

Конкурсная работа на тему:

## **«Структурные методы проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата»**

Мясников А.Ю., начальник бригады «БКС», СФКБ ПАО «Туполев»

### **Краткое изложение состояния рассматриваемого вопроса и постановка задачи, решаемой в конкурсной работе**

Особое место и роль в процессе создания летательного аппарата (ЛА) занимает разработка и внедрение бортовых комплексов оборудования (БКО), стоимость которых, как показывает международная практика, составляет от 50% до 75% стоимости изготовления всего ЛА. В условиях всевозрастающей автоматизации процессов управления вновь создаваемых ЛА наблюдается значительный рост числа бортовых систем (БС) БКО. Одной из составляющих БКО является бортовая кабельная сеть (БКС), обеспечивающая работоспособность и надежность БКО. БКС является частным случаем информационной сети, которая позволяет реализовывать модульный принцип БС, состоящей из отдельных блоков, функционирование которых как единое целое реализуется посредством многочисленных простых соединений от одного блока до другого, согласно конструкторской документации (КД). При установке (монтаже) БКС на ЛА простые жгуты одной БС объединяются с множеством простых жгутов различных БС БКО, образуя так называемые сложные жгуты. Стоит отметить, что наиболее сложным и трудоемким этапом во всем производстве ЛА является конструирование и монтаж БКС на ЛА, успешность которого напрямую зависит от этапов проектирования компонентов БКС – сложных жгутов.

На каждом из этапов разработки КД на БКС ЛА проектировщики сталкиваются с такими проблемами как минимизация массово-габаритных характеристик БКС, соблюдение электромагнитной совместимости (ЭМС), защита от повреждений, стойкость, живучесть, надежность и отказобезопасность электрических соединений, оптимизация электрических характеристик и других характеристик БКС. Автор исследования в данной работе концентрирует своё внимание на теоретических составляющих процессов проектирования, а также на разработке метода проектирования, позволяющего учитывать все требования нормативно-технической документации (ГОСТ, ОСТ и РТМ).

Особенностью современного решения задач проектирования является использование достижений CALS технологий и создаваемых на их основе конструкторских и технологических CAD/CAE/CAM систем.

Не совершенство средств систем автоматизированного проектирования (САПР), а также отсутствие единых стандартов и подходов к проектированию БКС ЛА отмечено следующими отечественными авторами: Коптев А.Н., Вахничев А.В., Биктулов С.В., Чупахин Я.Н.

Следует отметить, что основной проблемой использования различных CAD/CAE/CAM систем является отсутствие в них развитых средств инженерного анализа, отсутствие которого не позволяет разработать принципы и методы синтеза моделей целостной сложной деятельности проектировщика. Особенно остро эта проблема стоит в области проектирования БКО ЛА и, в частности, жгутов БКС ЛА.

Вопросами оптимизации процессов проектирования БКС ЛА занимались такие отечественные авторы как Терещук В.С., В.Ю. Кириллов, Слипащенко А.А., Низамов Р.А. и другие. Исследования практики проектирования показали широкое использование эвристических решений, отличающихся неопределенностью, которая

уменьшается по мере накопления опыта и рассмотрения решения на нескольких уровнях (руководители бригад и начальники отделов). В последние годы эта проблематика тесно связывается с проблемами построения искусственного интеллекта, которые частично решаются на уровне системного подхода, в частности посредством применения САПР E3.series, ElectricS Pro Авиация, ProEngineer/Creo, или САПР «МАКС», в которых задача проектирования решается на уровне эвристического программирования, использующего всё тот же опыт специалиста.

Проектировщик при проектировании БКС ЛА сталкивается с рядом требований и ограничений НТД с одной стороны, и с отсутствием четких и однозначных методов и алгоритмов формирования сложных жгутов и их оптимальной трассировки, а также вложения в монтажное пространство ЛА с другой стороны. Активное применение возможностей трехмерного моделирования конструкции современных ЛА и интеграции систем САПР БКС с САПР, используемыми для проектирования конструкции ЛА, позволило в некоторой степени автоматизировать эти процессы и снять с производства ЛА задачу компоновки и задания структуры сложных жгутов. Однако отсутствие строгих методов решения этой проблемы в коллективах конструкторских бюро (КБ) приводят к неопределенности и использованию эвристических путей решения этой задачи, базирующихся на большом опыте.

Разработка БКС, обладающей высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками на всех этапах жизненного цикла ЛА и удовлетворяющей требованиям технического задания на ЛА в части БКС, связана с решением целого ряда системных задач, таких как:

- анализ состояния теории и практики проектирования компонентов БКС и проблем при проектировании БКС ЛА;
- разработка метода формального представления компонентов БКС и топологического вложения этих компонентов в пространство ЛА;
- преобразования схемы ЭЗ в схему Э4 с точки зрения теоретической составляющей этого процесса;
- постановка и решение задачи проектирования простейших компонентов БКС ЛА – простых жгутов БС;
- разработка метода компоновки простых жгутов БКС в технологически завершенные компоненты БКС – сложные жгуты;
- разработка метода и алгоритма перехода от компоновочного набора (состава) сложных жгутов к плоскостной развертке сложного жгута для последующего построения плаза;
- разработка методики проектирования компонентов БКС ЛА.

Проведённые исследования проблемы проектирования компонентов БКС выявили отсутствие на сегодняшний день системного подхода к агрегированию компонентов БКС и их вложению в конструкцию ЛА. При этом решающим аспектом в вопросах технологичности процессов монтажа БКО является использование компонентов БКС, не требующих доработок непосредственно на борту ЛА.

### **Методы решения задачи и принятые допущения**

В качестве методов решения поставленных задач автором предложено:

- использование топологического подхода и аппарата операций с мультимножествами для математического моделирования поставленной задачи;
- декомпозиция задач проектирования основного компонента БКС – сложного жгута в последовательность задач проектирования жгутов возрастающей сложности – от простого проводника до сложного многокомпонентного жгута и задачи обеспечения размещения спроектированного жгута в заданном пространстве ЛА;

– представление модели компонентов БКС ЛА в виде абстрактного графа, с последующим его переводом в топологический граф, введение размерности для его последующего перевода в геометрическую структуру;

– представление процесса управления проектированием с точки зрения аппарата логики – исчисления высказываний;

– представление метода управления деятельностью проектирования и модели проектируемых компонентов БКС ЛА с позиций теории синтеза образов У. Гренандера.

В качестве допущений принята идеальная модель монтажного пространства ЛА с компоновкой оборудования, установленными системами и агрегатами. При этом не учитываются деформации идеальной модели компонентов БКС ЛА, которые связаны с большим количеством ограничений при переходе в реальную конструкцию сложного жгута.

## Основное содержание

### Постановка и решение задачи проектирования простых жгутов

В замкнутой форме задача проектирования простых жгутов представлена следующим образом: найти в заданном множестве электрических соединений БС множество компонентов, вложенных в монтажное пространство ЛА и удовлетворяющих множеству ограничений, связанных с требованиями, сформулированными в НТД на БКС ЛА.

Для решения этой задачи задана:

– информация о компоновке блоков внедряемой БС и сопрягаемых с ней БС на борту конкретного ЛА;

– схема электрическая принципиальная ЭЗ, разработанная для конкретного ЛА на основе схем соединений разработчика БС, а также схем электрических структурных Э1 и схем электрических функциональных Э2.

Необходимо с учетом ограничений заданного монтажного пространства построить схему соединений Э4 с привязкой к конкретному ЛА и сформировать простые жгуты на внедряемую БС.

Схема ЭЗ представляет собой топологическое пространство, которое описано набором проводников, представляющих простые отрезки. Отрезки необходимо превратить в набор кривых линий, при этом не изменяя функциональное назначение, т.е. все преобразования ЭЗ в Э4 происходят как преобразования подобия.

Информация о размещении блоков БС с общих позиций топологии также представляет собой топологическое пространство, в котором выявлена топологическая структура. Для решения поставленной задачи необходимо построить математическую модель электрических проводников, формирующую электрическую цепь из схемы ЭЗ. Все преобразования с исходной ЭЗ являются преобразованиями подобия, не влияющими на принцип работы БС и её функционал.

Итоговая схема Э4 БС, с точки зрения топологии, представляет множество геометрических комплексов, каждый из которых является объединением по определенным правилам составляющих его одномерных симплексов. Этим правилом является совпадение начала цепи и конца цепи для нескольких цепей, представленных одномерными симплексами. Для решения поставленной задачи проектирования простейших компонентов БКС ЛА – простых жгутов БС, исходных объект (схема Э4) сначала аппроксимируется до множества одномерных симплексов (отрезков). С общих позиций геометрической топологии схема Э4 БС может быть представлена комплексом

$$C^i(K) = \{\sum m_k x_k^i\}, \quad (1)$$

где  $m_k$  – коэффициент, обозначающий поставленное в соответствие симплексу целое число (длина симплекса), а  $x_k^i$  – одномерный ориентированный симплекс, часть цепи.

Тогда цепь  $C^1$  может быть формально составлена как сумма ориентированных симплексов  $x_k^i$  и будет равна

$$C^1 = \{m_1 x_1^1 + m_2 x_2^1 + \dots + m_k x_k^1\}. \quad (2)$$

$C^1$  есть одномерная цепь, в которой каждому одномерному симплексу поставлено в соответствие целое число  $m_k$ , обозначающее его длину в соответствии с метрикой  $d_{E_1}$ .

Гомологичность цепей выражается для разомкнутых цепей, которые формируются исходя из геометрической длины и протяженности этого симплекса, или суммы симплексов.

Все циклы, не гомологичные 0, можно распределить по классам так, что в один класс попадают все циклы, гомологичные друг другу. В частности, совокупность циклов, попадающих в один класс, обладает общими свойствами, информация о которых может быть получена в множестве действительных чисел  $R$ , образующих метрическое трехмерное числовое (координатное) пространство  $E^1 = (R, d_{E_1})$  с метрикой  $d_{E_1} = \sqrt{(x - y)^2} = |x - y|$ . При этом пространство  $E^1 = (R, d_{E_1})$  называется числовой прямой.

Введение числового пространства позволяет построить числовую модель всех компонентов простого жгута (электрических проводников). Это представляет процесс проектирования компонентов простых жгутов в виде преобразования кривой линии во множество симплексов (электрических проводников из Э4) и представление их отрезками на числовой оси, т.е. множеством всех чисел, расположенных между двумя числами. В качестве чисел могут служить начало и конец электрического проводника (его входная и выходная клемма разъемов). Преобразование этого электрического проводника в кривую линию осуществляется путем непрерывного отображения. Если обозначить элементы кривой  $I$  (электрического проводника) в виде симплексов между клеммой 1 начального разъема и, например, клеммой 5 конечного разъема, то его образ  $f(I)$  при любом непрерывном отображении  $f$  будет проводником с началом в точке  $f(1)$  и окончанием в точке  $f(5)$ .

Эта кривая линия представляет узкий класс кривых линий – кривую Жордана, получаемую из взаимно однозначного и взаимно-непрерывного отображения. Иными словами, кривая линия – это топологический образ отрезка. Процесс отображения отрезка представлен на рисунке 1.

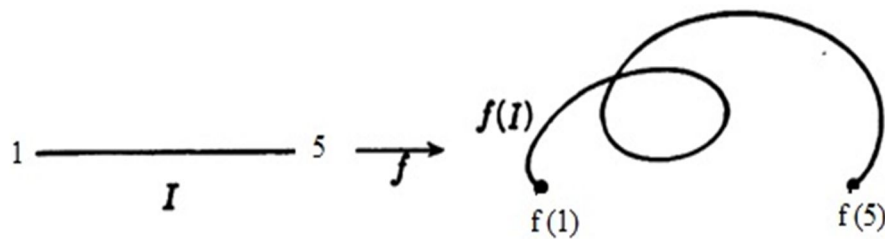


Рисунок 1 – Топологический образ отрезка  $I$

Простой жгут состоящий из нескольких проводов, в соответствии с вышеизложенным, может быть представлен как множество распределенных по классам электрических гомологичных друг другу проводников, т.е. с равными длинами.

Введем класс  $Z$ , образующий сумму из цепей, которые по существу равны друг другу, т.е. имеют равную длину. Это множество циклов  $Z_i(K)$  образует группу  $C_A(K)$ , являющуюся образующей простого жгута, состоящего из проводов, имеющих одинаковую длину.

Множество  $Z_i(K)$  является группой по сложению, что позволяет представить соединения классов, т.е. получить необходимое представление Э4 для ЛА в рамках точного формализма при условии взаимно однозначного и взаимно непрерывного

отображения модели системы в монтажное пространство ЛА. При этом задача о вложении конечной системы, состоящей из точек и связывающих их отрезков, принимается в качестве гипотезы, построенной на теореме о вложении в трехмерное пространство любой конечной системы без дополнительных пересечений.

Решение задачи преобразования Э3 в Э4, и преобразования Э4 в таблицы соединений решает функциональную задачу предназначения БКС ЛА, а также решает задачу привязки абстрактной Э3 к конструкции и к размещению блоков БС конкретно взятого ЛА.

С общих позиций топологии результатом задачи преобразований схемы Э3 и Э4 являются сформированные гомотопические классы. Процесс представления схемы Э4 в виде конечного объекта – таблицы соединений - достигается за счет операций кодирования и аппроксимации, а также фильтрации с целью обнаружения заданного множества цепей. Данные, представленные в табличном виде, удобно использовать для дальнейшего изготовления простых жгутов и компоновки их в сложные жгуты.

### **Постановка и решение задачи проектирования сложных жгутов**

Цель данного раздела состоит в том, чтобы продолжить исследование решения задачи синтеза образов компонентов БКС ЛА – сложных жгутов, рассматриваемых в рамках точного формализма, который будет использоваться в качестве концептуальной основы их проектирования.

Задача проектирования сложного жгута представлена следующим образом. Необходимо построить в заданном множестве простых жгутов различных БС и заданного расположения основных трасс БКС ЛА универсальную математическую модель сложного жгута, удобную для последующих преобразований в плоскостную развертку сложного жгута.

В результате проведенных исследований различных представлений топологических структур каждого жгута в работе предложено построить универсальную модель сложных жгутов, используя понятие абстрактного и топологического графа. Решение задачи синтеза топологического графа связано с получением нового объекта (сложного жгута), который в свою очередь связан с заданной совокупностью неприводимых элементов (простых жгутов) и их операторов, при заданных правилах объединения. Получение сложного жгута следует закону образования новых объектов из заданной совокупности простых жгутов, выступающих в виде их образующих и отвечающих тактико-техническим требованиям к БКС. Для этого полученные во второй главе гомотопические классы компонентов БКС необходимо представить в более удобной и конкретной форме для дальнейшей работы с ними. В качестве этой формы предлагаются топологические классы.

В проблеме синтеза образа сложного жгута рассматривается совокупность простых жгутов  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ , удовлетворяющих большому числу требований, т.е. обладающих определёнными свойствами, выражающимися различными типами этих свойств – признаками. Признакам, характеризующим свойства объектов, ставится в соответствие множество количественных и качественных значений. В рассматриваемом в данной работе случае объектом является сложный жгут, построенный из совокупности простых жгутов, представленных в евклидовом пространстве  $E^3 = (R^3, d_{E_3})$  с метрикой Евклида  $d_{E_n}$

$$d_{E_n}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (3)$$

Как было отмечено ранее, компоненты БКС ЛА – сложные жгуты состоят из множества точек (клемм разъемов), и кривых Жордана (проводников), соединяющих их. Образующие сложного жгута - множества простых жгутов могут быть рассмотрены как повторяющиеся элементы произвольной природы, являющиеся мультимножеством. Введение представления компонентов сложных жгутов в виде мультимножества позволило использовать расширенный набор операций над

мультимножествами. Операции над мультимножествами лежат в основе группирования простых жгутов для построения сложного жгута. В частности, в составе сложного жгута группа  $X_i$  простых жгутов, представленных мультимножествами  $A_i$ , может быть получена как объединение мультимножеств  $X_i = \bigcup_{i \in I} A_i$ , описывающих его образующие (простые жгуты). Группа  $X_i$  представляет состав сложного жгута. Задача определения простых жгутов по их признаку в отдельные непересекающиеся множества требует формального задания этих признаков для обеспечения информативности в части определения целесообразности включения простых жгутов в сложный.

Совокупности простых жгутов, объединяемых в классы с целью агрегирования их в сложный жгут, описываются  $m$  дискретными признаками  $Q_1, \dots, Q_m$ , имеющими конечное число качественных или количественных значений.

Соотношения между совокупностью объектов  $J = \{ J_1, J_2, \dots, J_n \}$  и множеством их признаков  $Q = \{ Q_1, Q_2, \dots, Q_m \}$  удобно выражать с помощью матрицы  $C = |c_{jm}|$  (табл. 1). Строки этой матрицы соответствуют объектам, столбцы – признакам, а элементы матрицы являются значениями признаков.

В качестве признаков  $Q$  могут быть выделены следующие значения  $q$  в соответствии с характеристиками, присущими каждому простому жгуту БКС ЛА:

- $Q_1$  – грубое расположение соединяемых устройств (принадлежность одному из бортов обоих адресов простого жгута, например, значение *left* – левый борт, *right* – правый борт, либо различные адреса для одного жгута, т.е. переход жгута с одного борта на другой:  $l \rightarrow r$  или  $r \rightarrow l$ );

- $Q_2$  – приблизительное расположение соединяемых устройств: номер шпангоута, стрингера или нервюры, например, 0-2 при расположении простого жгута в пределах от шпангоута №0 до шпангоута №2, 2-4 при расположении простого жгута в пределах от шпангоута №2 до шпангоута №4, и так далее до границы зоны ЛА, в которой анализируются объекты;

- $Q_3$  – наименование соединяемых устройств: позиционное обозначение блока БС заданному в соответствии с ГОСТ18675-2012;

- $Q_4$  – наименование разъёма на блоках: позиционный номер или обозначение разъёма из схемы электрической принципиальной, например, «X1», «X2»;

- $Q_5$  – сечение провода:  $m$  – для сечений до  $1 \text{ мм}^2$  включительно, используемое для проводов низкой токовой нагрузки (до 10А), или  $b$  – для сечений свыше  $1 \text{ мм}^2$ , используемое для проводов высокой токовой нагрузки (свыше 10А);

- $Q_6$  – тип провода (*single* – одинарный без экрана, *esingle* – одинарный экранированный, *ecouple* – двойной экранированный (витая пара), *etripel* – тройной экранированный (витая тройка)).

Матрица  $C$  объектов  $J$  и значений признаков  $Q$  на примере десяти простых жгутов произвольного ЛА

Таблица 1.

Объекты	Признаки					
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$
Жгут №1	<i>left</i>	0-2;2-4	05236-H1, 11711-A16	«X1», «X2»	$m, b$	<i>single, ecouple</i>
Жгут №2	<i>left</i>	4-6;6-8;8-10	02250-A1, 05471-A5	«X2», «X3»	$m$	<i>ecouple</i>
Жгут №3	<i>right</i>	0-2;2-4	04885-B7, 08974-N8	«X1», «X4»	$m$	<i>etripel</i>
Жгут №4	<i>left</i>	0-2;2-4	03171-A5, 11711-A16	«X2», «X4»	$b$	<i>single</i>

Жгут №5	<i>left</i>	0-2;2-4; 8;8-10	4-6;6-	02103-A7, 05471-A5	«X2», «X3»	<i>m</i>	single
Жгут №6	<i>right</i>	0-2;2-4		10085-A5, 03312-E2	«X1», «X1»	<i>b</i>	single
Жгут №7	<i>left</i>	0-2;2-4; 8;8-10	4-6;6-	11034-H1, 11442-A1	«X3», «X5»,	<i>m</i>	ecouple
Жгут №8	<i>right</i>	0-2;2-4		18322-H1, 08974-A8	«X3», «X1»,	<i>m</i>	ecouple
Жгут №9	<i>right</i>	0-2;2-4		11711-A16, 16933-A2	«X2», «X1»,	<i>b</i>	single
Жгут №10	<i>l-r</i>	0-2;2-4; 8;8-10	4-6;6-	11034- H1,16201-A1	«X1», «X1»,	<i>m</i>	ecouple

Стоит отметить, что признаки  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  в данной матрице имеют определённый порядок и значимость, который характеризует ранг этих признаков. Геометрический признак в проводимом кластерном анализе имеет наивысший приоритет, поскольку при объединении в некий класс простых жгутов, совпадающих по значениям геометрических признаков  $Q_1, Q_2$ , но не совпадающих по значениям признаков  $Q_3, Q_4$  (характеризующих принадлежности одному разъему или блоку БС),  $Q_5, Q_6$  (характеризующих ЭМС простых жгутов), решение принимается в соответствии с геометрическим признаком. Это объясняется тем, что на ЛА, как правило, допустимы объединения различных групп ЭМС с использованием защитных экранов и плетёнок, которые снижают взаимовлияния несовпадающих групп ЭМС в одном жгуте по ОСТ 1 01025-82.

Все объекты (простые жгуты), имеющие близкие по значению геометрические признаки, могут быть помещены в один класс или группу, а при условии выполнения требований НТД о максимальном значении суммарного диаметра и массы, все жгуты могут быть объединены в один сложный жгут.

Таким образом, с помощью метода непрямого классификации могут быть получены образующие сложного жгута или состав простых жгутов, целесообразных к объединению в один сложный жгут, который с общих позиций представляет собой планарный (абстрактный) граф, подлежащий вложению в пространство ЛА.

Данный перечень или набор простых жгутов может быть представлен в виде матрицы инцидентий топологического графа или матрицы достижимостей с целью построения геометрического графа, как модели (образа) сложного жгута, состоящего из простых жгутов.

Под некоторые требования разработчиков БС на матрицы достижимостей могут накладываться определенные ограничения, связанные с максимальными длинами электрических проводов. В этом случае целесообразно для математического представления использовать матрицу контрдостижимостей.

Для дальнейшего формирования образа сложного жгута из матриц достижимостей требуется построить топологический граф  $G = (X, U, \Psi)$  с вершинами  $X$  и ребрами  $U$ , где  $\Psi$  – это отображение  $\Psi: U \rightarrow \tilde{X}^2$ , относящее каждому ребру  $u \in U$  неупорядоченную пару  $\Psi(u) = \tilde{x}u$  вершин  $x, u \in X$ , называемых концами этого ребра.

Вершинами  $X$  топологического графа  $G = (X, U, \Psi)$  служат значения признаков  $Q_3$  или  $Q_4$  в зависимости от требуемой точности, т.е. выделенные точки трехмерного евклидова пространства, которое можно быть задано координатами ортогональной сетки. Ребрами  $U$  топологического графа являются Жордановы пути (кривые линии), соединяющие эти точки. У каждой кривой Жордана (криволинейный путь), используемой в данной работе, инцидентные вершины (концевые точки) различны.

Отметим, что всякий абстрактный граф допускает топологическое представление, т.е. в пространстве существует изоморфный ему топологический граф (рисунок 2).

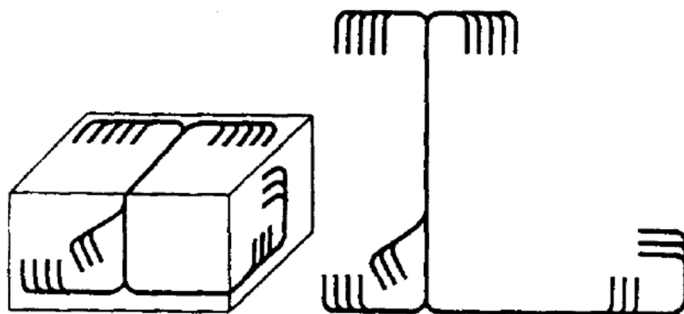


Рисунок 2 – Топологический граф и его развертка в плоскость

Введенное понятие топологического графа (жгута) позволяет поставить задачу проектирования сложного жгута как основного компонента БКС ЛА, в наиболее общем виде. При этом условия задачи математически могут быть записаны следующим образом: - Построить в заданном множестве простых жгутов  $M$  набор сложных жгутов  $N_i$ , где  $i=1, 2, \dots, n$  удовлетворяющих множеству заданных требований  $T(n)$ .

Задание пространства  $M$  означает в общем виде случае одновременное задание структуры  $M$  и разрешенные операции над  $M$ . Знание  $M$  является определяющим в исходных данных.

Полученную первоначально замкнутую формулировку задачи можно в общем случае перевести в другую форму, чтобы с учетом требований  $T(n)$  уменьшить пространство  $M$ , например, до ортогональной сетки, и уточнить таким образом представление задачи. Задача решается в рамках исследовательских изменений представлений с использованием разрешенных операций с исходными данными, которые гомеоморфно преобразуются для задачи в соответствующей формулировке.

В настоящее время сложилось два взгляда на методы построения рисунка графа на плоскости: геометрический подход и топологический подход. Отображение топологического графа в плоскость с заданием метрики даст геометрический граф.

Дальнейший анализ и операции над полученным геометрическим графом позволят создать плоскостную развертку жгута, необходимую для изготовления плаза и сборки на нем сложного жгута. Геометрический граф (рис.3) имеет минимальную длину пути между соединяемыми вершинами, однако реальное соединение проводов согласно модели полученного графа, будет противоречить ГОСТ 23586-96 «Технические требования к жгутам и их креплению», п.6.1 «Провода между двумя точками должны быть уложены по кратчайшей трассе».

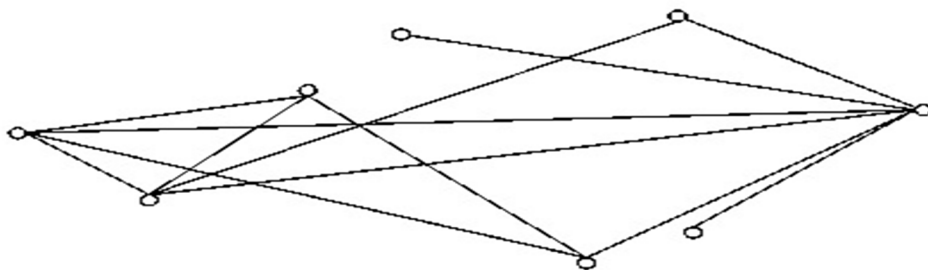


Рисунок 3 – Геометрический граф, развернутый в плоскость.

Таким образом, специфика производства и монтажа БКС ЛА диктует необходимость задания основных трасс прокладки жгутов, которые в свою очередь задают требования о необходимости наличия отверстий, вырезов и ложементов в конструкции ЛА. Это в свою очередь требует дополнительного анализа



геометрического графа и дополнительных операций для построения плаза сложного жгута.

В качестве базовой линии построенного геометрического графа (ствола сложного жгута) целесообразно выбирать наиболее протяженное соединение между двумя вершинами, которое на ЛА может быть совмещено с одной из трасс жгутов.

Оптимизация габаритных характеристик возможна с использованием метода решения задачи Штейнера (рис. 4), в которой нужно множество точек на евклидовой плоскости соединить линиями так, чтобы они стягивались к одной базовой линии, с учетом того, чтобы сумма длин отрезков была минимальна.

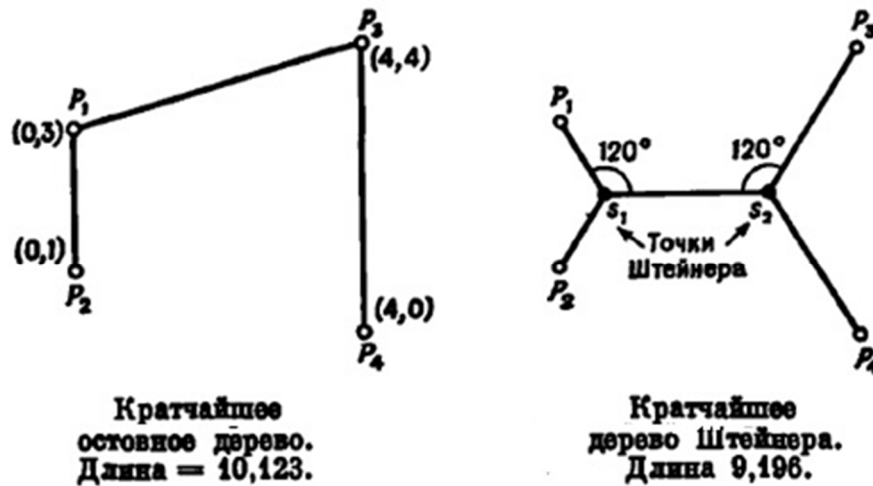


Рисунок 4 – Формирование кратчайшего дерева Штейнера.

В результате стягивания ребер к базовой линии получается оптимизированный геометрический граф под предполагаемую трассу в монтажном пространстве ЛА (рис. 5).

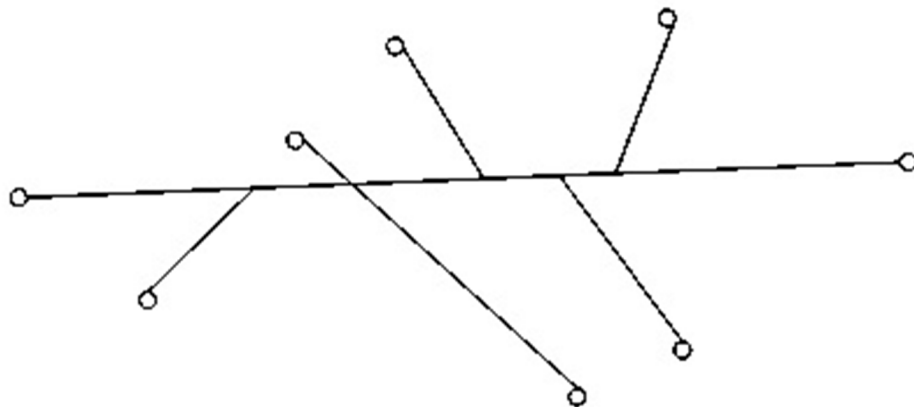


Рисунок 5 – Применение задачи Штейнера для геометрического графа, развернутого в плоскость

**Представление процесса проектирования с точки зрения аппарата логики – исчисления высказываний.**

Задача инженерного управления процессами проектирования компонентов БКС ЛА – жгутов электрических проводов в общей форме может быть сформулирована следующим образом.

Найти конечное число операторов, характеризующих поведение – способ выбора и комбинирования управляющих воздействий на объект для его перевода из

начального состояния в конечное состояние.

Начальным состоянием объекта является набор схем электрических принципиальных ЭЗ на различные БС из состава БКО ЛА. Конечным состоянием объекта является представление компонентов БКС внедряемых в БКО ЛА через набор простых жгутов, объединяемых в дальнейшем в сложные жгуты. Управляющими воздействиями служат преобразования объекта, осуществляемые в рамках преобразований подобия, не влияющими на функционал и принцип работы БС. Управляющие воздействия составляют основу процесса проектирования, и деятельность проектанта БКС ЛА заключается в интерпретации исходных данных об информационном объекте, описанном на соответствующем языке, необходимом для описания процесса проектирования.

Всё это позволяет использовать на этапе компоновки сложного жгута аппарат логики – исчисление высказываний, а при его оценивании исчисление предикатов первого порядка

В качестве метода решения задачи управления проектированием БКС ЛА в рамках точного формализма предлагается рассмотреть эти процессы с позиций теории синтеза образов У. Гренандера. В рамках этих представлений строится пространственно-временной образ действий и поведения проектировщика, реализуемой в антропотехнической (человеко-машинной системе) как процесс управления этими действиями во времени. Согласно этой теории, процессы управления проектированием БКС ЛА можно представить, как набор элементарных действий (образующих), выполняемых определенными способами.

В концепции синтеза образов, в нашем случае, образующими могут быть выбраны повествовательные предложения, представляющие описание простых действий, объединяемых в сложные предложения, описывающие результат действий, приводящих к получению полного набора информации об объекте проектирования путем комбинации исходных действий.

Образующие формируются путем связывания предложений с помощью синтаксических связок «и/или, если...то». Правила операций над образующими в рамках исчисления высказываний являются действиями, приводящими к регулярным структурам, создаваемым в результате комбинирования действий проектировщика – его поведения. Конфигурации формируют действия, последовательное выполнение которых создаёт модель изображений, а деформации этих изображений приводят к конечному состоянию процесса проектирования.

Одними из конечных, технологически завершённых компонентов БКС ЛА являются сложные жгуты, которые в рамках синтаксического или структурного подхода представляют собой иерархическую (древовидную) структуру. Образ сложного жгута образуется соединением из подобразов групп простых жгутов, целесообразных к компоновке в один сложный жгут. Подобразы групп простых жгутов можно описать еще более простыми подобразами – непосредственно простыми жгутами, рассматриваемые как производные элементы.

С точки зрения логики проектирования ряд простых предложений, объединенных в сложное предложение удобно представляется в виде графа отношений изображения (модели) объекта  $W$ , в данном случае плоскостной развертки сложного жгута (рис.6).

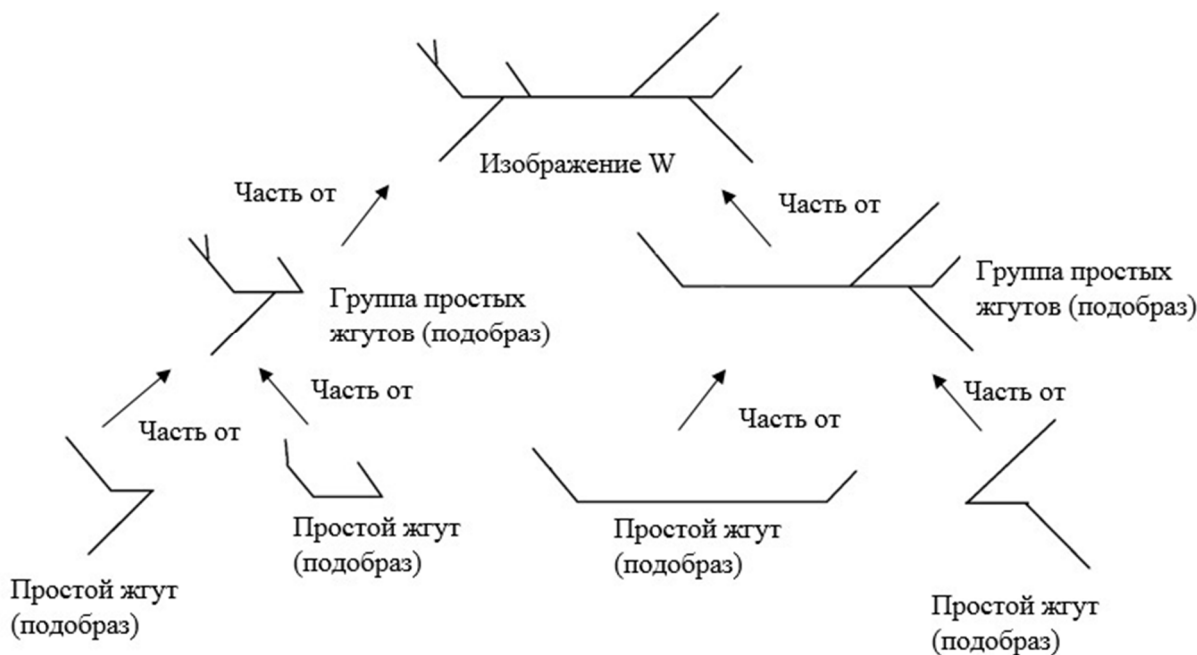


Рисунок 6 – Граф отношений изображения W плоскостной развертки сложного жгута.

В качестве примера использования аппарата логики рассматривается управление процессом проектирования схемы электрической соединений Э4 БКС ЛА, на основе которой составляются таблицы соединений простых жгутов. Для проектирования схемы электрической соединений БС задана схема электрическая принципиальная Э3 и задано расположение элементов, блоков, технологических разъемов, а также распределительно-коммутационных устройств в пространстве ЛА. Необходимо выполнить ряд преобразований в рамках преобразований подобия, для пространственного представления цепей из Э3 в Э4 с привязкой к реальному размещению элементов БС на борту ЛА.

Задача проектирования схемы Э4 разбивается на ряд действий по решению подзадач, описывающих действия, как повествовательные предложения:

1. Подготовительные работы по размещению условных графических обозначений (УГО) на поле схемы Э4.

1.1. Разбиение схемы Э4 на поле, составляющее ячейки, соответствующие зонам и отсекам ЛА. Нижняя часть поля схемы Э4 обозначает левый борт ЛА, верхняя часть – правый борт. Левая часть поля схемы Э4 составляет носовую зону ЛА, правая часть – хвостовую зону ЛА.

1.2. Размещение на поле схемы Э4 элементов БС согласно их реальному размещению на ЛА.

2. Непосредственные работы по соединению всех элементов на схеме Э4 согласно связям на схеме Э3.

2.1 Перенос цепей из схемы Э3 в схему Э4 согласно исходной схеме Э3.

2.2 Объединение цепей, проходящих от одного блока устройства до другого в один простой жгут и наименование простого жгута в соответствии с обозначением порядкового номера, системы к которой он относится и зоны прохождения этого жгута.

Первый и второй этап действий может быть представлен в символической форме как сложное предложение, составленное из простых предложений. Представим поле схемы Э4 в виде разлинованной сетки и дадим условные значения ячейкам (рис. 7).

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>

Рисунок 7 – Разбивка поля схемы Э4 на условные ячейки

Данная разбивка схемы Э4 не учитывает такие зоны как основное и хвостовое оперение. Вид и дискретность поля схемы может быть задана более точно, исходя из требований точности решения задачи.

Согласно условным значениям ячеек схемы:

- правый борт будет обозначаться как  $R = 1 \wedge 2 \wedge 3$ ;
- ось самолета будет обозначаться как  $J = 4 \wedge 5 \wedge 6$ ;
- левый борт будет обозначаться как  $L = 7 \wedge 8 \wedge 9$ ;
- носовая часть будет обозначаться как  $N = 1 \wedge 4 \wedge 7$ ;
- центральная часть будет обозначаться как  $C = 2 \wedge 5 \wedge 8$ ;
- хвостовая часть будет обозначаться как  $T = 3 \wedge 6 \wedge 9$ .

Всё пространство ЛА можно представить в виде  $X = (R \wedge O \wedge L) \vee (N \wedge C \wedge T)$ .

Алгоритм размещения в необходимой ячейке элемента  $x$  БС ( $x \in X$ ) из множества элементов схемы Э3 БС  $X$  принимает следующий вид:

- $(x \in 1) \wedge (x \in 2) \wedge (x \in 3) \rightarrow x \in R$ ;
- $(x \in 4) \wedge (x \in 5) \wedge (x \in 6) \rightarrow x \in O$ ;
- $(x \in 7) \wedge (x \in 8) \wedge (x \in 9) \rightarrow x \in L$ ;
- $(x \in 1) \wedge (x \in 4) \wedge (x \in 7) \rightarrow x \in N$ ;
- $(x \in 2) \wedge (x \in 5) \wedge (x \in 8) \rightarrow x \in C$ ;
- $(x \in 3) \wedge (x \in 6) \wedge (x \in 9) \rightarrow x \in T$ .

Истинные значения любых двух выражений однозначно определяют расположение УГО элемента из Э3 на поле схемы Э4.

Данные высказывания, состоящие из сложных предложений, формируют образ процесса управления размещением элементов из схемы Э3 на БС в схему Э4.

Второй этап действий по проектированию схемы Э4, а именно работы по соединению всех элементов на схеме Э4 согласно связям на схеме Э3 и перенос цепей из схемы Э3 в схему Э4, осуществляется по двум правилам:

1. Если цепь (имя провода)  $v_i$  принадлежит элементу  $x$  из Э3, то элементу  $x'$  из Э4 также принадлежит данная цепь (провод)  $v_i$ .

*Примечание:* элементы  $x$  и  $x'$  это одни и те же элементы, отличающиеся лишь в том, что для последнего на Э4 указывается местоположение в монтажном пространстве ЛА.

2. Если группа цепей (имена проводов)  $v_1, v_2, \dots, v_n$  принадлежит элементу  $x_1'$  и та же группа цепей принадлежит элементу  $x_2'$  то данные цепи объединяются в цепь  $V_1$  с присвоением ей номера простого жгута.

Данные высказывания можно формализовать, используя символьную логику:

1.  $v_1 \in x_1 = v_1 \in x'_1$ .
2.  $(v_1 \in x_1) \wedge (v_2 \in x_1) \wedge (v_1 \in x'_1) \wedge (v_2 \in x'_1) \rightarrow v_1, v_2 \in V_1$ .

Таким образом, исчисления высказываний в символьной логике представляют корректную модель процесса проектирования БКС ЛА на примере проектирования схемы Э4, которая в рамках теории образов представляется как изображение –

некоторая абстракция, перевод которой в конкретность – реальную конструкцию сложного жгута требует учета ограничений – деформаций.

### **Обсуждение полученных результатов и сопоставление с ранее известными**

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработаны теоретические основы преобразования схемы Э4 БС в совокупность компонентов (простых жгутов) БКС на основе топологического образа кривой Жордана с учетом теоретического решения задачи о вложении компонент в пространство  $R^3$ .

2. Разработана формальная система синтеза образа (модели) сложного жгута, представляющего собой совокупность простых жгутов, рассматриваемых в рамках точного формализма как совокупность абстрактных объектов (символов), в которой представлены правила оперирования множеством этих объектов – символов в синтаксической трактовке.

3. Разработан метод решения задач классификации и упорядочения компонентов БКС, мультимножества которых представляются совокупностью простых жгутов с отличающимися значениями количественных (число проводников) и качественных (имена проводников) признаков, характеризующих их свойства.

4. Разработан метод формирования чертежей сложных жгутов в плоскостной развертке.

Теоретическая значимость состоит в том, что в рамках теории синтеза образов и теории мультимножеств на основе формального понятия образа и понятий теории мультимножеств поставлены и решены задачи синтеза образа сложного жгута, его представление точным формализмом мультимножеств, который позволяет одновременно учесть все комбинации признаков, а также число значений признаков. Это позволило решить ряд частных задач кластерного анализа простых жгутов, их классификации и упорядочения с целью структуризации совокупности простых жгутов для синтеза сложных жгутов.

Практическая значимость исследования состоит в том, что применение разработанных методов и средств проектирования компонентов БКС ЛА позволяет составить научно-обоснованную методику проектирования компонентов БКС ЛА и построить алгоритм, учитывающий особенности тактико-технических требований и технических заданий к БКС ЛА, а также позволяющий формировать средства технологической подготовки производства компонентов БКС (плаз для сборки сложных жгутов).

Разработанный алгоритм может быть использован как приложение для разрабатываемых САПР в виде фрагментов алгоритмизации, построенных на базе основных положений символической логики, что позволяет описать образ действий проектировщика в рамках концепции точного формализма.

### **Выводы и рекомендации**

Результаты данной работы могут быть использованы для решения задач проектирования не только ЛА, но и всех подвижных объектов, оснащенных электрифицированным оборудованием (ЭФО) и, соответственно, кабельно-жгутовыми изделиями, обеспечивающими функционирование ЭФО.

Рассмотренная проблематика задачи проектирования БКС ЛА сформировала общий подход к решению задачи синтеза простых и сложных жгутов. Приведённое представление результатов решения задач в математической форме позволило выполнить глубокий анализ простых жгутов на предмет схожих геометрических признаков, значения которых имеют решающее значение в принятии решения об

агрегировании объектов. На основе алгоритмов сравнения значений признаков с учётом их ранга, неограниченный набор объектов определяется в некие классы и группы, внутри которых объекты имеют максимальное сходство между собой, и агрегирование таких объектов наиболее целесообразно.

На примере разработки схемы Э4 представлен алгоритм последовательности действий в рамках аппарата логики-исчисления высказываний. Данный пример показывает, что применённый метод позволяет продолжить разработку алгоритмов для дальнейшей автоматизации процессов проектирования БКС ЛА.

### **Личный вклад автора**

Автор на основе научного анализа проблематики проектирования бортовых кабельных сетей выявил, что в современных методах проектирования компонентов БКС преобладают эвристические решения, отличающиеся неопределенностью. Эти методы подвержены совершенствованию с учетом предлагаемых автором научно-обоснованных фрагментов алгоритмизации процесса проектирования, приводящим к созданию основ формальной системы проектирования таких многогранных объектов, как сложные жгуты, на основе достижения многообразия геометрий и редко используемого аппарата теории мультимножеств.