

DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.07
УДК 629.7.022

В.А. Клягин, И.А. Петров, С.А. Серебрянский, Д.А. Лаушин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

**МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОМПОНОВКИ
БЛОКОВ БРЭО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ ПРИБЛИЖЕНИЯМИ
НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ
НА БАЗОВЫХ ПЛОСКОСТЯХ ОТСЕКОВ**

Описывается методика, разработанная на основе метода последовательных приближений для решения задачи компоновки блоков БРЭО в автоматизированном режиме. Последовательные приближения заключаются в использовании дискретных моделей компоновки разных размерностей (1D, 2D, 3D).

Дискретные представления разной размерности позволяют показать связь с типовыми задачами комбинаторной оптимизации, например с задачами о рюкзаке или упаковке в полуограниченную полосу. Тогда для их решения подходят широко известные алгоритмы, например, ветвей и границ и FFDH соответственно. В свою очередь, это позволит решать задачу с достаточной точностью за конечное время. Отсечения происходят при переходе с одного этапа на другой.

На основе методики разработан алгоритм, работоспособность которого подтверждена решением тестового примера. Важно отметить, что при переходах между этапами человек может корректировать отсечения и исходные данные задачи.

Ключевые слова: компоновка, блоки электронного оборудования, методика, оптимизация, автоматизация, проектирование летательных аппаратов.

V.A. Klyagin, I.A. Petrov, S.A. Serebryansky, D.A. Laushin

Moscow Aviation Institute (National REsearch University), Moscow, Russian Federation

**THE METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF AVIONICS BLOCKS
ARRANGEMENT BY SUCCESSIVE APPROXIMATIONS BASED
ON A DISCRETE MODEL OF THEIR INSTALLATION ON THE VIRTUAL PLANES**

The article describes a technique developed on the basis of the method of successive approximations for solving the problem of avionics blocks arrangement in an automated mode. Successive approximations consist in the use of discrete layout models with different dimensions (1D, 2D, 3D). These models connect installation problem with typical combinatorial optimization problems, for example, the knapsack problem or packing in a semi-bounded band. Then their solutions are suitable widely known algorithms, e.g., branch and bound and FFDH appropriately. This will allow to solve the problem with sufficient accuracy in a finite time. Clipping occurs during the transition from one stage to another.

Algorithm is developed on the the technique, which is tested and confirmed by the solution of the test example. It is important to note that during the transitions between the stages a human can adjust the clipping and edit task initial data.

Keywords: layout, scheme, installation, avionics equipment, methods, optimization, automation, aircraft design.

Введение

Оптимальная компоновка (размещение) сложного по своей структуре и количеству элементов бортового комплекса радиоэлектронного оборудования (БРЭО) на самолете является нетривиальной и трудоемкой задачей. Качественное решение этой проблемы для практически любого современного ЛА невозможно без применения средств автоматизации. Разработке теоретических аспектов автоматизации процесса размещения посвящено много трудов [1, 2, 3], среди которых можно выделить работы, выполненные под руководством проф. В.В. Мальчев-

ского по направлению матрично-топологической компоновки [4, 5], М.Ю. Куприкова [6], Л.В. Маркина [7, 8]. Постановка задачи компоновки БРЭО рассматривалась в работах [5, 6, 9].

Однако эти работы не учитывают требований современных стандартов, а также тенденций снижения стоимости за счет требований технологичности и обеспечения сервиса. В результате можно выделить определенные закономерности установки оборудования, описанные в [10], на основании которых в [11] представлена дискретная модель компоновки. Дискретизация позволяет применить методы комбинаторной оптимизации (КО), а поэтапные упрощения – новый подход к проблеме АК.

Таким образом, цель данной статьи – разработка методики поэтапного решения задачи автоматизированной компоновки (АК), реализация ее в общем алгоритме, а также подтверждение его работоспособности.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть особенности процесса компоновки БРЭО на ранних стадиях создания ЛА, на основании чего выделить требования для разрабатываемой методики, а также зафиксировать исходные данные и получаемые результаты. Далее необходимо предложить имплементацию в алгоритмы, реализовать их в ПО и решить тестовый пример.

Особенностью процесса является допущение, что аэродинамическая и конструктивно-силовая компоновка заданы, топливо, кабина экипажа и прочие составляющие элементы объемно-весовой компоновки (ОВК) не меняются, а варьируются только расположение блоков БРЭО и размещение коммуникаций.

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

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, так как вариантов слишком много и большинство из них явно неоптимальные.

Методика также должна удовлетворять следующим дополнительным требованиям:

- выдавать отранжированное множество решений;
- отсеивать невозможные комбинации;
- обеспечивать высокую скорость и стабильность;
- обеспечивать возможность уточнять граничные условия и критерии по ходу работы.

Методика решения задачи

Для соответствия указанным требованиям методика должна основываться на введении последовательных критериев $K_1 \dots K_N$. Тогда K_1 , например – физическое непересечение элементов при 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. 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. 1).

Каждой точке – варианту решения из области O_1 соответствует определенное значение критерия эффективности, например суммарная масса коммуникаций между отсеками L , по которому можно отранжировать результаты.

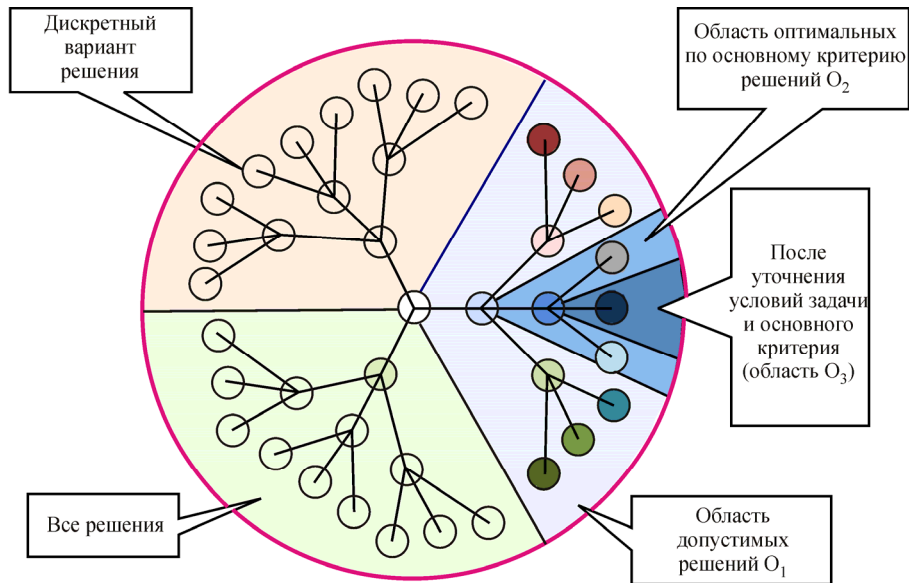


Рис. 1. Последовательность решения

Таким образом, в основе предлагаемой методики лежит полный перебор всех комбинаций распределения элементов по отсекам и формирования области O_1 по критерию K_1 с дальнейшим отбором вариантов и выявлением области решения O_2 по K_2 и т.д., причем хотя бы на последнем этапе проводится ранжирование.

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.

Наиболее очевидный способ разбиения на этапы – объединение, когда некоторые блоки и отсеки будут сначала рассматриваться как единое целое и далее разделяться. Но это бесперспективно, так как снижает размерность всего на порядок. Для большей эффективности нужны разные способы разбиения, и каждое последующее приближение должно полностью включать в предыдущее. Введем ряд допущений:

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 дополнительных 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 математического 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.

Тогда проблема АК представляется как набор подзадач (рис. 2): одномерная постановка, плоская постановка (2,5D), уточнение положения блока в отсеке. Каждый из этапов – следующий критерий отсека, за счет чего реализуется метод последовательных приближений. Предложенные этапы могут легко сочетаться и дополнять друг друга в любых комбинациях (рис. 3).

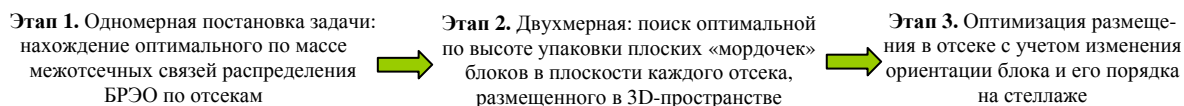


Рис. 2. Последовательность решения

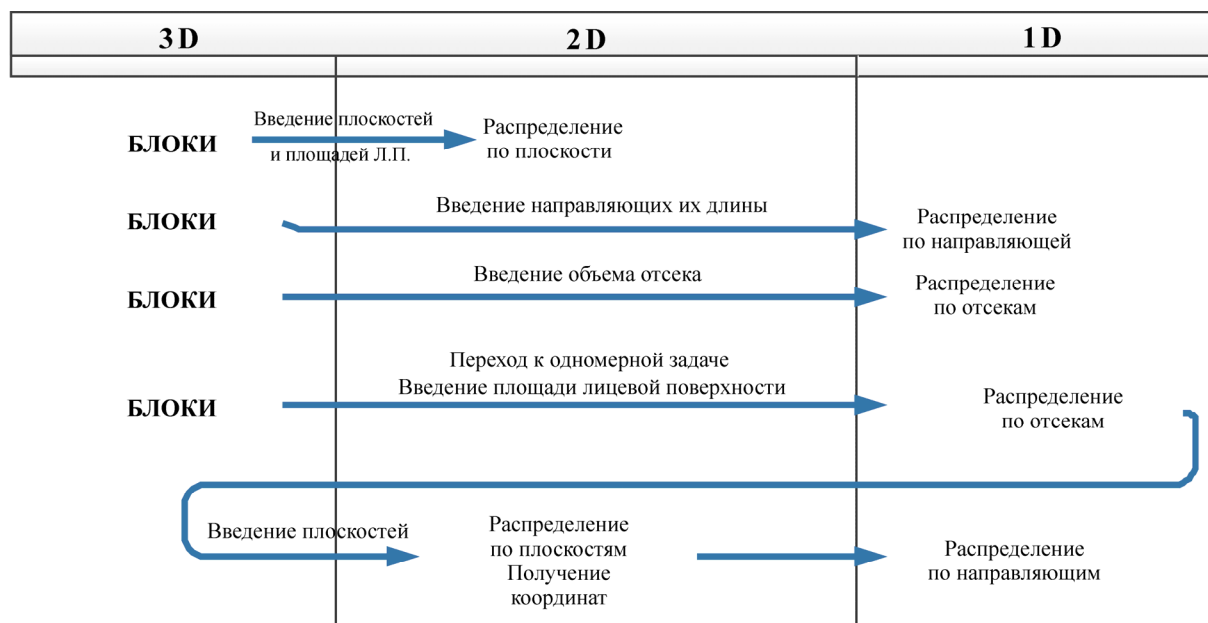


Рис. 3. Диаграмма использования

Таким образом, можно выделить 3 этапа, а как точку отсева вариантов человеком рационально использовать переходы между ними. Для практической реализации необходимо подобрать упрощения, передачу исходных данных и т.д.

Приведение 3-мерной задачи к 2-мерной рационально сделать на базе работ [10] и [11], где показано, что БРЭО размещается на стеллажах/рамах/контейнерах, в конструкции которых можно выделить лицевую сторону и представить их в виде направляющих плоскостей, образованных тремя точками в трехмерном пространстве.

Однако для формирования серии плоских задач необходимо задать распределение БРЭО по отсекам (плоскостям). Его можно получить исходя из минимума массы межотсечных связей. Ниже будет показано, что поиск можно проводить в 1D-постановке, а применяемые модели межотсечных связей и результаты распределения могут использоваться без изменений в 2D-постановке. Необходимо отметить, что это частный случай «задачи о ранце», которая изучается в КО.

Таким образом упрощаем 3-мерную задачу до 2,5-мерной, исходными данными для которой являются результаты одномерного этапа (рис. 4).

Одномерную задачу можно получить исходя из [11], где также показано, что жгуты между отсеками проходят по зонам коммуникаций, которые можно аппроксимировать полилиниями по точкам в 3D-пространстве.

На основании этого можно сделать несколько допущений и перейти к 1D.

Первое допущение: каждый размещаемый блок и каждый отсек для размещения имеют только одну размерность – площади лицевой поверхности (ЛП), которые берутся аналогично 2D-этапу. Площадь каждого из них умножается на коэффициент запаса для учета зазоров или сложной формы. Это позволяет не учитывать точную геометрию, осуществляется только про-

верка на физическую возможность размещения определенных элементов в отсеках, выделенных под их размещение.

Второе допущение данного этапа заключается в представлении цепей коммуникаций как *линий связей*, сформированных между блоками. Таким образом, можно отойти от точной геометрии трассы цепи. Это позволяет представить каждую цепь в виде условной линии, связывающей два компонента системы.

Э	Блоки									
	Номер блока	Ширина	Высота	Глубина	Отсек	Стеллаж	Отступы	3D-модель	Тепловое деление	Воздействие
1	И	рассчитывается S ЛП		Н	Р	Н	Н	Н	И	И
2	И	И	И	Н	И	Р	И	И	Н	Н
3	И	И	И	И	И	Р	И	И	И	И

Э	Отсеки							
	Номер отсека	Ширина	Высота	Объем	Координаты 3 образующих	Точка выхода из отсека	Тепловое рассеивание	Воздействия в отсеке
1	И	Н	Н	И	Н	И	И	И
2	И	И	И	Н	И	Н	Н	Н
3	И	Н	Н	Н	Н	И	И	И

Э	Точки трассировки		
	Номер точки	Координаты	Тип точки
1	И	И	И
2	Р	Р	Р
3	И	И	И

Э	Стеллажи		
	Номер стеллажа	Номер образующей точки 1	Номер образующей точки 2
1	Н	Н	Н
2	Р	Р	Р
3	И	И	И

Примечание: Э = номер этапа, Н = не используется, Р = результат; И = используется.

Рис. 4. Использование данных по этапам

Здесь вводится *третье допущение*, связанное с цепями коммуникаций: каждая такая «линия» связывает только 2 блока, а каждое разветвление цепи представляется в виде отдельного дополнительного элемента. В реальной конструкции присутствует значительное число разветвлений цепей, например тройники, которые в данном случае представлены компонентами с тремя связями.

Четвертое допущение: внутриотсечными связями можно пренебречь исходя из характерных размеров самолета. Это объясняется большим расстоянием между зонами размещения, нежели расстояния между блоками в них. Соответственно, перенос составляющей системы в соседний отсек вызовет значительно больший прирост длины коммуникаций, нежели на соседний стеллаж.

Пятое допущение: зоны прохода коммуникаций можно представить в виде плоского графа, веса граней которого соответствуют расстоянию между точками. Тогда длина каждой линии связи между блоками будет равна сумме ребер из начальной до конечной точки. Нахождение такого маршрута относят к классу задач *трассировки на графах* и также изучается в КО.

Таким образом, можно перейти от 2–3-мерной задачи к одномерной с ограничениями. Исходные данные и результаты этапа показаны на рис. 4.

Еще одним этапом может быть *уточнение порядка на стеллажах*, что позволит еще более оптимизировать компоновку по массе коммуникаций. Это предположение основано на том, что прокладка коммуникаций по стеллажам выполняется вдоль них и по вертикальным стойкам, а не напрямую между разъемами, так как висящие жгуты запрещены. Но это выходит за рамки статьи и будет рассмотрено в следующих работах.

Отметим, что предложенные этапы взаимосвязаны и можно составить диаграммы использования данных (см. рис. 4).

Алгоритм решения

Согласно методу последовательных приближений и модели компоновки из [11] можно представить схему общего алгоритма АК БРЭО (рис. 5). Для каждого этапа рационально рассмотреть требования и выбрать отдельный алгоритм (рис. 6).

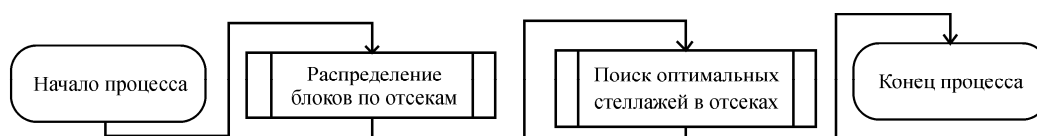


Рис. 5. Общий алгоритм

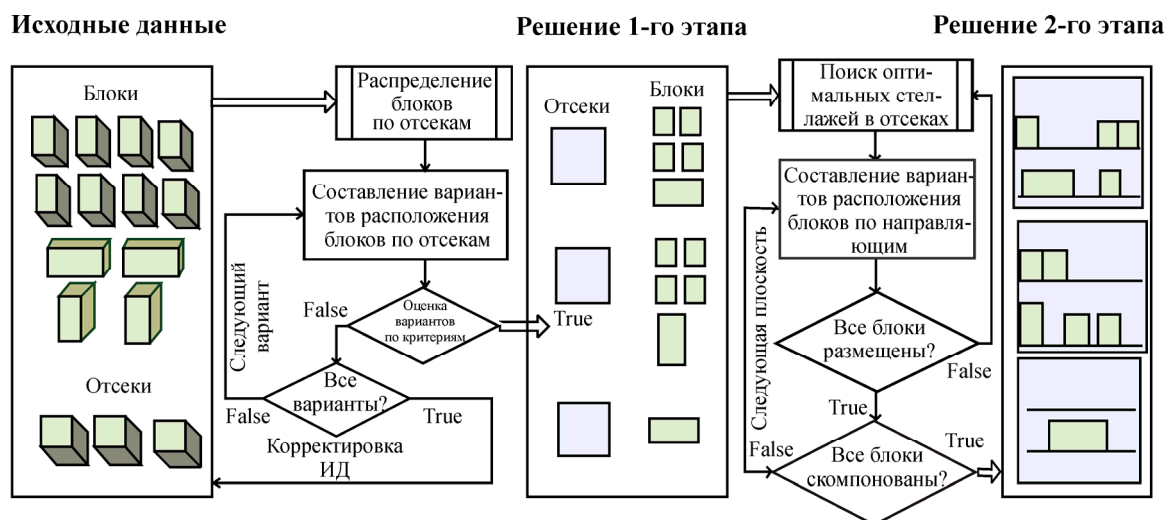


Рис. 6. Общий алгоритм с уточнением по этапам

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 «требуется защиты» рассматриваются отсеки только с параметром «защищенный».

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

Как было показано выше, этот этап основан на двух 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 нет алгоритмов, которые гарантированно находили бы точное решение без полного перебора и его модификаций.

При этом для этих алгоритмов наследуются требования из подразд. 2, дополнительных требований не накладывается. Существует конфликт требований, так как полный перебор требует крайне больших вычислительных ресурсов (сложность растет экспоненциально размерности), а эвристические методы лишь в немногих задачах дают гарантированный результат. Поэтому выбор алгоритма является предметом отдельного исследования, а в рамках данной методики принимаются следующие допущения:

- перебор вариантов распределения – используется полный перебор. Схема общего алгоритма 1-го этапа представлена на рис. 7. В будущем рационально рассмотреть метод ветвей и границ, являющийся частным случаем ПП;
- трассировка – используется алгоритм Дейкстры [9] как достаточно надежный при очень высокой скорости по сравнению с ПП.

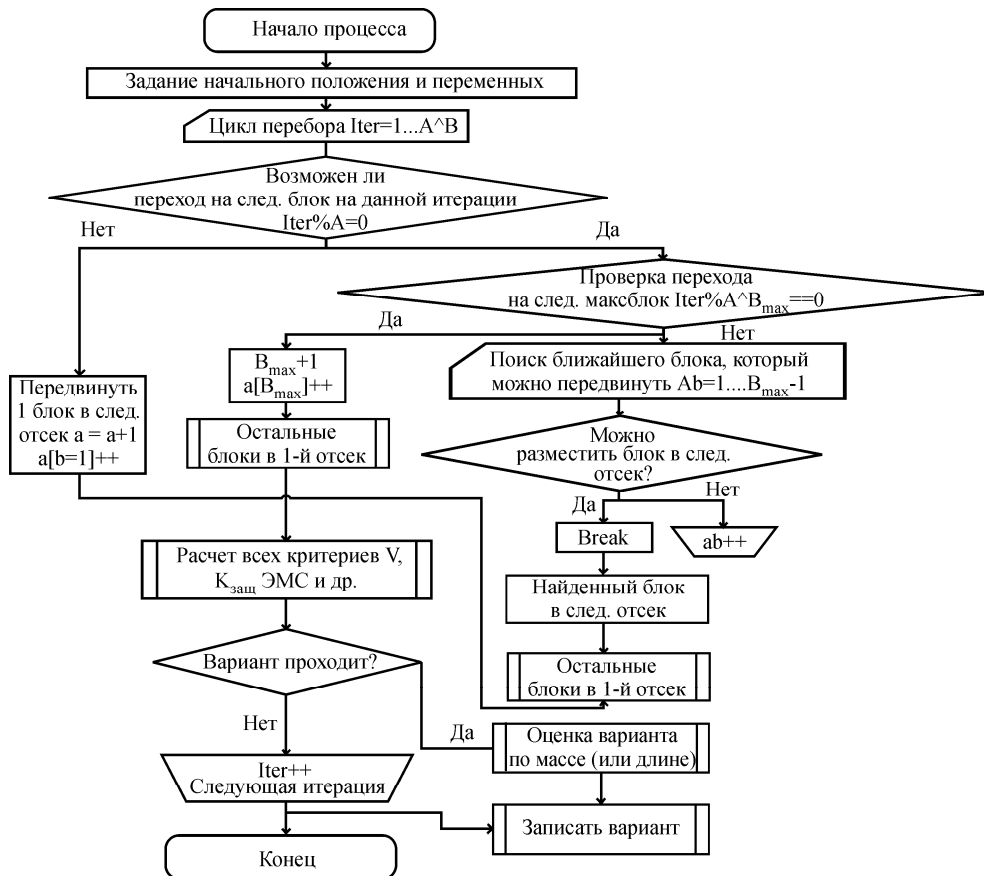


Рис. 7. Схема алгоритма полного перебора блоков

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 работы алгоритма перебора комбинаций схож с часами, в котором столбцы аналогичны секундам, минутам, часам: значение минут увеличится только по завершении полного цикла с 0 до 60 секунд. То есть блок 2 перемещается на следующую позицию, только когда блок 1 достиг крайнего отсека. В этом случае 1-й блок возвращается в начальное положение (рис. 8). Важно отметить, что перестановки происходят итеративно, а через номер итерации можно восстановить матрицу.

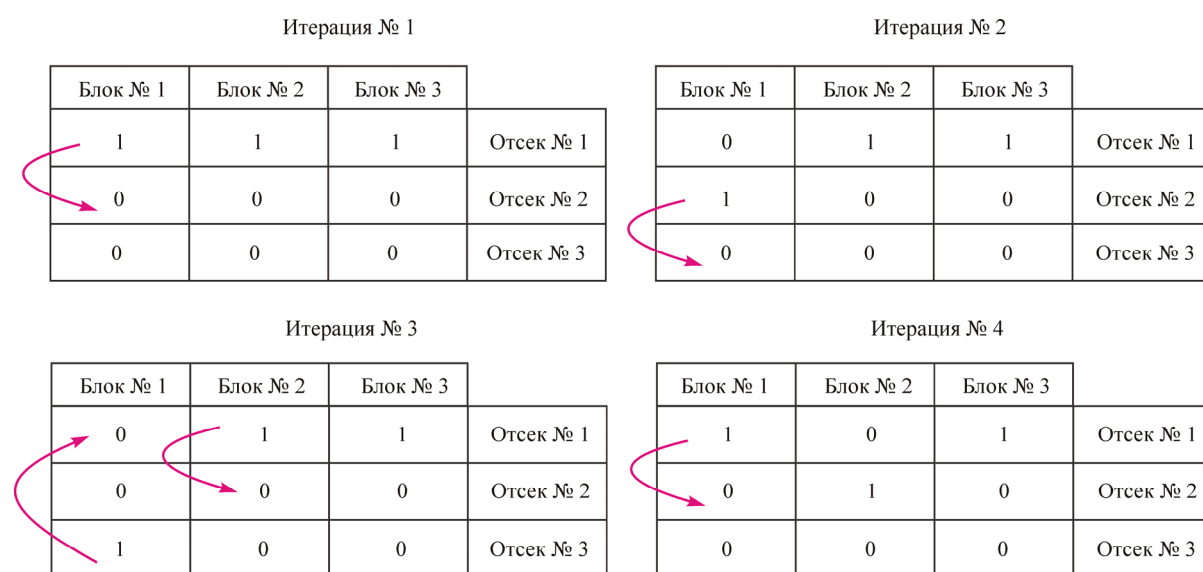


Рис. 8. Полный перебор матрицы Y_{nm}

Ключевой частью процедуры оценки является нахождение минимального расстояния от старта до финиша для всех связей. Для нахождения суммарной длины необходим циклический перебор всех связей и суммирование их длин, для чего находится расстояние начальной точки до конечной. Однако здесь для упрощения за основу берется существующий алгоритм Дейкстры, находящий расстояние из точки до всех остальных, и выбирается нужный маршрут. Подробное описание классического алгоритма представлено в [9].

Следующий 2,5D-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 алгоритма плоской компоновки необходимо уточнить требования. По условию рассматриваемый случай применяется для уже заданного распределения отсеков и блоков, поэтому:

- полный перебор является менее строгим требованием, так как принимается тот, что был осуществлен ранее и были отсеяны варианты по критериям;
 - 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 с других этапов.

Анализ литературы [13, 14, 15] по упаковке в полуограниченную полосу показывает, что алгоритмы полного перебора в чистом виде неприменимы и рекомендуется использовать кодирующую функцию на основе выявленных ограничений. Для АК в [10] была отмечена закономерность, а в [11] предложена модель, по которой прямоугольники располагаются на «уровнях», что в данном случае может быть кодирующей функцией (высота стеллажа задается по наивысшему блоку, стеллажи только прямые), тогда рациональным является алгоритм FFDH (first fit decreasing high).

Вербальное описание можно записать так: прямоугольники сортируются по невозрастанию 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 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 название «first fit» – прямоугольник помещается на первый подходящий уровень снизу. Схема всего этапа приведена на рис. 9.

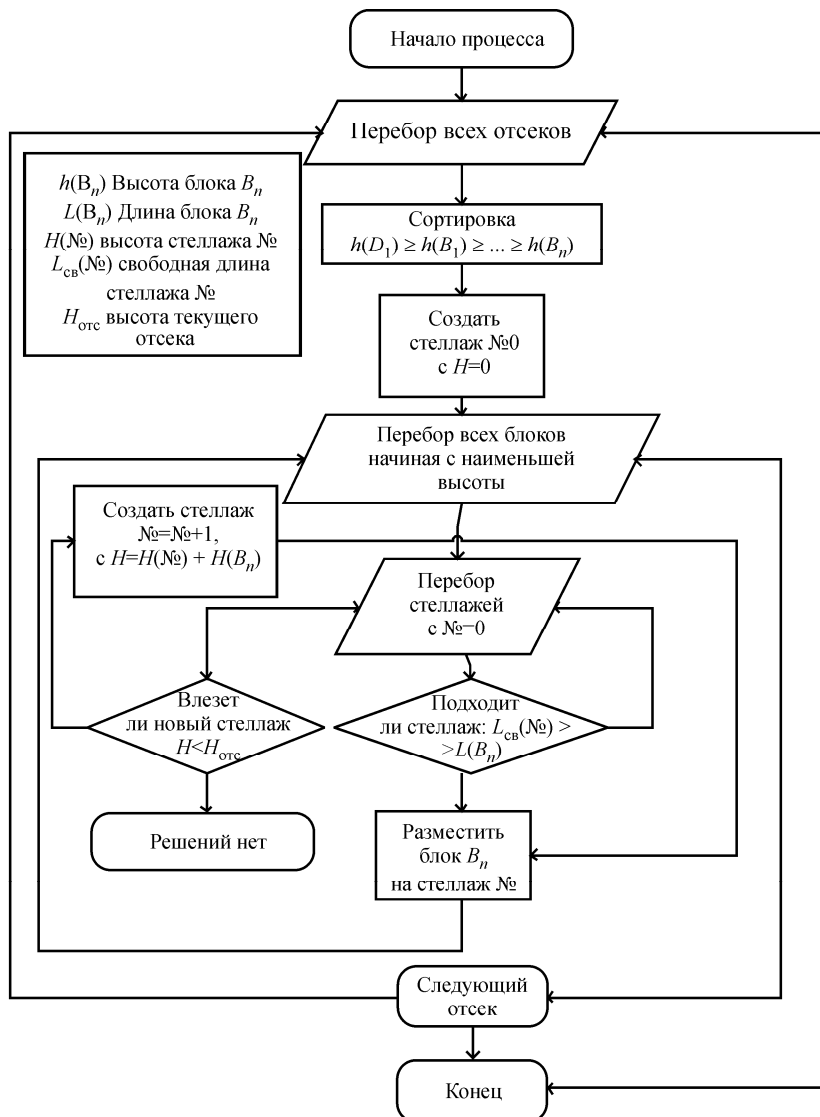


Рис. 9. Алгоритм компоновки блоков в плоскости отсека

Тестирование

Для проверки работоспособности алгоритма были разработаны тестовые задачи на примере учебно-тренировочного самолета. Описание и результаты расчета приведены в [12]. Необходимо отметить, что результаты расчета включают наилучшее решение, найденное человеком.

Заключение

В статье предложен алгоритм решения задачи АК методом последовательных приближений: на первом находят всевозможные распределения блоков по отсекам в одномерной постановке, далее выполняется трассировка, и рассчитывается масса межотсечных связей для каждого из вариантов. Наилучшие из них передаются на следующий этап. На втором – выполняется размещение в плоскости отсеков, в результате чего возможна трехмерная модель. Этапы привязаны к типовым проблемам КО, для которых известны апробированные алгоритмы. На их основании предложены модифицированные алгоритмы для соответствующих этапов.

Также показана работоспособность алгоритма на тестовой задаче. Применение позволяет расширить возможности автоматизации компоновки БРЭО на начальных стадиях проектирования реальных ЛА.

Библиографический список

1. Кербер, Л. Л. Компоновка оборудования на самолетах. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
2. Стоян, Ю.Г., Кулиш Е.Н. Автоматизация проектирования компоновки оборудования ЛА. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
3. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
4. Мальчевский В.В. Матрично-топологический метод синтеза схемы и компоновки самолета. – М.: Изд-во МАИ, 2011 – 356 с.
5. Пашенко О.Б. Компоновка оборудования маневренного самолета на базе матрично-топологического метода: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1991.
6. Компоновка самолетов / А.Б. Аведьян [и др.]; под ред. М.Ю. Куприкова. – М.: Изд-во МАИ, 2012 – 294 с.
7. Ньи Н.Х., Маркин Л.В., Соседко А.А. Применение рецепторных геометрических моделей в задачах автоматизированной компоновки авиационной техники // Труды МАИ. – 2014. – № 72.
8. Ситу Лин, Ньи Н.Х., Маркин Л.В. Рецепторные геометрические модели в задачах автоматизированной компоновки технического отсека легкого самолета // Труды МАИ. – 2011. – № 47.
9. Свободная энциклопедия «Википедия». Алгоритм Дейкстры [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Дейкстры.
10. Клягин В.А., Петров И.А., Шкурин М.В. Анализ размещения блоков бортового радиоэлектронного оборудования на самолетах // Труды МАИ. – 2017. – № 95.
11. Клягин В.А., Петров И.А. Дискретная модель компоновки БРЭО для ранних этапов проектирования ЛА // Полет. – 2017. – № 9.
12. Клягин В.А., Петров И.А. Оптимизация методики автоматизированной компоновки блоков БРЭО в 1D-постановке за счет отсечения по предельной длине межотсечных коммуникаций // Гагаринские чтения. XLIV Междунар. молод. науч. конф.: тез докл. Т. 1. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 393 с.
13. Картак В.М. Задача упаковки прямоугольников: точный алгоритм на базе матричного представления // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9, № 4(22). – С. 104–110.
14. Тюхтина А.А. Методы дискретной оптимизации: учеб.-метод. пособие. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2014. – 62 с.
15. Martello S., Vigo D. Exact solution of two-dimensional finite bin packing problem // Managment Science. – 1997. – Vol. 35. – P. 64–68.

References

1. Kerber L. L. Komponovka oborudovaniya na samoletah [Layout of equipment on airplanes]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 304 p.
2. Stoyan Yu.G., Kulish E.N. Avtomatizatsiya proektirovaniya komponovki oborudovaniya LA [Automation of the layout design of aircraft equipment]. Moscow, Mashinostroenie, 1984, 192 p.
3. Gavrilov V.N. Avtomatizirovannaya komponovka pribornyh otsekov letatelnykh apparatov [Automated arrangement of instrumentation compartments of aircrafts]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 136 p.
4. Malchevskiy V.V. Matrichno-topologicheskiy metod sinteza skhemy i komponovki samoleta [Matrix-topological method for synthesizing the layout and layout of an aircraft]. Moscow, MAI, 2011, 356 p.
5. Pashchenko O. B. Komponovka oborudovaniya manevrennogo samoleta na baze matrichno-topologicheskogo metoda [Layout of the equipment of the maneuverable aircraft on the basis of the matrix-topological method]. CSc in technical sciences dissertation, Moscow, 1991.
6. Avedyan, A.B. Komponovka samoletov [Aircraft Layout]. Moscow, MAI, 2012, 294 p.
7. Ni N.H., Markin L. V., Sosedko A. A. Primenenie receptornykh geometricheskikh modeley v zadachah avtomatizirovannoy komponovki aviacionnoy tekhniki [Application of receptor geometric models in the problems of automated configuration of aviation equipment]. *Trudy MAI*, 2014, no. 72.
8. Situ Lin, Ni N.H., Markin L.V. Receptornye geometricheskie modeli v zadachah avtomatizirovannoy komponovki tekhnicheskogo otseka legkogo samoleta [Receptor geometric models in the problems of automated layout of the technical compartment of light aircraft]. *Trudy MAI*, 2011, no. 47.
9. Svobodnaya enciklopediya Vikipediya, statya "Algoritm Deykstry" [Wikipedia, article "Dijkstra Algorithm"]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm_Deykstry.
10. Klyagin V.A., Petrov I.A., Shkurin M.V. Analiz razmeshcheniya blokov bortovogo radioelektronnogo oborudovaniya na samoletah [Analysis of the placement of blocks of on-board radio-electronic equipment on airplanes]. *Trudy MAI*, 2017, no. 95.
11. Klyagin V.A., Petrov I.A. Diskretnaya model komponovki BREO dlya rannih etapov proektirovaniya LA [A discrete model for the layout of avionics for the early stages of designing an aircraft]. *Polet*, 2017, no. 9.
12. Klyagin V.A., Petrov I.A. Optimizatsiya metodiki avtomatizirovannoy komponovki blokov BREO v 1D postanovke za schet otsecheniya po predel'noy dline mezhotsechnykh kommunikatsiy [Optimization of the technique of automated assembly of avionics units in 1D setting due to clipping by the maximum length of inter-communication communications]. Proceedings of international Conference "Gagarinskie chteniya XLIV", Moscow, MAI, 2018, 393 p.
13. Kartak V.M. Zadacha upakovki pryamougol'nikov: tochnyy algoritm na baze matrichnogo predstavleniya [The problem of packing rectangles: an exact algorithm based on the matrix representation]. *Vestnik UGATU*, 2007, vol. 9, no.4 (22), pp. 104-110.
14. Tyuhtina A.A. Metody diskretnoy optimizatsii: uchebno – metodicheskoe posobie [Methods of Discrete Optimization: A Teaching Toolkit]. N. Novgorod, Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2014, 62 p.
15. Martello S., Vigo D. Exact solution of two-dimensional finite bin packing problem. *Management Science*, 1997, Vol. 35, pp. 64-68.

Об авторах

Клягин Виктор Анатольевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры 101, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: kliagin@mail.ru).

Петров Иван Алексеевич (Москва, Россия) – аспирант кафедры 101, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

Серебрянский Сергей Алексеевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры 101, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

Лаушин Дмитрий Андреевич (Москва, Россия) – аспирант кафедры 101, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

About the authors

Victor A. Klyagin (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department 101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoye highway, Moscow, 125080, Russian Federation, e-mail: kliagin@mail.ru).

Ivan A. Petrov (Moscow, Russian Federation) – PhD Student, Department 101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoye highway, Moscow, 125080, Russian Federation).

Sergey A. Serebryansky (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department 101, Moscow aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoye highway, Moscow, 125080, Russian Federation).

Dmitry A. Laushin (Moscow, Russian Federation) – PhD Student, Department 101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoye Highway, Moscow, 125080, Russian Federation).

Получено 28.08.2018