого возможного варианта проводится оценка массы межотсечных коммуникаций за счет решения задачи трассировки на графах (прокладывается каждая трасса по графу возможных зон прокладки жгута от отсека, в котором размещается первый блок до отсека со вторым блоком).

Далее возможные решения ранжируются по массе коммуникаций. В этот момент человек проводит оценку и выбирает наиболее перспективные для проработки на следующем этапе.

На втором этапе в каждом отсеке поочередно компонуются блоки, что представляет собой задачу упаковки в полуограниченную полосу. Для каждого блока получается координаты в местной системе координат, которые далее переводятся в самолетную систему координат. В случае, если какой-либо отсек невозможно скомпоновать – весь вариант отсекается. Далее по полученным координатам и ссылкам на реальные модели блоков создаются трехмерные электронные макеты каждого из вариантов. Окончательный выбор из них осуществляет конструктор.



Рис. 2.12 – Структура решаемой задачи

## *2.5 Связь с задачами комбинаторной оптимизации*

В связи с развитием ЭВМ важным критерием практической применимости предлагаемой методики становится возможность использования эффективных алгоритмов, реализуемых в ПО. Выше было показано, что методика базируется на представлении проблемы АК в связанных задач. А именно, в виде задачи распределения блоков по отсекам, задачи трассировки линий межотсечных связей и компоновки блоков в плоскости отсека. Рационально рассмотреть эти задачи с точки зрения комбинаторной оптимизации [87], т.к. данная область математики эффективно решается при помощи ЭВМ.

Распределение блоков по отсекам является частным случаем мультипликативного рюкзака, которая в общем виде формируется следующим образом: есть несколько рюкзаков, каждый со своим максимальным весом. Каждый предмет можно положить в любой рюкзак или оставить. Необходимо найти такое распределение предметов, чтобы суммарная ценность предметов в рюкзаках была максимальна.

В качестве рюкзаков выступают отсеки, в качестве предметов – блоки. Площади лицевой поверхности являются «весом»: ни в одном из отсеков суммарная площадь поверхностей размещенных блоков не должна превышать максимально разрешённого для каждого отсека. А оценкой «ценности» выступает минимальная масса межотсечных коммуникаций, зависящая от протяженности коммуникаций.

В свою очередь, для нахождения суммарной протяженности коммуникаций необходимо для каждой связи решить задачу о нахождении кратчайшего пути на графе [5]. Она состоит в нахождении комбинации смежных вершин графа (т.е. соединенных) между двумя вершинами на графе (стартовой и конечной точками), в которой минимизируется сумма весов ребер. Эта задача является одной из важнейших классических задач теории графов.

В качестве графа выступает паутинка возможных прохождений коммуникаций, узлами которого являются точки трассировки. Длина ребер графа

задается как расстояния между точками. В качестве начальной и конечной точки маршрута используется точка входа в отсек, в котором размещается начальный/конечный блок.

Задача о компоновке блоков в плоскости отсека является частным случаем задачи упаковки в полуограниченную полосу (2 Dimensional Strip Packing, 2DSP) [8, 29, 30, 78], которая заключается в упаковке объектов конкретной формы в конечное число контейнеров конкретной формы таким образом, чтобы суммарная высота «полос» была минимальной.

В качестве полуограниченной полосы выступает плоскость отсека, ограниченная направляющей снизу и задающими направление боковыми границами, а в качестве компонуемых объектов – прямоугольники по лицевой поверхности блока. Причем, как было показано ранее, блоки имеют строгие типоразмеры, а размещение их возможно только на уровнях (т.е. ставить блок на блок нельзя, что соответствует понятию «требования гильотинного раскроя» в КО). В качестве критерия выступает суммарная «высота» от нижней направляющей до наибольшего уровня по каждому отсеку.

Тут стоит отметить, что критерий на непревышение высоты отсека не выдвигается, т.к. на предыдущем этапе проводился отсев по непревышению суммарной площади лицевой поверхности, что с учетом стандартных типоразмеров блоков и ранних этапов проектирования (т.е. свет люка еще можно изменить) не должно сильно ухудшать оценку решения.

*Таким образом, в заключение второй главы необходимо отметить следующее:*

1. Анализ существующих ограничений выявил следующие особенности процесса компоновки оборудования:
  - в большинстве случаев блоки БРЭО размещаются в плоскостях отсеков на многоуровневых стеллажах;
  - блоки БРЭО и монтажные конструкции имеют шаг типоразмеров;
  - размещение выполняется с определенным дискретным шагом;

- трассы межотсечных коммуникаций проходят по заранее определенным зонам.
- 2. На основании обнаруженных особенностей была разработана дискретная модель компоновки, причем компоновку можно представить в одномерном и двумерном представлениях.
- 3. Показана применимость данной модели исходя из статистического анализа размещения БРЭО на различных самолетах.
- 4. Декомпозиция процесса компоновки позволила предложить новую методику компоновки оборудования на основании метода ветвей и границ за счет поэтапного решения задачи, где на разных этапах используются модели разных размерностей (одномерная и двумерная представления).
- 5. Предложен новый обобщенный критерий оценки компоновочного действия – масса межотсечных коммуникаций.
- 6. Показана связь частных задач, на которых основана методика, с типовыми задачами комбинаторной оптимизации, что позволит применить уже известные эффективные алгоритмы их решения на ЭВМ.

### 3 Алгоритм автоматизированной компоновки бортового радиоэлектронного оборудования и его программная реализация

#### 3.1 Общий алгоритм поэтапного решения решения

Согласно методу последовательных приближений и модели компоновки, из [96, 98] можно представить схему общего алгоритма АК БРЭО. (Рис. 2.1) Для каждого этапа рационально рассмотреть требования и выбрать отдельный алгоритм. (Рис. 2.1 б)

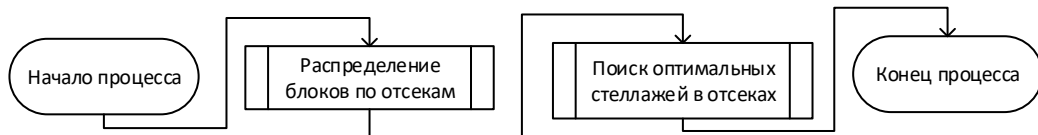


Рис. 3.1 а) – Общий алгоритм

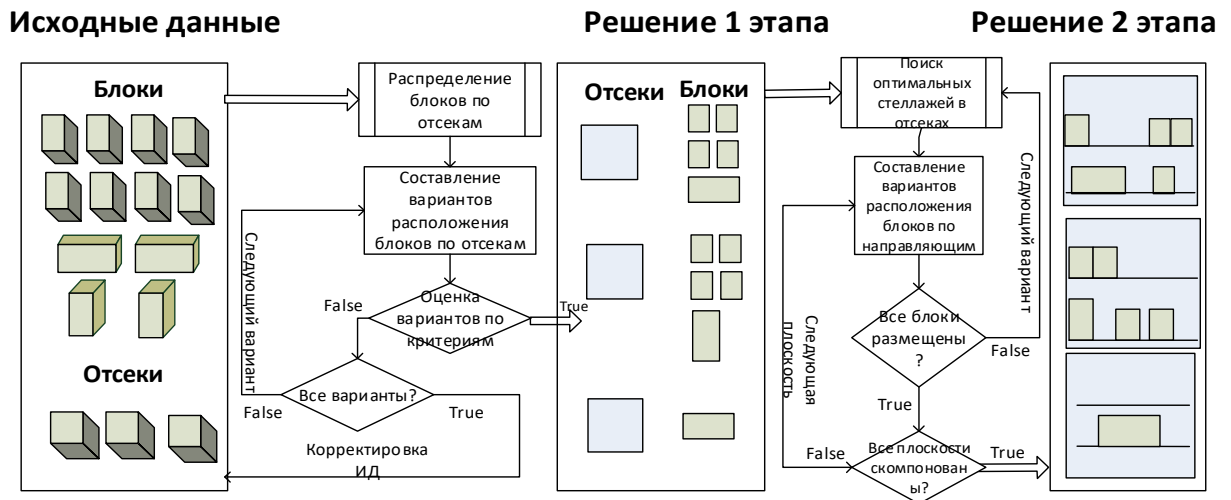


Рис. 3.1 б) – Общий алгоритм с уточнением по этапам

#### 3.2 Алгоритм первого этапа

В целом, *одномерный этап* сводится к поиску такого варианта комбинации распределения блоков, связанных линиями связи, по отсекам, имеющим определенную площадь ЛП, чтобы суммарная масса линий связи была минимальной. При этом суммарная масса рассчитывается суммой масс отдельных линий, для которой необходимо найти суммарную протяженность.



Помимо основного критерия (по площади ЛП), при размещении БРЭО учитывается тепловой баланс в отсеке, электромагнитная совместимость линий связей, требования по защищенности.

Учет теплового баланса заключается в нахождении суммарного тепловыделения всего оборудования в каждом отсеке, при этом вводится допущение, выделенное тепло не поглощается конструкцией.

Учет ЭМС заключается в том, что для каждого типа линии связи задается список совместимых типов, при этом предполагается, что отдельные трассы полностью изолированы друг от друга.

Учет требований по размещению БРЭО только в защищенных зонах заключается в том, что при наличии условия «требует защиту» рассматриваются отсеки только с параметром «защищенный».

Тогда задача сводится к перебору всех вариантов распределения и отправке каждого из них в процедуру проверки по площади ЛП и дополнительным критериям, а успешно прошедшие проверку – в процедуру оценки, в основе которой лежит трассировка. Наилучшие решения сохраняются.

Как было показано выше, этот этап основан на 2 типовых проблемах комбинаторной оптимизации («задача о ранце» и «трассировка на графах»), поэтому для него рационально создавать алгоритм за счет модификации существующих. С точки зрения комбинаторной оптимизации данные задачи являются NP – полными. Это означает, что на текущий момент времени, не известно эффективных алгоритмов или методов, которые гарантированно находили бы точное решение за время меньшее, чем затрачено на полный перебор или его вариации.

При этом, для этих алгоритмов наследуются требования из раздела 3, дополнительных требований не накладываемся. Существует конфликт требований, т.к. полный перебор требует крайне больших вычислительных ресурсов (сложность растет экспоненциально размерности), а эвристические методы лишь в

немногих типах задач дают гарантированный результат. Поэтому выбор алгоритма является предметом отдельного исследования, а в рамках данной методики принимаются следующие допущения:

- поиск вариантов распределения – используется МВиГ, являющийся частным случаем ПП. Конкретная реализация будет описана ниже;
- трассировка – используется алгоритм Дейкстры как достаточно надежный при очень высокой скорости по сравнению с ПП.

Оптимизация каждого из них будет рассмотрена в следующих работах, т.к. выходит за предмет данной статьи. Здесь же ниже будут даны примеры работы наиболее простых реализаций.

Таким образом, можно представить схему общего алгоритма 1го этапа (Рис. 3.2), а в разделах 3.2 и 3.3 представлены иллюстрации принципа работы частных модифицированных алгоритмов.

Информация о распределении электронного оборудования по отсекам хранится в виде единичной матрицы, где каждый столбец соответствует блоку, а строка – отсеку. В каждом столбце может быть только одна единица, ее номер строки обозначает номер отсека, в котором находится блок. Тогда необходим алгоритм, перебирающий всевозможные комбинации состояния матрицы.

Принцип перебора комбинаций распределения блоков по отсекам основывается на методе ветвей и границ, для чего используется стек (хранилище) матриц с распределениями блоков по отсекам, которые удовлетворяют условиям. Итерацией алгоритма считается единичное переставление блока из начального отсека в следующий, под шагом алгоритма – переход к варьированию следующего блока, под процедурой оценки – проверка на соответствие ограничениям, при этом в случае положительной оценки вариант распределения заносится в стек снизу.

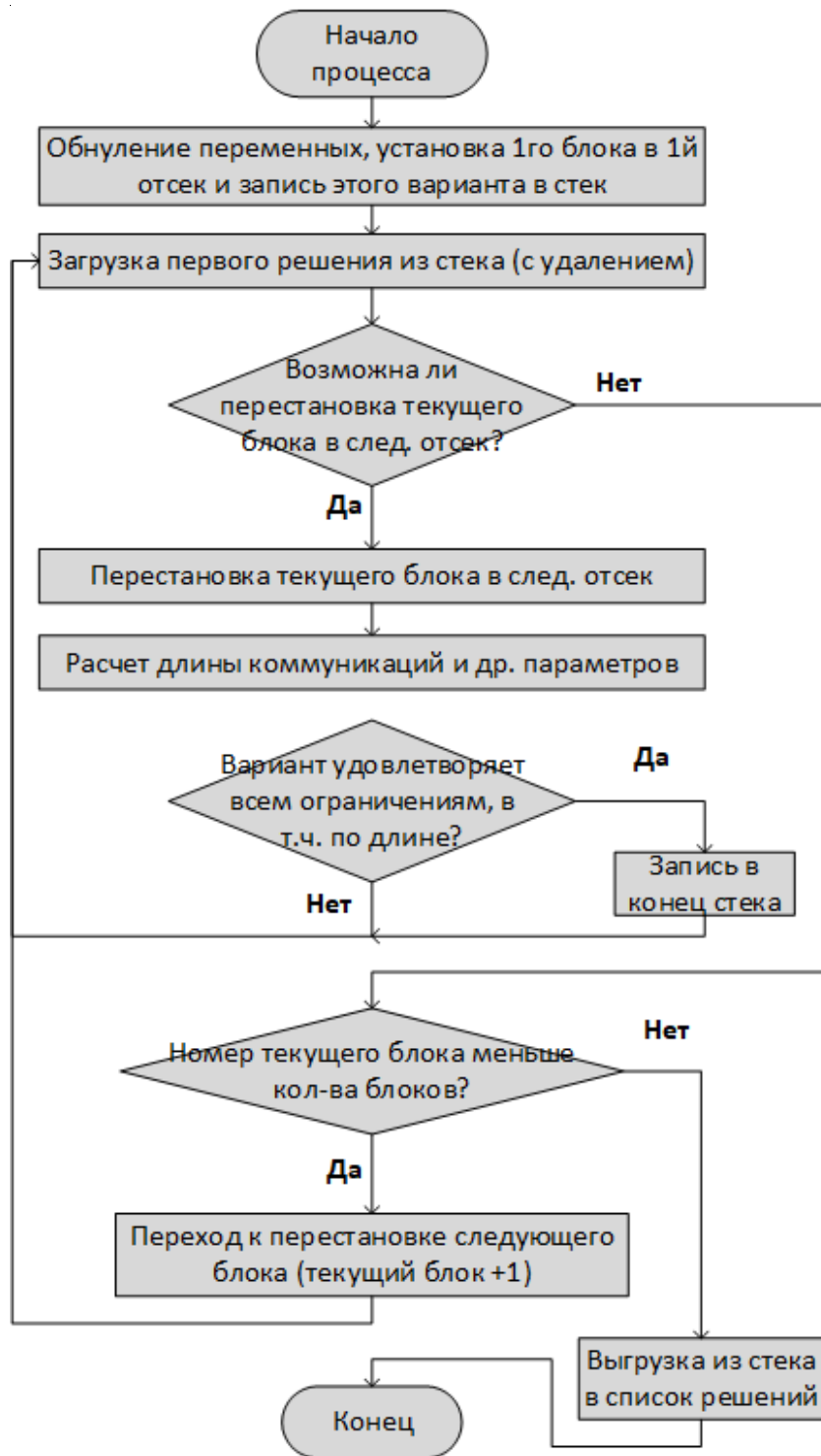


Рис. 3.2 – Схема алгоритма полного перебора блоков

На стартовой итерации размещается 1й блок в 1й отсек, далее осуществляется проверка на ограничения. Далее происходит перестановка 1го блока во 2й отсек и снова оценка. Так продолжается до тех пор, пока не будет оценено размещение 1го блока в последнем отсеке, шаг алгоритма считается завершенным. После чего из стека сверху вытягивается матрица (в данном случае 1й блок в 1м отсеке), система

начинает варьировать 2й блок и так далее. Порядок работы показан на рис. 3.3. Важно отметить, что перестановки происходят итеративно, а через номер итерации можно восстановить матрицу.

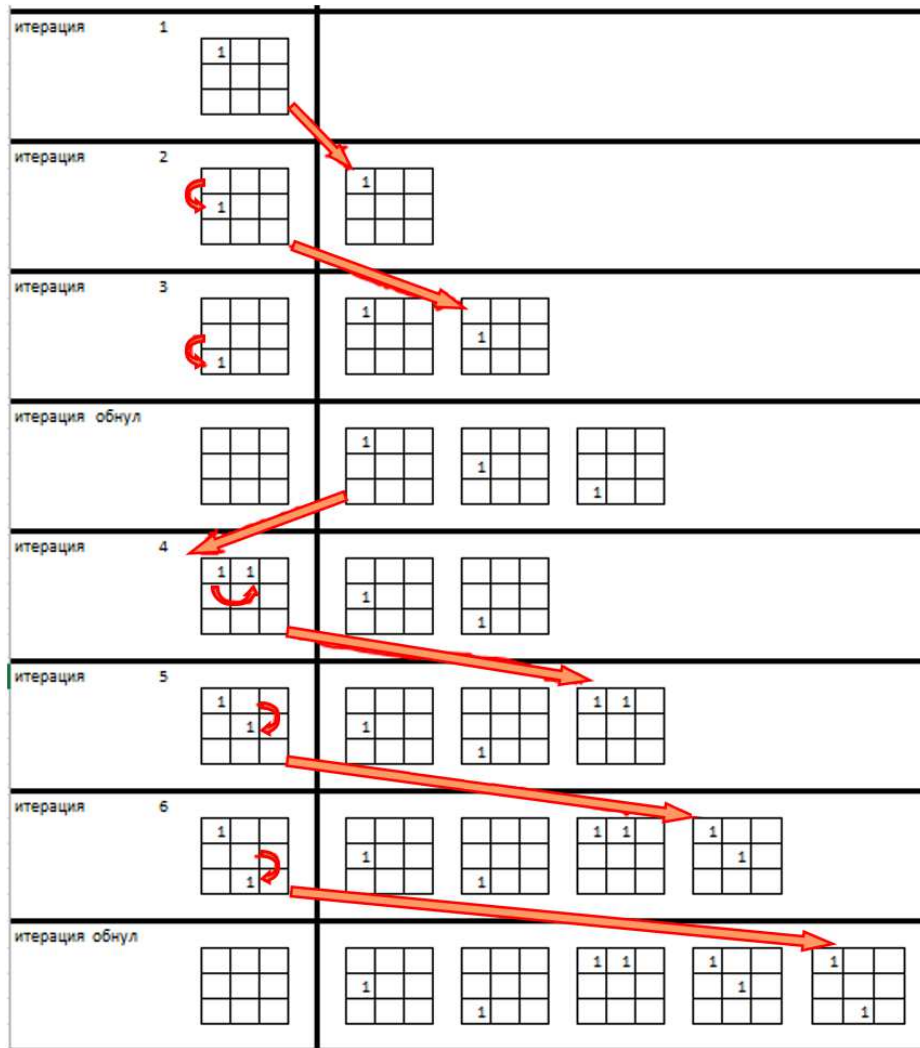


Рис. 3.3 – Перебор матрицы  $Y_{nm}$ , отражающей распределение блоков по отсекам

Ключевой частью процедуры оценки является нахождение минимального расстояния от старта до финиша для всех связей. Нахождение суммарной длины осуществляется циклическим перебором всех связей и суммирование их длин, для чего находится расстояние начальной точки до конечной. Однако, здесь для упрощения в основу берется существующий алгоритм Дейкстры, находящий расстояние из точки до всех остальных, и выбирается нужный маршрут. Подробное описание классического алгоритма представлено в [5].

### 3.3 Алгоритм второго этапа

*Следующий плоский этап* сводится к поиску такого варианта размещения БРЭО в отсеках, чтобы высота в каждом была минимальна (а плотность компоновки - максимальна). Для этого необходимо в соответствии с заданным распределением последовательно упаковать прямоугольники на плоскости с минимальной высотой.

Перед выбором частного алгоритма необходимо уточнить требования. По условию рассматриваемый случай применяется для уже обработанного распределения отсеков и блоков с постоянными геометрическими и физическими параметрами, что уточняет некоторые из них:

- полный перебор на данном этапе не является строгим требованием, т.к. принимается что был осуществлен ранее и были отсеяны варианты;
- нет необходимости отсева по ЭМС, воздействиям и тепловыделению;
- появляется необходимость отсева по дополнительным критериям (например, превышение максимальной высоты или глубины);
- если решений нет хотя бы в одном из отсеков, то весь вариант отсекается.

Остальные требования наследуются из п. 3.2.

Анализ литературы по 2D упаковке показывает, что существует следующая классификация задач двухмерной упаковки по области упаковки:

- упаковки в квадрант (2DAP);
- упаковки в контейнеры (2DBP);
- упаковки в полосу (2DSP);
- максимального покрытия (2DSSP).

Для данных задач алгоритмы полного перебора являются крайне ресурсоемки и рекомендуется использовать кодирующую функцию на основе особенностей конкретного случая. Например, в задачах 2D раскроя можно основываться на том, что режущий инструмент движется только по прямой и т.п. Для АК в [66] была отмечена закономерность, а в [96] предложена модель, по

которой прямоугольники располагаются на «уровнях», что в данном случае может быть кодирующей функцией (высота стеллажа определяется по наивысшему блоку, стеллажи только прямые).

Как было отмечено ранее, компоновка в плоскости отсека подобна задаче упаковки в полуограниченную полосу. Существует значительное количество алгоритмов решения данной задачи.

Для выбора проведем анализ области применения алгоритма плоской компоновки, в контексте задачи КО и сформулированных выше требований для общей задачи:

- исходные данные строго заданы;
- исходные блоки/отсеки представляют собой однородные объекты;
- целевая функция коэффициента полезного использования пространства прерывистая и сложно прогнозируемая;
- трудоемкость полного перебора области слишком велика на данном этапе развития ЭВМ;
- результат должен повторяться при одинаковых ИД;
- результат должен удовлетворять некоторым критериям, а именно должен быть предсказуем.

Исходя из приведенной в [7] классификации алгоритмов КО рационально рассмотреть жадные/эвристические алгоритмы, так как полный перебор для данной задачи при текущих вычислительных мощностях невозможен. Среди жадных алгоритмов распространены алгоритмы решения через «декодеры». Рассмотрим некоторые из них на примере тестовой задачи: необходимо разместить заданное число блоков (прямоугольников лицевой стороны) в ограниченную плоскость (замкнутый прямоугольник).

Габариты плоскости = 3200x800 мм. Критерий в данной задаче - высота упаковки блоков.

Табл. 3.1 – Таблица размеров блоков

Кол-во блоков	Типоразмер	Размеры, мм.
2	1К	57x194x320
3	1,5к	90,5x194x320
5	2К	124x194x320
19	3К	194x194x320
3	5К	324x194x320
2	6К	390x194x320

Для решения тестовой задачи в работе [12, 13] предложен программный комплекс. Всего рассмотрено 22 алгоритма: 8 оффлайн и 14 онлайн (онлайн алгоритмы допускают рассчитаны на изменяющиеся исходные данные). Результаты представлены на рис. 3.5 б), в), г). Время выполнения каждого составило менее 1 миллисекунды.

На основании чего можно сделать следующие выводы:

- представленные алгоритмы эффективно решают задачу компоновки в плоскости;
- оффлайн алгоритмы эффективнее, чем онлайн;
- алгоритм Burke повторил оптимальное решение (т.е. достиг результата полного перебора);
- большая часть оффлайн алгоритмов уложилась в границу ~15% относительно наилучшего результата;
- некоторые онлайн алгоритмы показали результаты, в целом равнозначные оффлайн алгоритмам. Однако, для их успешной работы необходимо задавать коэффициенты запаса, которые заполняются статистически/эмпирически и сильно влияют на результат. Поэтому данный тип алгоритмов далее не рассматривается;
- лучший результат на данной задаче показал алгоритм Burke, который при упаковке не использует отрезки (стеллажи). Но тогда данный алгоритм противоречит требованиям НД и сделанным выше предположениями о

размещении блоков в основном на стеллажах. Поэтому данный алгоритм не рассматривается в дальнейшей работе;

- для дальнейшей проработки выбран алгоритм FFDH, который модифицирован за счет добавления сортировки по ширине блоков. Так как упаковка будет не хуже, чем у большинства других, но при этом быстрее. В худшем случае придется рассматривать на каждом шагу все уровни снизу вверх (такая ситуация маловероятна).

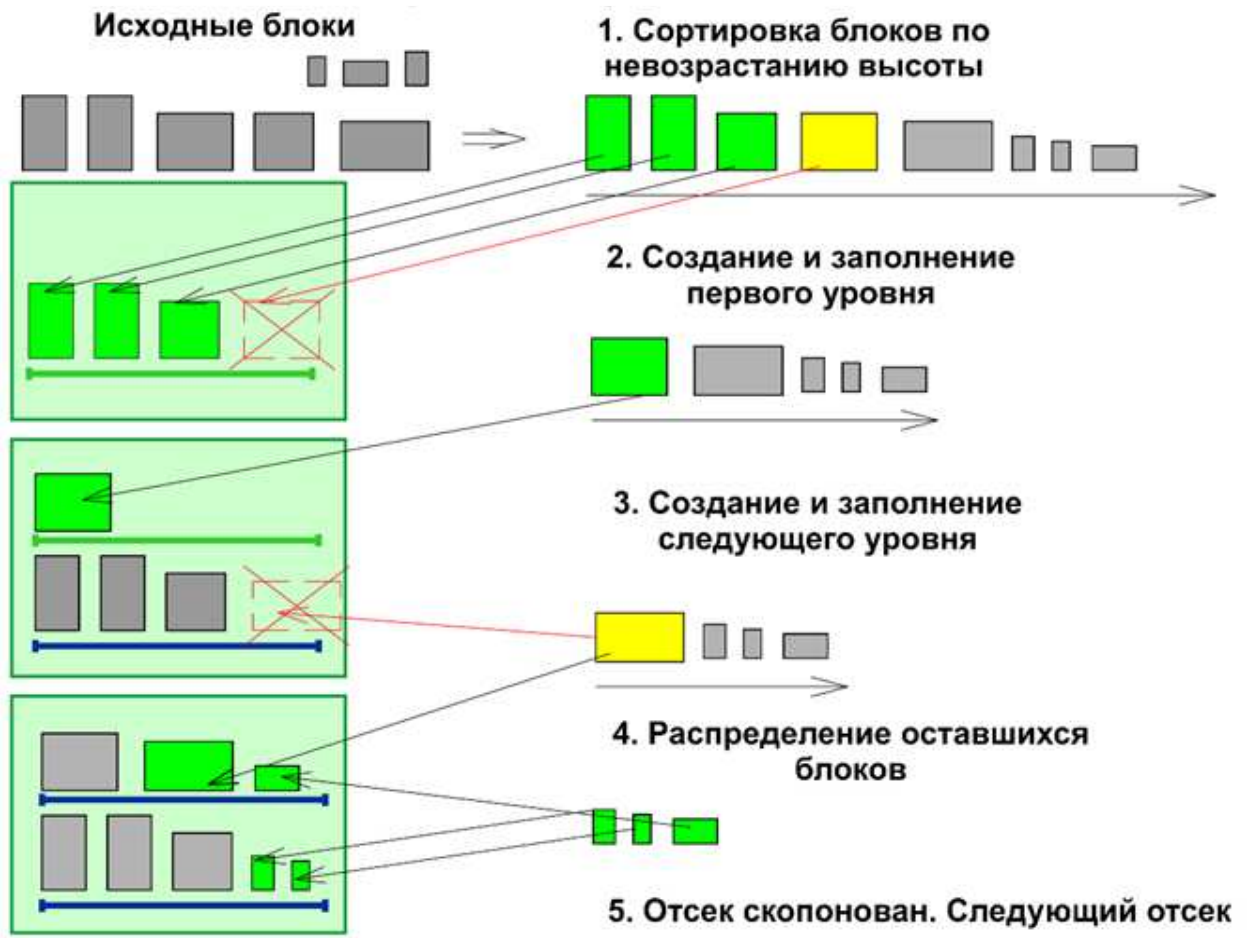


Рис. 3.4 – Принцип работы алгоритма FFDH

Вербальное описание модифицированного алгоритма FFDH можно записать как: прямоугольники сортируются по не-возрастанию высоты, самый высокий располагается в левом нижнем углу полосы, тем самым инициализируя первый уровень, по высоте равный ему. Остальные прямоугольники располагаются слева направо, пока есть место на текущем уровне. Если места на уровне нет для текущего прямоугольника-то рассматривается или создается следующий уровень. После установки текущего прямоугольника, для каждого следующего



прямоугольника ищется место не только на последнем уровне, а начиная с самого нижнего. Отсюда вытекает название «first fit» — прямоугольник помещается на первый подходящий уровень снизу. Схема всего этапа с учетом FFDH приведена на рис. 3.5 а).

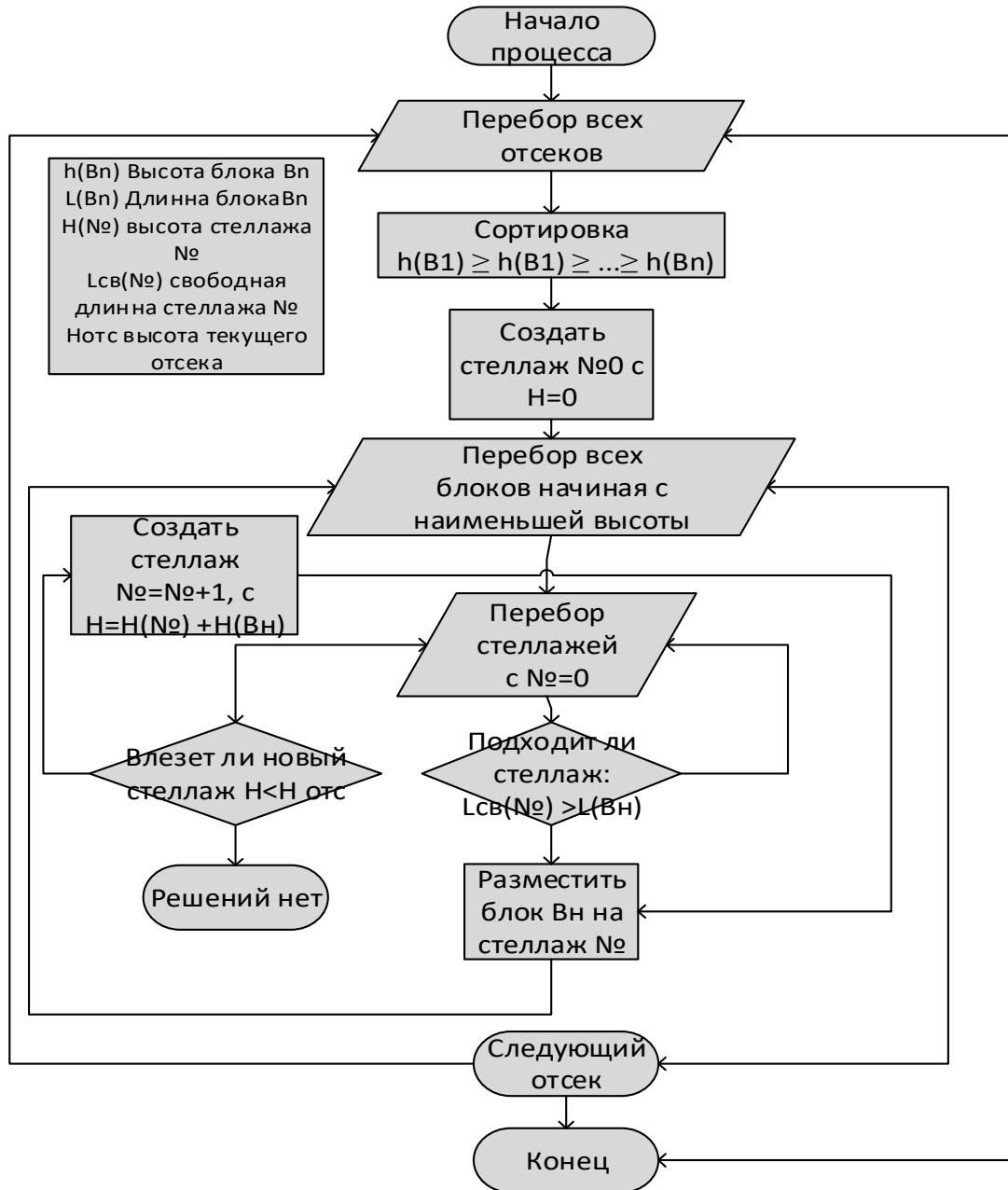


Рис. 3.5 а) – Алгоритм решения плоского этапа

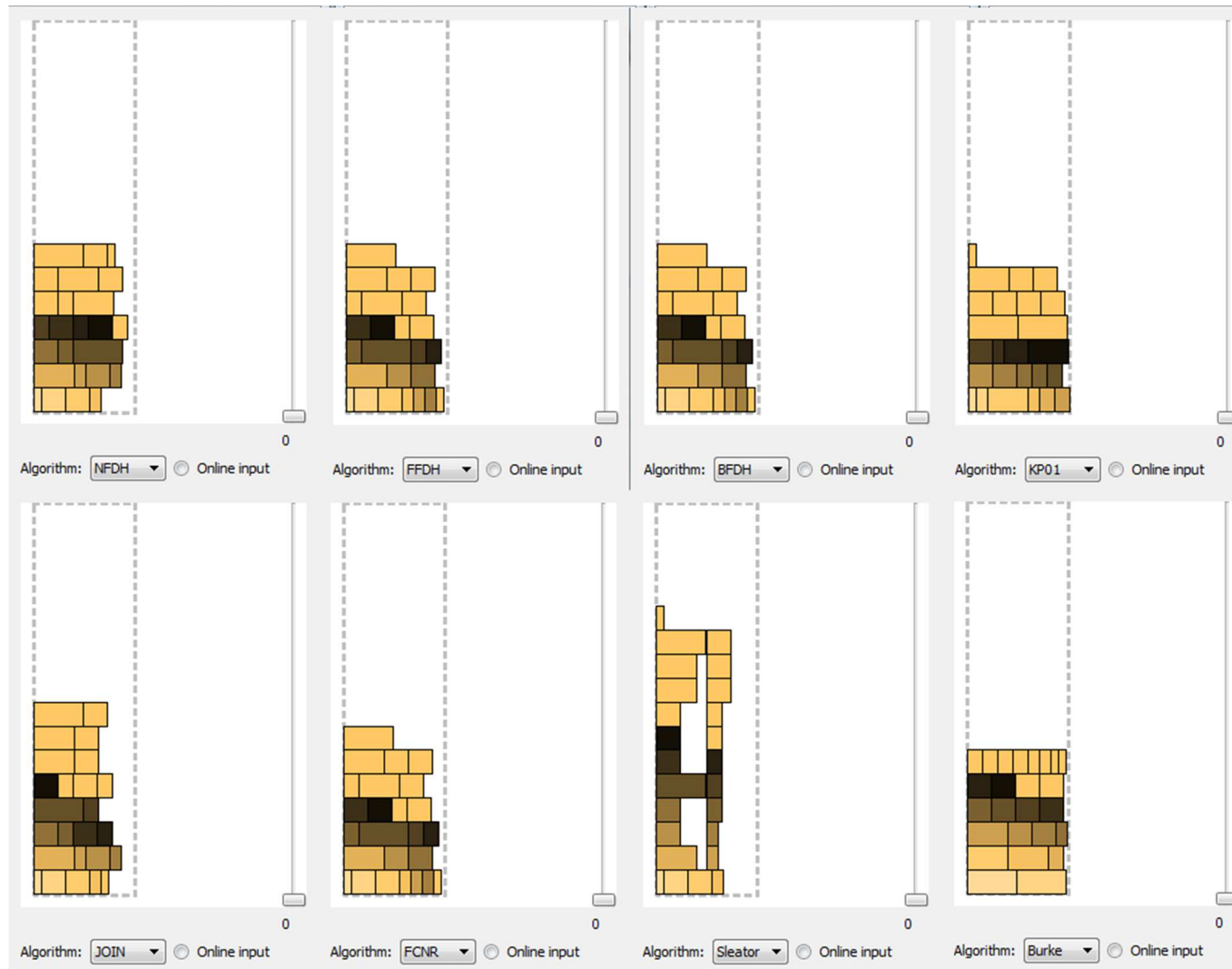


Рис. 3.5 б) – Сравнение алгоритмов упаковки

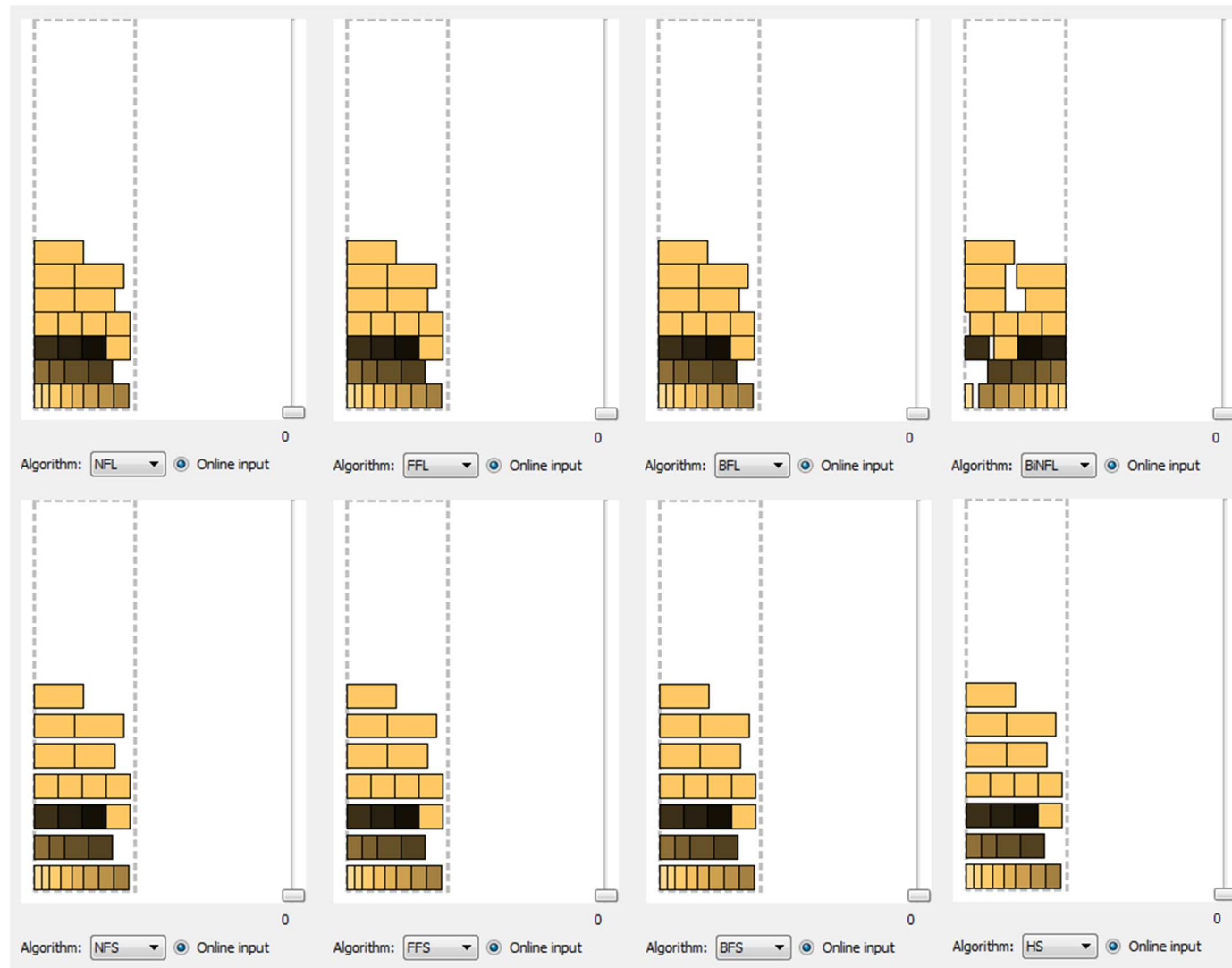


Рис. 3.5 в) – Сравнение алгоритмов упаковки

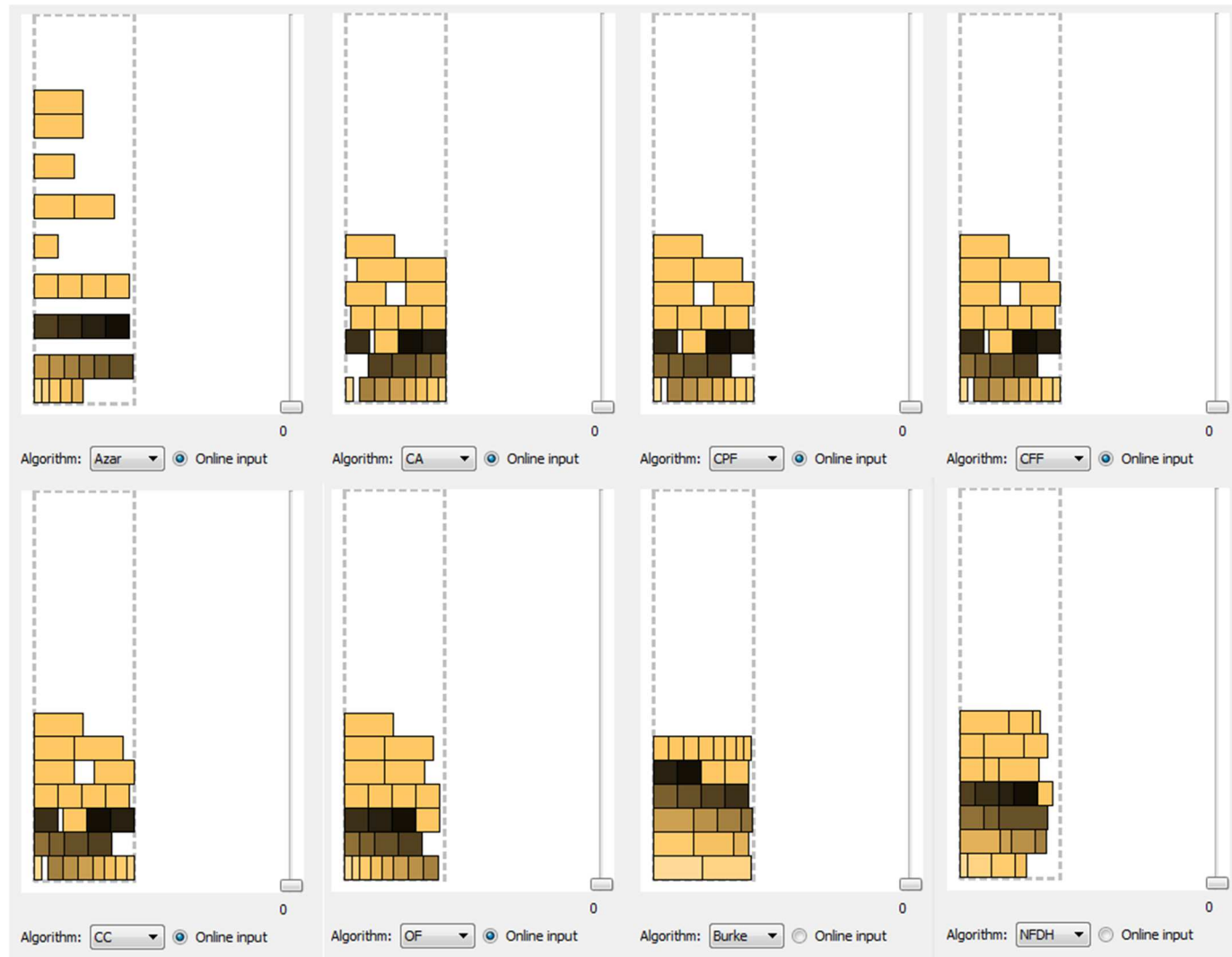


Рис. 3.5 г) – Сравнение алгоритмов упаковки

### 3.4 Программная реализация

В основе структуры данных лежат следующие классы:

- block – хранит в себе параметры блоков БРЭО;
- field – параметры отсеков, а также размещенные в них блоки;
- chain – параметры коммуникации между блоками;
- point – параметры точки трассировки, в т.ч. разрешённые переходы;
- solution – хранит в себе решение, в т.ч. массу межотсечных коммуникаций;

Схема классов приведена на рис 4.6.

Можно отметить, что в целом структура данных в классах подобна математической постановке задачи и распределению исходных данных по этапам

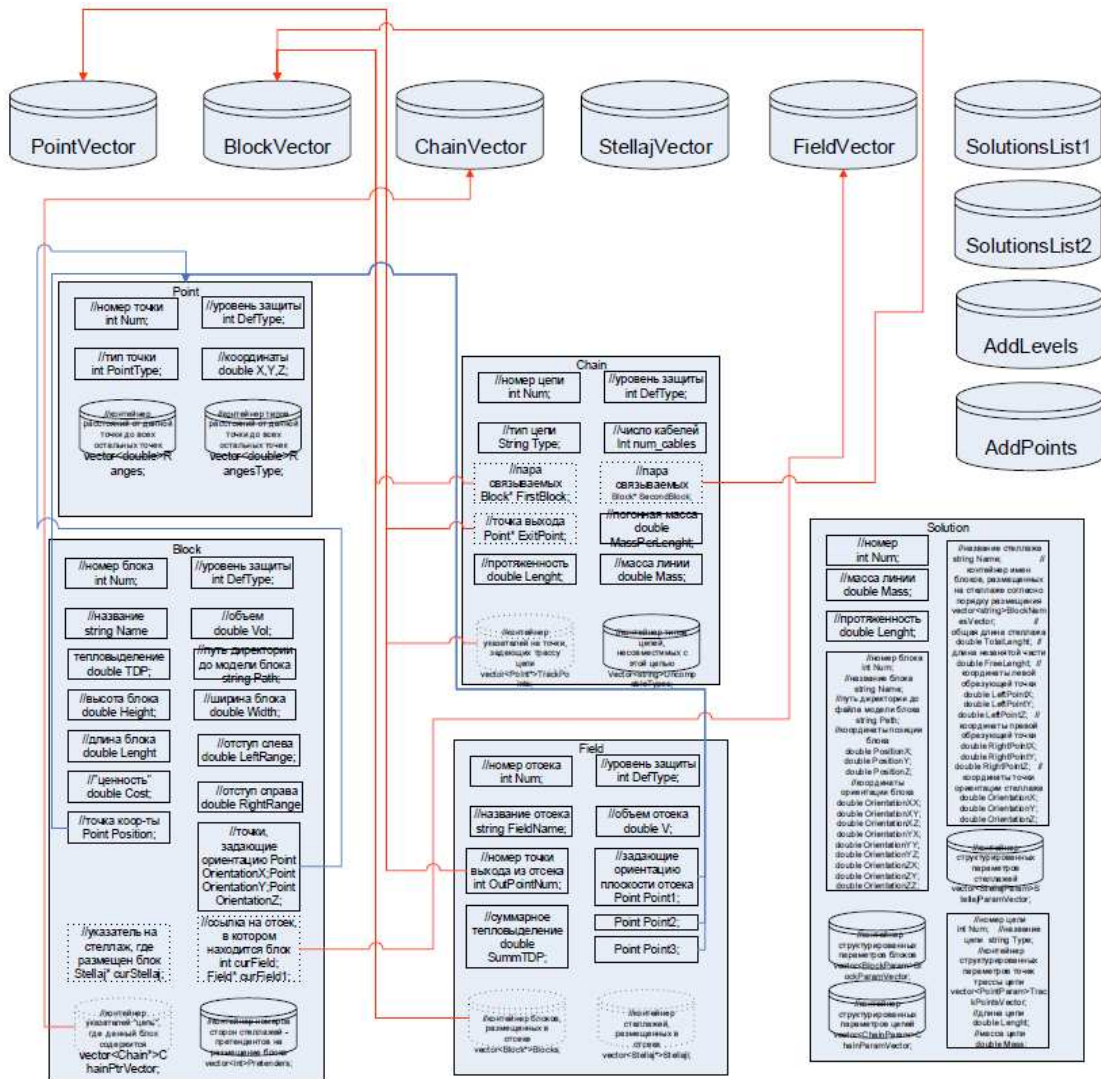


Рис.3.6 – Схема классов программы

Программа состоит из нескольких модулей:

- главный модуль Main - осуществляет инициализацию данных, предоставляет выбор пользователю и запускает нужный этап;
- одномерный решатель- соответствует 1му этапу методики;
- плоский решатель - соответствует второму этапу;
- постпроцессор input/output - осуществляет обработку результатов (в т.ч. создание схем, трёхмерных эм и др), экспорт/ импорт решений и т.п.;

После завершения одного из решателей осуществляется переход в главный модуль, где пользователь может выбрать дальнейшие действия.

Отбор решений человеком производится между модулями, посредством отбора решений и запуска нужных из них в работу.

Подготовка исходных данных, запуск расчетов и обработка результатов производится во внешнем открытом ПО.

Обмен данными между модулями осуществляется за счет загрузки информации главным модулем в общие контейнеры- вектора. Но в зависимости от этапа заполняются разные данные (см. Диаграмму использования данных)

Схема запуска модулей программы приведена на рис.3.7.

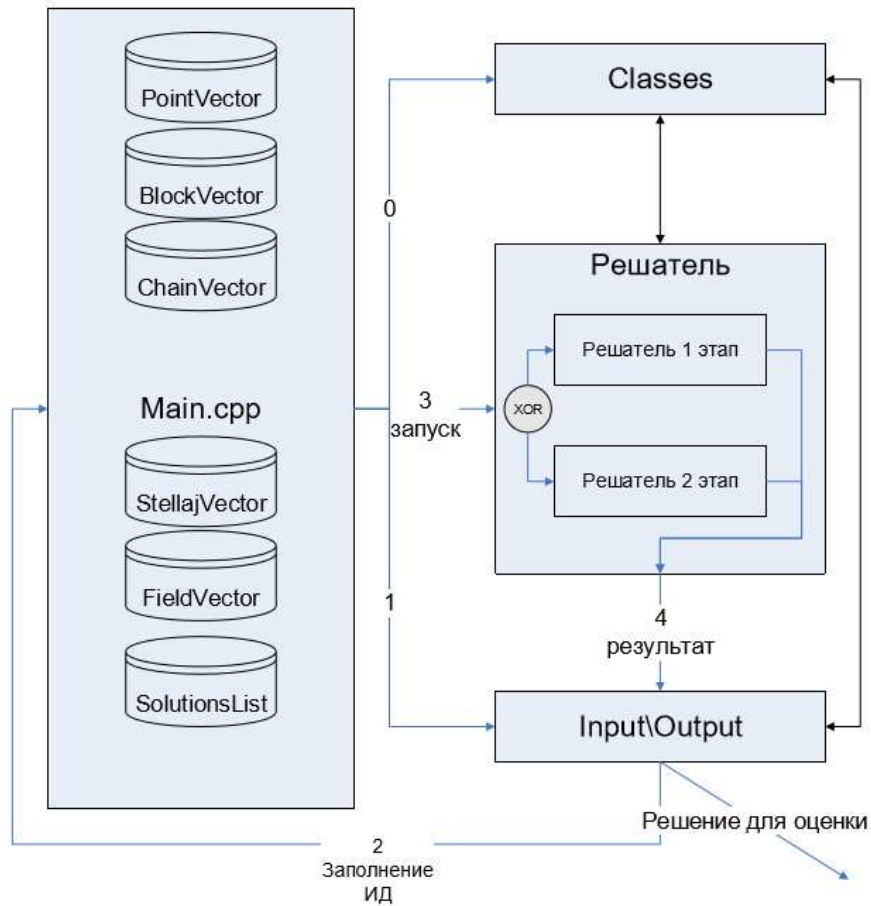


Рис.3.7 – Схема запуска модулей программы

Процесс проведения автоматизированной компоновки объекта условно можно разделить на следующие этапы:

1. Сбор исходных данных по объектам.
2. Обработка и подготовка исходных данных.
3. Отправка задачи на расчет.
4. Выполнение расчета на ЭВМ.
5. Обработка результатов.

Рассмотрим более подробно некоторые из них.

Для работы тестируемой программы все ИД задачи необходимо привести к определенному формату. Данный формат задает точное соответствие между блоками, отсеками и пр. с их характеристиками (объем, тепловыделение, защищенность, наличие связи и ее тип) с помощью индекса. Приведение исходных данных к такому формату включает в себя следующие пункты:

1. Составление проиндексированного списка отсеков под размещение оборудования с их объемами и уровнем воздействия в них.
2. Составление проиндексированного списка размещаемых блоков с их характеристиками: объем, тепловыделение, уровень защищенности.
3. Составление проиндексированного перечня всех связей компокуемых блоков, включая как межблочные связи, так и связи блоков с внешними источниками/потребителями, с типами таких связей и уровнем их защищенности.
4. Составление карты прокладки линий связей между отсеками в виде ввода пары номеров отсеков и расстояния между ними. Учитывается расстояние между центрами объемов данных отсеков для учета «цены прохождения» через них. В случае, если непосредственного доступа из одного отсека в другой не предусмотрено, то соответствующее значение расстояния принимается = 0.

В ходе форматирования ИД составляются списки блоков, отсеков и связей, и каждому блоку, отсеку и каждой связи присваивается свой порядковый номер. Причем блоки с варьируемым размещением задаются первыми в данном списке. Далее по порядку идут блоки, размещаемые вручную и блоки с фиксированным положением.

Для уменьшения общей трудоемкости форматирования ИД разработана частичная автоматизация данного процесса в виде макросов на языке Visual Basic в программе электронных таблиц Microsoft Excel.

Отправка задачи на расчет осуществляется после ввода в соответствующие текстовые файлы ввода исходных данных строго в определенном формате.

Файловый ввод/вывод исходных данных задачи и результата расчета происходит посредством следующих текстовых файлов:

- A\_V\_M\_T\_P\_C\_Ka.txt - основной файл, содержит размерность задачи: количество отсеков (A) для размещения, количество компокуемых блоков (B), вручную размещаемых блоков (M), точечных источников/ потребителей



(Т), дополнительных точек возможного прохождения маршрута линий связей (Р), количество структурных связей (С), коэффициент использования физического объема в отсеках (Ка).

- Fields.txt - значения объемов отсеков и воздействия в отсеках.
- Blocks.txt - значения объемов блоков, тепловыделение и допустимые уровни воздействия на блоки.
- Chains.txt - проиндексированный перечень структурных связей блоков их типам и уровни защищенности связей.
- Manual.txt - проиндексированный перечень вручную размещенных блоков по отсекам.
- Ranges.txt - значения расстояний между отсеками, точечными источниками/потребителями и дополнительными точками трассировки линий связей (точки входа/выхода в отсек и т.п.).
- Result.txt – результат расчета, включающий варианты распределения блоков по отсекам, значения суммарного тепловыделения и свободного объема в отсеках, маршруты трасс жгутов коммуникаций.

По готовности данных файлов пользователем запускается приложение *Multitask.exe*.

Приложение предусматривает возможность ввода ИД через консоль. В случае выбора файлового ввода ИД и обнаружения ошибки в ИД приложение выведет в консоль сообщение об ошибке с указанием файла, где обнаружена ошибка, и характер данной ошибки. На текущий момент данное приложение крайне чувствительно к формату введенных данных, что требует тщательной проверки введенных ИД.

Далее приложение запрашивает ввод числа потоков, на которые будет разбита задача. Распараллеливание в данном случае осуществляется на уровне задачи. Все расчетные потоки одной задачи являются независимыми, какого-либо обмена данными между ними и синхронизации их работы не требуется. Возможен запуск

на нескольких не связанных сетью ЭВМ, причем гарантируется отсутствие потери возможных вариантов решения.

После ввода числа потоков приложение *Multitask.exe* генерирует соответствующее число папок с вложенными файлами ИД и решателем *Solver.exe* в своей директории. Имена папок соответствуют порядковым номерам расчетных потоков. Также в исходной директории генерируется пакетный файл MS-DOS *Run.bat*, запуск которого инициирует одновременный запуск всех сгенерированных решателей. Каждый решатель просчитывает только свой диапазон итераций.

Для эффективной работы и удобства пользователей необходимо представлять результаты работы программы АК в виде 3х-мерной модели. Визуализация варианта компоновки, выработанного программой АК, значительно повышает эффективность процесса его оценки.

При этом предъявляются следующие требования:

- полученный файл должен открываться в программе NX;
- файл должен содержать узнаваемые модели блоков, предпочтительно – 3хмерные модели блоков, предоставленные в исходных данных;
- взаимные расположения и расстояния между блоками должны соответствовать расчетным;
- должна быть предусмотрена возможность интегрирования файла-результата в программный продукт TeamCenter;
- элементы конструкции и др. могут быть показаны условно.

ПО Siemens NX может открывать следующие типы файлов, пригодные для хранения 3х мерных электронных моделей:

Табл. 3.2 – поддерживаемые форматы файлов

файл	Комментарий	С-ть с ТС	сборка
*.prt	UG part - параметризованная геометрия	+	+
*.x_t	Parasolid непараметризованная геометрия	+	+/-
*.igs	IGES – файл, непараметризованная геометрия	+	-
*.stp	step – файл, непараметризованная геометрия	+	-
*.stl	Stereolithography	-	-

Из таблицы видно, что структурированные сборки поддерживает только \*.prt., поэтому этот формат выбран для дальнейшей работы.

Для визуализации решения пользователь в рабочем \*.prt файле запускает Journal файл, который содержит последовательные команды на загрузку компонентов в сборку с заданными координатами, где компонентом является трехмерная модель блока, а координаты – результат работы решателя.

Journal – текстовый файл, содержащий команды NX S.N.A.P. (Simple NX Application Programming) в определенном порядке, за счет чего осуществляется алгоритмизация действий. NX S.N.A.P. представляет собой программный интерфейс NX UG (Application Programming Interface - API). Введен в 8 версии (NX8) и является стандартным средством NX8 и более. Данный стандарт поддерживает необходимые команды: загрузки компонента, перемещения в 3х координатах, вращение относительно 3х осей и др. UG NX по команде пользователя загружает данный файл и далее выполняет содержащиеся в нем команды автоматическом режиме.

Journal файл с положениями блоков генерируется пост процессором путем преобразования полученного решения и заданных ЭМ. Параметризованная геометрия должна быть подготовлена заранее в виде файлов NX, где тела размещены определенным образом

Принцип работы генератора journal файлов показан на рис. 3.8.

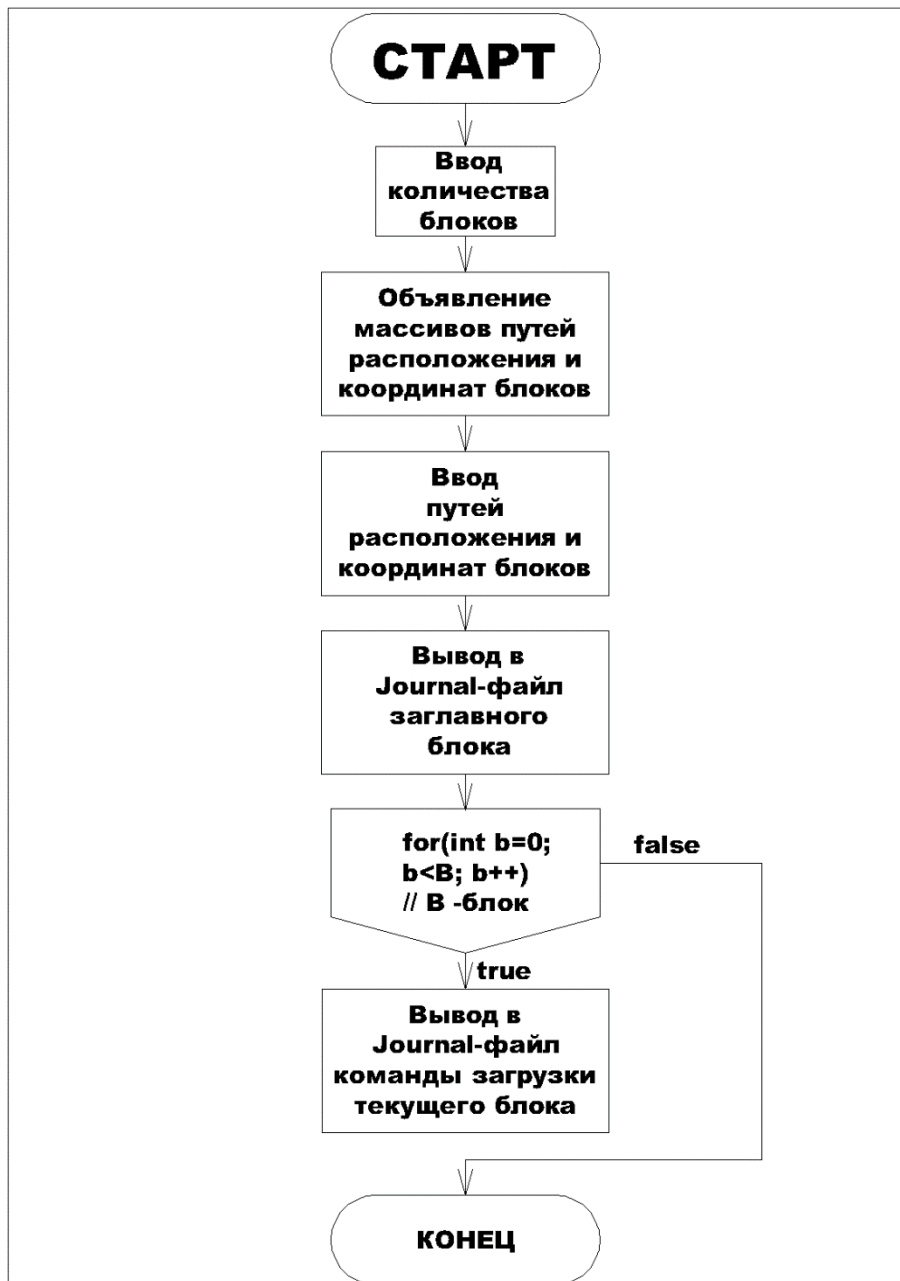


Рис. 3.8 – Блок-схема программы визуализации результатов в UG

Пример Journal файла приведен в приложении И.

Таким образом, в заключение третьей главы необходимо отметить следующее:

1. На основе предложенной модели компоновки и методики поэтапного решения задачи АК создан общий алгоритм решения задачи, отражающий последовательность перехода от этапа к этапу с возможностью корректировки человеком.
2. Для каждого этапа рассмотрены существующие и выбран наиболее рациональный из них или предложен новый на их основе:
  - Первый этап, перебор блоков – алгоритм на базе метода ветвей и границ;
  - Первый этап, трассировка коммуникаций – алгоритм Дейкстры;
  - Второй этап – алгоритм FFDH.
3. Алгоритмы реализованы в ПО модульной архитектуры, написанных на языке C++:
  - заглавный модуль Main - осуществляет инициализацию данных, предоставляет выбор пользователю и запускает нужный этап;
  - одномерный решатель- соответствует 1му этапу методики;
  - плоский решатель - соответствует второму этапу;
  - постпроцессор input/output - осуществляет обработку результатов (в т.ч. создание схем, трёхмерных эм и др), экспорт/ импорт решений и т.п..
4. Функционал ПО помимо структуры данных и непосредственно расчета, также включает визуализацию результатов в современном САПР (Siemens NX/TC) за счет языка Journal и средства поддержки проведения расчета в режиме многопоточности.
5. Подготовка исходных данных предполагается в открытом или общедоступном ПО (MS Office), загрузка в ПО осуществляется в текстовом виде.
6. Для промышленной эксплуатации необходимо разработать и включить в состав ПО модуль для автоматизации подготовки исходных данных, однако это выходит за рамки данной работы.

## 4 Тестирование, верификация и апробация

После разработки программного комплекса, реализующего описанные выше алгоритмы, необходимо:

- проверить работоспособность каждого отдельного модуля и всей программы в целом. С этой целью необходимо разработать несколько вариантов верификационных задач, направленных на конкретные функции каждого модуля, и решить их с помощью апробируемого ПК;
- выявить ошибки при работе текущей версии программы и внести исправления;
- получить данные о производительности тестируемой программы при различных вариациях алгоритма АК на объектах по своей сложности и параметрам близким к реальным изделиям. Для этого необходимо разработать несколько вариантов тестовых задач;
- провести апробацию ПК на решении реальной задачи;
- собрать данные о трудоемкости подготовки исходных данных, необходимых для проведения АК объекта.
- выполнить анализ полученных вариантов компоновки с целью оценки их реализуемости и эффективности путем экспертной оценки профильным отделом предлагаемого варианта, на основании которой подготовить заключение о реализуемости.
- выполнить оценку эффективности по сравнению с базовым вариантом компоновки объекта путем сравнения таких параметров как суммарная масса межотсечных коммуникаций и отношение занятого блоками объема отсека к его полному объему.

При выполнении задач тестирования необходимо учитывать, что неизменными остаются как постановка самой задачи АК объекта, так и методы, алгоритмы АК и трассировки межотсечных коммуникаций. Внесение исправлений в исходный код программы предусматривает только ликвидацию ошибок по ходу выполнения задачи АК.

Таким образом, для тестирования программного комплекса необходимо разработать и решить им задачи 3 типов:

- верификационные – показывают, что ПО работает корректно;
- тестовые – необходимы для оптимизации и сбора статистики по работе алгоритмов, а также отработки подготовки исходных данных;
- апробация на реальной задаче.

#### ***4.1 Описание верификационных задач***

Основное назначение верификационных задач- показать правильность работы алгоритма. Поскольку важна проверка именно корректности результатов работы, то решение должно быть очевидным для человека. Из этого следует, что задачи должны быть крайне малой размерности, т.е. использовать реальные задачи или снять данные о производительности с верификационных задач не представляется возможным.

Были разработаны 3 задачи, охватывающие отдельно каждый этап (распределение блоков по отсекам, трассировку, упаковку на плоскости) и 1 общая, проверяющая их комплексирование.

Поскольку все задачи очевидны для человека, то далее визуализируется только наилучшее решение, найденное алгоритмом.

Рассмотрим задачу *трассировки маршрутов по зонам разрешенных переходов (простой граф) между зафиксированными блоками*

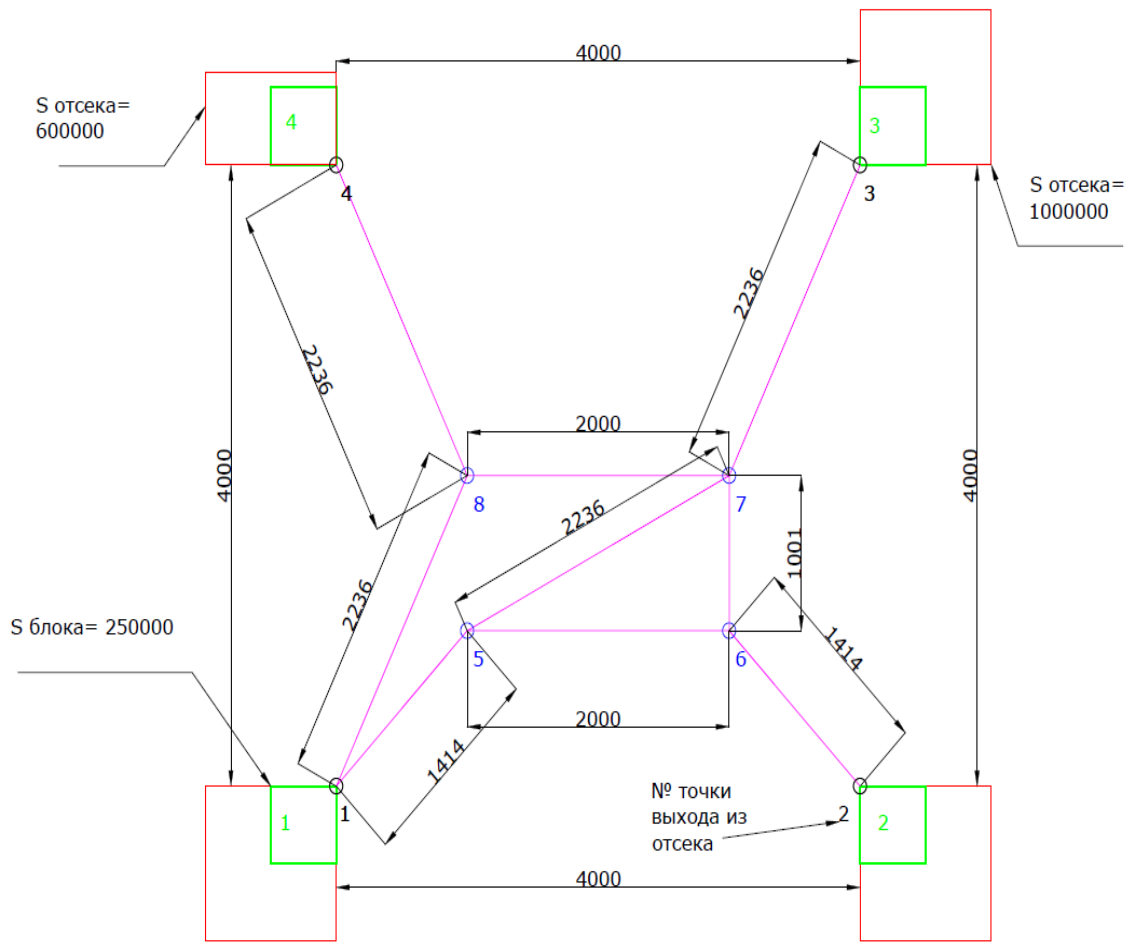


Рис.4.1 – Схема отсеков и расположения блоков.

Необходимо проложить линии связи минимальной длины между блоками 1-3, 1-4, 1-2, 2-4, для чего по расположению блоков определить соответствующие точки выхода из отсеков и уже между ними построить маршруты для трасс по зонам разрешенных переходов, обозначенных на рис. 4.1.

Результат работы алгоритма показан на рис.4.2. – 4.5 Для сравнения в табл. 4.1 – 4.4 приведены всевозможные комбинации маршрутов соответственно.



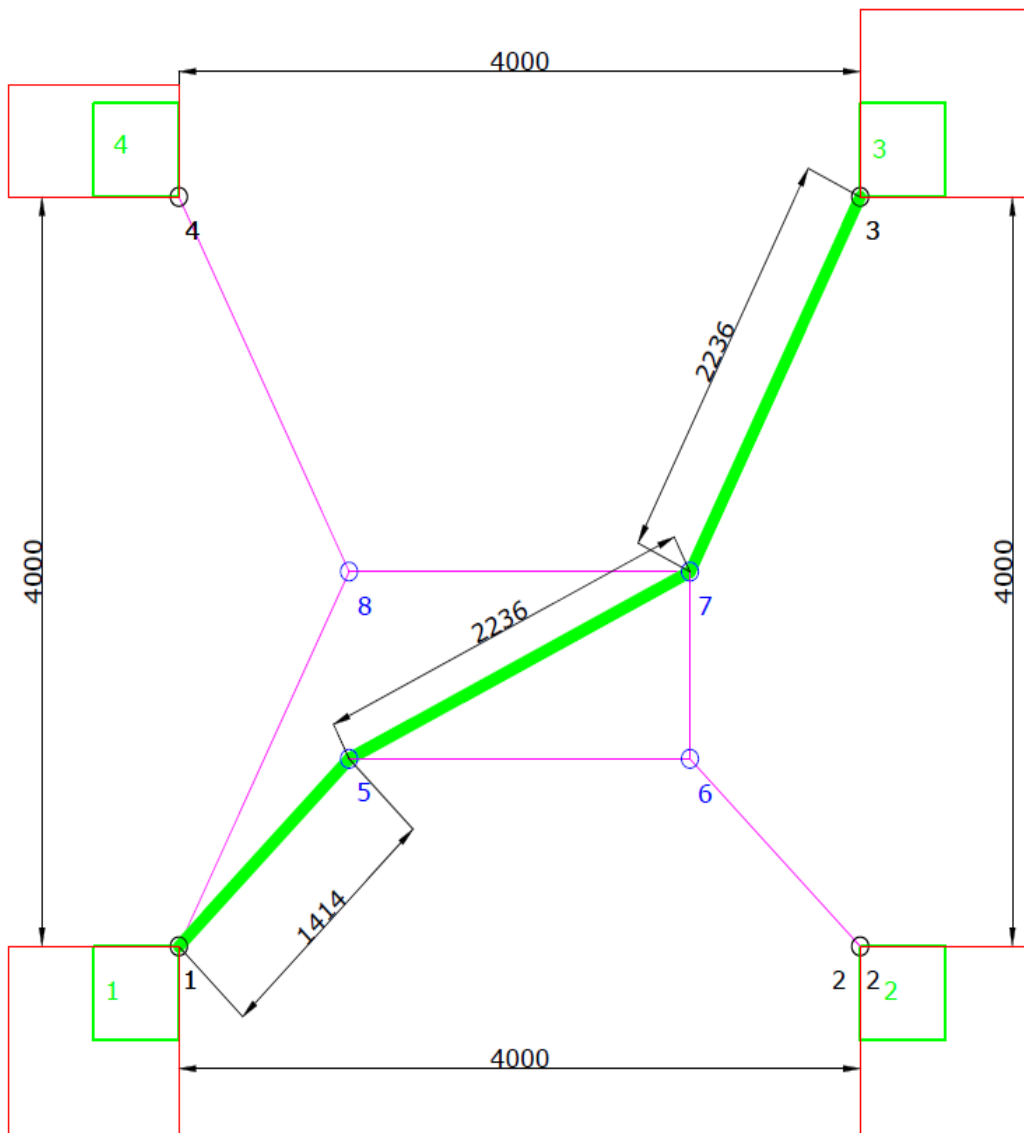


Рис.4.2 – Схема отсексов и расположения блоков для трассы 1-3.

Табл. 4.1 – Варианты маршрутов для трассы 1-3

	Маршрут	Длина
1-3	1-5-7-3	<b>5886</b>
1-3	1-5-6-7-3	6650
1-3	1-8-7-3	6472

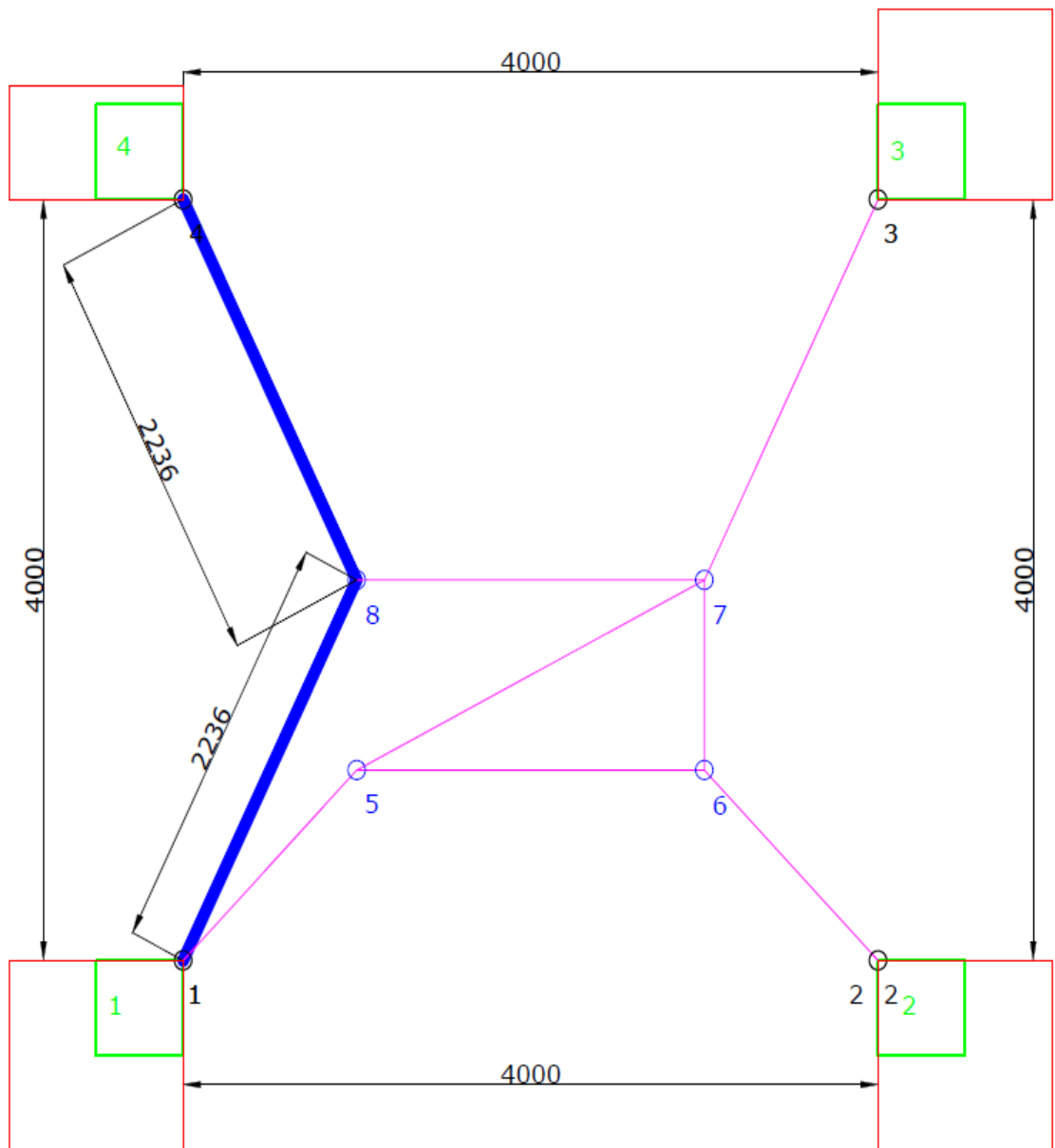


Рис.4.3 – Схема отсекaв и расположения блоков для трассы 1-4.

Табл. 4.2 – Варианты маршрутов для трассы 1-4

	Маршрут	Длина
1-4	1-8-2	<b>4472</b>
1-4	1-5-7-8-2	7886
1-4	1-5-6-7-8-2	8650

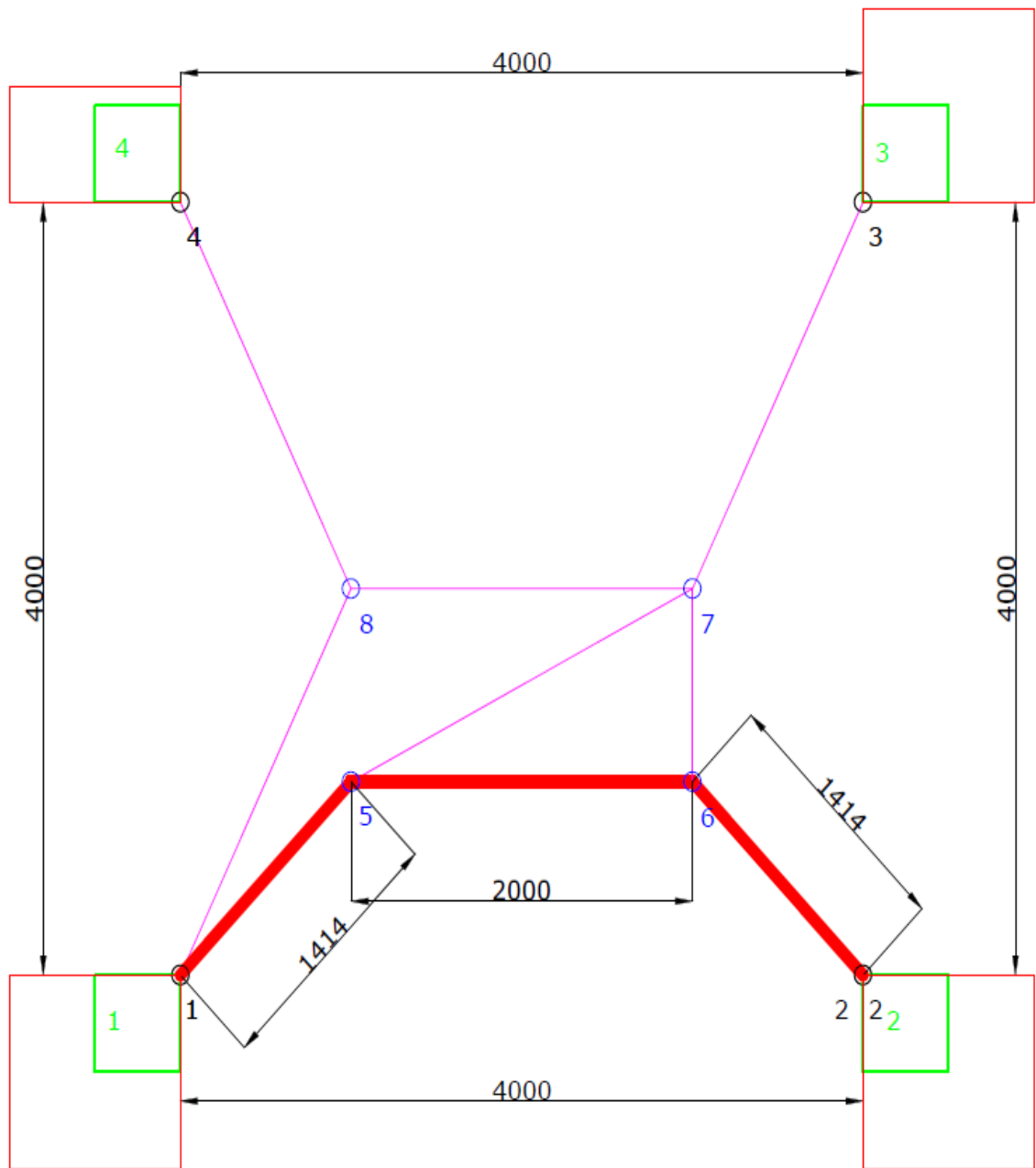


Рис.4.4 – Схема отсектов и расположения блоков для трассы 1-2

Табл. 4.3 – Варианты маршрутов для трассы 1-2

	Маршрут	Длина
1-2	1-5-6-2	<b>4828</b>
1-2	1-5-7-6-2	6064
1-2	1-8-7-6-2	6650

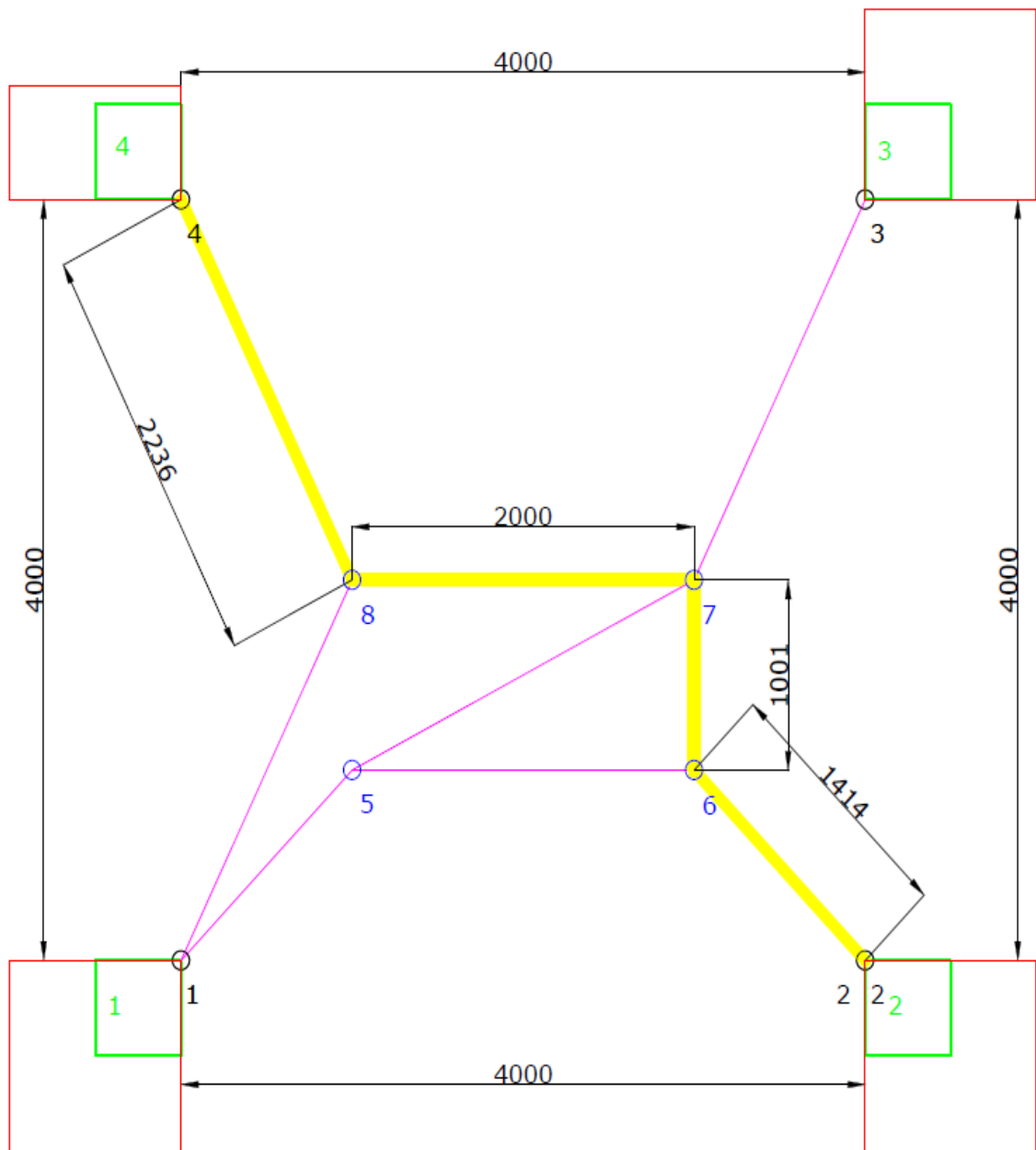


Рис.4.5 – Схема отсеков и расположения блоков для трассы 2-4

Табл. 4.4 – Варианты маршрутов для трассы 2-4

	Маршрут	Длина
2-4	2-6-7-8-4	<b>6650</b>
2-4	2-6-5-7-8-4	9886
2-4	2-6-5-1-8-4	9300

Анализ результатов показывает принципиальную возможность алгоритма прокладывать кратчайший путь на графе и рассчитывать его длину.

Рассмотрим задачу поиска оптимального распределения блоков по отсекам, обеспечивающего минимальную длину коммуникаций (прокладка по зонам разрешенных переходов)

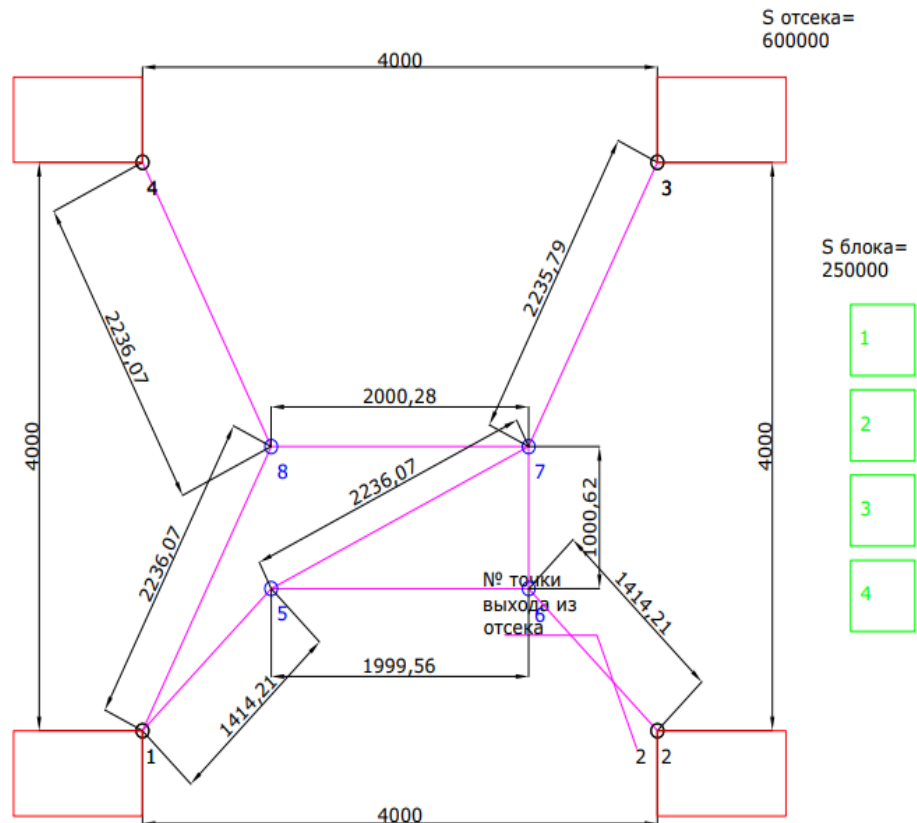


Рис.4.6 – Схема отсеков и расположения блоков.

Алгоритму необходимо перебрать все комбинации размещения блоков в отсеках и выбрать из них такое, чтобы длина коммуникаций была минимальна (внутриотсечными коммуникациями пренебречь). Коммуникации прокладываются только по разрешенным зонам. Превышение площади в отсеке не допускается. Список соединения блоков 1-3, 3-4, 1-2, 2-4. Площади отсеков и блоков приведены в таблице 4.5:

Табл. 4.5 а) – Блоки для задачи

№ блока	1	2	3	4	
Площадь, мм <sup>2</sup>	250000	250000	250000	250000	
Габариты, мм	500x500	500x500	500x500	500x500	

Табл. 4.5 б) – Отсеки для задачи

№ отсека	1	2	3	4	
Площадь, мм <sup>2</sup>	600000	600000	600000	600000	
Габариты, мм	600x1000	600x1000	600x1000	600x1000	

В результате алгоритм проложил каждую трассу, схемы которых приведены на рис. 4.7.-4.8.

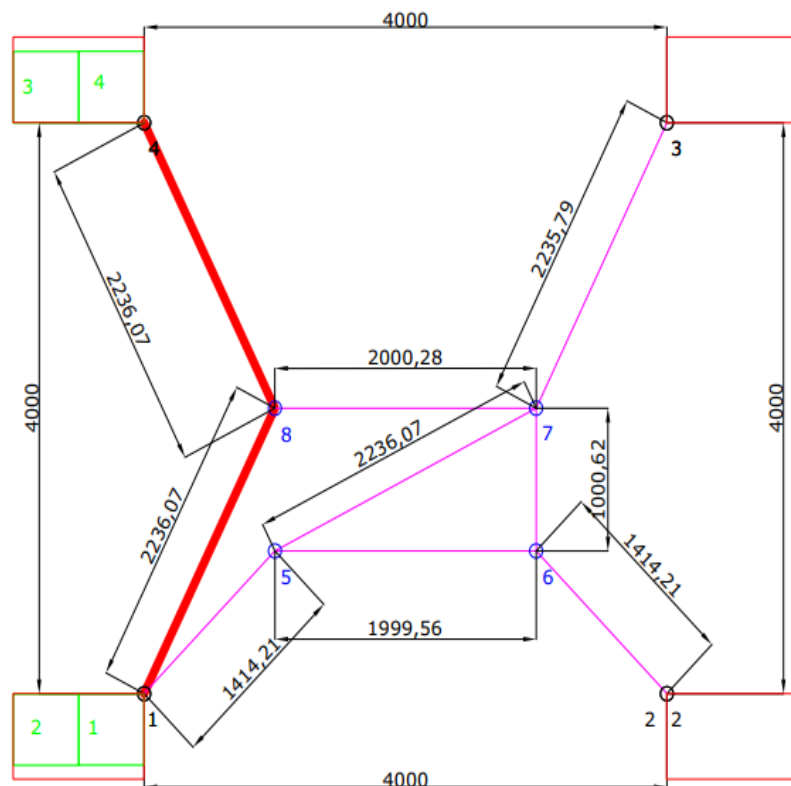


Рис.5.7 – Схема расположения блоков и трасса 2-4.

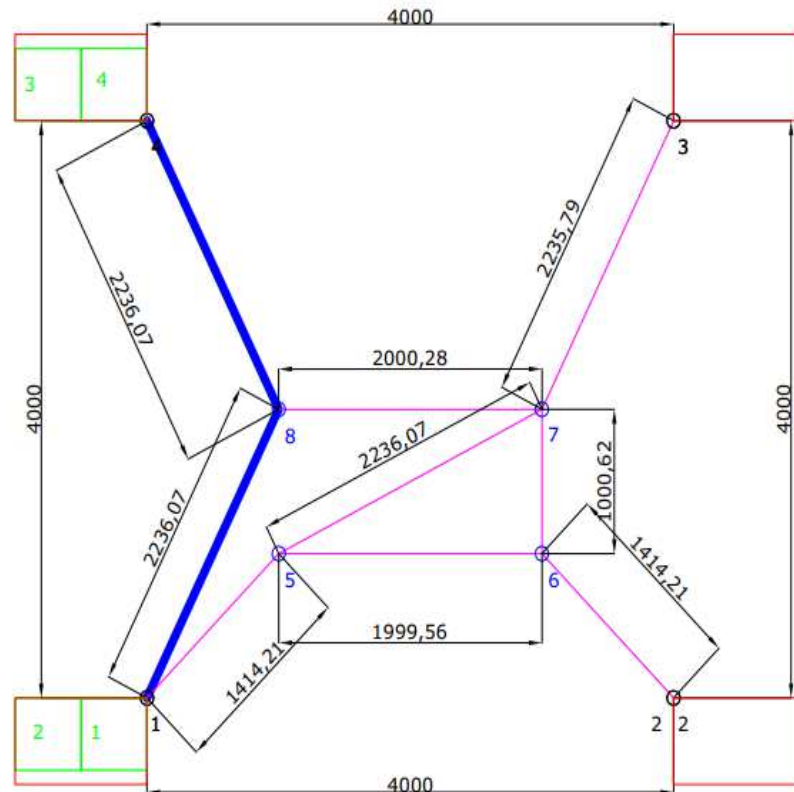


Рис.4.8 – Схема расположения блоков и трасса 1-3.

Данная задача показывает возможность перебора всех комбинаций размещения блоков в отсеках и их корректной оценки по длине коммуникаций.

Задача *трассировка маршрутов кабельной сети по зонам разрешенных проходов* состоит из паутинки, в которой 5 точечных источников (точки 1-5) и 7 узловых точек (точки 6-12). Расстояния показаны на рисунке 4.9. Прокладка коммуникаций разрешена только по разрешенным переходам.

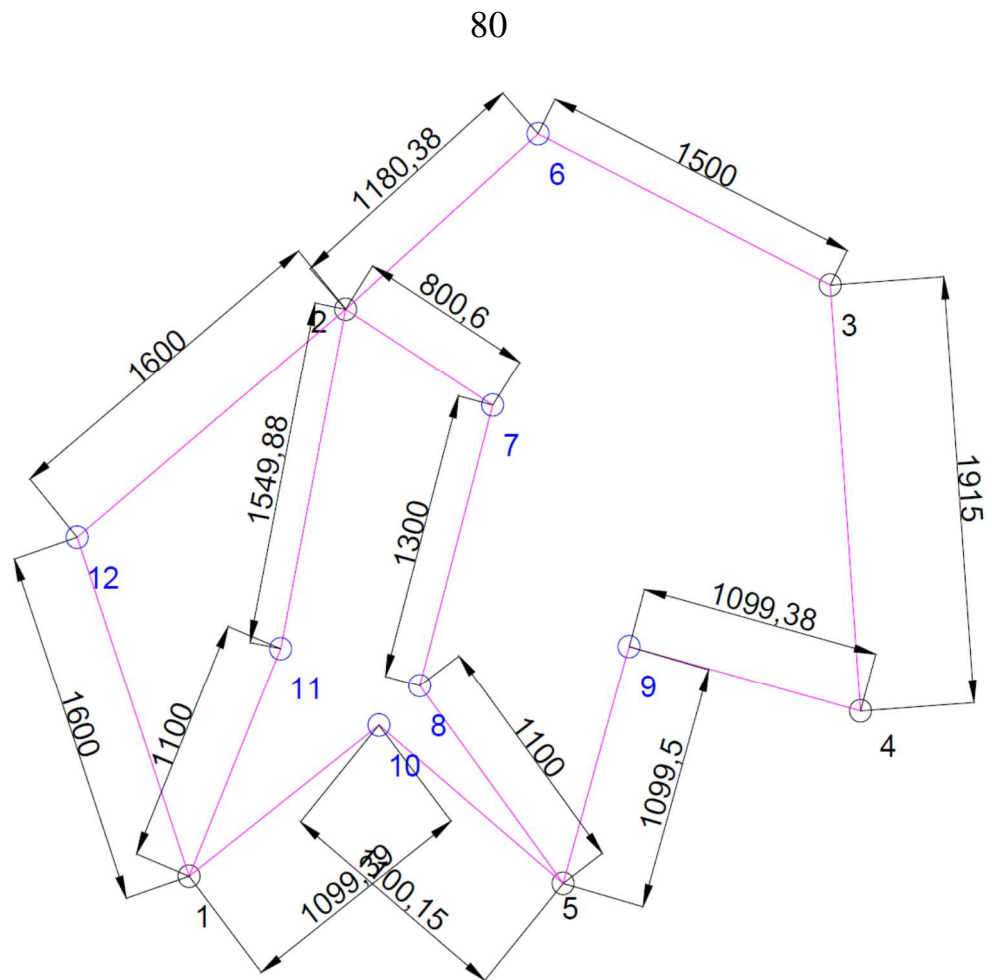


Рис.4.9 – Схема возможных зон прокладки маршрутов для верификации алгоритма трассировки.

*Требуется* проложить минимальный путь и рассчитать длину для 5 жгутов из разных точек: 1-3, 1-4, 5-2, 5-3, 2-4.

В результате алгоритм проложил каждую трассу, схемы которых приведены на рис. 4.10.

Очевидно, что алгоритм выбрал оптимальные решения, которые были также получены человеком.



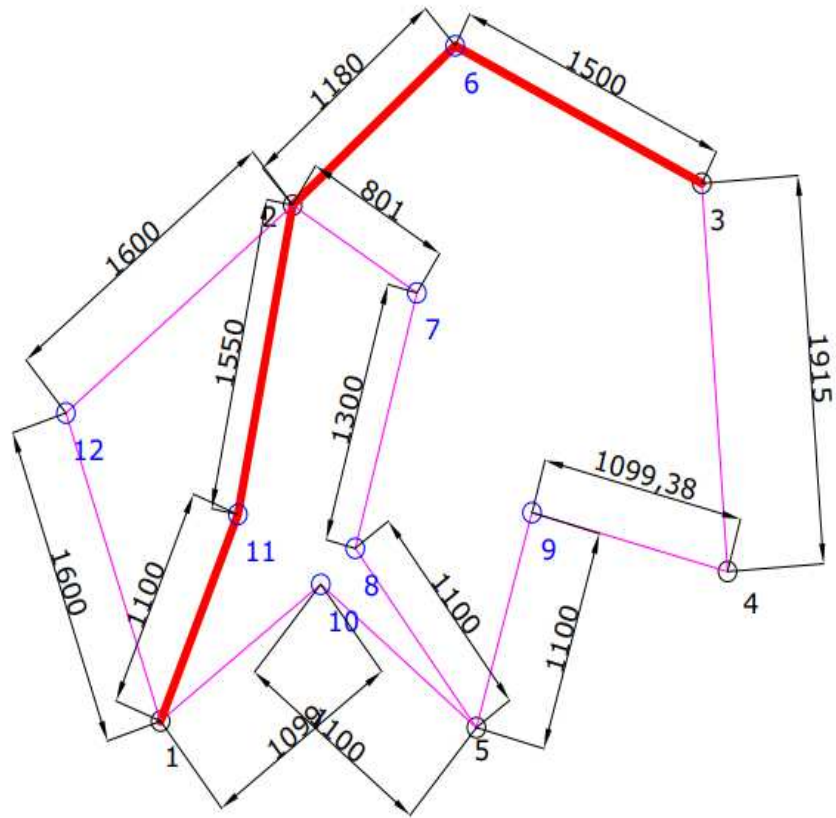


Рис.4.10 а) – Схема маршрута 1-3

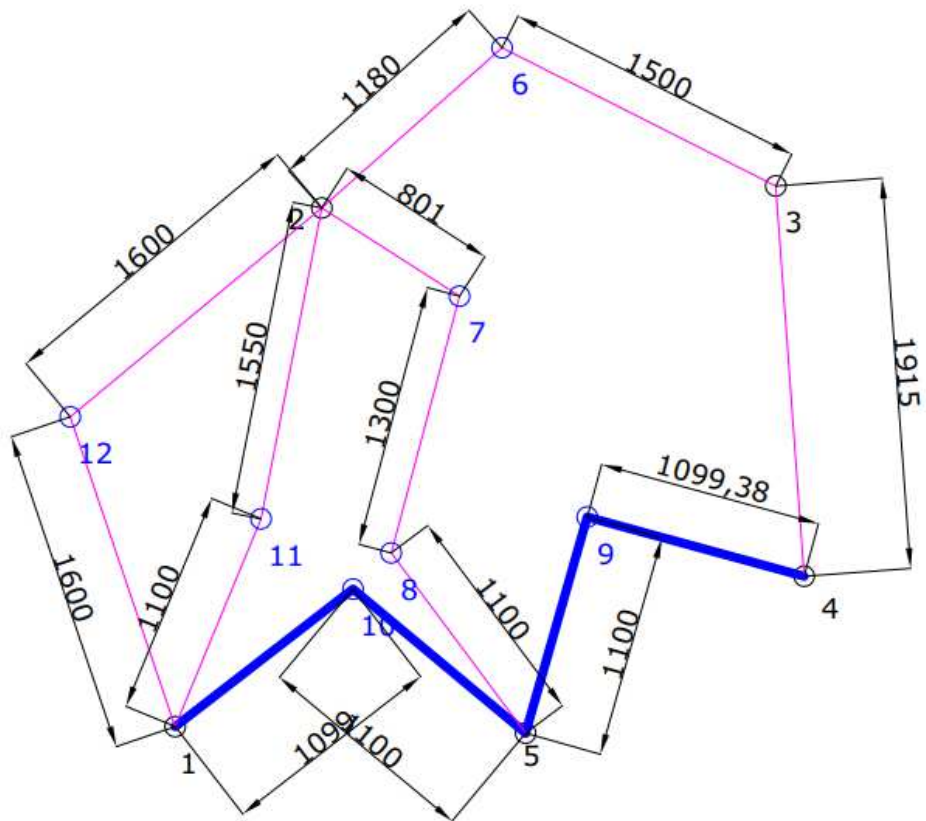


Рис.4.10 б) – Схема маршрута 1-4

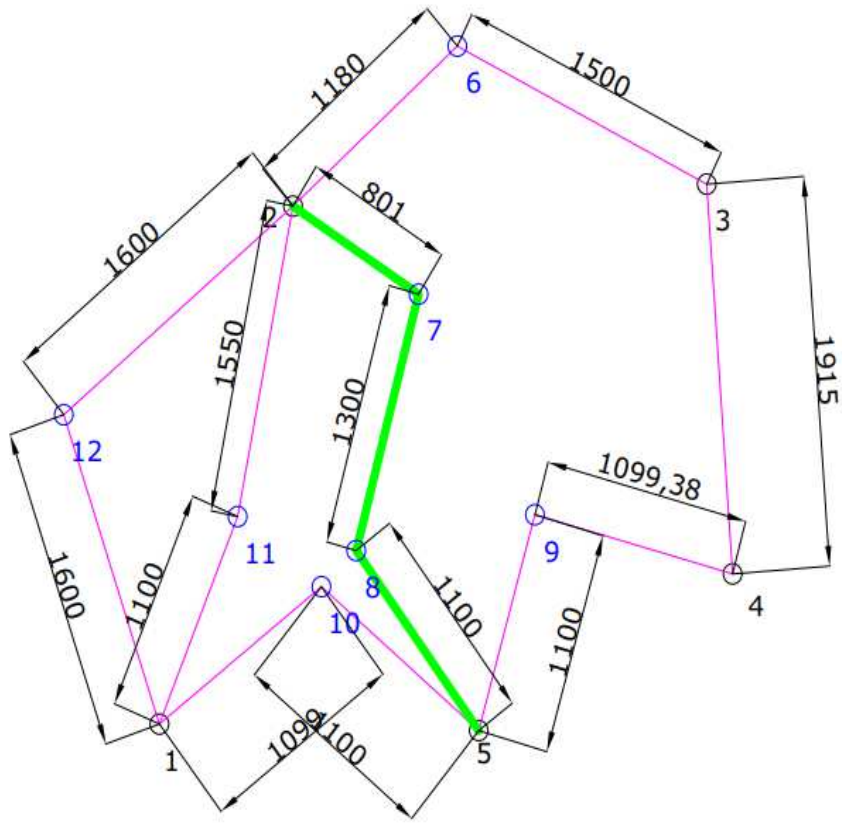


Рис.4.10 в) – Схема маршрута 5-2

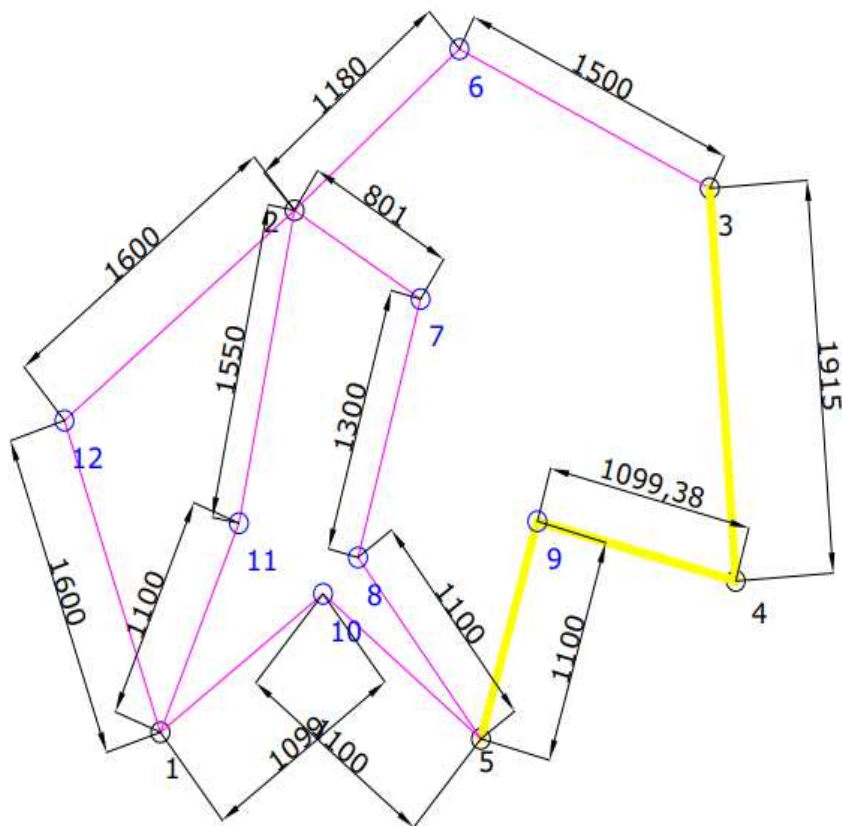


Рис.4.10 г) – Схема маршрута 5-3

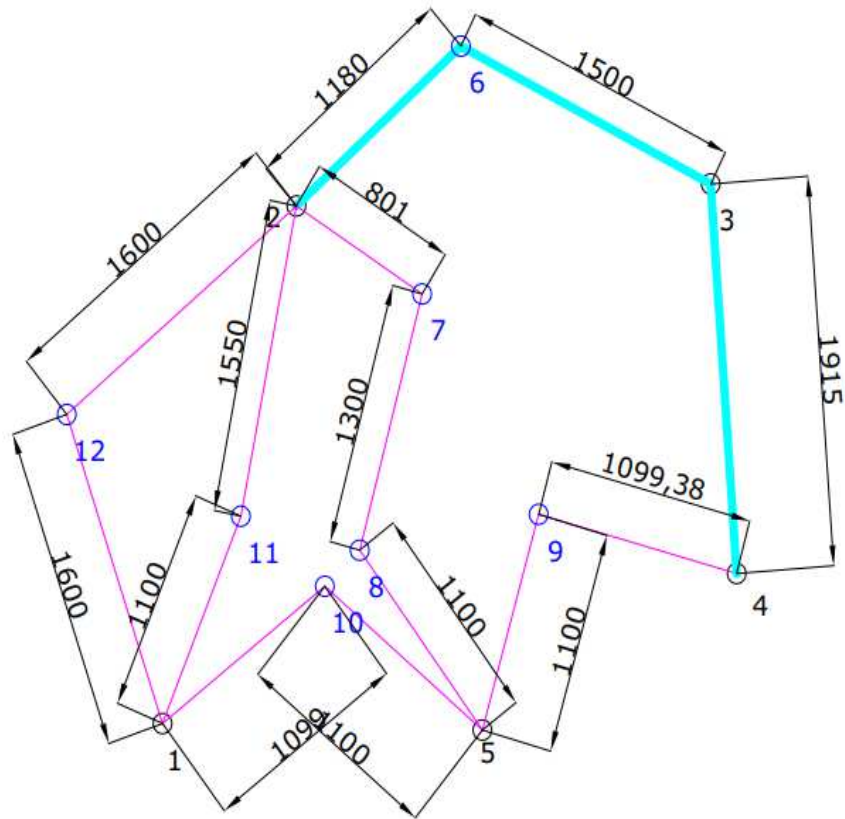


Рис.4.10 д) – Схема маршрута 2-4

Табл. 4.6 – Таблица длин маршрутов

№	Точки маршрута	Длина
1-3	1-11-2-6-3	5330
1-4	1-10-5-9-4	4330
5-2	5-8-7-2	3200
5-3	5-9-4-3	4115
4-2	2-6-3-4	4596

Данная задача показывает корректность работы алгоритма трассировки на сложном графе, способность его находить как кратчайший путь, так и корректность решения в целом

Верификация плоской постановки производится на *задаче компоновки типовых блоков в плоскости отсека*

Состоит из 1 отсека размера 640 на 880 мм., в котором размещаются 11 типовых блоков (табл. 4.7). Схема задачи приведена на рис. 4.11.

Табл. 4.7 – Блоки для задачи упаковки типовых блоков в плоскости отсека

№	Типоразмер	Ширина	Высота	Примечание
1	2,5К	257	194	
2	2К	190	194	
3	0,5К	60	194	
4	1К	90	194	
5	1,5К	124	194	
6	2К	190	194	
7	1,5К	157	194	
8	3К	324	194	
9	4К	390	194	
10	3К	324	194	
11	2К	190	194	

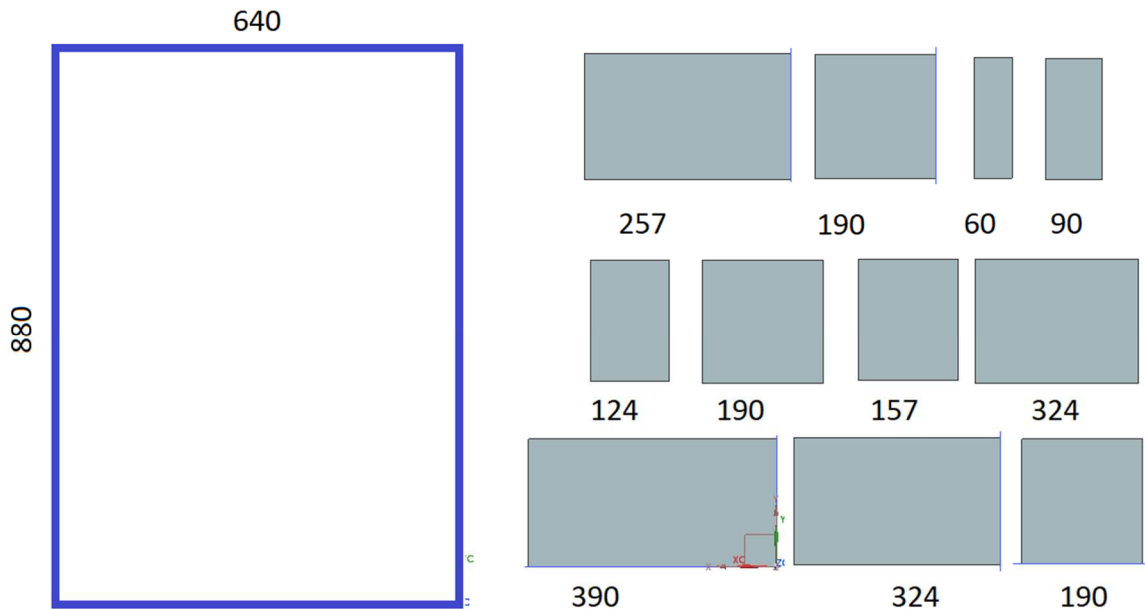


Рис.4.11 – Схема задачи упаковки типовых блоков в плоскости отсека

*Задача алгоритма:* упаковать блоки и найти минимальную высоту.

Для решения в первую очередь алгоритм сортирует блоки по ширине (рис. 4.12). В этом порядке они будут размещаться.

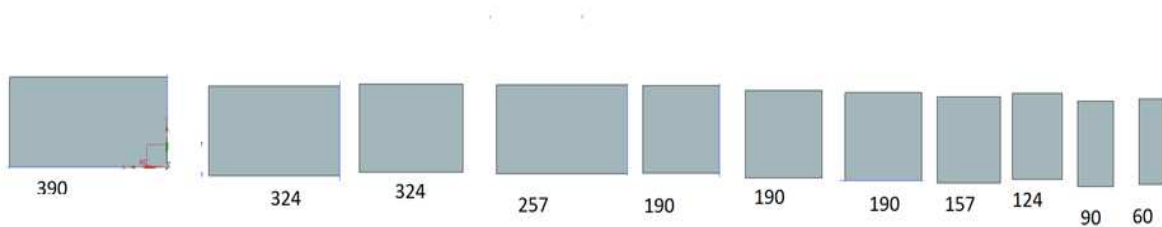


Рис. 4.12 – Блоки после сортировки по ширине

Далее алгоритм поочередно заполняет уровни. Блоки размещаются по порядку сортировки. (рис. 4.13)

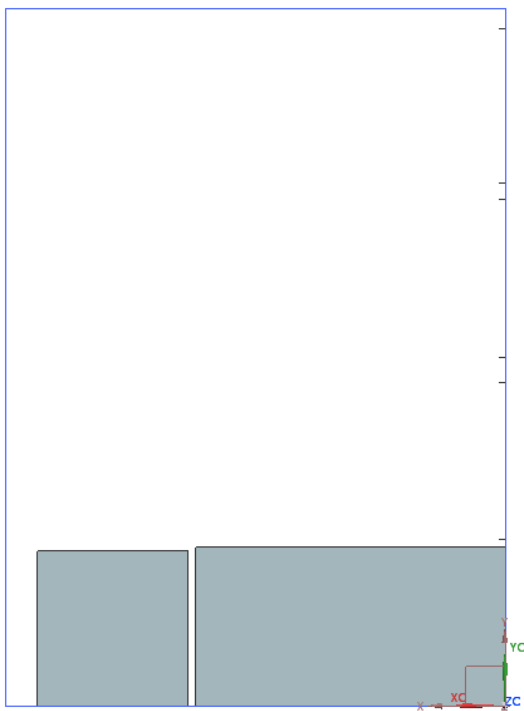


Рис.4.13 – Шаг 1-2: заполненный 1й уровень

При заполнении уровня и невозможности разместить там ни одни из оставшихся блоков – создается следующий уровень. И так до размещения всех блоков. (Рис. 4.14 – 4.16)

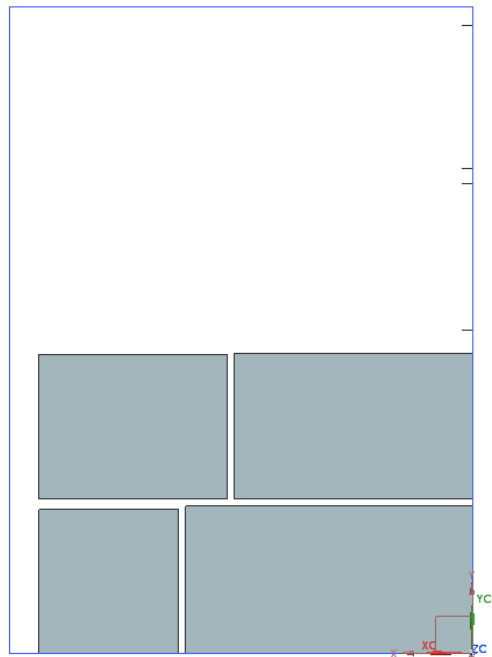


Рис.4.14 – Шаг 3-4: заполненный 2й уровень

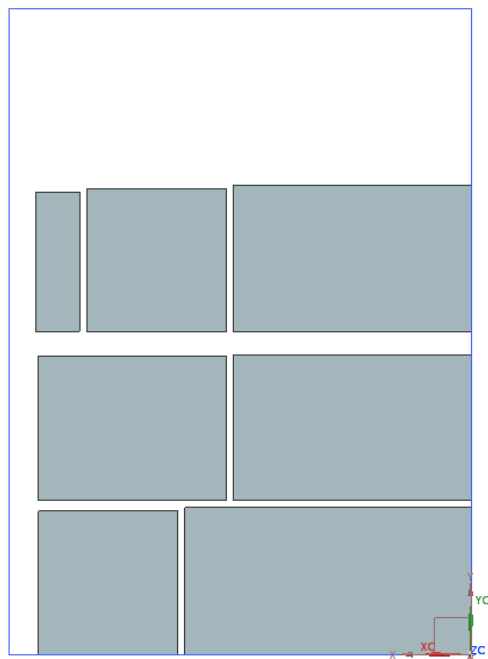


Рис.4.15 – Шаг 5-7: заполненный 3й уровень

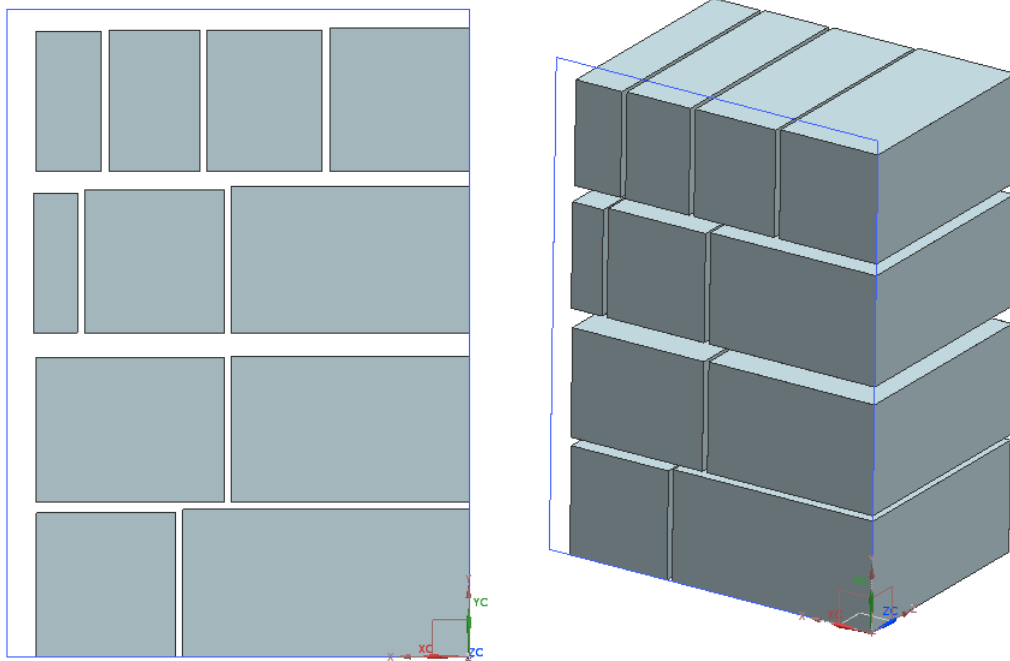


Рис.4.16 – Шаг 9-12: заполненный 4й уровень – результат

Данная задача показывает корректность упаковки в полуограниченную полосу. Общая верификационная задача может быть сформулирована как *распределение блоков по отсекам исходя из минимума межотсечных коммуникаций*.

Состоит из 4 отсеков (табл. 4.8), соединенных паутинкой из 8 точек (рис. 4.17), а также 8 блоков (табл. 4.9), связанных между собой (табл. 4.10). Принимается, что погонная масса жгутов одинакова.

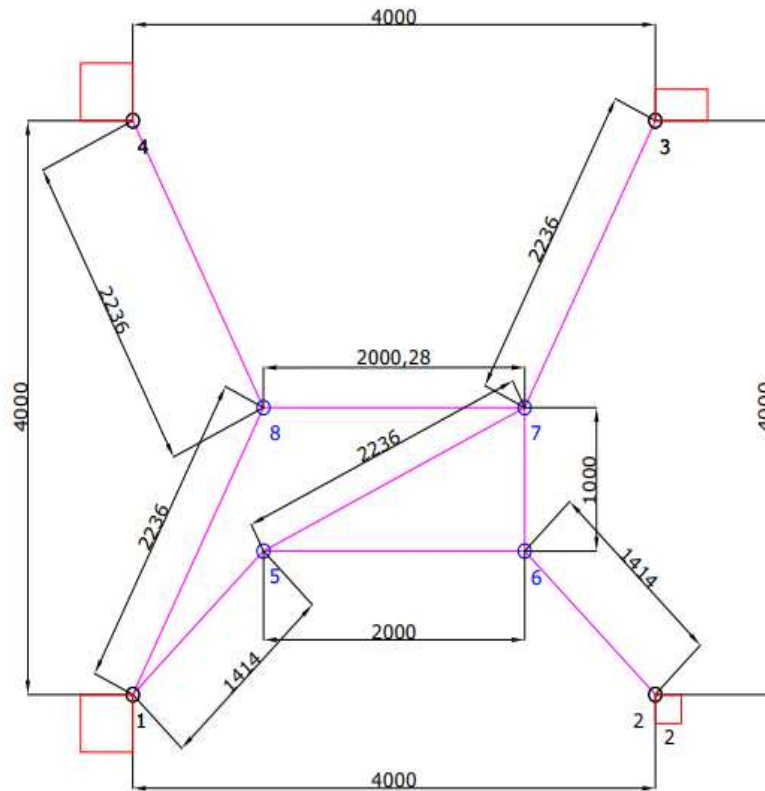


Рис.4.17 – Схема возможных зон прокладки маршрутов для верификации алгоритма АК БРЭО в одномерной постановке

Табл. 4.8 – Параметры отсеков

№ отсека	Название	Объем отсека	Н точек вых
1	Field1	162184	1
2	Field2	40546	2
3	Field3	76100	3
4	Field4	162184	4

Табл. 4.9 – Параметры блоков

№	Название блока	Ширина	Высота
1	Block1	190	194
2	Block2	190	194
3	Block3	190	194



4	Block4	190	194
5	Block5	190	194
6	Block6	190	194
7	Block7	190	194
8	Block8	190	194
9	Block9	390	194
10	Block10	90	194

Табл. 4.10 – Взаимосвязь блоков между собой

№	№ Блока 1	№ Блока 2	Уд.масса [кг./км.]
1	1	2	1
2	1	3	1
3	1	4	1
4	1	5	1
5	5	6	1
6	5	7	1
7	5	8	1
8	1	9	1
9	5	9	1
10	9	10	1

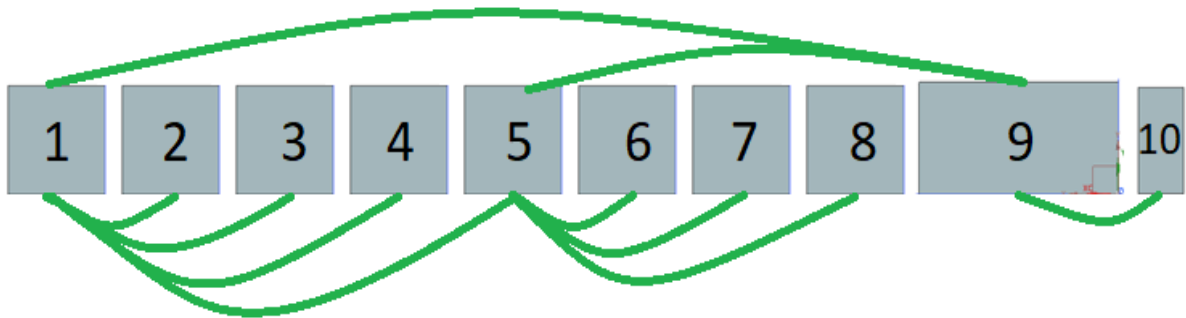


Рис.4.18 – Схема взаимосвязей блоков.

Задача алгоритма распределить таким образом блоки, чтобы масса межотсечных связей был минимальна.

Для решения в первую очередь алгоритм находит всевозможные комбинации распределения блоков по отсекам. Далее для всех возможных комбинаций проводится трассировка для определения длины межотсечных связей. Варианты решения сортируются по длине межотсечных связей. Наилучший вариант распределения блоков представлен на Рис. 4.19, а на Рис. 4.20- 4.24 – схемы коммуникаций.

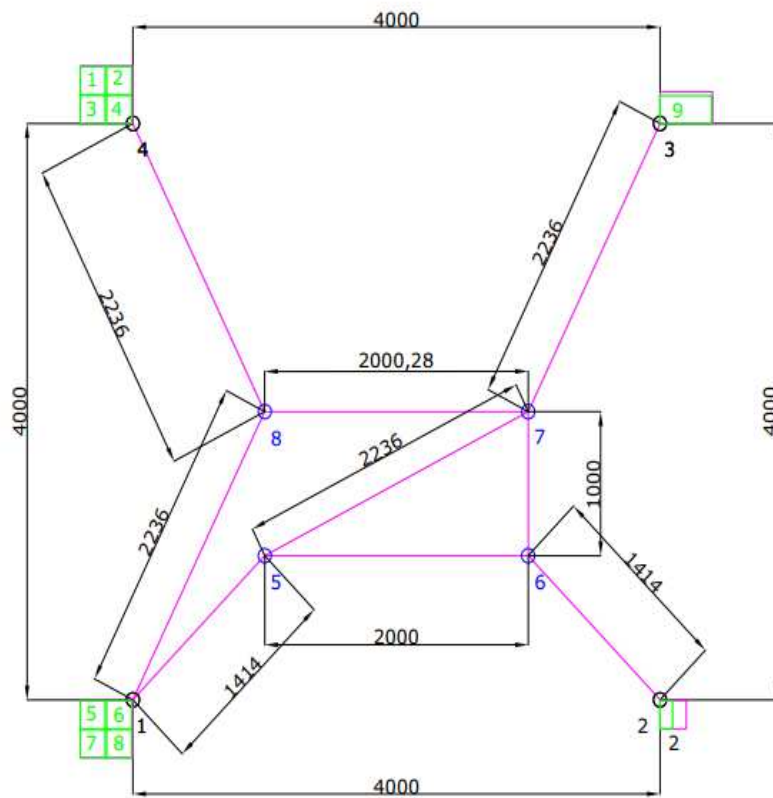


Рис.4.19 – Распределение блоков по отсекам

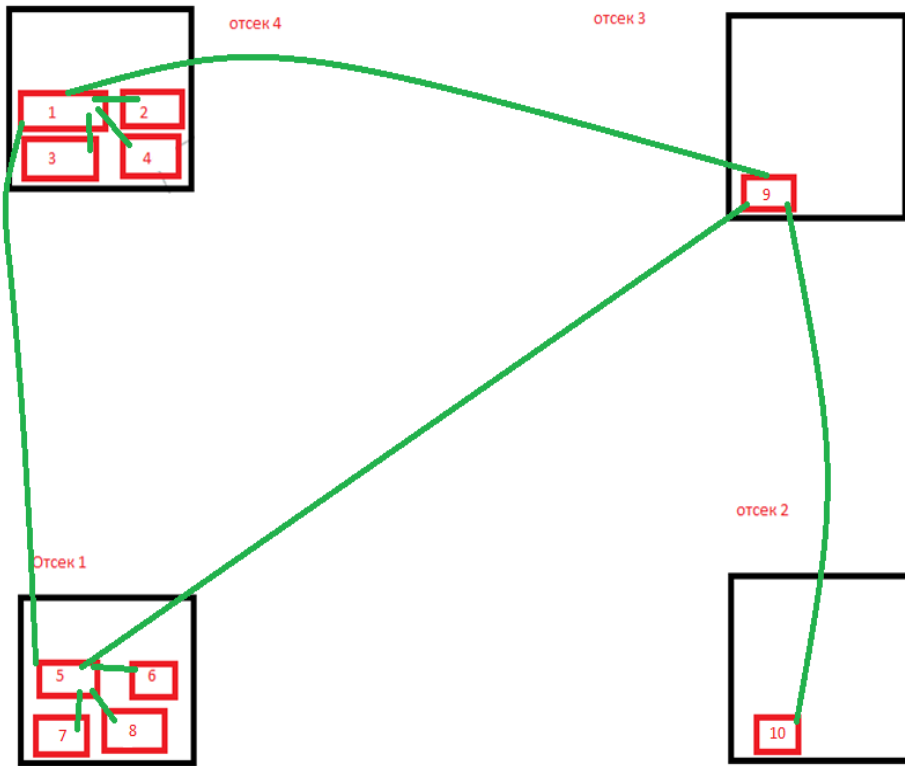


Рис.4.20 – Схема коммуникаций после распределения блоков

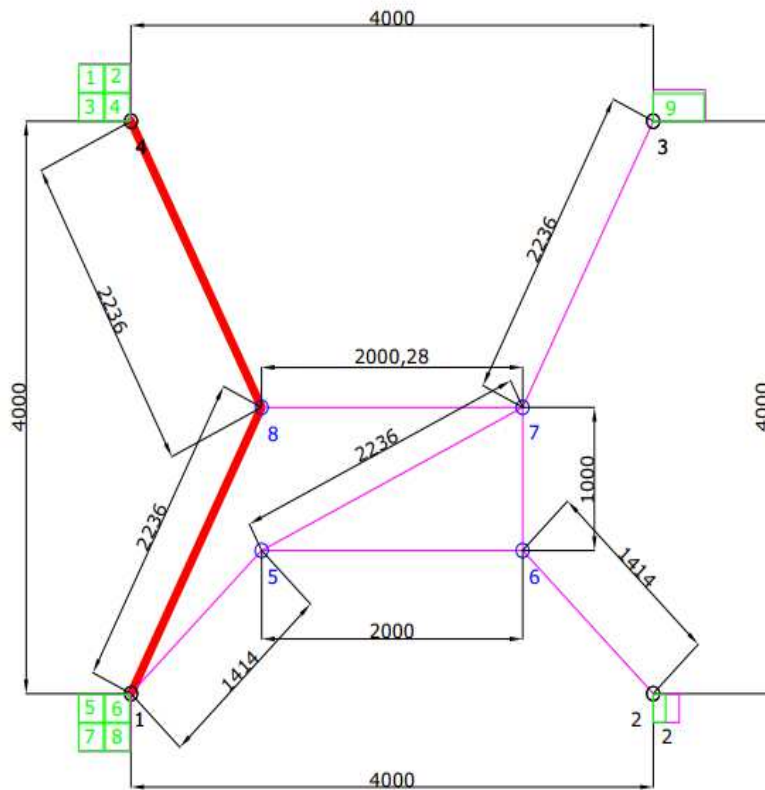


Рис.4.21 – Схема маршрута межотсечной трассы №1 (блок 1- блок 5) (отсек 4 – отсек 5)

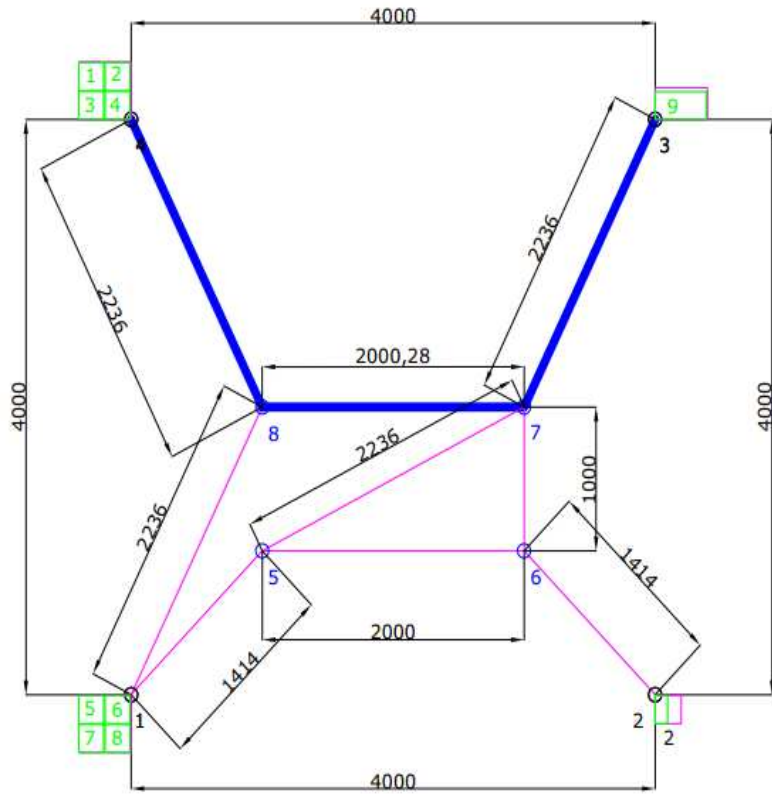


Рис.4.22 – Схема маршрута межотсечной трассы №2 (блок X- блок Y) (отсек 4 – отсек 3)

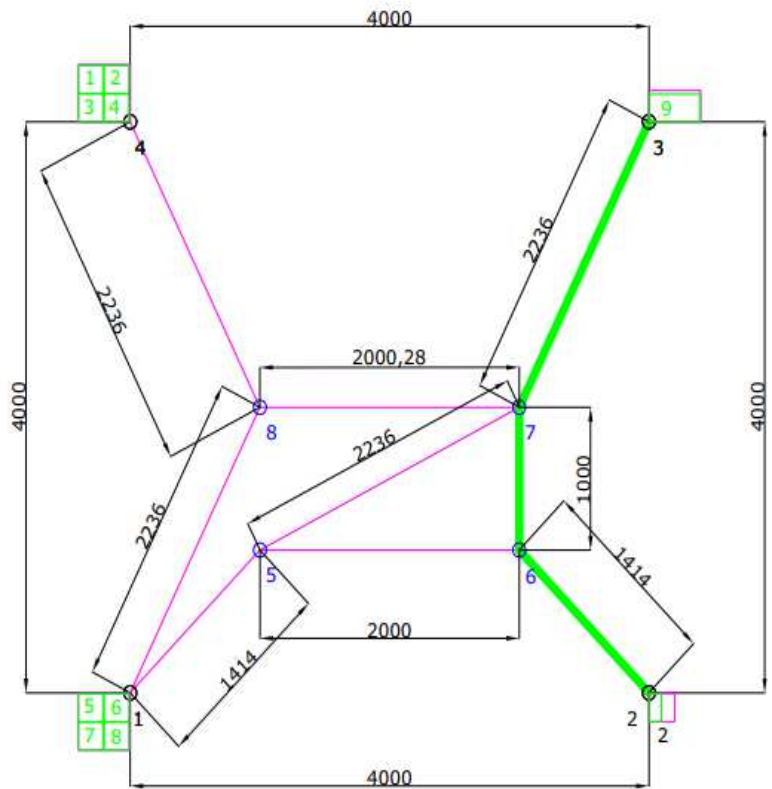


Рис.4.23 – Схема маршрута межотсечной трассы №3 (блок X- блок Y) (отсек 3 – отсек 2)

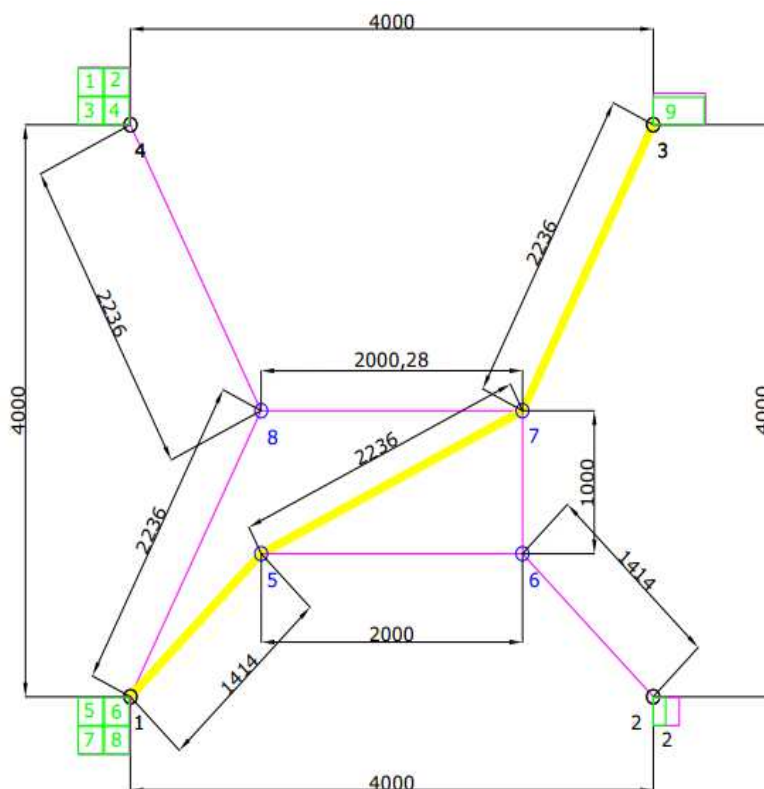


Рис.4.24 – Схема маршрута межотсечной трассы №4 (отсек 1 – отсек 3)

Данная задача показывает работоспособность и применимость алгоритма в целом для решения задач распределения блоков по отсекам с минимальной массой межотсечных коммуникаций.

Таким образом, по результатам верификации программный комплекс успешно выполнил расчет всех вышеуказанных задач. При этом найденные решения полностью совпадают с результатами работы человека, что подтверждает корректность работы ПО.

## 4.2 Тестовые задачи

Основным назначением тестовых задач является:

- подтверждение применимости реализованных математических методов АК БРЭО и трассировки коммуникаций;
- сбор данных о производительности;
- во время разработки ПО тестовые задачи служат эталоном при автоматизированной проверке.

Тестовые задачи выбраны из условия размерности (небольшое время счета и возможность человеку эвристически проверить результаты), поэтому исходные данные подготовлены на базе условного учебно-тренировочного самолета. При этом состав блоков и др. данные в целом соответствуют реальным объектам. Всего выбрано 4 тестовых задачи, отличающимися основными особенностями, такими как, например: наличие/отсутствие внешних связей, блоков с фиксированным положением и т.п.

Объект тестирования представляет собой трехмерную модель учебно-тренировочного самолета, созданную в среде Siemens NX10, содержащую 5 технических отсеков для размещения оборудования. Все отсеки связаны друг с другом сетью коробов коммуникаций, по которым должна быть осуществлена трассировка связей размещаемых блоков оборудования.

Геометрические ограничения на размещение блоков на каждом из 5 отсеков обуславливаются геометрией каркаса данного объекта и необходимостью обеспечения доступа для монтажа и демонтажа заданного состава оборудования. Полный состав размещаемого оборудования содержит 14 блоков. Количество блоков и отсеков является постоянным. При этом данные блоки связаны между собой связями трех типов (питание, цифровой сигнал, высокочастотный сигнал), количество которых зависит от тестового случая.

Для тестирования всех необходимых аспектов были разработаны 4 тестовых случая за счет изменения некоторых данных. Например, некоторые блоки

размещаются вручную или добавляются связи с внешними источниками (в этом случае число связей между блоками увеличивается с 20 до 28ми). В табл. 4.11 приведено описание каждого варианта тестовой задачи.

Табл.4.11 – Описание тестовых задач

№ случая	Вручную назнач. блоки	Внешние связи	Примечание
1	0	0	Проверяет корректность работы программы без дополнительных условий
2	0	+	Проверяет корректность обработки внешних связей (напр., выход в киль). Количество связей увлечено до 28 шт.
3	+	0	Основан на 1м случае, но 3 блока размещаются вручную. Служит для проверки корректности обработки данной возможности
4	+	+	Представляет собой сочетание 2 и 3 тестовых случаев.

Схематичное изображение расчетной модели отсеков приведена на рис. 4.25  
схема коробов коммуникаций -рис. 4.26.

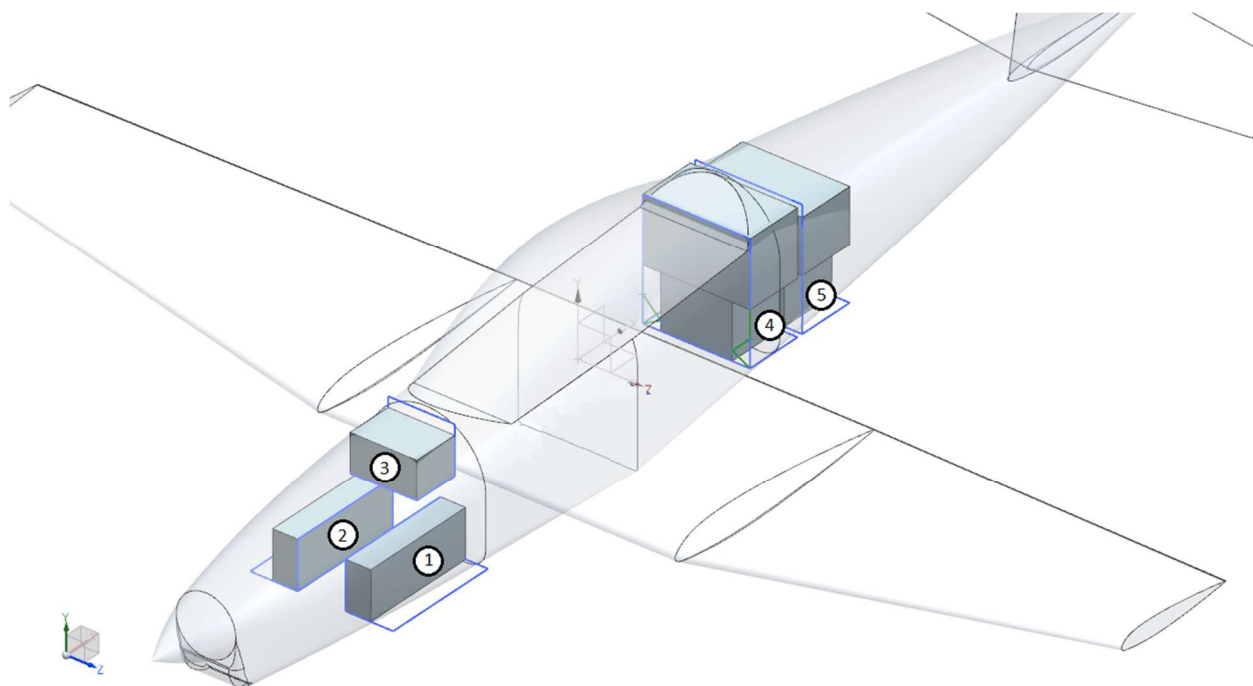


Рис. 4.25 – Технические отсеки расчетной модели

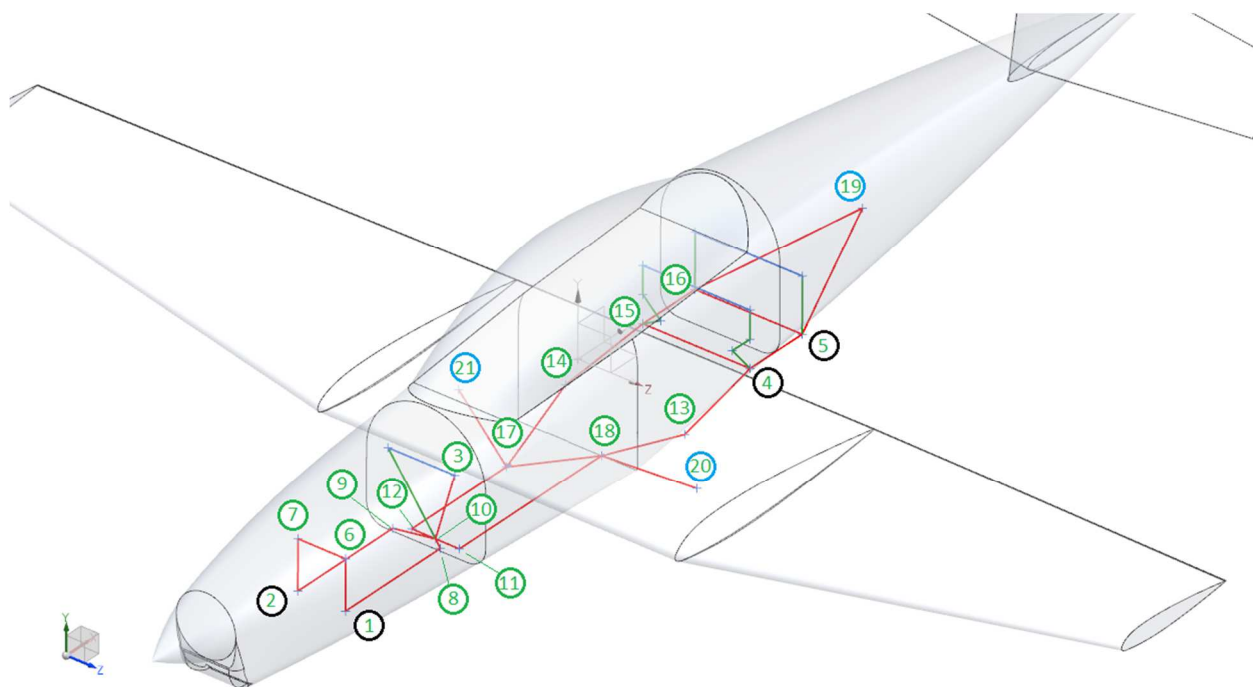


Рис. 4.26 – Стеллажи и коробка коммуникаций расчетной модели

*(красный цвет – коробка, зеленый – обычные точки, голубой – точки доступа к оборудованию в ОЧК и антеннам в ХЧФ, черный – точки входа в отсек)*

Пространственные координаты точек трассировки представлены в приложении Б. Список размещаемых блоков с их габаритными размерами приведен в приложении В. Список связей размещаемых блоков – в приложении Г. Для каждого отсека в приложении Д записаны параметры, а плоскость установки блоков задана с помощью трех образующих точек.

При этом связь между парой любых размещаемых блоков (из списка в 14 блоков согласно приложению Б) является внутренней (0), а связь между одним таким блоком и любой точкой трассировки (которая является точкой доступа к оборудованию с фиксированным размещением, например антеннам) является внешней (1).

В тестовых задачах приняты следующие упрощения:

- требования ЭМС не предъявлялись;



- требования к конкретному размещению определенных блоков не предъявлялись;

Разработанная технология АК БРЭО подразумевает поэтапное формирование компоновочного варианта БРЭО:

- этап 1: распределение блоков по отсекам;
- этап 2: упаковка назначенной группы блоков в отсек.

С целью определения области применимости каждого этапа целесообразно провести АК БРЭО за счет распределения блоков по заданным отсекам и плоская упаковка каждой группы блоков (этап 1 + этап 2);

Основным критерием оптимальности компоновочного варианта для двух данных способов АК БРЭО является минимум длины кабельной сети.

Вторым критерием оценки тестируемых методов является трудоемкость полного цикла формирования компоновочного варианта (подготовка исходных данных, проведение расчета, пост-обработка результатов).

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

В рамках первого этапа АК был проведен расчет оптимальной комбинации распределения данного состава блоков по отсекам для всех тестовых случаев (табл. 4.12). Эталонные решения приведены в приложениях Д и Е.

Табл. 4.12 – Взаимосвязь блоков между собой

№	Отсеки	Блоки	Из них фикс-ны	Точки	связи	Из них внешние	L min	t, с	Н полученных вариантов компоновки
1	5	14	0	18	20	0	7097	780	355905327
2	5	14	0	21	28	8	21467	790	355905327
3	5	14	3	18	20	0	8197	30	2280442
4	5	14	3	21	28	8	22017	35	2280442

При этом была выявлена следующая закономерность для всех тестовых случаев: максимальное и минимальное значение длины коммуникаций на каждом шаге растет дискретно. Это объясняется тем, что на одном шаге алгоритма, например, на варьировании 8го блока, все блоки уместятся в 2 отсека, а при переходе к следующему шагу – 9ть блоков в эти отсеки не размещаются, поэтому используется 3й отсек и минимальная протяженность коммуникаций вырастает. На рис. 4.27 а) приведен график изменения максимального и минимального значения суммарной протяженности в сравнении с решением, предложенным человеком. Видно, что начиная с 7го блока появляются решения, протяженность которых уже больше человеческого варианта компоновки. Эти решения рассматривать нерационально, т.к. далее значение будет точно не меньше.

Поэтому для 1го тестового случая проведены расчеты с разным коэффициентом отсеечения: при его превышении на каком-либо шаге (например, на 6м блоке), то данная ветка решений отсеивается и на следующий шаг не переходит (т.е. при варьировании 7го блока и далее этот вариант не учитывается). В данном случае коэффициент отсеечения задавался постоянным для всех шагов, поэтому решение точное и заведомо лучшее решение не может быть отсеяно на ранних этапах. Результаты представлены в таблице 5.13, а на рисунке 5.27 б) - график нахождения локально-оптимальных вариантов распределения блоков. В приложении Е – таблицы распределения блоков.

Табл. 4.13 – Взаимосвязь блоков между собой

Test Case 1 (L=7097)		
L max	t, с (1 поток)	N полученных вариантов комп-ки
Unlim	750	355905327
50000	540	92746487
25000	30	592745
15000	5	27787
10000	1	2399
7500	0,1	3

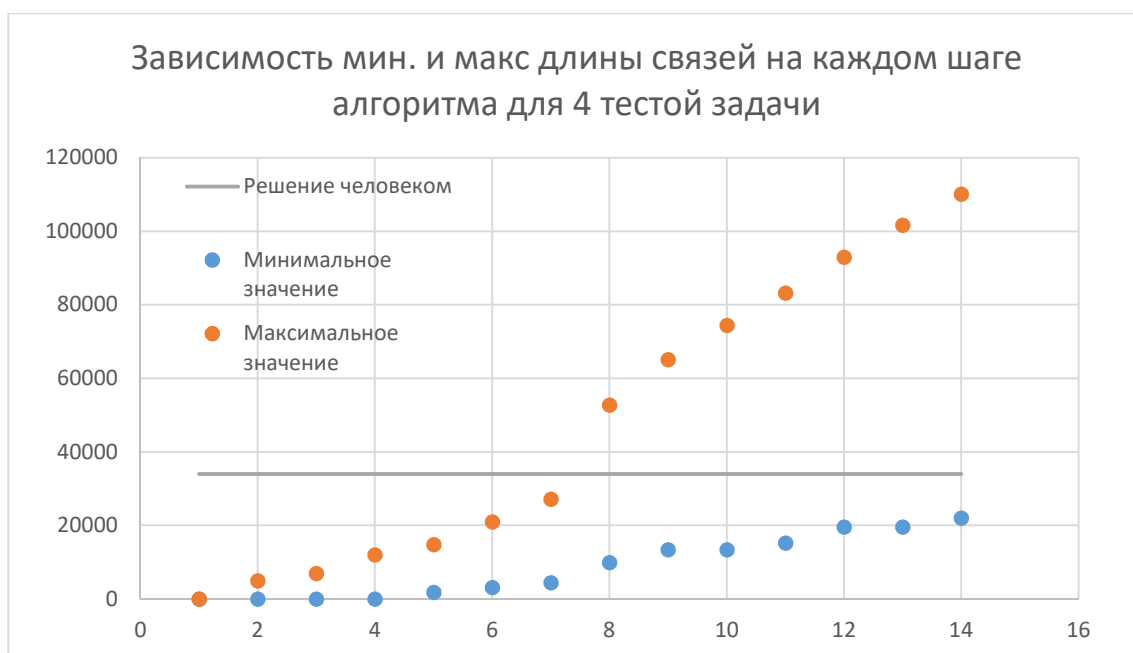


Рис.4.27 б) – График максимальной и минимальной протяженности коммуникаций от варьируемого блока.

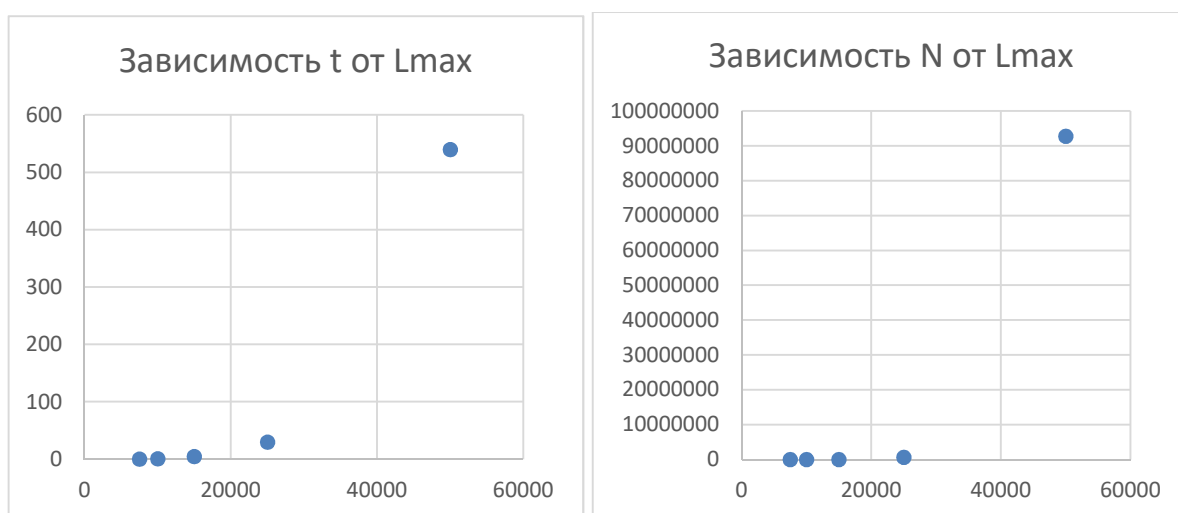


Рис.4.27 б) – График зависимости времени решения и количества обработанных комбинаций от коэффициента отсечения.

По приведенному выше графику можно заметить экспоненциальный характер роста комбинаций и потребного времени поиска для нахождения лучшего варианта распределения блоков. Использование коэффициента отсечения может оказаться крайне важным при решении реальных задач.

Упаковка полного состава блоков в рамках **второго этапа** АК для лучшей из найденных комбинаций распределения заняла менее 1 секунды в каждом тестовом

случае. Координаты положения блоков после их упаковки в каждом отсеке представлены в приложении Ж. Трассы связей блоков вместе со значениями протяженностей и масс для данного компоновочного варианта (далее 1 вариант компоновки) представлены в приложении Е.

В результате АК были получены решения на рис. 4.28- 5.31.

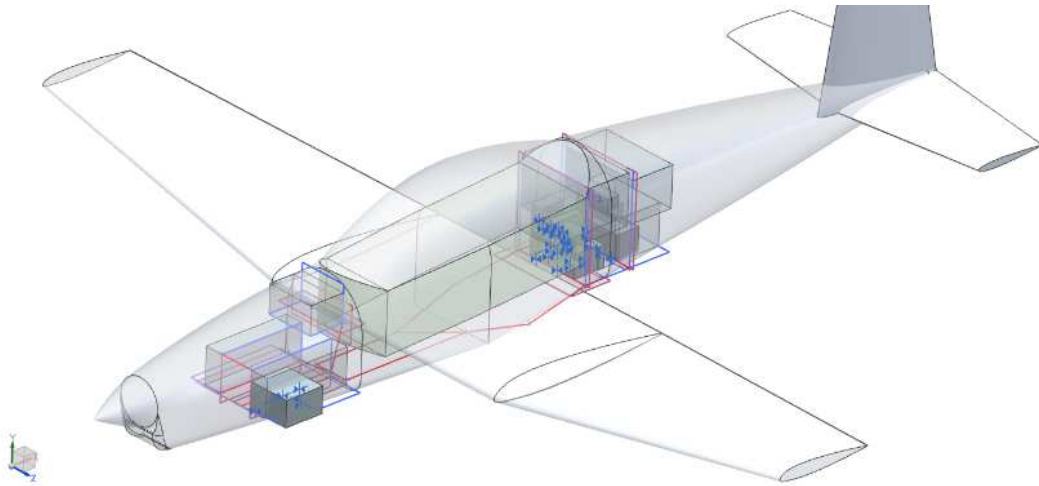


Рис. 4.28 – Наилучший вариант компоновки БРЭО для 1го тестового случая

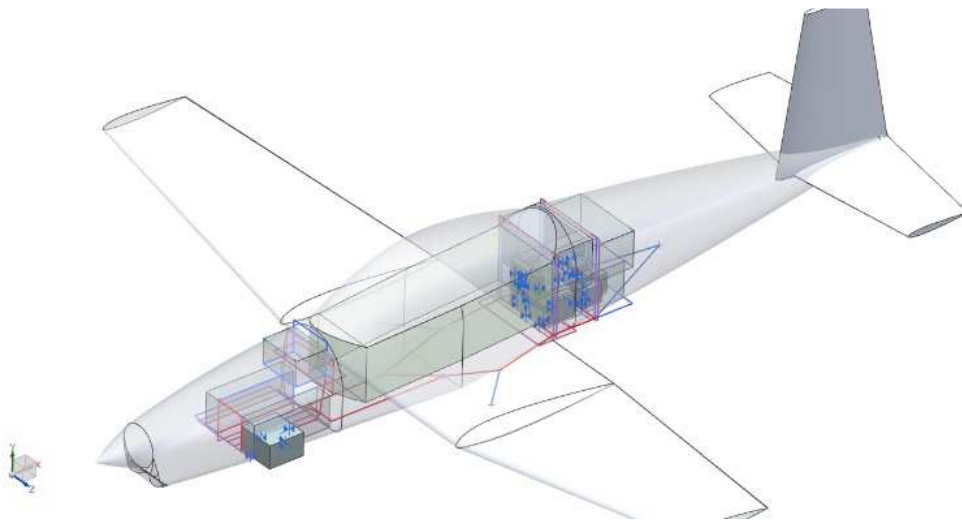


Рис. 4.29 – Наилучший вариант компоновки БРЭО для 2го тестового случая

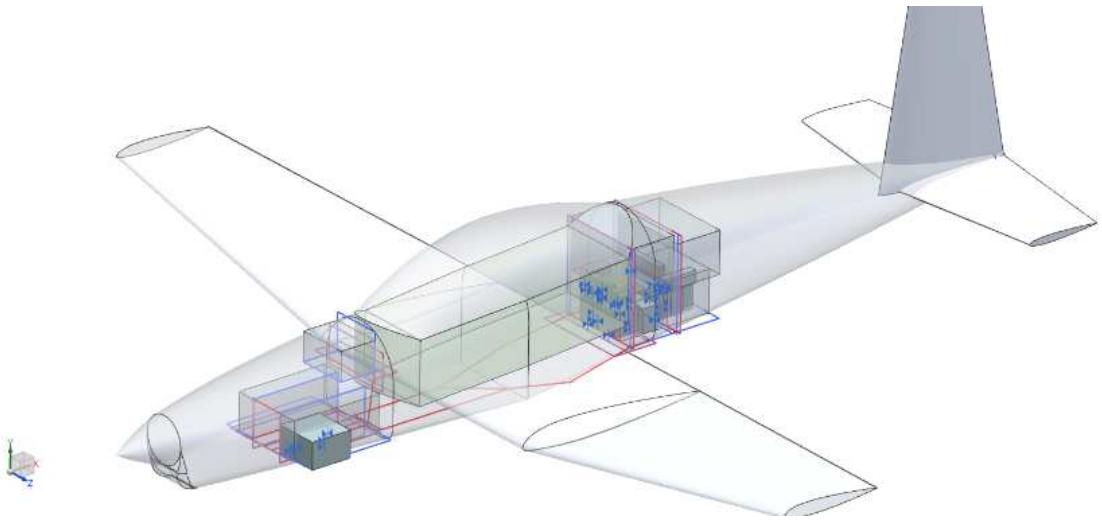


Рис. 4.30 – Наилучший вариант компоновки БРЭО для 3го тестового случая

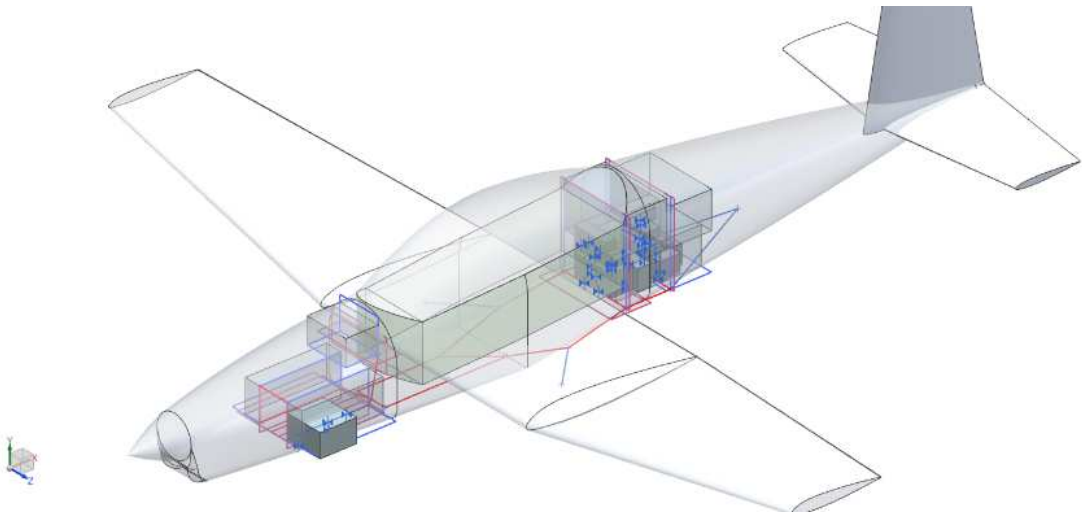


Рис. 4.31 – Наилучший вариант компоновки БРЭО для 4го тестового случая

Для экономической оценки в качестве основного критерия используется суммарная трудоемкость подготовки исходных данных, проведения расчета и пост-обработки результатов для каждого этапа АК БРЭО. Для данного объекта трудоемкость представлена в табл. 4.14.

Табл. 4.14 – Сравнение трудоемкости каждого этапа АК БРЭО

Наименование	Первый этап	Второй этап
	Трудоемкость [ч.ч.]	
Подготовка ИД	32	8
Расчет	Менее 1 [астр.ч.]	менее 1 [астр.мин.]
Пост -обработка	8	2
<b>Итого:</b>	<b>~41</b>	<b>~ 10</b>

По результатам проведенного тестирования на задачах, подобных реальному объекту, можно заключить, что технология АК БРЭО работоспособна и должна быть апробирована на реальных задачах. Можно отметить следующее:

- высокая трудоемкость сбора исходных данных (до 80% от суммарной трудоемкости генерации варианта компоновки);
- результат работы первого этапа требует значительной пост-обработки инженером и не является компоновкой в явном виде;
- при решении первого этапа перспективно использовать коэффициент отсечения по суммарной длине коммуникаций;
- результат работы второго этапа представляет собой трехмерную компоновку, которая генерируется автоматически. Однако, требуется пост-обработка человеком в части проверки пересечений и для некоторых сочетаний исходных данных возможно выходение за теоретический контур;
- подготовка исходных данных для второго этапа требует значительно меньше времени и ресурсов.

### ***4.3 Апробация на реальной задаче***

Апробация методики автоматизированной компоновки блоков БРЭО проводилась при выполнении аванпроекта перспективного среднего военно-транспортного самолета. Полный состав БРЭО и электросистемы составляет 183 блока, из которых по согласованию с конструкторами 123 блока принимаются с фиксированным расположением (излучающие/принимающие антенно-фидерные устройства, приемники воздушного давления, инерциальные системы и пр.), т.е. иными словами варьируется расположение 60 блоков. Исходя из схемы электросистемы и предварительной схемы БРЭО было выделена 121 связь между блоками. По электронным моделям выделено 10 плоскостей (отсеков), а упрощенные зоны прохода электрожгутов описываются графом из 41 вершины. К сожалению, по соображениям защиты государственной тайны и противодействия иностранным разведкам в диссертации нельзя привести полные исходные данные и подробное описание полученных решений. На момент выполнения апробации погонная масса жгутов еще не была определена, поэтому для первого этапа использовался критерий длины коммуникаций.

Подготовка исходных данных заняла порядка 10 рабочих дней (2 недели), время расчета – порядка 8 астрономических часов.

По результатам работы ПО было получено множество вариантов решения, которые рассмотрены конструкторами и на основании лучших из них создана компоновка в системе трехмерного проектирования Siemens NX. Также с помощью ПО была рассчитана длина связей для варианта решения, разработанного человеком. Сравнение вариантов распределения блоков по отсекам приведено в табл. 4.15.

Табл. 4.15 – Сравнение базового и оптимизированного варианта

Блок	№	Расположение (№ отсека) в базовом варианте	Расположение (№ отсека) в оптимизированном варианте
СУОСО-15	1	8	8
СУОСО-14	2	7	7
КСС-23	3	6	6
КСС-41	4	6	6
БРЭО-56	5	6	6
БРЭО-55	6	1	1
ПНПК-34	7	9	9
КСС-10	8	6	6
СЭС-30	9	5	5
СЭС-2	10	4	4
СЭС-8	11	4	4
СЭС-24	12	5	5
БЦВМ-51	13	1	1
БЦВМ-52	14	1	1
БЦВМ-53	15	1	1
БЦВМ-54	16	1	1
БЦВМ-49	17	10	10
БЦВМ-50	18	10	10
БРЭО-57	19	6	6
БРЭО-58	20	6	6
БРЭО-59	21	6	6
БРЭО-60	22	6	6
СЭС-31	23	1	1
СЭС-9	24	1	1
СЭС-21	25	1	1
СЭС-38	26	1	1
СЭС-25	27	1	1
СЭС-5	28	1	1
СЭС-27	29	1	1
СЭС-3	30	1	1
РСНП-29	31	6	6
РСНП-20	32	6	6
РСНП-19	33	6	6
РСНП-18	34	6	6
РСНП-36	35	1	1
РСНП-17	36	1	1
КСС-39	37	6	6
КСС-40	38	10	10
СУОСО-12	39	1	1
КСС-7	40	6	6
КСС-46	41	6	6
КСС-43	42	1	1
СЭС-4	43	1	1
СЭС-26	44	4	4
КСС-6	45	5	5



СУОСО-16	46	4	4
КСС-44	47	4	5
СУОСО-13	48	2	4
СУОСО-37	49	3	4
КСС-28	50	10	1
БРЭО-11	51	1	1
КСС-42	52	4	2
БРЭО-22	53	9	1
КСС-1	54	5	5
КСС-48	55	9	6
ПНПК-33	56	2	4
ПНПК-45	57	2	4
БРЭО-47	58	2	5
КСС-32	59	9	1
ПНПК-35	60	3	2

Коэффициент длины межотсечных коммуникаций базового варианта, разработанного человеком = 1586,8 м, а для оптимизированного варианта = 996,8 м. Общий вид показан на рис. 4.32 и рис. 4.33 соответственно. Красным отмечены блоки, положение которых было изменено. При этом суммарный коэффициент оптимальности компоновки улучшился на 2...3 %, поэтому им можно пренебречь.

Таким образом, за счет перестановки 12 блоков, удалось сократить длину межотсечных коммуникаций на 37%. Полученные результаты будут использоваться на этапе технического проекта, что подтверждается актом внедрения с предприятия ПАО «Ил».

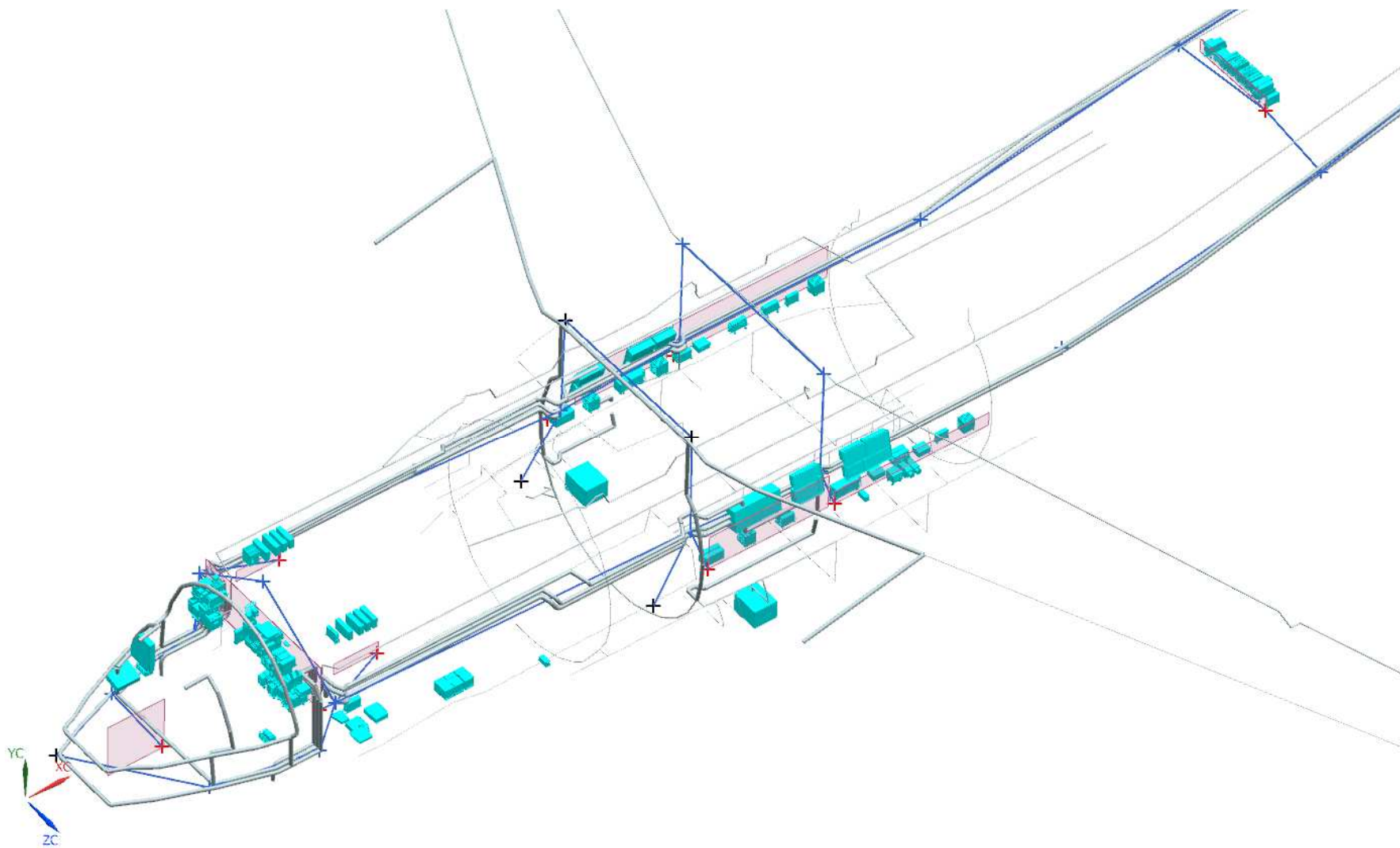


Рис. 4.32 – Общий вид базового варианта компоновки БРЭО

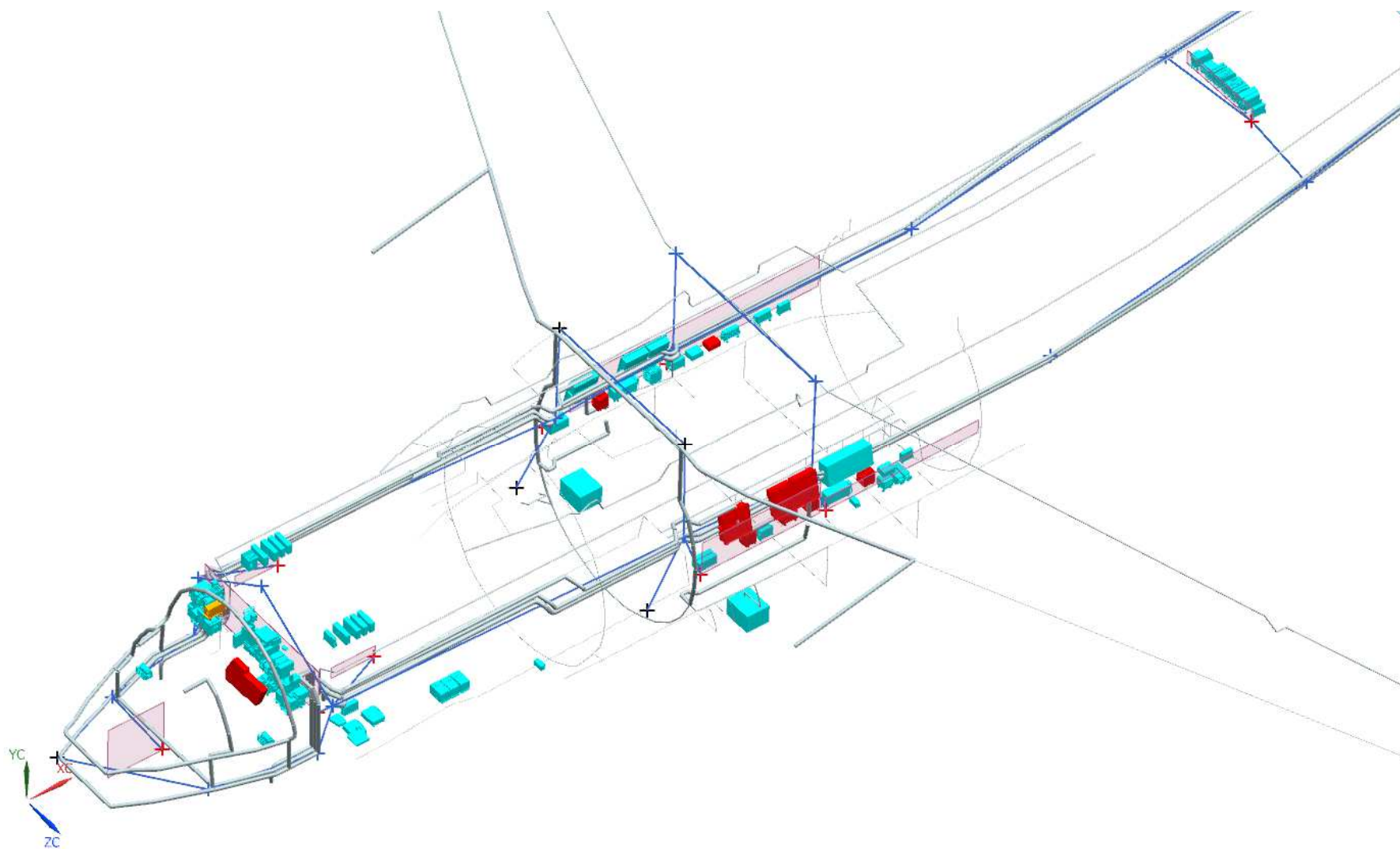


Рис. 4.33 – Общий вид оптимизированного варианта компоновки БРЭО

*Таким образом, в заключение четвертой главы необходимо отметить следующее:*

1. Проведена верификация разработанного программного комплекса.
2. Показана работоспособность разработанной технологии на тестовых и реальных задачах.
3. Собрана статистика по трудоемкости и времени выполнения разных этапов решения задачи.
4. Применение данной технологии позволяет улучшить компоновку, разработанную человеком.
5. Область применения методики, состоящей из первого и второго этапа – аванпроект или эскизно-технический проект, которые характеризуются неполными исходными данными, большими свободными объемами внутри самолета и частой корректировкой исходных данных.
6. При правильном применении разработанной технологии возможно сократить время и трудозатраты на создание компоновочного варианта, а также повысить качество компоновки путем снижения массы кабельной сети.
7. При этом можно отметить следующие особенности.
8. Высокая трудоемкость сбора статистики по компоновке БРЭО.
9. Слабое обеспечение НД по компоновке БРЭО и трассировке коммуникаций. Большое количество требований, которые применяются в отдельных частных случаях или только к определенным блокам.
10. Высокая трудоемкость сбора исходных данных (до 80% от суммарной трудоемкости генерации варианта компоновки).
11. Большая размерность практических задач.
12. Размерность задачи сильно ограничена производительностью ЭВМ.

## 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. Поэтому данные алгоритмы неприемлемыми при решении 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. Вербально сформулирована задача АК БРЭО, которая относится к задачам синтеза, а математически - как многокритериальная задача оптимизации. В работе показана связь с типовыми задачами комбинаторной оптимизации,

такими как задача о рюкзаке, трассировка на графах и упаковка в полуограниченную полосу. Поэтому для 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 – «компоновка блоков БРЭО транспортного самолёта», результат решения которой по массе межотсечных связей на ~37% лучше человеческого решения, что подтверждено актом реализации.

## Список литературы

- 1 Albano, and G. Sapuppo: Optimal Allocation of Two-Dimensional Irregular Shapes Using Heuristic Search Methods, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (1980), 10, pp. 242-248.
- 2 Lodi, S. Martello, D. Vigo: Heuristic and metaheuristic approaches for a class of two-dimensional bin packing problems, INFORMS Journal on Computing 11 (1999), pp. 345–357.
- 3 Andrew Lim and Lei Wang, Wenbin Zhu, Hu Qin\* : A two-stage tabu search algorithm with enhanced packing heuristics for the 3L-CVRP and M3L-CVRP , Computers & Operations Research, Volume 39, Issue 9, September 2012, pp. 2178 - 2195.
- 4 Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Stein, Clifford : Section 24.3: Dijkstra's algorithm. Introduction to Algorithms (Second ed.). MIT Press and McGraw–Hill. (2001): pp. 595–601.
- 5 E. W. Dijkstra : A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik. V. 1 (1959), pp. 269-271.
- 6 Khammapun Khantanapoka and Krisana Chinnasarn: Pathfinding of 2D & 3D Game Real-Time Strategy with Depth Direction A\*Algorithm for Multi-Layer, 2009 Eighth International Symposium on Natural Language Processing, Thailand, pp. 184-188.
- 7 Martello S., P. Toth: Knapsack problems: algorithms and computer implementations, J. Wiley & Sons, Dec 14, 1990.
- 8 Martello, S. Exact solution of two-dimensional finite bin packing problem / S. Martello , D.Vigo // Management Science. – 1997. – Vol. 35. – P. 64–68.
- 9 Matthews, James: Basic A\* Pathfinding Made Simple, AI Game Programming Wisdom, Charles River Media, 2002.
- 10 Nyi Nyi Htun. Finding the shortest smooth path in variable size using improved A\* algorithm on grid-based receptor model // (<http://www.ucsy.edu.mm/ucsy/635558k.do>) « 11th International Conference On Computer Applications – 2013, Yangon, Myanmar ». –UCSY. – 2013, pp.255-260.

- 11 Pisinger. D.,Vigo. D., Martello S.: The three-dimensional bin packing problem. Operations Research 48(2000), pp. 256–267.
- 12 Wildy. Про двумерную упаковку: offline алгоритмы [Электронный ресурс Habr.com] / Wildy //– Habr.com - 2012 – Режим доступа: [www.habr.com/ru/post/136225/](http://www.habr.com/ru/post/136225/)
- 13 Wildy. Про двумерную упаковку: online алгоритмы [Электронный ресурс Habr.com] / Wildy //– Habr.com - 2012 – Режим доступа: [www.habr.com/ru/post/160869/](http://www.habr.com/ru/post/160869/)
- 14 Аведьян, А.Б., Бибииков, С.Ю., Долгов, О.С., Деришев, Д.С., Колесников, В.Л., Куприков, М.Ю., Маркин, Л.В., Пухов, А.А., Рипецкий, А.В., Соседко, А.А. Компоновка самолетов / под ред. М.Ю. Куприкова– М.: МАИ, 2012 – 296 с.
- 15 Агеева, И.А., Корн, Г.В., Маркин, Л.В. Геометрические модели изделий машиностроения. / И.А. Агеева, Г.В. Корн Г.В., Л.В. Маркин // В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Современные проблемы автоматизики». - М., 1989. - С. 47
- 16 Аристова, И.В., Методы и алгоритмы приближенного решения комплексной проблемы упаковки: автореф. Дис. Канд. Тех. Наук: 05.13.01 / И.В. Аристова. - Харьков, 1984. - 26 с.
- 17 Аристова, И.В., Об автоматизации процесса компоновки машинного зала энергоблока / И.В. Аристова // Проблемы машиностроения. – 1982. - № 15. - С. 68-71.
- 18 Базилевич, Р.П., Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного метода конструирования электронных устройств. /Р.П. Базилевич – Львов.: Вища школа, 1981. – 168 с.
- 19 Базилевич, Р.П., Обобщенный подход к формализации задачи машинной трассировки межсоединений на плоскости / Р.П. Базилевич // Изв. ВУЗов СССР. Радиоэлектроника. – 1974. - № 6. - С. 98-103.



- 20 Барковский, В.И. Методологические аспекты разработки программы создания истребителя нового поколения /В. И. Барковский // Сборник РАРАН. – 2002 . – №28/4. – С. 28.
- 21 Барковский, В.И., Скопец, Г.М., Степанов, В.Д. Методология формирования технического облика экспортно ориентированных авиационных комплексов / В.И. Барковский, Г.М. Скопец, В.Д. Степанов; под ред. В.И. Барковского. - М.: Физматлит, 2008. – 244 с.
- 22 Бодрышев, В.В., Маркин, Л.В. О заполнении замкнутого контура прямоугольниками. / В.В. Бодрышев, Л.В. Маркин // В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Математическое обеспечение рационального раскроя в системах автоматизированного проектирования». - Уфа, 1987. - С. 18 - 19.
- 23 Валеева, А.Ф., Тоцков, И.Е. Решение задачи трехмерной упаковки. / А.Ф. Валеева, И.Е. Тоцков // в сб.: Труды международной конференции “Комплексный анализ, дифференциальные уравнения, численные методы и приложения”. Применение численных методов. Геометрические задачи. - Уфа, 1996. - С. 30-36.
- 24 Верхотуров, М.А., Математическое обеспечение автоматизированных систем нерегулярного размещения двух- и трехмерных геометрических объектов на базе дискретных моделей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / М. А. Верхотуров. – Уфа, 2000. – 34 с.
- 25 Верхотуров, М.А. Об устойчивых алгоритмах построения годографа / М.А. Верхотуров // в сб.: Принятие решений в условиях неопределенности: Межвузовский сборник. - Уфа: УГАТУ, 1998. - С.270-284.
- 26 Верхотуров, М.А., Верхотурова, Г.Н., Брусиловский, Д.П. Методы и алгоритмы нерегулярной двумерной упаковки объектов сложных геометрических форм. / М.А. Верхотуров, Г.Н. Верхотурова, Д.П. Брусиловский // Рукопись деп. в ВИНТИ. - №682-В97 от 05.03.97. – 28 с.
- 27 Верхотуров, М.А., Верхотурова, Г.Н., Логинов, Е.В., Петренко, С.В. Задача нерегулярного раскроя фигурных заготовок: построение пути режущего

- инструмента / М.А. Верхотуров, Г.Н. Верхотурова, Е.В. Логинов, С.В. Петренко // в сб.: Принятие решений в условиях неопределенности. –Уфа: УГАТУ, 2003. –С.158-163
- 28 Верхотуров, М.А., Верхотурова, Г.Н., Мухачёва, Э.А. Об использовании оценок в задачах трёхмерной упаковки / М.А. Верхотуров, Г.Н. Верхотурова, Э.А. Мухачёва // Прикладная и индустриальная математика: Тезисы второго сибирского конгресса. – Новосибирск, 1996. - С.139
- 29 Верхотуров, М.А., Мартынов, В.В., Мухачева, Э.А. Модели и методы расчета раскроя-упаковки геометрических объектов /М.А. Верхотуров, В.В. Мартынов, Э.А. Мухачева – Уфа: УГАТУ, 1998. - 217 с.
- 30 Верхотуров, М.А., Мухачева, Э.А., Шабрина, Л.И. Многообразие задач раскроя и упаковки / Верхотуров М.А., Мухачева Э.А., Шабрина Л.И. // Рукопись Деп.в ВИНТИ. - №3023-В94. - М:1994. - 8с.
- 31 Волошин, В.В. Автоматизация проектирования летательных аппаратов / В.В. Волошин - М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
- 32 Гаврилов, В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов / В.Н. Гаврилов – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
- 33 Гаврилов, В.Н., Вахрушев, А.Н. Разработка базы данных для задач компонования летательных аппаратов / В.Н. Гаврилов, А.Н. Вахрушев // В сб. Тезисов докл. 3 Всес. конф. «Автоматизация поискового конструирования и подготовка инженерных кадров». - Иваново, 1983. – С. 128
- 34 Гардан, И., Люка, М. Машинная графика и автоматизация конструирования / И. Гардан, М. Люка – М.:Мир, 1987. - 270 с.
- 35 Герасименко, Е.П., Зозулевич, Д.М. Методы формирования трехмерных рецепторных матриц на ЭВМ. / Е.П. Герасименко, Д.М. Зозулевич // В сб.: ВТ в машиностроении. – Минск: ИТК АН БССР, 1971. - С. 24-31.
- 36 Герасименко, Е.П., Зозулевич, Д.М. Минимизация вычислительного процесса при решении геометрических задач с помощью рецепторных матриц / Е.П. Герасименко, Д.М. Зозулевич // В сб.: ВТ в машиностроении. – Минск: ИТК АН БССР, 1970. С. 26 - 40.

- 37 Герасименко, Е.П., Кот, В.И. и др. Автоматизация проектирования печатных блоков с модулями произвольной формы / Герасименко Е.П., Кот В.И. и др. - М.: Машиностроение, 1979. - 167 с.
- 38 Гиль, Н.И. Математическое моделирование нерегулярного размещения плоских геометрических объектов в системах автоматизации проектирования: автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.13.12 / Н.И. Гиль.- Минск, 1990. - 32с.
- 39 Гиль, Н.И., Комяк, В.М. Об одном подходе к построению годографа вектор - функции плотного размещения плоских геометрических объектов, устойчивого к вычислительной погрешности / Н.И. Гиль, В.М. Комяк // АН УССР Ин-т пробл. Машиностроения. – 1991. - № 350. – С. 23.
- 40 ГОСТ 21467-81 АМОТИЗАТОРЫ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛА. ТИПЫ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, РАЗМЕРЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ. – М. Государственный комитет СССР по станд., 1981. – 14 с.
- 41 ГОСТ 23701-79 Корпуса блоков и монтажные устройства самолетной радиоэлектронной аппаратуры М. Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 86 с.;
- 42 ГОСТ 26765.16-87 Конструкции второго и третьего уровней бортовых авиационных радиоэлектронных средств. Общие технические условия М. Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. – 92 с.;
- 43 ГОСТ 30893.1-2002 Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками – М. Стандартиформ, 2002. – 14 с.
- 44 Денискин, Ю.И. Обобщённые методы геометрического моделирования объектов и управления их формой при параметрическом представлении: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук: 05.01.01 / Ю. И. Денискин. — М., МГАИ, 2000. - 38с.
- 45 Егер, С.М., Лисейцев, Н.К., Самойлович, О.С. Основы автоматизированного проектирования самолетов / Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.

- 46 Егоров, С.Я. Методология автоматизированного поиска объемнопланировочных решений химических производств / С.Я. Егоров // Химическая промышленность сегодня. – 2006. – № 10. – С. 35 – 54.
- 47 Егоров, С.Я. Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств: Монография. / С.Я. Егоров – М.: Издательство "Машиностроение", 2007. – 104 с
- 48 Егоров, С.Я. Информационно-логическая модель компоновки промышленных объектов: / С.Я. Егоров, В.А. Немтинов, М.С. Громов // Научно-техническая информация. –2006, – серия 2. – №4. – С. 19 – 23
- 49 Есмуханова, Ж. Ж. Алгоритм построения оптимальной конфигурации инженерной сети / Ж. Ж. Есмуханова // Моделирование задач науки и техники методами начертательной геометрии.— Алма-Ата: изд. КазПТИ.— 1986.— С. 43- 46.
- 50 Есмуханова, Ж. Ж. Геометрические задачи на инженерных сетях / Ж. Ж. Есмуханова // Прикладная геометрия и инженерная графика в теории и практике авиационного автоматизированного проектирования.— Киев: КИИГА, 1984.—С. 58—62.
- 51 Есмуханова, Ж. Ж. Геометрические методы расчета конфигурации инженерных сетей: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.01.01. / Ж. Ж. Есмуханова — М.: МАИ, 1987. — 17 с.
- 52 Зиман, Ю.Л., Гринберг, Г.С. Некоторые новые возможности волнового алгоритма / Ю.Л. Зиман, Г.С. Гринберг // в сб.: Электронные вычислительные машины - М.: ИТМ и ВТ АН СССР. - 1973. – С. 22.
- 53 Зиман, Ю.Л., Рябов, Г.Г. Волновой алгоритм и электрические соединения/ Ю.Л. Зиман, Г.С. Гринберг // В сб.: Электронные вычислительные машины. - М.: ИТМ и ВТ АН СССР. - 1965 г. - С. 47-62.
- 54 Зозулевич, Д. М., Максимова, Л. Г. Выполнение на ЭЦВМ некоторых операций с трехмерными кусочно-заданными объектами / Д. М. Зозулевич, Л. Г. Максимова // В сб.: Вычислительная техника в машиностроении. - Минск, НТК АН БССР. – 1970. - С. 75-84.

- 55 Зозулевич, Д. М., Шерлинг, Д.Р. Методы реализации на ЭЦВМ теоретико-множественных операций над плоскими многосвязанными областями / Д. М. Зозулевич, Д.Р.Шерлинг // В сб.: Вычислительная техника в машиностроении. - Минск, НТК АН БССР. – 1969. - С. 26-35.
- 56 Иванов, Г. С., Есмуханова, Ж. Ж. Построения кратчайших связывающих сетей на топографической поверхности/ Г. С. Иванов, Ж. Ж Есмуханова // Начертательная геометрия и машинная графика в практике решения инженерных задач.— Омск: ОмПИ, 1987. — С. 27- 32.
- 57 Калинин, Б.В. Автоматизация синтеза топологии и размещения коммуникационных сетей: Автореф. канд. дисс. ... канд. техн. наук.:05.13.12 /Б.В. Калинин. - Куйбышев, КуАИ. – 1985. - 16 с.
- 58 Калинин, Б.В., Цыбатов, В.А. Об одном подходе к оптимизации размещения измерительно-вычислительных комплексов / Б.В. Калинин, В.А. Цыбатов // в сб.: Автоматизация научных исследований. - Куйбышев: КуАИ, 1984. - С. 41-47.
- 59 Канторович, Л.В. Математические методы в организации и планировании производства / Л.В. Канторович – Л.: ЛГУ, 1939. – 60 с.
- 60 Канторович, Л.В. Методы рационального раскроя металла / В. Канторович – М.: Произ. техн. бюллетень, 1942. - 35с.
- 61 Канторович, Л.В., Залгаллер, В.А. Расчет рационального раскроя промышленных материалов / Л.В. Канторович, В.А. Залгаллер - Л.: Лениздат, 1951. – 199 с.
- 62 Картак, В.М. Задача упаковки прямоугольников: точный алгоритм на базе матричного представления / В.М. Картак // Вестник УГАТУ.– 2007. – Т.9. №4 (22). – С. 104–110.
- 63 Кербер, Л. Л. Компоновка оборудования на самолетах / Л.Л. Кербер – М.: Машиностроение, 1976 – 304 с.
- 64 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.

- 65 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.
- 66 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.
- 67 Корн, Г.В. Методы формирования рецепторных геометрических моделей и их применение при решении инженерно-геометрических задач: Автореф. дисс.. канд. техн. наук.: 05.01.01 / Г.В. Корн. - М.: МАДИ, 1990. - 22 с.
- 68 Корн, Г.В. Применение рецепторных моделей при компоновке изделий авиационной техники. // В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. «Интегрированные системы автоматизированного проектирования». – М.: 1989. – с. 18-24.
- 69 Корн, Г.В., Маркин, Л.В. О возможностях математического обеспечения проектирования изделий машиностроения на базе рецепторных моделей / Корн, Л.В. Маркин // В сб.: Материалы научно-технического семинара «Автоматизация проектирования передач и редукторов». – Ижевск, 1989. – С. 23 – 24.
- 70 Куприков, М.Ю., Маркин, Л.В., Панов, В.В. и др. Формирование рационального облика перспективных авиационных ракетных систем и комплексов / Панов В.В., Горчица Г.И., Балыко Ю.П., Ермолин О.В., Нестеров В.А., Кунриков М.Ю., Маркин Л.В. - М.: Машиностроение, 2010. – 608 с.
- 71 Лузин, С.Ю, Лячек, Ю.Т., Петросян, Г.С., Полубасов, О.Б. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры / Лузин С.Ю, Лячек Ю.Т., Петросян Г.С., Полубасов О.Б. - СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 224 с.

- 72 Лузин, С.Ю., Лячек, Ю.Т. Полубояров, О.Б. Автоматизация проектирования печатных плат. Система топологической трассировки ТороR / С.Ю. Лузин, Ю.Т. Лячек, О.Б. Полубояров. – СПб, СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2005. - 132 с.
- 73 Мальчевский, В.В. Матрично-топологический метод синтеза схемы и компоновки самолета / В.В. Мальчевский – М.: МАИ, 2011 – 356 с.
- 74 Мальчевский, В.В. Автоматизация процесса компоновки самолета / В.В. Мальчевский. – М.: МАИ, 1987. – 49 с.
- 75 Маркин, Л.В. Геометрические модели компонуемых объектов в системе автоматизированного проектирования воздушных судов / Л.В. Маркин // В сб. Научных трудов «Геометрические модели в авиационном проектировании». - Киев: КИИГА, 1987. - С. 12-17
- 76 Маркин, Л.В. Геометрическое моделирование задач автоматизации размещения / Л.В. Маркин // Прикладная геометрия, инженерная графика, компьютерный дизайн. - № 1 (11). – 2007. - С. 9-18.
- 77 Маркин, Л.В. Задачи формирования подсистем компоновки САПР летательных аппаратов. / Л.В, Маркин // В сб.: «Прикладная геометрия и инженерная графика в теории и практике авиационного автоматизированного проектирования». - Киев: КИИГА, 1984. - С. 6-9
- 78 Мухачева, Э.А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Применение АСУ / Э.А. Мухачева. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.
- 79 Мухачева, Э.А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Применение АСУ / Э.А. Мухачева. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.
- 80 Ньи Ньи Хтун. Алгоритмы задач трассировки на основе рецепторных геометрических моделей / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Тез. докл. 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010». – М.: МАИ. – 2010. – С.314-315.
- 81 Ньи Ньи Хтун. Дискретные модели телесной трассировки / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Тез. докл. (Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2011») . – М.: МЭЙЛЕР. - С.190-191

- 82 Ньи Ньи Хтун. Использование рецепторного метода для проектирования каналовых поверхностей / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Тез. докл. научно - практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ. – 2012. – С.256.
- 83 Ньи Ньи Хтун. Использование рецепторных геометрических моделей в задачах телесной трассировки / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Труды. докл. «Международного конкурса научных работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, МГТУ им. Н.Э.Баумана». – М.: Изд-во НИИ, 2012. - С.146 – 147
- 84 Ньи Ньи Хтун. Использование рецепторных моделей в задачах трассировки / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Тез. докл «Технологии Microsoft в теории и практике программирования: труды VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных». – М.: Вузовская книга – МАИ. – 2010. – С.85.
- 85 Ньи Ньи Хтун. Исследование рецепторного метода проектирования каналовых поверхностей в задачах компоновки авиатехники / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Тез. докл. 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». – М.: МАИ. – 2012 . – С.298-299.
- 86 Ньи Ньи Хтун. Улучшенный алгоритм трассировки пути, основанный на рецепторном методе / Ньи Ньи Хтун // В сб.: Тез. докл. научно – практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010». Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ. – 2010. – С.108.
- 87 Нападимитру, Х., Стайглиц, К. Комбинаторная оптимизация: алгоритмы и сложность / Х. Нападимитру, К. Стайглиц. – М.: Мир. – 1984. – 510 С.
- 88 ОСТ4 ГО.410.003 - 73. Корпусы блоков самолетной радиоэлектронной аппаратуры. Конструкция и размеры М. Государственный комитет СССР по стандартам, 1973.
- 89 Пашенко, О. Б. Компоновка оборудования маневренного самолёта на базе матрично-топологического метода: дис... кан. тех. наук: 05.07.02 О.Б. Пашенко. - М, 1991. – 157 с.



- 90 Пащенко, О.Б. Автоматизированная компоновка оборудования в фюзеляже маневренного самолета / О. Б. Пащенко // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1990. -№ 4. – С. 111-113.
- 91 Пащенко, О.Б. Компоновка оборудования маневренного самолета на базе матрично-топологического метода. дис... кан. тех. наук: 05.07.02 О.Б. Пащенко. - М, 1991. – 22 с.
- 92 Пащенко, О.Б. Метод формирования компоновочной схемы радиоэлектронного оборудования на борту маневренного самолета / О.Б. Пащенко // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1991. - № 2. – С. 64-66.
- 93 Перевезенцева, А.В. Объемная компоновка отсеков оборудования с использованием SolidWorks / А.В. Перевезенцева // САПР и графика. – 2006. - № 6. – С.14
- 94 Петренко, А.И. Основы автоматизации проектирования / А.И. Петренко. - К.: Техника, 1982 - 295 с.
- 95 Петренко, А.П., Тетельбаум, А.Я., Забалуев Н.Н. Топологические алгоритмы трассировки многослойных печатных плат / А.П. Петренко, А.Я. Тетельбаум, Н.Н. Забалуев. – М.: Радио и связь. – 1989. – 152 с.
- 96 Петров, И.А, Клягин, В.А. Дискретная модель компоновки БРЭО для ранних этапов проектирования ЛА/И.А. Петров, В.А. Клягин // Полет. – 2017. – № 9.
- 97 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.
- 98 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 //

- 99 Руднев, А.С. Алгоритмы локального поиска для задач двумерной упаковки: дисс... кан. тех. наук: 05.13.18/ А.С. Руднев. – Новосибирск, 2010. – 104 с.
- 100 Рогоза, Ю.А. Задание геометрических объектов в дискретном пространстве / Ю.А. Рогоза. - Рукопись деп. в ВИНТИ 27.12.89. №7690-В-89. - М.: МАИ, 1989. – 28 с.
- 101 Руководство для конструкторов (РДК-Э) выпуск 2.1.2 Эксплуатационные люки. –М.:ЦАГИ. – 1985. – 14 с.
- 102 Ситу Л, Хтун, Н. Н., Маркин, Л. В. Рецепторные геометрические модели в задачах автоматизированной компоновки технического отсека легкого самолета / Лин Ситу, Ньи Ньи Хтун, Л.В. Маркин // Труды МАИ. - №47. - 2011.
- 103 Ситу Лин. Алгоритмы распознавания незаполненных пространств в задачах компоновки / Ситу Лин // В сб.:Тез.докл. 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика 2010». - М.: Изд-во МАИ. - 2010 . - С.315-316.
- 104 Ситу Лин. Дискретные модели выявления формы незаполненных пространств / Ситу Лин // В сб.:Тез.докл научно практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2010». Тезисы докладов. - М.: Изд-во МАИ. - 2010.-С.192.
- 105 Стандарт СП 407–2010 АППАРАТУРА, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ. ТРЕБОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
- 106 Стоян Ю.Г. Размещение геометрических объектов / Ю.Г. Стоян. – Киев: Наукова думка, 1975. – 239 с.
- 107 Стоян Ю.Г., Винарский В.Я. Алгебро-топологические свойства объектов/ Ю. Г. Стоян, В.Я. Винарский. – Харьков: Препринт ИПМаш АН УССР, 1981. – 34 с.
- 108 Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов / Ю.Г. Стоян, Н.И. Гиль.- Киев: Наукова думка, 1976. – 249 с.

- 109 Стоян Ю.Г., Кулиш Е.Н. Автоматизация проектирования компоновки оборудования летательных аппаратов / Ю. Г. Стоян, Е.Н. Кулиш. – М.: Машиностроение, 1984. -192с.
- 110 Стоян Ю.Г., Панасенко А.А. Периодическое размещение геометрических объектов/ Ю.Г. Стоян, А.А. Панасенко. – Киев: Наукова думка, 1978. – 176 с.
- 111 Стоян Ю.Г., Смеляков С.В., Аристова И.В., Алисейко Е.В. О сведении задачи телесной трассировки к задаче поиска оптимальной манхеттеновой трассы / Стоян Ю.Г., Смеляков С.В., Аристова И.В., Алисейко Е.В. // Киев, Теория и методы автоматизации проектирования. – вып. 1. – 1984, с. 5-9.
- 112 Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрической компоновки/Ю.Г. Стоян, С.В. Яковлев. – Киев.: Наукова думка, 1986 г.-265с.
- 113 Хтун Н. Н., Маркин Л. В., Соседко А.А. Применение рецепторных геометрических моделей в задачах автоматизированной компоновки авиационной техники /Ньи Ньи Хтун , Л.В. Маркин , А.А. Соседко // Труды МАИ. – вып. №72. – 2014.
- 114 Хтун Н. Н., Ситу Л., Маркин Л. В. Рецепторные геометрические модели в задачах автоматизированной компоновки технического отсека легкого самолет /Ньи Ньи Хтун , Л.В. Маркин , А.А. Соседко // Труды МАИ. – вып. №47. – 2011.
- 115 Хтун Н. Н., Тайк Ч., Маркин Л. В. Исследование алгоритмов использования рецепторных геометрических моделей в задачах телесной трассировки авиационной техники / Ньи Ньи Хтун , Ч. Тайк, Л.В. Маркин // Труды МАИ. – вып. №69. – 2013.

## Приложение А.

### Акт внедрения

«Утверждаю»

Директор проектно-  
технического комплекса

ПАО «Ил»

Галанов А.А.

«31» мая 2019 г.

#### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Петрова И.А. на тему: «методика автоматизированной компоновки БРЭО и трассировки коммуникаций на этапах разработки ЛА» в эскизный проект перспективного транспортного самолета, выполняемого проектно-техническим комплексом ПАО «Ил».

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований, изложенные в диссертации аспиранта кафедры 101 Московского авиационного института Петрова И.А., использованы при сравнительном анализе вариантов компоновки блоков бортового радиоэлектронного оборудования и трассировки коммуникаций.

Применение изложенной методики автоматизированной компоновки блоков БРЭО позволило разработать рациональный вариант решения задачи, у которого предполагается снижение массы межотсечных коммуникаций на 37% по сравнению с первоначальной компоновкой.

Согласовано:

Автор работы

Начальник отд. 624

Начальник отд. 613



 Петров И.А.

 Верина Т.В.

 Синицин Е.И.

**Приложение Б.****Координаты точек трассировки для тестовых задач**

## Задача № 1

<b>№№Точки</b>	<b>X1</b>	<b>Y1</b>	<b>Z1</b>	<b>Type</b>
<b>1</b>	-2700	-400	200	4
<b>2</b>	-2700	-400	-200	4
<b>3</b>	-1650	170	280	4
<b>4</b>	1250	-330	450	4
<b>5</b>	1800	-330	450	4
<b>6</b>	-2700	0	200	1
<b>7</b>	-2700	0	-200	1
<b>8</b>	-1700	-400	200	1
<b>9</b>	-1700	-400	-200	1
<b>10</b>	-1500	-500	0	1
<b>11</b>	-1500	-500	200	1
<b>12</b>	-1500	-500	-200	1
<b>13</b>	500	-460	500	1
<b>14</b>	500	-460	-500	1
<b>15</b>	1250	-330	-450	1
<b>16</b>	1800	-330	-450	1
<b>17</b>	-500	-500	-200	1
<b>18</b>	0	-500	200	1

Тип 4 – точка выхода из отсека

Тип 1 – точка межотсечной трассировки

Тип 5 – точечный источник, обозначающий выход в другу. Зону (например, выход в зону кия до располагаемой там антенны)

## Задача № 2

№№Точки	X1	Y1	Z1	Type
1	-2700	-400	200	4
2	-2700	-400	-200	4
3	-1650	170	280	4
4	1250	-330	450	4
5	1800	-330	450	4
6	-2700	0	200	1
7	-2700	0	-200	1
8	-1700	-400	200	1
9	-1700	-400	-200	1
10	-1500	-500	0	1
11	-1500	-500	200	1
12	-1500	-500	-200	1
13	500	-460	500	1
14	500	-460	-500	1
15	1250	-330	-450	1
16	1800	-330	-450	1
17	-500	-500	-200	1
18	0	-500	200	1
19	3000	-100	0	5
20	0	-450	1000	5
21	0	-450	-1000	5

## Задача № 3

№№Точки	X1	Y1	Z1	Type
1	-2700	-400	200	4
2	-2700	-400	-200	4
3	-1650	170	280	4
4	1250	-330	450	4
5	1800	-330	450	4
6	-2700	0	200	1
7	-2700	0	-200	1
8	-1700	-400	200	1
9	-1700	-400	-200	1
10	-1500	-500	0	1
11	-1500	-500	200	1
12	-1500	-500	-200	1
13	500	-460	500	1
14	500	-460	-500	1
15	1250	-330	-450	1
16	1800	-330	-450	1
17	-500	-500	-200	1
18	0	-500	200	1

## Задача № 4

<b>№№Точки</b>	<b>X1</b>	<b>Y1</b>	<b>Z1</b>	<b>Type</b>
1	-2700	-400	200	4
2	-2700	-400	-200	4
3	-1650	170	280	4
4	1250	-330	450	4
5	1800	-330	450	4
6	-2700	0	200	1
7	-2700	0	-200	1
8	-1700	-400	200	1
9	-1700	-400	-200	1
10	-1500	-500	0	1
11	-1500	-500	200	1
12	-1500	-500	-200	1
13	500	-460	500	1
14	500	-460	-500	1
15	1250	-330	-450	1
16	1800	-330	-450	1
17	-500	-500	-200	1
18	0	-500	200	1
19	3000	-100	0	5
20	0	-450	1000	5
21	0	-450	-1000	5

## Приложение В. Списки блоков для тестовых задач

### Задача №1

№№	Название блока	Длина	Ширина	Высота	Отсек	Отступ слева	Отступ справа	ЭМ	TDP	DefT
1	BTsVM	170	471	255	-1	3	3		10	1
2	INS	272	400	265	-1	3	3		10	1
3	Otvetchik	253	138	224	-1	3	3		10	1
4	RSBM	170	446	280	-1	3	3		10	1
5	ARK	70	470	230	-1	3	3		10	1
6	Battery	451	418	285	-1	3	3		10	1
7	Radio	370	90	128	-1	3	3		10	1
8	RU	417	122	270	-1	3	3		10	1
9	SVS	133	455	251	-1	3	3		10	1
10	Predohranitely	206	65	145	-1	3	3		10	1
11	RV	133	431	250	-1	3	3		10	1
12	Kontactory	88	90	138	-1	3	3		10	1
13	VOR	57	319	194	-1	3	3		10	1
14	DME	200	270	96	-1	3	3		10	1

Если отсек = -1, это значит, что положение блока варьируется. В ином случае – блок принудительно устанавливается в указанный отсек

### Задача № 2

№№	Название блока	Длина	Ширина	Высота	Отсек	Отступ слева	Отступ справа	ЭМ	TDP	DefT
1	BTsVM	170	471	255	-1	3	3		10	1
2	INS	272	400	265	-1	3	3		10	1
3	Otvetchik	253	138	224	-1	3	3		10	1
4	RSBM	170	446	280	-1	3	3		10	1
5	ARK	70	470	230	-1	3	3		10	1
6	Battery	451	418	285	-1	3	3		10	1
7	Radio	370	90	128	-1	3	3		10	1
8	RU	417	122	270	-1	3	3		10	1
9	SVS	133	455	251	-1	3	3		10	1
10	Predohranitely	206	65	145	-1	3	3		10	1
11	RV	133	431	250	-1	3	3		10	1
12	Kontactory	88	90	138	-1	3	3		10	1
13	VOR	57	319	194	-1	3	3		10	1
14	DME	200	270	96	-1	3	3		10	1



## Задача № 3

№№	Название блока	Длина	Ширина	Высота	Отсек	Отступ слева	Отступ справа	ЭМ	TDP	DefT
1	BTsVM	170	471	255	4	3	3		10	1
2	INS	272	400	265	4	3	3		10	1
3	Battery	451	418	285	1	3	3		10	1
4	Otvetchik	253	138	224	-1	3	3		10	1
5	RSBM	170	446	280	-1	3	3		10	1
6	ARK	70	470	230	-1	3	3		10	1
7	Radio	370	90	128	-1	3	3		10	1
8	RU	417	122	270	-1	3	3		10	1
9	SVS	133	455	251	-1	3	3		10	1
10	Predohranitely	206	65	145	-1	3	3		10	1
11	RV	133	431	250	-1	3	3		10	1
12	Kontactory	88	90	138	-1	3	3		10	1
13	VOR	57	319	194	-1	3	3		10	1
14	DME	200	270	96	-1	3	3		10	1

## Задача №4

№№	Название блока	Длина	Ширина	Высота	Отсек	Отступ слева	Отступ справа	ЭМ	TDP	DefT
1	BTsVM	170	471	255	4	3	3		10	1
2	INS	272	400	265	4	3	3		10	1
3	Battery	451	418	285	1	3	3		10	1
4	Otvetchik	253	138	224	-1	3	3		10	1
5	RSBM	170	446	280	-1	3	3		10	1
6	ARK	70	470	230	-1	3	3		10	1
7	Radio	370	90	128	-1	3	3		10	1
8	RU	417	122	270	-1	3	3		10	1
9	SVS	133	455	251	-1	3	3		10	1
10	Predohranitely	206	65	145	-1	3	3		10	1
11	RV	133	431	250	-1	3	3		10	1
12	Kontactory	88	90	138	-1	3	3		10	1
13	VOR	57	319	194	-1	3	3		10	1
14	DME	200	270	96	-1	3	3		10	1

**Приложение Г.  
Списки связей для тестовых задач**

Задача №1

№№	Тип связи	Внутренняя(0)/ Внешняя(1)	№№ Блока 1	№№Блока 2/ №№Точки	Уд.масса [кг./км.]	Кол-во проводов	DefT
1	Digital	0	1	2	18	1	1
2	Digital	0	1	4	18	1	1
3	Digital	0	1	5	18	1	1
4	Electric	0	1	8	64	1	1
5	Digital	0	1	9	18	1	1
6	Digital	0	1	10	18	1	1
7	Digital	0	1	13	18	1	1
8	Digital	0	1	14	18	1	1
9	Electric	0	2	8	64	1	1
10	Electric	0	3	8	64	1	1
11	Electric	0	4	8	64	1	1
12	Electric	0	5	8	64	1	1
13	Electric	0	6	12	64	1	1
14	Electric	0	7	8	64	1	1
15	Electric	0	8	9	64	1	1
16	Electric	0	8	10	64	1	1
17	Electric	0	8	11	64	1	1
18	Electric	0	8	13	64	1	1
19	Electric	0	8	14	64	1	1
20	Electric	0	10	12	64	1	1

## Задача № 2

№№	Тип связи	Внутренняя(0)/ Внешняя(1)	№№ Блока 1	№№Блока 2/ №№Точки	Уд.масса [кг./км.]	Кол-во проводов	DefT
1	Digital	0	1	2	18	1	1
2	Digital	0	1	4	18	1	1
3	Digital	0	1	5	18	1	1
4	Electric	0	1	8	64	1	1
5	Digital	0	1	9	18	1	1
6	Digital	0	1	10	18	1	1
7	Digital	0	1	13	18	1	1
8	Digital	0	1	14	18	1	1
9	Electric	0	2	8	64	1	1
10	Electric	0	3	8	64	1	1
11	Electric	0	4	8	64	1	1
12	Electric	0	5	8	64	1	1
13	Electric	0	6	12	64	1	1
14	Electric	0	7	8	64	1	1
15	Electric	0	8	9	64	1	1
16	Electric	0	8	10	64	1	1
17	Electric	0	8	11	64	1	1
18	Electric	0	8	13	64	1	1
19	Electric	0	8	14	64	1	1
20	Electric	0	10	12	64	1	1
21	HF	1	3	19	27	1	1
22	HF	1	5	19	27	1	1
23	HF	1	7	19	27	1	1
24	Electric	1	8	21	64	1	1
25	Electric	1	8	20	64	1	1
26	HF	1	9	21	27	1	1
27	HF	1	11	19	27	1	1
28	HF	1	14	19	27	1	1

## Задача № 3

№№	Тип связи	Внутренняя(0)/ Внешняя(1)	№№ Блока 1	№№Блока 2/ №№Точки	Уд.масса [кг./км.]	Кол-во проводов	DefT
1	Digital	0	1	2	18	1	1
2	Digital	0	1	4	18	1	1
3	Digital	0	1	5	18	1	1
4	Electric	0	1	8	64	1	1
5	Digital	0	1	9	18	1	1
6	Digital	0	1	10	18	1	1
7	Digital	0	1	13	18	1	1
8	Digital	0	1	14	18	1	1
9	Electric	0	2	8	64	1	1
10	Electric	0	3	12	64	1	1
11	Electric	0	4	8	64	1	1
12	Electric	0	5	8	64	1	1
13	Electric	0	6	8	64	1	1
14	Electric	0	7	8	64	1	1
15	Electric	0	8	9	64	1	1
16	Electric	0	8	10	64	1	1
17	Electric	0	8	11	64	1	1
18	Electric	0	8	13	64	1	1
19	Electric	0	8	14	64	1	1
20	Electric	0	10	12	64	1	1

## Задача №4

№№	Тип связи	Внутренняя(0)/ Внешняя(1)	№№ Блока 1	№№Блока 2/ №№Точки	Уд.масса [кг./км.]	Кол-во проводов	DefT
1	Digital	0	1	2	18	1	1
2	Digital	0	1	4	18	1	1
3	Digital	0	1	5	18	1	1
4	Electric	0	1	8	64	1	1
5	Digital	0	1	9	18	1	1
6	Digital	0	1	10	18	1	1
7	Digital	0	1	13	18	1	1
8	Digital	0	1	14	18	1	1
9	Electric	0	2	8	64	1	1
10	Electric	0	3	12	64	1	1
11	Electric	0	4	8	64	1	1
12	Electric	0	5	8	64	1	1
13	Electric	0	6	8	64	1	1
14	Electric	0	7	8	64	1	1
15	Electric	0	8	9	64	1	1
16	Electric	0	8	10	64	1	1
17	Electric	0	8	11	64	1	1
18	Electric	0	8	13	64	1	1
19	Electric	0	8	14	64	1	1
20	Electric	0	10	12	64	1	1
21	HF	1	4	19	27	1	1
22	HF	1	6	19	27	1	1
23	HF	1	7	19	27	1	1
24	Electric	1	8	21	64	1	1
25	Electric	1	8	20	64	1	1
26	HF	1	9	21	27	1	1
27	HF	1	11	19	27	1	1
28	HF	1	14	19	27	1	1

**Приложение Д.  
Отсеки для тестовых задач**

## Задача №1

№ отс.	Название	Объем отсека	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	Н тчк вых	DefT
1	Field1	55000000	-2700	400	200	1700	400	200	2700	400	412	1	5
2	Field2	42400000	-2700	400	-200	1700	400	200	2700	400	412	2	5
3	Field3	35510000	-1650	170	280	1650	170	280	2050	170	280	3	5
4	Field6	84375000	1250	330	450	1250	330	450	1750	330	450	4	5
5	Field7	84375000	1800	330	450	1800	330	450	2300	330	450	5	5

## Задача № 2

№ отс.	Название	Объем отсека	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	Н тчк вых	DefT
1	Field1	55000000	-2700	400	200	1700	400	200	2700	400	412	1	5
2	Field2	42400000	-2700	400	-200	1700	400	200	2700	400	412	2	5
3	Field3	35510000	-1650	170	280	1650	170	280	2050	170	280	3	5
4	Field6	84375000	1250	330	450	1250	330	450	1750	330	450	4	5
5	Field7	84375000	1800	330	450	1800	330	450	2300	330	450	5	5

## Задача № 3

№ отс.	Название	Объем отсека	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	Н тчк вых	DefT
1	Field1	55000000	-2700	- 400	200	- 1700	- 400	200	- 2700	- 400	412	1	5
2	Field2	42400000	-2700	- 400	-200	- 1700	- 400	200	- 2700	- 400	412	2	5
3	Field3	35510000	-1650	- 170	280	- 1650	- 170	280	- 2050	- 170	280	3	5
4	Field6	84375000	1250	- 330	450	1250	- 330	450	1750	- 330	450	4	5
5	Field7	84375000	1800	- 330	450	1800	- 330	450	2300	- 330	450	5	5

## Задача №4

№ отс.	Название	Объем отсека	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	Н тчк вых	DefT
1	Field1	55000000	-2700	- 400	200	- 1700	- 400	200	- 2700	- 400	412	1	5
2	Field2	42400000	-2700	- 400	-200	- 1700	- 400	200	- 2700	- 400	412	2	5
3	Field3	35510000	-1650	- 170	280	- 1650	- 170	280	- 2050	- 170	280	3	5
4	Field6	84375000	1250	- 330	450	1250	- 330	450	1750	- 330	450	4	5
5	Field7	84375000	1800	- 330	450	1800	- 330	450	2300	- 330	450	5	5

**Приложение Е.**  
**Эталонные решения 1го этапа для тестовых задач**

Задача №1

Распределение блоков по отсекам

блок	отсек
1	4
2	4
3	1
4	5
5	5
6	5
7	5
8	4
9	4
10	4
11	5
12	1
13	4
14	5

Полученная длина межотсечных коммуникаций = 22017 мм

Задача № 2

Распределение блоков по отсекам

блок	отсек
1	4
2	4
3	1
4	5
5	5
6	5
7	5
8	4
9	4
10	4
11	5
12	1
13	4
14	5

Полученная длина межотсечных коммуникаций = 22017 мм



## Задача № 3

## Распределение блоков по отсекам

блок	отсек
1	4
2	4
3	1
4	5
5	5
6	5
7	5
8	4
9	4
10	4
11	5
12	1
13	4
14	5

Полученная длина межотсечных коммуникаций = 22017 мм

## Задача №4

## Распределение блоков по отсекам

блок	отсек
1	4
2	4
3	1
4	5
5	5
6	5
7	5
8	4
9	4
10	4
11	5
12	1
13	4
14	5

Полученная длина межотсечных коммуникаций = 22017 мм.

## Эталонные маршруты коммуникаций для задачи №4

№ связи	Старт	Финиш	Дистанция	Маршрут
1	4	4	0	4-5
2	4	5	550	4-5
3	4	5	550	
4	4	4	0	
5	4	4	0	
6	4	4	0	
7	4	4	0	
8	4	5	550	4-5
9	4	4	0	
10	1	1	-1	
11	5	4	550	5-4
12	5	4	550	5-4
13	5	4	550	5-4
14	5	4	550	5-4
15	4	4	0	
16	4	4	0	
17	4	5	550	4-5
18	4	4	0	
19	4	5	550	4-5
20	4	1	4347,29	4-1-18-11-10-8-1
21	5	19	1302,08	5-19
22	5	19	1302,08	5019
23	5	19	1302,08	5-19
24	4	21	2370	4-15-14-21
25	4	20	1470	4-13-2-
26	4	21	2370	4-15-14-21
27	5	19	1302,08	5-19
28	5	19	1302,08	5-19

**Приложение Ж.****Эталонные решения 2го этапа для тестовой задачи №4**

Координаты блоков по отсекам:

№№	Название	X	Y	Z
1	BTsVM	1800	120	283
2	INS	1500	-330	308
3	Battery	-1650	170	103.5
4	Otvetchik	1800	120	65
5	RSBM	1800	-330	359
6	ARK	1800	120	409
7	Radio	1800	120	-252
8	RU	1800	-330	59.5
9	SVS	1500	-330	99.5
10	Predohranitely	-1809	-400	-200
11	RV	-72.5	-500	-200
12	Kontaktory	-1750	-400	200
13	VOR	465.5	-500	200
14	DME	1800	-300	-255

## Приложение И.

### Пример реализации Journal файла

```

Option Strict Off
Imports System
Imports NXOpen
Module NXJournal
Sub Main
Dim theSession As Session = Session.GetSession()
Dim workPart As Part = theSession.Parts.Work
Dim displayPart As Part = theSession.Parts.Display
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId1 As Session.UndoMarkId
markId1 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId2 As Session.UndoMarkId
markId2 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId2, "Add Component Dialog")
Dim basePart0 As BasePart
Dim partLoadStatus0 As PartLoadStatus
basePart0 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\BTsVM.prt", partLoadStatus0)
partLoadStatus0.Dispose()
Dim nErrs1 As Integer
nErrs1 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId1)
Dim markId3 As Session.UndoMarkId
markId3 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects1(-1) As NXObject
Dim nErrs2 As Integer
nErrs2 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects1)
Dim basePoint1 As Point3d = New Point3d(1800, 120, 283)
Dim orientation1 As Matrix3x3
orientation1.Xx = 0
orientation1.Xy = 0
orientation1.Xz = 1
orientation1.Yx = 0.0
orientation1.Yy = 1.0
orientation1.Yz = 0.0
orientation1.Zx = 0
orientation1.Zy = 0
orientation1.Zz = 1
Dim partLoadStatus1 As PartLoadStatus
Dim component1 As Assemblies.Component
component1 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\BTsVM.prt",
"MODEL", "_BLOK_0", basePoint1, orientation1, -1, partLoadStatus1, True)
partLoadStatus1.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId3, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId2, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId2, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId4 As Session.UndoMarkId
markId4 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId5 As Session.UndoMarkId
markId5 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId5, "Add Component Dialog")
Dim basePart1 As BasePart
Dim partLoadStatus2 As PartLoadStatus
basePart1 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\INS.prt", partLoadStatus2)
partLoadStatus2.Dispose()
Dim nErrs3 As Integer
nErrs3 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId4)
Dim markId6 As Session.UndoMarkId
markId6 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects2(-1) As NXObject
Dim nErrs4 As Integer
nErrs4 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects2)
Dim basePoint2 As Point3d = New Point3d(1500, -330, 308)
Dim orientation2 As Matrix3x3

```

```

orientation2.Xx = 0
orientation2.Xy = 0
orientation2.Xz = 1
orientation2.Yx = 0.0
orientation2.Yy = 1.0
orientation2.Yz = 0.0
orientation2.Zx = 0
orientation2.Zy = 0
orientation2.Zz = 1
Dim partLoadStatus3 As PartLoadStatus
Dim component2 As Assemblies.Component
component2 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\INS.prt",
"MODEL", "_BLOK_1", basePoint2, orientation2, -1, partLoadStatus3, True)
partLoadStatus3.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId6, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId5, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId5, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId7 As Session.UndoMarkId
markId7 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId8 As Session.UndoMarkId
markId8 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId8, "Add Component Dialog")
Dim basePart2 As BasePart
Dim partLoadStatus4 As PartLoadStatus
basePart2 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Otvetchik.prt",
partLoadStatus4)
partLoadStatus4.Dispose()
Dim nErrs5 As Integer
nErrs5 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId7)
Dim markId9 As Session.UndoMarkId
markId9 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects3(-1) As NXObject
Dim nErrs6 As Integer
nErrs6 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects3)
Dim basePoint3 As Point3d = New Point3d(1800, 120, 65.5)
Dim orientation3 As Matrix3x3
orientation3.Xx = 0
orientation3.Xy = 0
orientation3.Xz = 1
orientation3.Yx = 0.0
orientation3.Yy = 1.0
orientation3.Yz = 0.0
orientation3.Zx = 0
orientation3.Zy = 0
orientation3.Zz = 1
Dim partLoadStatus5 As PartLoadStatus
Dim component3 As Assemblies.Component
component3 =
workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Otvetchik.prt", "MODEL",
"_BLOK_2", basePoint3, orientation3, -1, partLoadStatus5, True)
partLoadStatus5.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId9, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId8, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId8, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId10 As Session.UndoMarkId
markId10 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId11 As Session.UndoMarkId
markId11 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId11, "Add Component Dialog")
Dim basePart3 As BasePart
Dim partLoadStatus6 As PartLoadStatus
basePart3 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\RSBM.prt", partLoadStatus6)
partLoadStatus6.Dispose()
Dim nErrs7 As Integer
nErrs7 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId10)

```

```

Dim markId12 As Session.UndoMarkId
markId12 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects4(-1) As NXObject
Dim nErrs8 As Integer
nErrs8 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects4)
Dim basePoint4 As Point3d = New Point3d(1800, -330, 359)
Dim orientation4 As Matrix3x3
orientation4.Xx = 0
orientation4.Xy = 0
orientation4.Xz = 1
orientation4.Yx = 0.0
orientation4.Yy = 1.0
orientation4.Yz = 0.0
orientation4.Zx = 0
orientation4.Zy = 0
orientation4.Zz = 1
Dim partLoadStatus7 As PartLoadStatus
Dim component4 As Assemblies.Component
component4 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\RSBM.prt",
"MODEL", "_BLOK_3", basePoint4, orientation4, -1, partLoadStatus7, True)
partLoadStatus7.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId12, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId11, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId11, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----

Dim markId13 As Session.UndoMarkId
markId13 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId14 As Session.UndoMarkId
markId14 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId14, "Add Component Dialog")
Dim basePart4 As BasePart
Dim partLoadStatus8 As PartLoadStatus
basePart4 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\ARK.prt", partLoadStatus8)
partLoadStatus8.Dispose()
Dim nErrs9 As Integer
nErrs9 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId13)
Dim markId15 As Session.UndoMarkId
markId15 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects5(-1) As NXObject
Dim nErrs10 As Integer
nErrs10 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects5)
Dim basePoint5 As Point3d = New Point3d(1800, 120, 409)
Dim orientation5 As Matrix3x3
orientation5.Xx = 0
orientation5.Xy = 0
orientation5.Xz = 1
orientation5.Yx = 0.0
orientation5.Yy = 1.0
orientation5.Yz = 0.0
orientation5.Zx = 0
orientation5.Zy = 0
orientation5.Zz = 1
Dim partLoadStatus9 As PartLoadStatus
Dim component5 As Assemblies.Component
component5 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\ARK.prt",
"MODEL", "_BLOK_4", basePoint5, orientation5, -1, partLoadStatus9, True)
partLoadStatus9.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId15, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId14, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId14, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----

Dim markId16 As Session.UndoMarkId
markId16 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId17 As Session.UndoMarkId
markId17 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId17, "Add Component Dialog")
Dim basePart5 As BasePart

```

```

Dim partLoadStatus10 As PartLoadStatus
basePart5 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Battery.prt",
partLoadStatus10)
partLoadStatus10.Dispose()
Dim nErrs11 As Integer
nErrs11 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId16)
Dim markId18 As Session.UndoMarkId
markId18 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects6(-1) As NXObject
Dim nErrs12 As Integer
nErrs12 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects6)
Dim basePoint6 As Point3d = New Point3d(-1650, 170, 103.5)
Dim orientation6 As Matrix3x3
orientation6.Xx = 0
orientation6.Xy = 0
orientation6.Xz = 1
orientation6.Yx = 0.0
orientation6.Yy = 1.0
orientation6.Yz = 0.0
orientation6.Zx = 0
orientation6.Zy = 0
orientation6.Zz = 1
Dim partLoadStatus11 As PartLoadStatus
Dim component6 As Assemblies.Component
component6 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Battery.prt",
"MODEL", "_BLOK_5", basePoint6, orientation6, -1, partLoadStatus11, True)
partLoadStatus11.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId18, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId17, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId17, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId19 As Session.UndoMarkId
markId19 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId20 As Session.UndoMarkId
markId20 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId20, "Add Component Dialog")
Dim basePart6 As BasePart
Dim partLoadStatus12 As PartLoadStatus
basePart6 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Radio.prt", partLoadStatus12)
partLoadStatus12.Dispose()
Dim nErrs13 As Integer
nErrs13 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId19)
Dim markId21 As Session.UndoMarkId
markId21 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects7(-1) As NXObject
Dim nErrs14 As Integer
nErrs14 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects7)
Dim basePoint7 As Point3d = New Point3d(1800, 120, -252)
Dim orientation7 As Matrix3x3
orientation7.Xx = 0
orientation7.Xy = 0
orientation7.Xz = 1
orientation7.Yx = 0.0
orientation7.Yy = 1.0
orientation7.Yz = 0.0
orientation7.Zx = 0
orientation7.Zy = 0
orientation7.Zz = 1
Dim partLoadStatus13 As PartLoadStatus
Dim component7 As Assemblies.Component
component7 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Radio.prt",
"MODEL", "_BLOK_6", basePoint7, orientation7, -1, partLoadStatus13, True)
partLoadStatus13.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId21, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId20, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId20, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----

```

```

Dim markId22 As Session.UndoMarkId
markId22 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId23 As Session.UndoMarkId
markId23 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId23, "Add Component Dialog")
Dim basePart7 As BasePart
Dim partLoadStatus14 As PartLoadStatus
basePart7 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\RU.prt", partLoadStatus14)
partLoadStatus14.Dispose()
Dim nErrs15 As Integer
nErrs15 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId22)
Dim markId24 As Session.UndoMarkId
markId24 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects8(-1) As NXObject
Dim nErrs16 As Integer
nErrs16 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects8)
Dim basePoint8 As Point3d = New Point3d(1800, -330, 59.5)
Dim orientation8 As Matrix3x3
orientation8.Xx = 0
orientation8.Xy = 0
orientation8.Xz = 1
orientation8.Yx = 0.0
orientation8.Yy = 1.0
orientation8.Yz = 0.0
orientation8.Zx = 0
orientation8.Zy = 0
orientation8.Zz = 1
Dim partLoadStatus15 As PartLoadStatus
Dim component8 As Assemblies.Component
component8 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\RU.prt",
"MODEL", "_BLOK_7", basePoint8, orientation8, -1, partLoadStatus15, True)
partLoadStatus15.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId24, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId23, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId23, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----

Dim markId25 As Session.UndoMarkId
markId25 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId26 As Session.UndoMarkId
markId26 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId26, "Add Component Dialog")
Dim basePart8 As BasePart
Dim partLoadStatus16 As PartLoadStatus
basePart8 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\SVS.prt", partLoadStatus16)
partLoadStatus16.Dispose()
Dim nErrs17 As Integer
nErrs17 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId25)
Dim markId27 As Session.UndoMarkId
markId27 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects9(-1) As NXObject
Dim nErrs18 As Integer
nErrs18 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects9)
Dim basePoint9 As Point3d = New Point3d(1500, -330, 99.5)
Dim orientation9 As Matrix3x3
orientation9.Xx = 0
orientation9.Xy = 0
orientation9.Xz = 1
orientation9.Yx = 0.0
orientation9.Yy = 1.0
orientation9.Yz = 0.0
orientation9.Zx = 0
orientation9.Zy = 0
orientation9.Zz = 1
Dim partLoadStatus17 As PartLoadStatus
Dim component9 As Assemblies.Component
component9 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\SVS.prt",
"MODEL", "_BLOK_8", basePoint9, orientation9, -1, partLoadStatus17, True)
partLoadStatus17.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId27, Nothing)

```



```

theSession.SetUndoMarkName(markId26, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId26, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId28 As Session.UndoMarkId
markId28 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId29 As Session.UndoMarkId
markId29 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId29, "Add Component Dialog")
Dim basePart9 As BasePart
Dim partLoadStatus18 As PartLoadStatus
basePart9 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Predohranitely.prt",
partLoadStatus18)
partLoadStatus18.Dispose()
Dim nErrs19 As Integer
nErrs19 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId28)
Dim markId30 As Session.UndoMarkId
markId30 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects10(-1) As NXObject
Dim nErrs20 As Integer
nErrs20 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects10)
Dim basePoint10 As Point3d = New Point3d(-1809, -400, -200)
Dim orientation10 As Matrix3x3
orientation10.Xx = -1
orientation10.Xy = 0
orientation10.Xz = 0
orientation10.Yx = 0.0
orientation10.Yy = 1.0
orientation10.Yz = 0.0
orientation10.Zx = -1
orientation10.Zy = 0
orientation10.Zz = 0
Dim partLoadStatus19 As PartLoadStatus
Dim component10 As Assemblies.Component
component10 =
workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Predohranitely.prt",
"MODEL", "_BLOK_9", basePoint10, orientation10, -1, partLoadStatus19, True)
partLoadStatus19.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId30, Nothing)

theSession.SetUndoMarkName(markId29, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId29, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId31 As Session.UndoMarkId
markId31 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId32 As Session.UndoMarkId
markId32 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId32, "Add Component Dialog")
Dim basePart10 As BasePart
Dim partLoadStatus20 As PartLoadStatus
basePart10 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\RV.prt", partLoadStatus20)
partLoadStatus20.Dispose()
Dim nErrs21 As Integer
nErrs21 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId31)
Dim markId33 As Session.UndoMarkId
markId33 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects11(-1) As NXObject
Dim nErrs22 As Integer
nErrs22 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects11)
Dim basePoint11 As Point3d = New Point3d(-72.5, -500, -200)
Dim orientation11 As Matrix3x3
orientation11.Xx = -1
orientation11.Xy = 0
orientation11.Xz = 0
orientation11.Yx = 0.0
orientation11.Yy = 1.0
orientation11.Yz = 0.0
orientation11.Zx = -1

```

```

orientation11.Zy = 0
orientation11.Zz = 0
Dim partLoadStatus21 As PartLoadStatus
Dim component11 As Assemblies.Component
component11 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\RV.prt",
"MODEL", "_BLOK_10", basePoint11, orientation11, -1, partLoadStatus21, True)
partLoadStatus21.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId33, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId32, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId32, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId34 As Session.UndoMarkId
markId34 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId35 As Session.UndoMarkId
markId35 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId35, "Add Component Dialog")
Dim basePart11 As BasePart
Dim partLoadStatus22 As PartLoadStatus
basePart11 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Kontaktory.prt",
partLoadStatus22)
partLoadStatus22.Dispose()
Dim nErrs23 As Integer
nErrs23 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId34)
Dim markId36 As Session.UndoMarkId
markId36 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects12(-1) As NXObject
Dim nErrs24 As Integer
nErrs24 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects12)
Dim basePoint12 As Point3d = New Point3d(-1750, -400, 200)
Dim orientation12 As Matrix3x3
orientation12.Xx = 1
orientation12.Xy = 0
orientation12.Xz = 0
orientation12.Yx = 0.0
orientation12.Yy = 1.0
orientation12.Yz = 0.0
orientation12.Zx = 1
orientation12.Zy = 0
orientation12.Zz = 0
Dim partLoadStatus23 As PartLoadStatus
Dim component12 As Assemblies.Component
component12 =
workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\Kontaktory.prt", "MODEL",
"_BLOK_11", basePoint12, orientation12, -1, partLoadStatus23, True)
partLoadStatus23.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId36, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId35, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId35, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId37 As Session.UndoMarkId
markId37 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId38 As Session.UndoMarkId
markId38 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId38, "Add Component Dialog")
Dim basePart12 As BasePart
Dim partLoadStatus24 As PartLoadStatus
basePart12 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\VOR.prt", partLoadStatus24)
partLoadStatus24.Dispose()
Dim nErrs25 As Integer
nErrs25 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId37)
Dim markId39 As Session.UndoMarkId
markId39 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects13(-1) As NXObject
Dim nErrs26 As Integer
nErrs26 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects13)
Dim basePoint13 As Point3d = New Point3d(465.5, -500, 200)
Dim orientation13 As Matrix3x3

```

```

orientation13.Xx = 1
orientation13.Xy = 0
orientation13.Xz = 0
orientation13.Yx = 0.0
orientation13.Yy = 1.0
orientation13.Yz = 0.0
orientation13.Zx = 1
orientation13.Zy = 0
orientation13.Zz = 0
Dim partLoadStatus25 As PartLoadStatus
Dim component13 As Assemblies.Component
component13 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\VOR.prt",
"MODEL", "_BLOK_12", basePoint13, orientation13, -1, partLoadStatus25, True)
partLoadStatus25.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId39, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId38, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId38, Nothing)
' -----
' Menu: Assemblies->Components->Add Component...
' -----
Dim markId40 As Session.UndoMarkId
markId40 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Visible, "Add Component")
Dim markId41 As Session.UndoMarkId
markId41 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Start")
theSession.SetUndoMarkName(markId41, "Add Component Dialog")
Dim basePart13 As BasePart
Dim partLoadStatus26 As PartLoadStatus
basePart13 = theSession.Parts.OpenBase("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\DME.prt", partLoadStatus26)
partLoadStatus26.Dispose()
Dim nErrs27 As Integer
nErrs27 = theSession.UpdateManager.DoUpdate(markId40)
Dim markId42 As Session.UndoMarkId
markId42 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Add Component")
Dim objects14(-1) As NXObject
Dim nErrs28 As Integer
nErrs28 = theSession.UpdateManager.AddToDeleteList(objects14)
Dim basePoint14 As Point3d = New Point3d(1800, -330, -255)
Dim orientation14 As Matrix3x3
orientation14.Xx = 0
orientation14.Xy = 0
orientation14.Xz = 1
orientation14.Yx = 0.0
orientation14.Yy = 1.0
orientation14.Yz = 0.0
orientation14.Zx = 0
orientation14.Zy = 0
orientation14.Zz = 1
Dim partLoadStatus27 As PartLoadStatus
Dim component14 As Assemblies.Component
component14 = workPart.ComponentAssembly.AddComponent("D:\ipetrov\AK_BREO\UTS\DME.prt",
"MODEL", "_BLOK_13", basePoint14, orientation14, -1, partLoadStatus27, True)
partLoadStatus27.Dispose()
theSession.DeleteUndoMark(markId42, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId41, "Add Component")
theSession.DeleteUndoMark(markId41, Nothing)
End Sub
End Module

```