

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Кузнецов Андрей Сергеевич

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА РАННИХ ЭТАПАХ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность: 2.2.9.

«Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной  
аппаратуры (технические науки)»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Ушкар Михаил Николаевич

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	12
1.1. Анализ особенностей конструкций БРЭА БПЛА. ....	12
1.2. Анализ маршрута проектирования БРЭА. ....	21
1.3. Анализ путей повышения эффективности проектирования конструкций БРЭА. ....	24
1.4. Постановка задачи исследования.....	26
Выводы по главе 1.....	29
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО БАЗИСА БРЭА</b> .....	30
2.1. Разработка формализованного описания структуры БРЭА.....	30
2.2. Разработка информационной модели СЧ БРЭА.....	33
2.3. Формирование исходного конструктивного базиса проектируемой БРЭА.....	39
2.4. Формирование допустимого конструктивного базиса проектируемой БРЭА.....	40
Выводы по главе 2 .....	50
<b>ГЛАВА 3. СИНТЕЗ И РАНЖИРОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ БРЭА</b> .....	52
3.1. Постановка задачи синтеза допустимых конструкторских проектных решений БРЭА.....	52
3.2. Параметрический синтез и сравнительный анализ допустимых систем охлаждения БРЭА .....	60
3.3. Синтез и ранжирование допустимых вариантов проектных решений БРЭА.....	69

3.4. Методика повышения эффективности проектирования конструкций БРЭА.....	81
Выводы по главе 3.....	85
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ БРЭА НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....</b>	<b>87</b>
4.1. Структура программного комплекса синтеза и анализа проектных решений БРЭА.....	88
4.2. Экспериментальные исследования методики формирования конструктивного базиса БРЭА. ....	89
4.3. Экспериментальные исследования методики синтеза и ранжирования проектных решений БРЭА.....	95
4.4. Проверка на адекватность разработанных методик.....	101
Выводы по главе 4.....	104
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>106</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>108</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>109</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акты внедрения.....</b>	<b>121</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....</b>	<b>125</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В – Кластеризация альтернативных вариантов проектных решений БРЭА .....</b>	<b>127</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Фрагмент исходного текста программного модуля формирования исходного конструктивного базиса БРЭА.....</b>	<b>130</b>

## Введение

### Актуальность темы исследования

Легкие и средние беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение как при ведении боевых действий, так и в народном хозяйстве, особенно в труднодоступных районах. К этой группе относятся отечественные БПЛА типа: «Катран», «Иноходец» и др. с высотой полета до 7 км, дальностью – до 350 км, скоростью – до 220 км/час, массой целевой нагрузки – 35...100 кг [47,57,89,92, 115]. Небольшая грузоподъемность БПЛА данного класса требует минимизации массогабаритных характеристик и ограничения потребляемой мощности БРЭА, устанавливаемой на данных ЛА. Кроме того, необходимо принимать во внимание также требования по повышению надежности и сокращению стоимостных и временных затрат на разработку БРЭА. Эти требования обуславливают необходимость широкого применения в конструкции БРЭА модулей высокой готовности и прогнозирования параметров конструкции БРЭА на ранних этапах проектирования.

Проектирование БРЭА БПЛА предполагает решение следующих задач [15,17,36, 37]:

- повышение надежности при ужесточении условий эксплуатации;
- снижение массогабаритных характеристик БРЭА;
- сокращение сроков проектирования.

При решении этих задач необходимо учитывать следующие особенности современной БРЭА [41,52,75,79,92]:

- применение твердотельных усилителей мощности СВЧ, а также цифровых методов формирования и обработки сигналов обеспечивает опережающее снижение массогабаритных параметров относительно снижения потребляемой мощности, что приводит к существенному росту плотности теплового потока конструкций БРЭА;

- рост плотности теплового потока в условиях ограничений на потребляемую мощность и охлаждающий воздух приводит к необходимости разработки эффективных систем охлаждения БРЭА, параметры которых существенно влияют на показатели качества проектных решений конструкций БРЭА;
- необходимость сокращения сроков проектирования БРЭА исключает итерации при проектировании БРЭА и повышает требования к качеству проектных решений, принимаемых на ранних этапах проектирования.

Необходимость разработки методов и средств повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования вытекает также из требований нормативно-технической документации. В соответствии с ГОСТ 2.120—2013 работы, выполняемые на ранних этапах проектирования, должны содержать «...Разработку и обоснование технических решений, направленных на обеспечение показателей надежности, установленных ТЗ...». Решение этой задачи невозможно без предварительной проработки конструкции БРЭА и анализа её теплового режима.

Таким образом, разработка методики повышения эффективности конструкторских проектных решений БРЭА на ранних этапах проектирования является актуальной.

### **Степень разработанности темы исследования**

Существующая методология проектирования и конструирования РЭС основывается на фундаментальных работах выдающихся отечественных учёных Шахнова В.А., Дульнева Г.Н., Роткопа Л.Л., Талицкого Е.Н. и др. [31,84,106]. Вместе с тем, эти работы не в полной мере учитывают особенности построения бортовой РЭА.

Разработке БРЛС БПЛА посвящены работы отечественных учёных Гуськова Ю.Н., Канащенкова А.И., Ильина Е.М., Самарина О.Ф. [26,36,37,41]. Работы этих учёных позволили создать ряд БРЛС БПЛА - БРЛС МФ-2, Корсар-МРЛЦН, Форпост-МРЛЦН. В этих работах рассмотрены

методология, архитектура, системотехника построения БРЭА на примере БРЛС БПЛА, однако не рассмотрены вопросы выбора эффективных конструкций на ранних этапах проектирования.

В работе Кожевников А.М. автором рассмотрены методы оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов [44]. Однако уровень бортовых радиоэлектронных средств ограничен компонентной базой и печатными узлами. В данной работе рассматривается БРЭА третьего конструктивного уровня, представляющая собой многоблочные конструкции.

Недостатком существующих методов и средств прогнозирования эффективности проектных решений многоблочных конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования является отсутствие методов и алгоритмов синтеза проектных решений конструкций БРЭА, учитывающих особенности их построения и обеспечивающих повышение эффективности проектных решений при условии выполнения всех требований ТЗ на БРЭА.

**Объект исследования** – конструкции бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА).

**Область исследования** – разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа конструкторских проектных решений (ПР) БРЭА.

### **Цели и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработки методики повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования.

Достижение поставленной цели связано с необходимостью решения следующих задач:

- выполнить анализ особенностей построения БРЭА, на примерах БРЛС БПЛА;

- разработать формализованное описание электрической схемы БРЭА, необходимое для автоматизации синтеза и анализа её проектных решений;
- разработать информационную модель (ИМ) на составные части БРЭА, необходимую для автоматизации формирования конструктивного базиса БРЭА;
- разработать методику генерации допустимых комплектов модулей высокой готовности (МВГ), реализующих СЧ БРЭА;
- разработать алгоритм синтеза проектных решений конструкций БРЭА, удовлетворяющих требованиям ТЗ;
- разработать методику обеспечения надёжности БРЭА путём синтеза эффективных систем охлаждения;
- разработать методику сравнительного анализа и ранжирования проектных решений БРЭА;
- разработать программный комплекс (ПК) информационной поддержки формирования конструкторских проектных решений БРЭА, обеспечивающий повышение эффективности и сокращение сроков проектирования.

### **Методология и методы исследования**

Методы исследований опираются на использование методов комбинаторики и теории графов, теории сложных систем, тензорной алгебры, системном анализе, теории нейронных сетей.

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

1. Методика повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования, позволяющая обеспечить высокую надёжность БРЭА, при сокращении мощности потребления на 20-25% на рассмотренных примерах, за счет сравнительного анализа и выбора систем охлаждения с низким потреблением.
2. Методика автоматизации формирования конструктивного базиса БРЭА на ранних этапах проектирования, позволяющая за счёт применения

информационной модели составных частей БРЭА, графовой модели структуры БРЭА и методики автоматизированной генерации допустимых комплектов модулей высокой готовности сократить сроки проектирования и увеличить число вариантов конструкций БРЭА.

3. Алгоритм синтеза проектных решений БРЭА, обеспечивающий снижение погрешности оценки параметров конструкции БРЭА, за счёт учёта реальных параметров систем охлаждения, при снижении времени анализа в 6-8 раз, на рассмотренных примерах.

### **Научная новизна работы состоит в следующем**

1. Разработана методика решения задачи сравнительной оценки и выбора варианта проектного решения (ПР) конструкции БРЭА на раннем этапе проектирования, отличающаяся от известных автоматизацией процедур формирования вариантов ПР и выбора эффективных систем охлаждения, что позволяет повысить эффективность проектных решений, за счёт снижения погрешности предварительной оценки параметров конструкции БРЭА и увеличения количества сравниваемых вариантов.
2. Разработана методика автоматизации формирования конструктивного базиса БРЭА на ранних этапах проектирования, отличающаяся от известных формализацией процедур описания СЧ и структуры БРЭА и автоматизацией формирования допустимых комплектов модулей СЧ БРЭА.
3. Разработан алгоритм синтеза систем ПВО БРЭА, отличающийся от известных высокой эффективностью за счёт использования не теплонагруженных элементов конструкции в качестве удалённых радиаторов.
4. Разработан алгоритм синтеза и ранжирования проектных решений БРЭА на ранних этапах проектирования, отличающийся от известных высокой точностью прогнозирования параметров надёжности за счёт

достоверного анализа теплового режима БРЭА и учёта параметров систем охлаждения.

### **Практическая значимость работы**

Практической значимостью обладают следующие результаты:

1. Разработана реализованная в виде программного комплекса методика, позволяющая формировать конструктивный базис для реализации БРЭА в виде комплектов модулей, удовлетворяющих требованиям ТЗ по конструктивным параметрам: масса, объём, потребляемая мощность, стоимость, надёжность.
2. Разработана реализованная в виде программного комплекса методика синтеза систем принудительного воздушного охлаждения БРЭА, позволяющая, исходя из конкретных условий применения, выбрать вариант ПВО, обеспечивающий максимальное снижение температуры при минимальном потреблении мощности.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждена экспериментальной проверкой разработанных методов и алгоритмов, актами практического внедрения и обсуждениями на НТК.

### **Апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 5 научно-технических конференциях:

1. 2020 International Conference «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications » (IEEE), (Moscow, 2020).
2. 2021 International Conference «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications » (IEEE), (Moscow, 2021).
3. 2022 International Conference «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications » (IEEE), (Moscow, 2022).

4. Научно-техническая конференция «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», Москва, МАИ 2022 г.

5. Научно-техническая конференция «Гагаринские чтения», Москва, МАИ, 12-15 апреля 2016 г.

### **Внедрения**

Результаты диссертационной работы внедрены в Радиотехническом институте им. академика А.Л. Минца в рамках выполнения НИР «Прожектор», в АО «НПО дальней радиолокации им. академика А.Л. Минца» в ходе выполнения СЧ ОКР «Эверест-1», при подготовке материалов технического проекта в книге 4 «Технические (аппаратурные) и программно-алгоритмические решения задач назначения», а также в учебном процессе кафедры 404 «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» Московского авиационного института (национальный исследовательский университет).

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 16 печатных работах, в том числе в 4 статьях в журналах перечня ВАК РФ, 4 работы, опубликованные в сборниках докладов Scopus. 8 работ опубликованы в других изданиях. Из указанных работ 4 написаны лично автором, а 12 – в соавторстве.

### **Личный вклад соискателя**

Все научные положения, определение цели, постановка задачи, выводы и рекомендации сформулированы лично автором. Результаты теоретических исследований получены лично автором. Экспериментальные исследования проводились с его участием. Личное участие автора в получении, изложенных в диссертации результатов отражено в публикациях и подтверждено соавторами.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует специальности 2.2.9. «Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной

аппаратуры» (технические науки), поскольку в ней находит отражение следующий пункт паспорта специальности:

«Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов проектирования и производства информационно-измерительных приборов, систем контроля и диагностирования, радиоэлектронной аппаратуры и их элементов на базе решения проблем обеспечения надежности их работы и экологической безопасности окружающей среды» [76].

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 131 страницу, работа содержит 59 рисунков, 26 таблиц, четыре приложения. Список литературы включает 131 наименование.

## Глава 1 Анализ состояния, проблемы и постановка задачи исследования

### 1.1. Анализ особенностей конструкций БРЭА БПЛА

Особенности конструкций БРЭА, во многом, определяются видом и ресурсами (энергетика, масса целевой нагрузки, наличие кондиционированного воздуха и т.д.) носителя. Масса полезной нагрузки таких БПЛА, а также возможности их энергетических установок ограничены [47,92].

В диссертационной работе рассматриваются особенности конструкций БРЭА, устанавливаемой на БПЛА, на примере БРЛС. Анализ обзоров и статей, посвященных построению БРЛС, показывает, что они являются достаточно характерными представителями БРЭА, включающими в себя всю их специфику, в частности: требования к минимальной массе, объему, стоимости и максимально возможной надежности при наличии достаточно высокой потребляемой мощности [7,15,17,36,57,91,106].

В Таблице 1.1 представлены основные параметры конструкций БРЭА на примере БРЛС, разработанные с 2010 по 2020 гг. [92]. Для сравнения, в Таблице 1.2 представлены основные параметры конструкций БРЛС «Арбалет», разработанной в 90-х годах.

Таблица 1.1 - Параметры БРЭА на примерах БРЛС БПЛА

БРЛС	Потребляемая мощность, Вт	Дальность, Км	Масса Кг	$V^*$ , дм <sup>3</sup>	Ресурс. час	$P_{уд}$ Вт/ дм <sup>3</sup>
Корсар-МРЛЦН	400	15-20	40	16	330'	25
Форпост-МРЛЦН	550	30	38	16	280'	34
AN/APY-8	600	15	52	15	300	40
Thales I Master	600	27	30	14	250	42
EL/M-2055D	800	40	38	17	300	47

$V^*$  - общий объем наиболее тепловыделяющих составных частей,

$P_{уд}$  - удельная объёмная плотность теплового потока.

Таблица 1.2 - Параметры БРЭА в качестве примера БРЛС  
вертолета «Ка-52»

БРЛС	Потребляемая мощность, Вт	Дальность, Км	Масса Кг	$V^*$ , дм <sup>3</sup>	Ресурс, час	$P_{уд}$ Вт/ дм <sup>3</sup>
Арбалет	3000	15-30	180	250	150	12

Сравнительный анализ данных, представленных в Таблицах 1.1 и 1.2, показывает, что за 20-30 лет потребляемая мощность БРЭА снизилась в 5-6 раз, масса в 4-6 раз, объём в 15-18 раз. Опережающее снижение объёма конструкций БРЭА привело к существенному росту удельной плотности теплового потока БРЭА, как показано на Рисунке 1.1 [ 54].

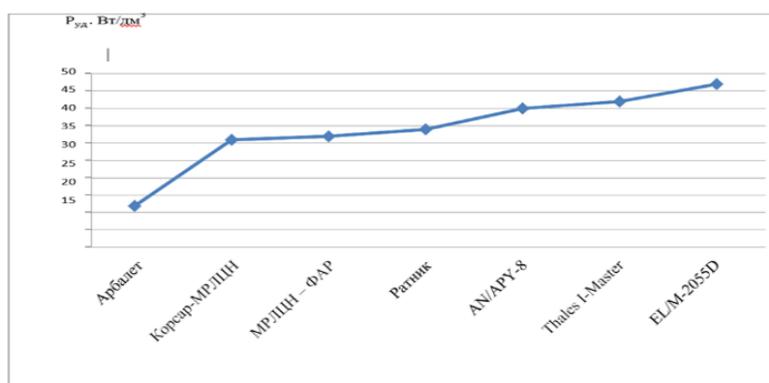


Рисунок 1.1 – Тенденция роста удельной плотности теплового потока интеграции и твердотельных усилителей мощности СВЧ

В Таблице 1.3 приведены значения потребляемой мощности СЧ и площади поверхности радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС «Корсар-МРЛЦН».

Таблица 1.3 – Потребляемая мощность составных частей РЧМ

№ п/п	Наименование СЧ	$P_B$ , Вт	$S$ , см <sup>2</sup>	$P_{уд}$ , Вт/см <sup>2</sup>
1	Усилитель мощности СВЧ	200	1438	0,14
2	Синтезатор частот (СЧ)	75	2473	0,03
3	Задающий генератор (ЗГ)	10	504	0,02
4	БЦВМ	60	3488	0,017

Как видно из таблицы, самым теплонагруженным модулем является твердотельный УМ СВЧ. Удельная плотность теплового потока БРЭА

распределена не равномерно между её составными частями, что может привести к локальным перегревам.

Кроме того, обычно твёрдотельные УМ строятся по принципу сложения мощностей, что обусловлено ограничениями мощности полупроводниковых приборов (Таблица 1.4).

Таблица 1.4 - Параметры полупроводниковых усилителей

№ п/п	Наименование полупроводникового усилителя	Диапазон Частот	Тепловой поток, Вт	Площадь основания, см <sup>2</sup>	$P_{уд}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$T_{доп}$ , °С
1	Транзистор TGI18596	X	20	2,73	9,2	130
3	Микросхема GaN NC11613C-1618P30-	Ku	8	0,91	8,8	85

Такое построение УМ приводит к локализации теплового потока в пределах расположения выходных усилительных микросхем или транзисторов, которые формируют высокую плотность теплового потока [32].

Исходя из значения температуры окружающей среды +55°С, плотности теплового потока и допустимой температуры корпуса прибора из номограммы, представленной на Рисунке 1.2, определяем, что для отвода теплового потока от приборов необходимо жидкостное охлаждение, что может существенно усложнить конструкцию БРЭА [14].

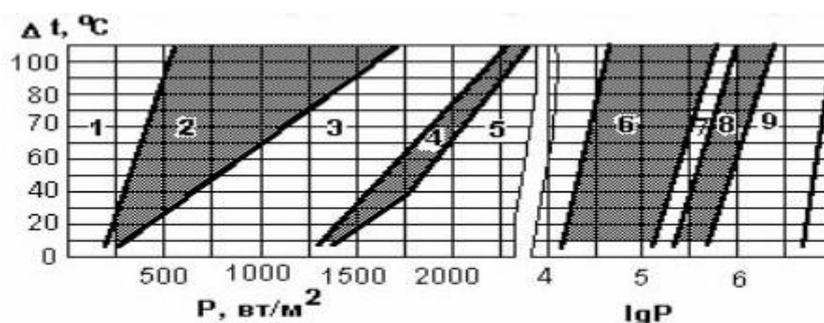


Рисунок 1.2 - Эффективность систем охлаждения РЭА

1-естественное воздушное охлаждение (ВО), 2- естественное и принудительное ВО, 3 - принудительное ВО, 4- принудительное ВО и

жидкостное, 5- принудительное жидкостное, 6- принудительное жидкостное и испарительное, 7- испарительное.

На Рисунке 1.3 приведены результаты теплового моделирования радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС «Корсар-МРЛЦ» при естественном ВО [54]. Анализ результатов моделирования показывает, что температура на корпусе усилителя мощности СВЧ достигает 174 °С, и возникает необходимость применения эффективных систем охлаждения для обеспечения нормального теплового режима БРЭА.

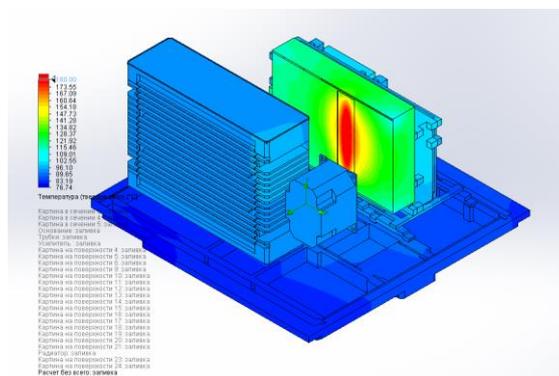


Рисунок 1.3 - Результаты теплового моделирования РЧМ БРЛС «Корсар-МРЛЦ»

### Конструктивная совместимость с объектом размещения

Размещение БРЭА на ЛА определяется преимущественно её целевым назначением. Так, например, для решения задач обнаружения и целеуказания воздушных целей обычно БРЛС размещается в носовой части ЛА. Бортовая РЛС БПЛА обычно выполняет задачи картографирования, обнаружения и целеуказания наземных целей, поэтому размещаются под фюзеляжем. При этом все блоки, кроме антенного, размещаются в фюзеляже БПЛА. Антенный блок и часть волноводного тракта находятся под радиопрозрачным обтекателем. В первом и втором случае все блоки устанавливаются на общей монтажной раме (несущем основании), установочные размеры которой совместимы с соответствующими размерами БПЛА [18,25].

На Рисунке 1.4 показан вариант размещения БРЛС под фюзеляжем.

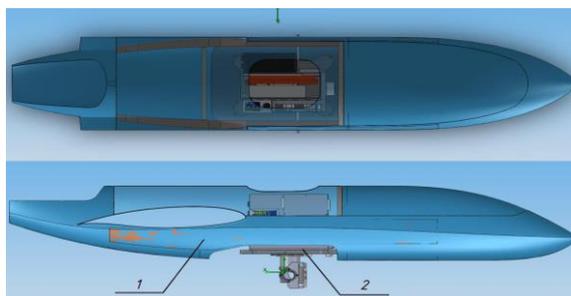


Рисунок 1.4 -Размещение БРЛС на БПЛА под фюзеляжем 1 – БПЛА, 2 – БРЛС

На Рисунке 1.5 приведена конструкция БРЛС. Все блоки, кроме антенного, объединены в радиочастотный модуль (РЧМ), который защищен общим кожухом. Антенный модуль с электромеханическим приводом, обеспечивающим необходимые углы сканирования, расположен под фюзеляжем. Несущая конструкция БРЛС является базовой для целого ряда БПЛА: «Корсар», «Форпост» и другие [41,92].

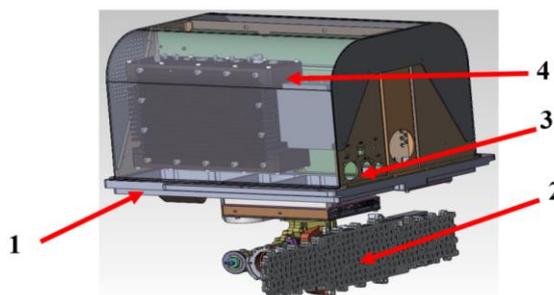


Рисунок 1.5 – Конструкция БРЛС, размещаемая под фюзеляжем БПЛА  
1-несущее основание, 2 – антенный модуль, 3 – панель внешних подключений, 4 – РЧМ

#### Ограничения на параметры БРЭА

В ТЗ на разработку БРЭА вводятся ограничения на следующие параметры: потребляемая мощность, масса, габариты, эксплуатационная интенсивность отказов, температура, виброперегрузка, ударные ускорения.

Потребляемая мощность

Потребляемая мощность БРЭА на примере БРЛС определяется, в основном, мощностью потребления всех СЧ БРЛС. До половины выделенной на БРЛС мощности потребляет УМ СВЧ, параметры которого определяют для БРЛС дальность обнаружения цели (для радиолиний дальность связи). Эти параметры, при прочих равных данных, определяются мощностью излучения. Для активной БРЛС с совмещённой антенной мощность излучения  $P_{II}$  определяется следующей зависимостью [10]:

$$P_{II} = \frac{P_A \times 4\pi \times \lambda^2 \times R^4}{\sigma \times S^2 \times K_{nom} \times \Pi} \quad (1.1)$$

Где,  $P_A$  – чувствительность приёмника;  $\lambda$  - длина волны;  
 $R$  – дальность;  $\sigma$  - ЭПР цели;  $S$  - площадь антенны;  
 $K_{nom}$  – потери энергии сигнала на гидрометеорах ( $K_{nom} \leq 1$ );  
 $\Pi$  – потери на обработку сигнала ( $\Pi \leq 1$ ).

При известных скважности и КПД потребляемая усилителем СВЧ мощность равна:

$$P_{II} = \frac{P_{II}}{Q \times КПД}$$

В Таблице 1.3 приведены значения потребления СЧ РЧМ БРЛС Корсар-МРЛЦН. С учётом потребления антенного модуля, примерно, 70 Вт, общее потребление СЧ БРЛС составляет, примерно, 415 Вт.

Кроме СЧ БРЛС, существенный вклад в потребление может внести система охлаждения БРЛС. Самыми распространёнными системами охлаждения БРЛС являются системы принудительного воздушного охлаждения (ПВО). Для эффективного охлаждения БРЛС необходимы вентиляторы, статическое давление которых превышает аэродинамическое сопротивление конструкции БРЛС.

На Рисунке 1.6 приведены значения аэродинамического сопротивления конструкции РЧМ БРЛС Корсар-МРЛЦН, которое составляет 200-220 Па [54].

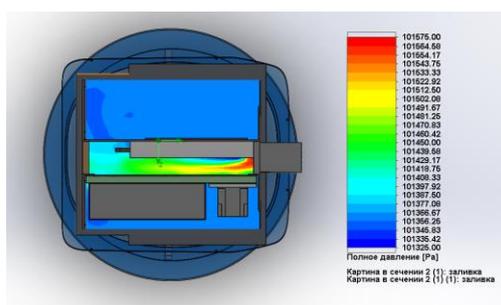


Рисунок 1.6 - Аэродинамическое сопротивление РЧМ БРЛС «Корсар-МРЛЦН»

В Таблице 1.5 приведены параметры вентиляторов, применяемых в БРЭА [43].

Таблица 1.5 – Параметры бортовых вентиляторов

№ п/п	Наименование	Расход воздуха, кг/ч	Статическое давление, Па	Мощность, Вт
1	0,8ЭВ-2,8-50-4620	280	300	135
2	1,25ЭВ-2,8-8-4225	280	50	26,4

Если конструкция БРЭА имеет высокую плотность компоновки, это приведёт к росту её аэродинамического сопротивления и существенному росту потребления.

#### Масса

Масса БРЭА включает массу несущей конструкции, всех СЧ БРЭА и массу кабельных сборок. В таблице 1.6 в качестве примера приведены значения указанных масс для БРЛС «Корсар-МРЛЦН» [92].

Таблица 1.6 - Значения масс СЧ БРЛС «Корсар-МРЛЦН»

Наименование Модулей	Масса, кг
Несущая конструкция БРЛС (сплав Д-16)	3,9
Антенный модуль, включая антенную сборку и электромеханический привод	16,7
Твердотельный УМ СВЧ	2,8
Синтезатор частот и синхросигналов	5,4
Приёмник СВЧ	1,3
Бортовая цифровая вычислительная машина	5,5
Кабельные сборки	1,5
ОГ	0,8
<b>ИТОГО:</b>	<b>37,9</b>

Анализ данных показывает, что масса кабельных сборок составляет 3,7%, масса несущей конструкции 12,2% от общей массы БРЛС. 84,1% - это масса СЧ БРЛС.

Эксплуатационная интенсивность отказов

Эксплуатационная интенсивность отказов является базовым показателем надежности и определяется по известной зависимости [99]:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_{\Sigma i} \quad (1.2)$$

где  $\lambda_{\Sigma}$  - общая эксплуатационная интенсивность отказов БРЛС.

$\lambda_{\Sigma i}$  - эксплуатационная интенсивность отказов  $i$ -ой СЧ.

$$\lambda_{\Sigma i} \approx \lambda_{0i} \times \prod_{i=1}^n K_i ; \quad (1.3)$$

где  $\lambda_0$  - базовая интенсивность отказов  $i$ -ой СЧ, определённая для конкретных (начальных) эксплуатационных факторов;

$K_i$  - коэффициенты, учитывающие изменения интенсивности отказов в зависимости от различных эксплуатационных факторов;

$n$  – число факторов.

Значимыми эксплуатационными факторами являются следующие коэффициенты: электрического режима, температуры, эксплуатации, уровня приёма и другие. Значения этих коэффициентов приводятся в источниках, например, [90,99,100], но они относятся к комплектующим элементам. Для СЧ БРЭА (УМ СВЧ, БЦВМ, синтезаторы частот и другие) значения надёжности фиксируются в ТУ и отражают эксплуатационные факторы, определяемые группой аппаратуры в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.304-98 или другими нормативными документами. Большинство этих коэффициентов учитывается при разработке ТУ на СЧ БРЭА. Значения некоторых коэффициентов зависят от конкретной конструкции БРЭА: компоновки СЧ, наличия охлаждающего воздуха и его параметров. Поэтому реальные значения температурного

коэффициента можно определить только после разработки конструкции. С другой стороны, влияние температуры на показатели надёжности существенно. На Рисунке 1.7 показана зависимость эксплуатационной интенсивности отказов УМ СВЧ бортовой РЛС от температуры [54,92].

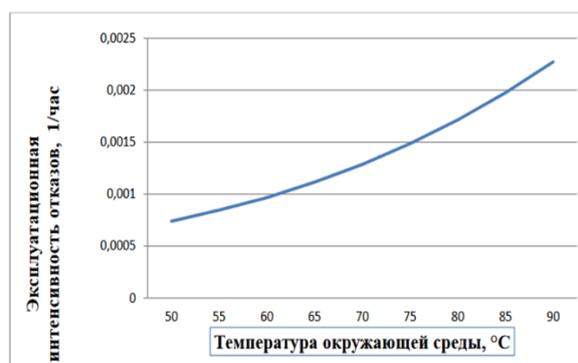


Рисунок 1.7 - Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов от температуры °C

Увеличение теплового потока объясняется переходом на твердотельные усилители мощности СВЧ, а также на использование элементной базы с высокой степенью интеграции.

Как видно из рисунка, при повышении температуры УМ на 20°C эксплуатационная интенсивность отказов, примерно, удваивается.

### Температура

Электронные компоненты обеспечивают значения своих функциональных параметров при значениях температуры окружающей среды не выше допустимых значений, указанных в их технических условиях. При проектировании БРЭА, представляющей собой многоблочные конструкции, границей раздела ответственности разработчиков БРЭА и разработчиков её СЧ являются поверхности корпусов СЧ БРЭА, поскольку внутренняя конструкция и распределение источников тепла СЧ БРЭА разработчику БРЭА неизвестны. Поэтому сведения о допустимых значениях температур поверхностей корпусов СЧ БРЭА должны представлять их разработчики.

Механическая прочность конструкции БРЭА определяется преимущественно несущей конструкцией, которая определяется по методу аналогии.

Таким образом, на основании приведённых выше исследований, можно сформулировать следующие основные особенности конструкций БРЭА:

1. Рост удельной плотности теплового потока, создающий локальные перегревы конструкций СЧ БРЭА, приводящие к существенному снижению надёжности.
2. Ограничение вариантов размещения БРЭА на ЛА позволяет использовать базовые несущие конструкции для размещения СЧ .
3. Высокая плотность компоновки БРЭА приводит к повышению аэродинамического сопротивления охлаждающему воздуху, что в свою очередь, требует существенного повышения потребления мощности системой ПВО.
4. Масса конструкций БРЭА, в основном, определяется массой её СЧ.
5. Допустимая температура СЧ БРЭА определяется допустимой температурой поверхностей их корпусов.

## **1.2. Анализ маршрута проектирования БРЭА**

Разработка БРЭА представляет собой многоэтапный процесс, в результате которого создается более совершенная аппаратура, отличающаяся от аналогов и прототипов более высокими потребительскими свойствами. При этом методология проектирования БРЭА основывается на системном подходе, который базируется на следующих основных принципах [79]:

1. Проектируемая БРЭА должна рассматриваться как совокупность взаимосвязанных элементов (подсистем), которыми являются СЧ БРЭА.
2. Проектируемая БРЭА требует анализа всех ее параметров и свойств во взаимодействии и взаимосвязи с окружающей средой.

3. Бортовая радиоаппаратура представляет собой иерархическую структуру, поэтому принимаемые решения не являются независимыми: каждое последующее решение ограничено принятыми ранее решениями и, в свою очередь, накладывает ограничения на последующие решения.

Проектирование БРЭА можно разделить на следующие основные этапы (Таблица 1.7) [79]:

Таблица 1.7 – Этапы проектирования БРЭА

Этап проектирования	Решаемые задачи
<b>Системотехнический</b>	Анализ ТЗ на разработку БРЭА, обоснование вариантов структуры и СЧ БРЭА, расчёт внешних функциональных параметров СЧ БРЭА, разработка ЧТЗ на составные части, сравнительный анализ и выбор вариантов структуры БРЭА.
<b>Схемотехнический</b>	Разработка и моделирование электрических схем СЧ и БРЭА в целом, разработка конструкции СЧ и БРЭА в целом, разработка программного обеспечения (как общего, так и специального), выполняется сравнительный анализ и выбор окончательного варианта построения БРЭА.
<b>Конструкторский</b>	Разработка комплекта конструкторской и программной документации на изготовление опытного образца (или опытной партии) БРЭА. Испытания БРЭА. Доработка документации по результатам испытаний.

Каждый из этапов проектирования завершается комплектом конструкторской документации (КД). В ГОСТ 2.103-2013 определены стадии разработки КД (Таблица 1.8). Стадия «Техническое предложение» не распространяется на КД, разрабатываемых по заказу Министерства обороны.

Таблица 1.8- стадии разработки КД БРЭА

Разработка проектной КД			Разработка рабочей документации		
Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Разработка КД опытного образца	Изготовление и испытания опытного образца	Доработка КД

Системотехническое и схемотехническое проектирование по сути является стадией разработки проектной КД. Рассмотрим подробнее задачи, решаемые на этих стадиях.

В соответствии с ГОСТ 2.118—2013, ГОСТ 2.119—2013 на этапе эскизного проектирования выполняются формирование возможных вариантов проектных решений, их сравнение и выбор оптимального варианта [62].

В соответствии с ГОСТ 2.120—2013 на этапе технического предложения осуществляется разработка конструкции и выполняется сравнительный анализ технико-экономических параметров, удовлетворяющих требованиям ТЗ [63].

Сложившаяся практика последовательного выполнения этапов проектирования противоречит требованиям ГОСТ, где уже на этапе технического предложения включены работы по проработке конструкции БРЛС. При этом каждый из предложенных вариантов должен удовлетворять параметрам ТЗ. Существующие методы прогнозной оценки параметров конструкции БРЭА на ранних этапах проектирования носят общий характер и не учитывают особенности конструкций БРЭА.

В настоящее время сроки выполнения ОКР БРЛС сокращаются с 3-5 до 1-3 лет. Временные затраты на разработку проектной документации ОКР составляет, примерно, 15-20 % от общего времени ОКР, что равно 2-6 месяцам [14,36,41,44,54]. Временные ограничения на ранние этапы проектирования БРЛС приводят к необходимости принимать субъективные проектные решения, что снижает качество большинства из перечисленных выше работ, проводимых на ранних этапах проектирования. Последующие проектные решения будут ограничены решениями, принятыми на ранних этапах, что может привести к разработке вариантов, не удовлетворяющих требованиям ТЗ.

Таким образом, на основании приведённых выше данных, можно сделать следующие выводы:

- 1) Работы, выполняемые на системотехническом этапе проектирования должны в полной мере учитывать требования ТЗ, что требует тщательного анализа конструкции БРЭА на этом этапе проектирования.

- 2) Для повышения эффективности системотехнического этапа проектирования необходимо разработать методику прогнозирования параметров конструкции БРЭА на ранних этапах проектирования.

### 1.3. Анализ путей повышения эффективности проектирования конструкций БРЭА

Поскольку БРЭА представляет собой сложную систему, эффективность проектных решений определяется как функциональными, так и конструкторскими параметрами изделия [10,15,18,19,53,86,104]. Рассмотрим взаимосвязь этих параметров на примере БРЛС БПЛА. Допустим при системотехническом проектировании БРЛС получена её базовая структура, представленная на Рисунке 1.8 [56]:

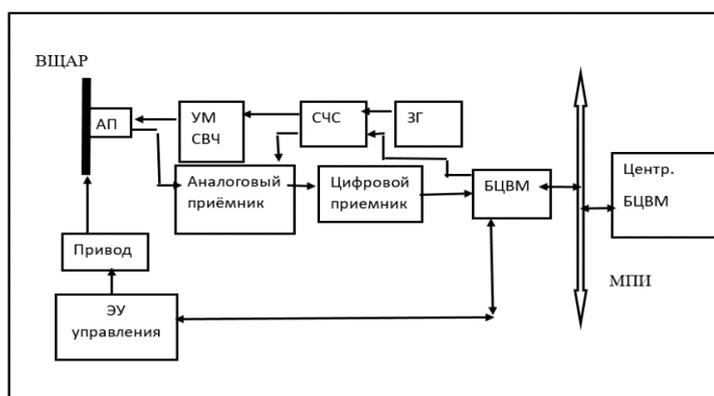


Рисунок 1.8 – Базовая структура БРЛС

Базовая структура может иметь различные конструктивные варианты реализации, влияющие на параметры БРЛС. Рассмотрим несколько вариантов.

Вариант 1. Конструктивное деление аналогового приёмника на приёмник СВЧ, приёмник ПЧ. При этом приёмник СВЧ размещается на антенном полотне ВЩАР (Рисунок 1.9).

Вариант 2. Вариант1 дополняется конструктивным объединением в одном корпусе СЧС и приёмник ПЧ.

Вариант 3. Вариант 2 дополняется объединением в одном корпусе цифрового приёмника и БРЛС.

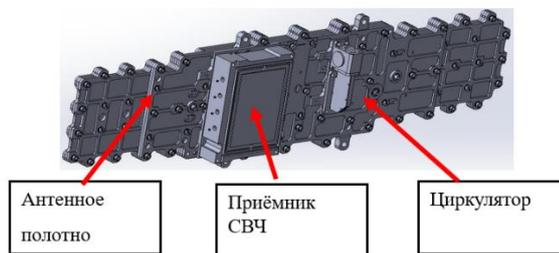


Рисунок 1.9 – Общий вид ВЦАР с приёмником СВЧ

Достоинства и недостатки этих вариантов представлены в Таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Достоинства и недостатки конструктивных вариантов реализации БРЛС

Вариант БРЛС	Достоинства	Недостатки
<b>Базовый</b>	Минимальная масса аналогового приёмника.	Увеличение массы СВЧ приёмного тракта. Повышение потерь в приёмном тракте.
<b>Вариант1</b>	Снижение потерь в приёмном тракте. Повышение отношения с/ш.	Повышение массы антенны. Повышение требований к приводу.
<b>Вариант2</b>	Снижение массы БРЛС.	Доработка конструкции СЧС. Увеличение затрат.
<b>Вариант3</b>	Снижение массы БРЛС	Доработка конструкции БЦВМ. Увеличение затрат.

Анализ результатов, представленных в Таблице 1.8, показывает, что сравнительный анализ по показателям качества должен проводиться как по функциональным, так и по конструктивным и технико-экономическим показателям качества. Это приводит к необходимости на системотехническом этапе проектирования для каждого синтезируемого варианта структуры БРЛС выполнять синтез и анализ его конструктивных вариантов и оценку затрат на реализацию ПР. Такой подход позволит расширить количество рассматриваемых вариантов и повысить точность оценки параметров реализации БРЛС, что повышает вероятность нахождения более эффективного варианта.

Рассмотрим какие СЧ определяют параметры эффективности ПР БРЭА. В Таблице 1.9 приведены основные параметры конструкции БРЛС «МРЛЦН-Корсар».

Таблица 1.9 - Основные параметры конструкции БРЛС «МРЛЦН-Корсар»

Наименование Модулей	Масса, кг	Рп, Вт	ОбъёмРЧМ, дм <sup>3</sup>	$\lambda_{\Sigma} \times 10^{-3}$ , 1/час (55°С)
Несущая конструкция БРЛС (сплав Д-16)	3,9	0	3,3	0,01
Антенный модуль	16,7	30	-	1
Твердотельный УМ СВЧ	2,8	200	1,6	0,8
Синтезатор частот и синхросигналов	5,4	65	1,5	0,16
Приёмник СВЧ	1,3	5	-	0,1
Бортовая цифровая вычислительная машина	5,5	60	5,2	0,12
Кабельные сборки	1,5	0	1,4	0,05
ОГ	0,8	10	0,8	0,08
<b>Итого</b>	<b>37,9</b>	<b>370</b>	<b>13,5</b>	<b>2,31</b>
Допустимо по ТЗ	39	400	16	3
Резерв на СО	1,1	30	2,5	0,69

Как видно из Таблицы 1.9 масса СЧ составляет 87% массы БРЛС, объём СЧ РЧМ – 75 % объёма РЧМ, потребляемая мощность -100%, надёжность СЧ – 97%. Эти данные приведены без учёта параметров СО.

#### 1.4. Постановка задачи исследования

Проектное решение конструкций БРЭА представляет собой объединение допустимого комплекта модулей, представляющего собой совокупность модулей высокой готовности, покрывающих составные части проектируемого изделия; системы охлаждения теплонагруженных модулей; несущую конструкцию и кабельные сети:

$$U_k = \{S_i \cup V_j \cup K_k \cup N_k\} \quad (1.4)$$

где  $S_i$  - комплект модулей, покрывающий составные части ПР,  $V_j$  - система охлаждения,  $N_k$  - несущая конструкция,  $K_k$  - кабельная сеть.

Допустимыми проектными решениями (ДПР) БРЭА являются такие ПР, которые удовлетворяют всем ограничениям ТЗ.

Задачу исследования можно сформулировать следующим образом: на этапе системотехнического проектирования определить вариант конструкции, обеспечивающий максимальное значение эффективности БРЭА.

Для сравнительного анализа и выбора ПР конструкций БРЭС на ранних этапах проектирования в работе предлагается следующий критерий эффективности ПР [18]:

$$\mathcal{E}(u_k) = \frac{P(u_k)}{R(u_k)} \mid \forall u_k \in U, \quad (1.5)$$

где  $U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_l\}$  - множество сформированных конструкторских проектных решений (ПР);  $k = \overline{1, l}$ ,  $l$  - общее число допустимых вариантов ПР;  $P(u_k)$  - вероятность выполнения  $k$ -м ПР изделия поставленной задачи;  $R(u_k)$  - затраты на реализацию  $k$ -го ПР.

В качестве затрат принимается комплексный показатель качества, который определяется как [69,70,82]:

$$R(u_k) = \sum_{p=1}^r \beta_p \overline{w_k^p} \mid \sum_{p=1}^r \beta_p = 1; 0 < \beta_p \leq 1; \forall w_k^p \leq W_{\text{ДОП}}^p, \quad (1.6)$$

где  $W(u_k) = \langle w_k^1, \dots, w_k^p, \dots, w_k^r \rangle$  - вектор параметров, которым характеризуется  $k$ -ый вариант проектного решения;  $p = \overline{1, r}$ ,  $r$  - общее число параметров, которыми характеризуются ПР;  $\beta$  - коэффициент веса  $p$ -го параметра;  $\overline{w_k^p}$  - нормированное значение  $p$ -го приведенного параметра  $k$ -го варианта проектного решения; все параметры приведены к единой тенденции, например, «чем меньше, тем лучше»;

$$\overline{w_k^p} = \frac{w_k^p}{w_{*p}^p} - \text{нормированное значение параметра; } w_k^{*p} = \min_k w_k^p.$$

Выше было показано, что основными параметрами, определяющими затраты на ПР конструкций БРЭА являются масса, потребляемая мощность, стоимость. К этим параметрам целесообразно добавить эксплуатационную интенсивность отказов, минимальное значение которой обеспечивает максимальное значение вероятности выполнения поставленной задачи, при заданном времени работы.

Тогда формальная постановка задачи сводится к выбору предпочтительного варианта проектного решения, для которого выполняется условие:

$$\mathcal{E}(u_k^0) \rightarrow \max \frac{1}{R_{\min}(u_k)} \mid \forall u_k \in U \quad (1.7)$$

С учетом всего выше сказанного, основная задача диссертационной работы, связанная с разработкой методики повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры за счет повышения их надежности и уменьшения потребляемой мощности на ранних этапах проектирования, включает в себя следующие составные части:

1. Разработать методики и алгоритмы автоматизации формирования конструктивного базиса ПР БРЭА, представляющего собой комплекты конструктивных модулей, реализующие структурную схему БРЭА и обеспечивающие выполнение всех заданных ограничений.
2. Разработать алгоритм синтеза и сравнительного анализа систем ПВО БРЭА, обеспечивающий нормальный тепловой режим БРЭА, требуемое значение эксплуатационной интенсивности отказов при условии выполнения заданных ограничений.
3. Разработать алгоритм синтеза и ранжирования ПР БРЭА, обеспечивающий сравнительный анализ ПР по критерию ( 1.5 ) и имеющий возможность работы с современными системами поддержки принятия решений (СППР).

4. Разработать программный комплекс, реализующий разработанные методики и алгоритмы.

### **Выводы по главе 1**

1. Выполнен анализ конструкций БРЭА, на основании которого определены особенности и тенденции их построения, в частности установлено, что опережающее снижение объёма конструкций БРЭА привело к существенному росту удельной плотности теплового потока БРЭА БПЛА, что требует применения эффективных систем охлаждения для обеспечения нормального теплового режима БРЭА.
2. Рассмотрен маршрут построения БРЭА, показана необходимость оценки параметров конструкции БРЭА на ранних этапах проектирования.
3. Проведён анализ путей повышения эффективности ПР конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования, на основании которого выполнена постановка задачи исследования.

## **Глава 2 Методика формирования конструктивного базиса проектных решений БРЭА**

Методика формирования конструктивного базиса проектных решений БРЭА должна обеспечивать решение задачи покрытия структуры БРЭА комплектами модулей высокой готовности (МВГ) при условии выполнения требований ТЗ по массе, надёжности, стоимости, сроках поставки и других параметров. Под МВГ понимаются те СЧ БРЭА, затраты на доработку которых под требования заказчика не превышает заданных значений. Для решения этой задачи, в условиях жёстких временных ограничений на проектирование БРЭА, необходимо автоматизировать процедуры формирования исходного конструктивного базиса БРЭА и формирования на его основе допустимых комплектов МВГ, покрывающих структуру БРЭА и удовлетворяющих требованиям ТЗ. Решение этих задач рассматривается в данной главе.

### **2.1. Разработка формализованного описания структуры БРЭА**

Формализованное описание структуры БРЭА отображается в виде направленного иерархического графа, где вершины графа сопоставляются составным частям [9,38,68]. Каждая вершина в графе раскрашивается идентификационным кодом и записывается в соответствующую таблицу в БД. В качестве примера, на Рисунке 2.1 приведена структурная схема радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС  $K_U$  диапазона, содержащая следующие составные части (СЧ): усилитель мощности СВЧ, опорный генератор, синтезатор частот, приемник промежуточной частоты, цифровой приемник и БЦВМ.

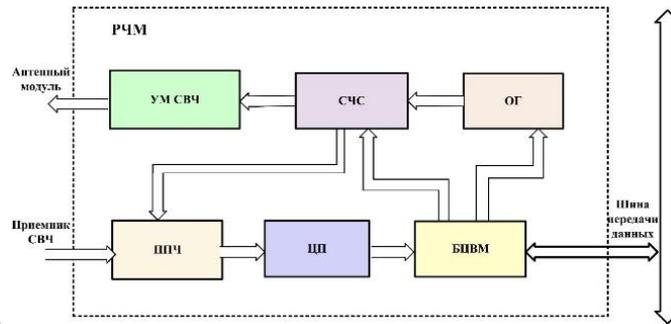


Рисунок 2.1 - Структура РЧМ БРЛС

Структура РЧМ БРЛС в виде ориентированного графа отображена на Рисунке 2.2.

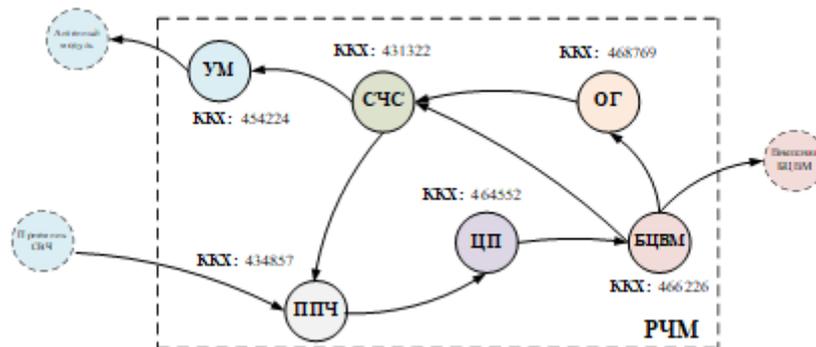


Рисунок 2.2 - Структура РЧМ в виде графа

С целью повышения производительности при работе с БД хранение структуры РЧМ БРЛС осуществляется в виде графовой модели [2,21,83]. Функционал использования графовых моделей в СУБД SQL Server 2017 позволяет параллельно обрабатывать несколько уровней в иерархии. Данная методика дает возможность упростить выборку данных при выполнении иерархических запросов [39,40,72,78,96,122].

Хранение структуры БРЛС в базе данных реализовано в виде пяти связанных таблиц: таблица классификатора ЕСКД, содержащая коды классификационных характеристик СЧ иерархического формата с разными уровнями вложенности, таблица вершин графа, хранящую в себе составные части в формате графа (NODE), таблица связей, содержащую вычисляемый идентификатор заданного узла в базе данных, входные и выходные связи вершин, таблица типов составных частей и идентификационная таблица

структур РЧМ БРЛС [24,28]. Фрагмент логической модели хранения структуры РЧМ в БД приведен на Рисунке 2.3.

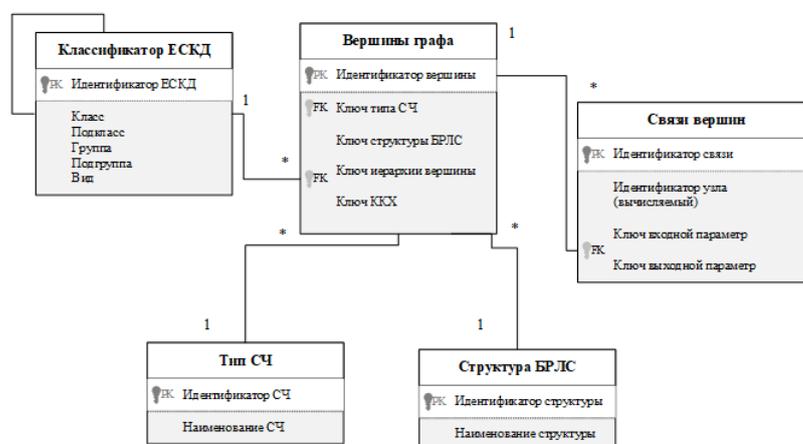


Рисунок 2.3 - Логическая модель структуры РЧМ в формате графа

Фрагмент графовой модели, приведенный на Рисунке 2.3. Данный метод наилучшим образом подходит для структур, в которых данные сильно связаны между собой и имеют четко определенные связи [71].

На Рисунке 2.4 отображена структура РЧМ БРЛС в табличной форме, которая хранится в БД в виде графовой модели.

Results	Messages	Snode_id_7EFD78B511F5400789AD834B10C08716	ESKD_ID	NAME_PARTS	Full_NAME_PARTS	FK_Parts	FK_Scheme	ParentID	Weight
1	{'type':'node','schema':'dbo','table':'Parts_Node','i...	432132	ОП	Опорный Генератор	7	2	NULL	120	
2	{'type':'node','schema':'dbo','table':'Parts_Node','i...	431322	СЧС	Синтезатор частот и синхросигн...	11	2	432132	80	
3	{'type':'node','schema':'dbo','table':'Parts_Node','i...	454224	УМ СВЧ	Усилитель мощности	12	2	454224	80	
4	{'type':'node','schema':'dbo','table':'Parts_Node','i...	434857	ППЧ	Приемник промежуточной частот...	16	2	454224	80	
5	{'type':'node','schema':'dbo','table':'Parts_Node','i...	46455	ЦП	Цифровой приемник	21	2	2434857	80	
6	{'type':'node','schema':'dbo','table':'Parts_Node','i...	466226	БЦВМ	Бортовая цифровая вычислитель...	22	2	46455	80	

Рисунок 2.4 - Структура РЧМ БРЛС в табличной форме

В данной табличной форме используются следующие обозначения: node\_id - вычисляемый идентификатор заданного узла в базе данных формата JSON, ESKD\_ID - идентификатор СЧ, Full\_Name\_Parts - Полное наименование СЧ, ParentID - ссылка на идентификатор элемента вышестоящего уровня в иерархии, FK\_Parts - внешний ключ на СЧ, FK\_Scheme - внешний ключ, который ссылается на вариант структуры БРЭА.

## 2.2. Разработка информационной модели СЧ БРЭА

Информационная модель, в соответствии с ГОСТ Р 57412—2017, это модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде совокупности элементов данных и отношений между ними. Применительно к проектированию БРЭА информационную модель СЧ БРЭА можно определить как информационный массив, который включает в себя информационные подмассивы, представляющие собой разделы частного технического задания на СЧ БРЭА: параметрический подмассив, текстовые файлы, файлы обмена данными между системами CAD и PDM. Структура ИМ СЧ представлена на Рисунке 2.5.

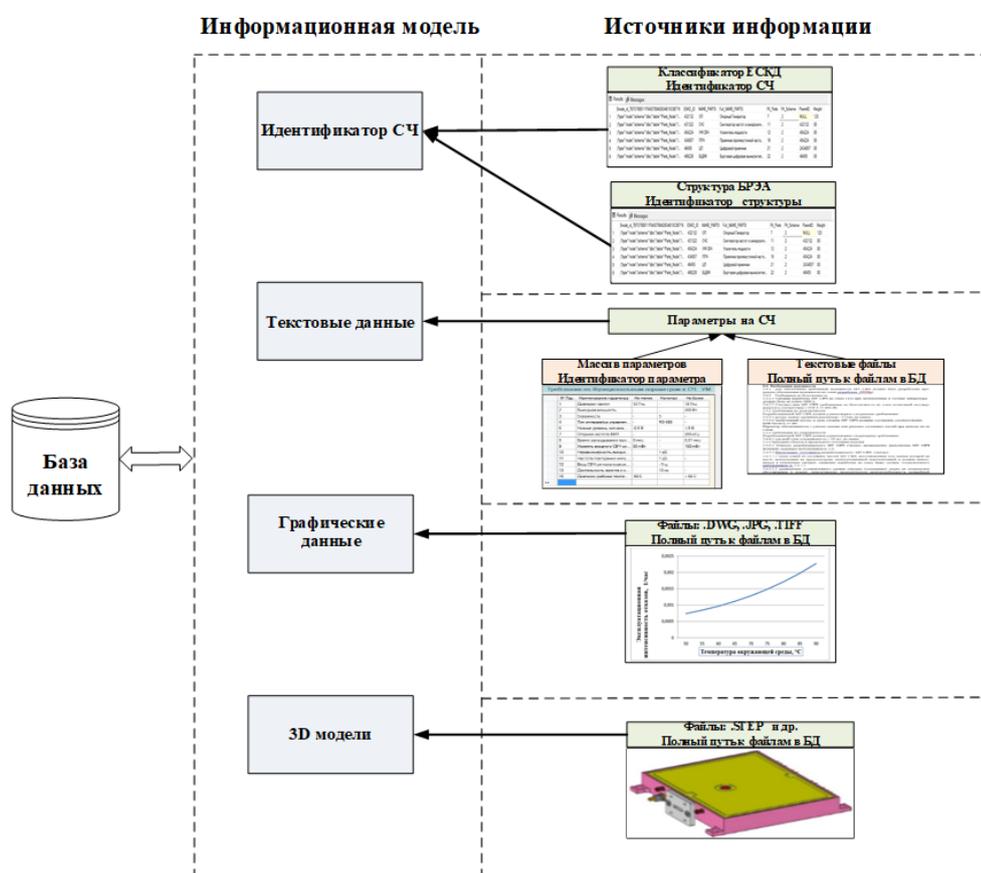


Рисунок 2.5 - Информационная модель СЧ БРЭА

Программная форма информационной модели СЧ является универсальным запросом для предприятия разработчика СЧ. При этом, в зависимости от возможностей предприятия разработчика, возможны два варианта получения информации:

1. Требования на составные части, заданные в интерактивной программной форме информационной модели составных частей БРЭА, в автоматизированном режиме с использованием технологии «LINQ to XML» экспортируются в сформированный файл «XML» [118,120,125,128]. Данный формат файла специально предназначен для хранения и импорта структурированных данных в БД [63]. Файл «XML» содержит все требования, необходимые для заполнения полей, входящих в информационную модель, отправляемую предприятию разработчику СЧ. Сотрудник предприятия заполняет файл-запрос и передает сформированную информацию, которая включает в себя «XML» файл, STEP файл, TXT файл и др. при помощи защищенной частной сети (VPN) или другими альтернативными методами [98,113,130]. На Рисунке 2.6 приведена схема прохождения запроса к БД предприятия.

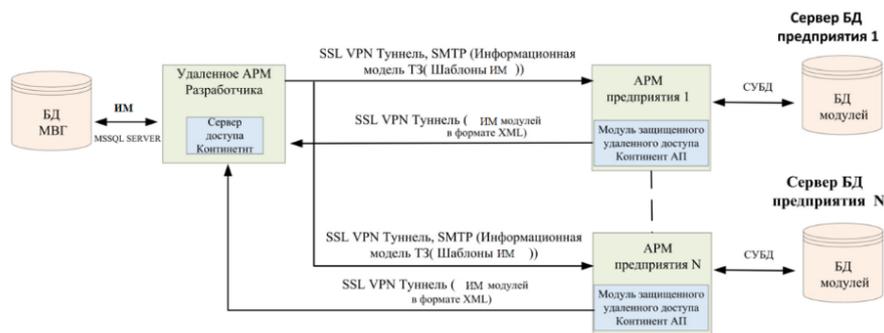


Рисунок 2.6 - Схема прохождения запроса к БД предприятия

Загрузка в БД информации, полученной от разработчика, осуществляется в автоматизированном режиме. При этом сопоставление составной части и идентификаторов параметров выполняется по заранее сформированным полям: ESKD\_ID и PARAM\_ID. На Рисунке 2.7 приведена схема импорта данных, полученных от предприятия разработчика СЧ.

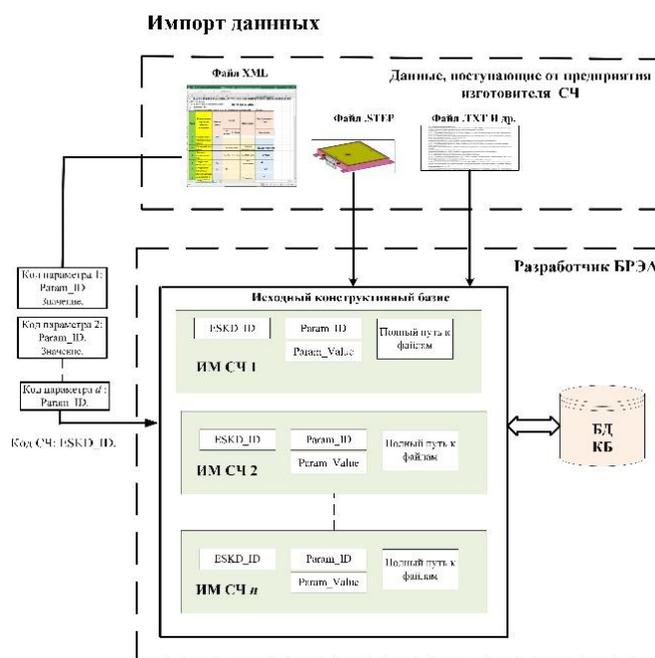


Рисунок 2.7 - Схема импорта данных в ИМ СЧ БРЭА в автоматизированном режиме

2. При наличии связи разработчика БРЭА с электронной библиотекой предприятия для поиска и получения информации используются сетевой протокол передачи данных (TCP/IP). Для подключения к серверу предприятия используется технология “Связанный сервер”. При этом на удаленном сервере могут использоваться СУБД MS SQL SERVER или ORACLE.

Параметрический подмассив, входящий в состав требований к СЧ и информационной модели СЧ, формируется путем параметрического моделирования. Среди большого количества различных видов параметризации наибольшее применение находят следующие [12,13,55]:

- 1) «Иерархическая параметризация – сводится к тому, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения» [12,13,55].
- 2) «Вариационная (размерная) параметризация - основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы

уравнений, определяющих зависимости между параметрами» [12,13,55].

- 3) «Геометрическая параметризация - базируется на том, что геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных» [12,13,55].
- 4) «Табличная параметризация - заключается в создании таблицы параметров изделия» [12,13,55].

Первые три метода относятся к так называемой «назначаемой параметризации, которая основана на определении связанных параметров и в установлении связей между ними, задаваемых уравнениями» [13]. Указанные методы ориентированы, в основном, на «применении в автоматизированных системах конструкторского проектирования и для построения 3D моделей [61]. Четвертый метод применяется при отсутствии арифметических зависимостей между значениями параметров. Данный метод находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых изделий, а также их применение в процессе конструкторского проектирования» [1,3,33,41,62,77,85,102].

Поскольку, при описании параметров СЧ БРЭА зависимости между параметрами отсутствуют, то для формирования параметрических подмассивов, входящих в состав требований и информационных моделей СЧ, применяется табличная (двухмерная) параметризация.

Для адекватного описания требований к СЧ в параметрическом подмассиве формируются следующие группы параметров:

- классификационные параметры, соответствуют кодовому обозначению изделия, присваиваемому согласно Классификатору ЕСКД (Идентификатор);

- функциональные параметры, полученные в результате схемотехнического (системного) моделирования, которые обеспечивают реализацию целевой функции системы;
- системные параметры, значения которых определяются ТЗ на систему, которые могут быть получены после синтеза системы на этапе схемотехнического проектирования;
- технико - экономические параметры, например, стоимость, стоимостные и временные затраты на доработку модуля, а также производные от них, которые также определяются на этапе схемотехнического проектирования.

К функциональным параметрам относятся все входные и выходные сигналы (стыковочные параметры), например: напряжения входного и выходного сигналов, выходная мощность, погрешность преобразования и др.

К системным параметрам можно отнести: конструкторские параметры (масса, габариты); параметры, характеризующие надежность; параметры, характеризующие стойкость к внешним воздействующим факторам; параметры, характеризующие электромагнитную совместимость (ЭМС); эксплуатационные параметры и т.д.

С учетом вышесказанного, в общем случае, формализованное описание параметрического подмассива требований к СЧ можно представить как совокупность подмножеств:

$$Q(D_e) = Q(H_e^D) \cup Q(F_e^D) \cup Q(C_e^D) \cup Q(E_e^D),$$

где  $D = \{D_1, \dots, D_e, \dots, D_f\}$  - множество СЧ;  $e = \overline{1, f}$ ,  $f$  - общее число СЧ, входящих в структуру проектируемого изделия;

$Q_e = \{Q_{e1}, \dots, Q_{eb}, \dots, Q_{ed}\}$ ;  $b = \overline{1, d}$ ,  $d$  - общее число требований к параметрам, характеризующих  $\forall D_e \in D$ ;  $Q(H_e^D)$  - идентификатор СЧ;  $Q(F_e^D)$  - подмножество требований к функциональным параметрам СЧ;  $Q(B_e^D)$  -

подмножество требований к системным параметрам СЧ;  $Q(E_e^D)$  – подмножество требований к технико-экономическим параметрам СЧ.

После заполнения программной формы требований к СЧ получаем информационную модель СЧ, в которой указываются значения параметров, текстовые данные, графические данные и 3D модели МВГ, покрывающего данную СЧ.

При этом ИМ СЧ включает в себя множество значений параметров, характеризующих МВГ, покрывающий  $D_e \in D$ :

$$Q(M_e) = \{Q(H_e^M) \cup Q(F_e^M) \cup Q(B_e^M) \cup Q(E_e^M)\}, \quad (2.2.4)$$

где  $Q(H_e^M)$  – идентификатор МВГ;  $Q(F_e^M)$  – подмножество значений функциональных параметров МВГ;  $Q(B_e^M)$  – подмножество значений системных параметров МВГ;  $Q(E_e^M)$  – подмножество значений технико-экономических параметров МВГ.

В качестве примера на Рисунке 2.8 показан программный интерфейс информационной модели УМ СВЧ.

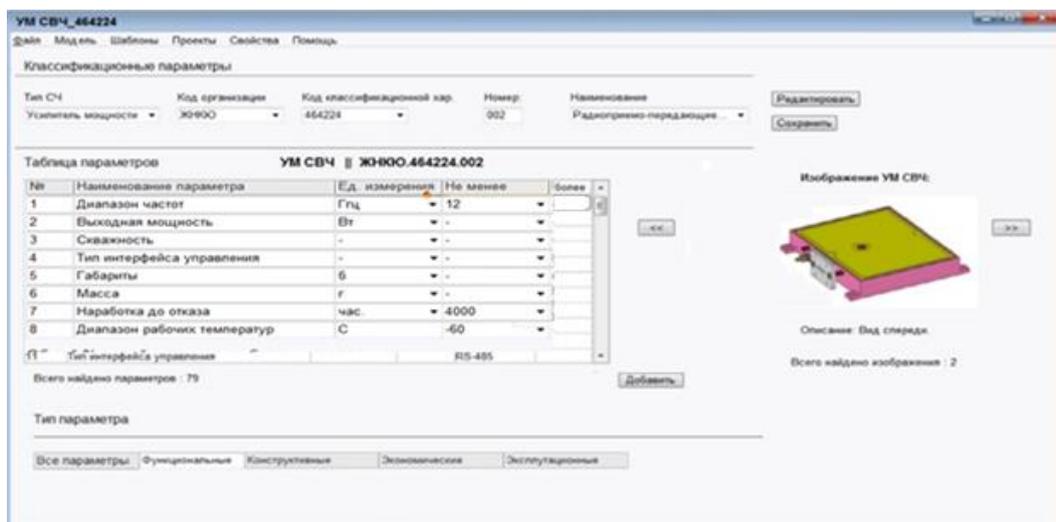


Рисунок 2.8 - Программный интерфейс информационной модели УМ СВЧ

### 2.3. Формирование исходного конструктивного базиса проектируемой БРЭА

Используя информационные модели СЧ БРЭА и формализованное описание структуры БРЭА формируется исходный конструктивный базис проектируемого изделия [56]. Для этого осуществляется выбор из множества МВГ, хранящихся в архивах предприятия (предприятий) модулей, отвечающих требованиям ЧТЗ. При этом, предприятие может выпускать несколько изделий одинакового функционального назначения, но отличающихся по технико-экономическим параметрам. Информация о готовых модулях переданная от разработчика СЧ хранится в виде информационных моделей, которые включают в себя: двухмерный массив значений параметров, текстовые файлы, файлы обмена данными между системами САД и PDM. В свою очередь двумерный массив содержит значения параметров, характеризующих МВГ: классификационные, функциональные, а также системные и технико-экономические. [29,55,98,102].

Алгоритм формирования исходного конструктивного базиса основан на последовательном выполнении следующих процедур:

- а) выбор из множества готовых модулей  $M$ , хранящихся в электронном архиве предприятия, такого подмножества модулей  $M_e^H$ , в котором идентификационный код  $\forall M_e \in M$  соответствует коду покрываемой составной части  $D_e \in D$ ; где:  $D = \{D_1, \dots, D_e, \dots, D_f\}$  - множество СЧ;  $e = \overline{1, f}$ ,  $f$  – общее число СЧ, входящих в структуру проектируемого изделия; В результате выбора формируется подмножество модулей  $M^H$ ;  $M_e^H \subseteq M$ ;
- б) выбор из множества  $M_e^H$  модулей в которых функциональные параметры удовлетворяют требованиям ЧТЗ;  $M_e^F \subseteq M_e^H \subseteq M_e$ ;
- в) выбор из множества  $M_e^F$  модулей в которых системные параметры удовлетворяют требованиям ЧТЗ;  $M_e^B \subseteq M_e^F \subseteq M_e^H \subseteq M_e$ ;

г) выбор из множества  $M_e^B$  модулей в которых технико-экономические параметры удовлетворяют требованиям ЧТЗ.

Таким образом, множество  $M_e^H$  сужается до множества  $M_e^E$ :  
 $M_e^E \subseteq M_e^B \subseteq M_e^F \subseteq M_e^H \subseteq M_e$ .

В этом случае исходный конструктивный базис БРЭА представляет собой совокупность множеств:  $M^{KB} = M_1^E \cup \dots M_e^E \cup \dots M_f^E$ ; где  $M_e^E$  - множество модулей, покрывающих СЧ  $D_e \in D$  и отвечающих требованиям ЧТЗ.

В качестве примера, на Рисунке 2.9 приведена структурная схема РЧМ, сформированная на основе структуры РЧМ, приведенной на Рисунке 2.1, входящего в состав бортовой РЛС, в котором составные части покрываются альтернативными МВГ.

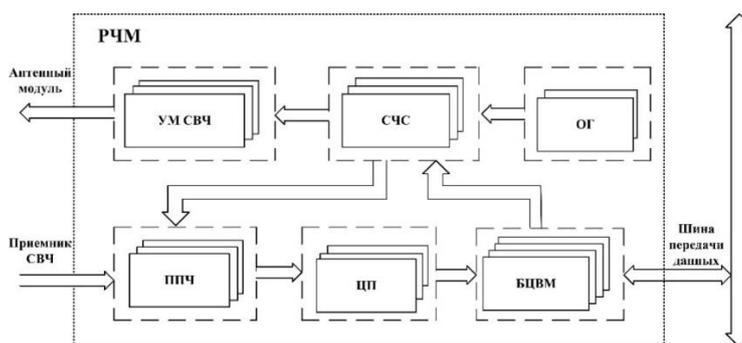


Рисунок 2.9 - Структурная схема РЧМ, входящего в состав бортовой РЛС, покрытая альтернативными МВГ

Таким образом, на основании сформированного исходного КБ каждая составная часть РЧМ, структура которого представлена на Рисунке 2.1, покрывается альтернативными вариантами МВГ [47,91].

#### 2.4. Формирование допустимого конструктивного базиса проектируемой БРЭА

При наличие базовой структуры БРЭА и конструктивного базиса, формирование которого было рассмотрено в параграфе 2.3 встает задача формирования множество допустимых альтернативных вариантов

комплектов МВГ, частично или полностью покрывающих СЧ проектируемого изделия. Данную задачу можно разделить на части, которые формулируются следующим образом:

- формирование альтернативных вариантов комплектов МВГ, покрывающих СЧ проектируемой БРА;
- определение значений системных и технико-экономических параметров каждого альтернативного варианта комплекта МВГ;
- выбор допустимых вариантов комплектов МВГ, удовлетворяющих требованиям ТЗ на конструкторские, эксплуатационные и технико-экономические параметры проектируемого изделия.

Целью настоящего параграфа является разработка методики формирования допустимых комплектов МВГ, покрывающих СЧ проектируемого изделия. Иными словами, необходимо сформировать комплекты готовых модулей на основе имеющихся в распоряжении разработчика базовой структуры, конструктивного базиса и с учетом всех заданных ограничений на конструкторские и технико-экономические параметры, проектируемой БРЭА.

Обзор литературы по данному вопросу показал, что «для решения указанных задач, при использовании систем автоматизированного проектирования, широкое распространение получили методы, относящиеся к классу комбинаторно-логических, в частности, морфологический метод на основе дерева решений, метод на основе сетей Петри, метод на основе многодольных графов и другие» [12]. На Рисунке 2.10 приведена классификация комбинаторных методов, получивших наибольшее распространение при проектировании РЭС.

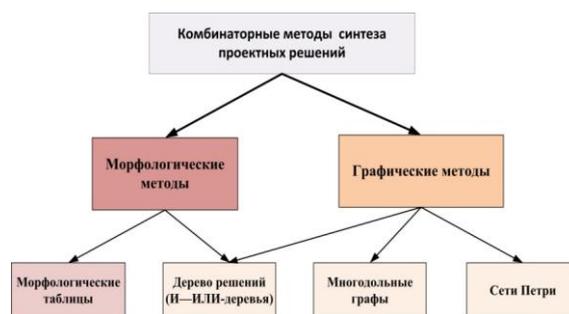


Рисунок 2.10 - Классификация комбинаторных методов

В основе указанных методов лежит организованный перебор возможных вариантов решения задачи [2,9,12].

«Морфологические методы позволяют найти и систематизировать все возможные способы построения объекта. Основой метода являются морфологические таблицы или морфологические И/ИЛИ –деревья. К достоинствам морфологического метода можно отнести простоту использования с хорошо отработанными правилами заполнения и поиска решений» [5,12]. Основным недостатком применения морфологического метода в том, что не существует универсального метода оценки эффективности того или иного варианта решения.

Метод альтернативных деревьев относится как к морфологическим, так и к графическим методам и может быть использован для синтеза технических решений [12,67]. Данный метод позволяет представить комбинаторное множество возможных вариантов в виде графа. Недостатком данного метода является высокая трудоемкость формирования графа при выполнении большого количества сценариев. [5]. Сети Петри применяются для моделирования динамических дискретных систем и представляют собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов - позиций и переходов, соединённых между собой дугами. Главным недостатком сетей Петри является последовательное моделирование и анализ альтернативных проектных решений, что требует больших временных и вычислительных затрат. Многодольный граф представляет собой множество вершин, которое разбито на совокупность непересекающихся подмножеств,

называемых долями графа. При этом все доли являются независимыми множествами, а вершины, принадлежащие одной доле - независимым подмножеством. При описании структуры БРЭА доли представляют СЧ системы, а вершины каждой доли соответствуют техническим реализациям СЧ [11,35]. Данный математический аппарат относится к разделу дискретной математики и обеспечивает не только хорошую наглядность, но и дает ясный способ описания как обобщенной структуры БРЭА, так и варианта модульной конструкции изделия [52,105].

Анализ рассмотренных комбинаторных методов показывает, что возможности математического аппарата многодольных графов позволяют эффективно применять его для решения всех трех частей задачи формирования допустимых комплектов модулей, покрывающих СЧ проектируемого изделия [71].

Решение первой части задачи сводится к объединению различных конструктивно оформленных модулей в единое целое и получение, тем самым, всех возможных вариантов комплектов МВГ, полностью покрывающих СЧ проектируемой БРЭА. Формализовать данную задачу можно как формирование, в соответствии с заданными правилами, множества комплектов МВГ –  $S$  из модулей исходного множества, входящих в конструктивный базис –  $M$ .

В этом случае структуру БРЭА можно интерпретировать  $M$  – дольным графом  $G = (M, R)$ , в котором каждой СЧ изделия  $D_e$ ;  $D_e \in D$  ставится в однозначное соответствие доля графа  $M_e$ ;  $M_e \in M$ , где  $M$  - множество долей графа;  $e = \overline{(1, f)}$ ;  $f$  – общее число долей в графе  $G$ . В свою очередь,  $\forall M_e \in M$  графа  $G$  представляет собой множество вершин  $M_e = M_{e1}, \dots, M_{eg}, \dots, M_{eh}$ , каждая из которых отображает модуль, покрывающий соответствующую СЧ проектируемой системы;  $g = \overline{(1, h)}$ ;  $h$  – общее число вершин в доле  $D_e$ ;  $\forall M_{eg} \in M_e$ . Дуги ( $R$ ) графа  $G = (M, R)$ , направленно связывают вершины  $M_{eg}$

и  $M_{(e+1)g}$ , входящие в разные подмножества  $M_e$  и  $M_{e+1}$ . Таким образом, многодольный граф позволяет перейти от конкретных схем к их математическому описанию и использовать эффективные методы анализа и синтеза проектного решения, широко используя компьютерное моделирование [42,51,58]. При этом многодольный граф должен отвечать следующим требованиям:

- Каждая доля  $M_e \in M$  графа  $G = (M, R)$  должна соответствовать составной части системы, выполняющей заданную функцию и характеризующейся определенным кодом классификационной характеристик по ЕСКД;
- Вершины в каждой доле соответствуют техническим реализациям модулей, обеспечивающих выполнение заданной функции;
- Вершины, принадлежащие одной доле, всегда являются независимым подмножеством;
- Дуги графа могут соединять только вершины смежных долей и, соответственно, концы любой выбранной дуги должны быть окрашены в разные цвета.

В качестве примера на Рисунке 2.11 показан шестидольный граф, сформированный на основе структурной схемы РЧМ, приведенной на Рисунке 2.9.

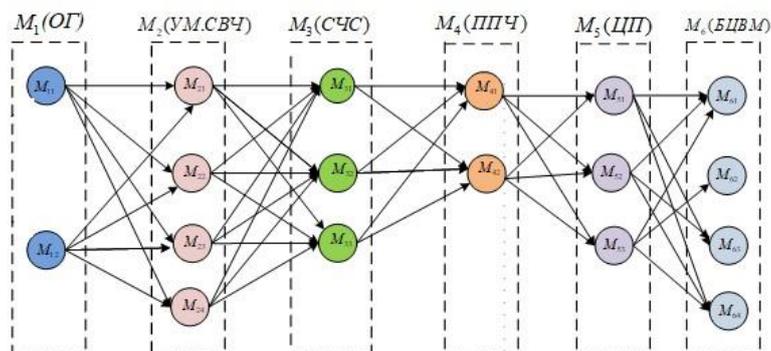


Рисунок . 2.11 - Шестидольный граф с различным количеством вершин в каждой доле

Количество альтернативных комплектов МВГ соответствует числу возможных маршрутов, которые формируются в графе  $G = (M, R)$  методом «поиска в глубину» [20,94,109]. Данный метод позволяет обходить все возможные маршруты в графе. Процесс обхода начинается с корневого узла, который помечается как посещённый. Далее полностью исследуется одна ветка и только потом переходим к другим веткам (если они останутся нерассмотренными). В результате получаем множество маршрутов, каждый из которых отображает альтернативный комплект модулей  $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ ; где  $i = \overline{(1, n)}$ ;  $n$  – общее число альтернативных комплектов МВГ. Алгоритм формирования комплектов модулей с применением метода поиска в глубину в графе показан на Рисунке 2.12.

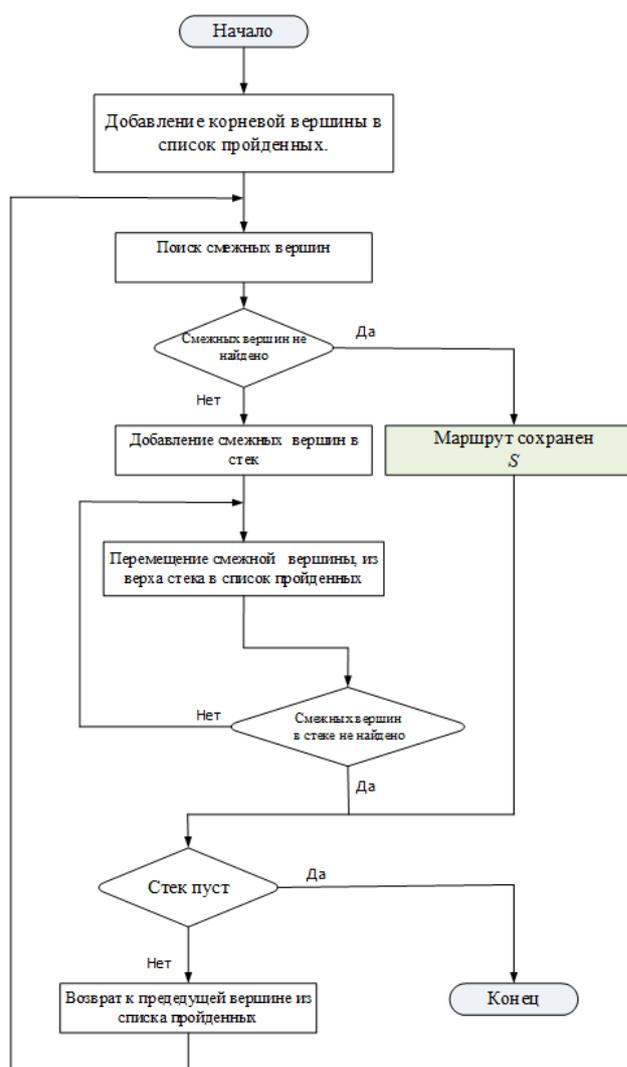


Рисунок 2.12 - Алгоритм формирования комплектов модулей с применением метода поиска в глубину в графе

Результат обхода графа можно представить в виде матрицы комплектов, которая представляет собой двумерный массив [22,103]. Количество столбцов в матрице соответствует множеству долей графа  $G = (M, R)$ , а количество строк – множеству альтернативных комплектов МВГ-  $S$ . Пример матрицы комплектов для графа, изображенного на Рисунке 2.11 показан на Рисунке 2.13.

$S_K$	M1(ОГ)	M2(УМСВЧ)	M3(СЧС)	M4(ППЧ)	M5(ЦП)	M6(БЦВМ)
1	$M_2^1$	$M_4^2$	$M_3^3$	$M_2^4$	$M_3^5$	$M_4^6$
2	$M_2^1$	$M_4^2$	$M_1^3$	$M_2^4$	$M_3^5$	$M_3^6$
3	$M_2^1$	$M_4^2$	$M_1^3$	$M_2^4$	$M_3^5$	$M_2^6$
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
574	$M_1^1$	$M_1^2$	$M_1^3$	$M_1^4$	$M_1^5$	$M_3^6$
575	$M_1^1$	$M_1^2$	$M_1^3$	$M_1^4$	$M_1^5$	$M_2^6$
576	$M_1^1$	$M_1^2$	$M_1^3$	$M_1^4$	$M_1^5$	$M_1^6$

Рисунок 2.13 - Матрица комплектов МВГ

Каждая строка матрицы представляет собой комплект модулей, покрывающих СЧ проектируемого изделия. Таким образом, формируется множество альтернативных комплектов  $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ ; где  $i = \overline{(1, n)}$ ;  $n$  – общее число альтернативных комплектов МВГ.

Вторая часть задачи решается путем использования математического аппарата взвешенных многодольных графов, который позволяет определить и проанализировать значения конструкторских параметров всех альтернативных вариантов комплектов [5,68,94].

Предположим, что  $\forall S_i \in S$  характеризуются вектором конструкторских параметров:

$$Q_i = \langle Q_{i1}, \dots, Q_{ib}, \dots, Q_{id} \rangle \quad (2.1)$$

где  $b = \overline{(1, d)}$ ;  $d$  – общее число конструкторских параметров, которыми характеризуются комплекты МВГ. При этом на  $\forall Q_b \in Q$  накладывается ограничение типа  $Q_b \leq Q_b^{доп}$ , и при условии, что все параметры приведены

к единой системе качества – чем меньше, тем лучше, формируется вектор ограничений:

$$Q_{\text{доп}} = \langle Q_{\text{доп}}^1, \dots, Q_{\text{доп}}^b, \dots, Q_{\text{доп}}^d \rangle \quad (2.2.)$$

В этом случае задача определения значений конструкторских параметров каждого альтернативного варианта комплекта МВГ решается путем использования математического аппарата взвешенных многодольных графов. Взвешенный граф формируется из обычного (не взвешенного) путем присвоения каждой дуге  $r_{eg}$  веса, который соответствует весу модуля  $M_{eg}$  по параметру  $Q_{eg}^b$ . Таким образом, мы получаем взвешенный граф по параметру  $Q^b$ . На Рисунке 2.14 показаны взвешенные графы по параметрам:  $\lambda_k^{\exists}$  - интенсивность отказов комплекта МВГ;  $P_k$  - мощность, потребляемая комплектом МВГ;  $m_k$  - масса комплекта МВГ;  $C_k$  - стоимость комплекта МВГ.

Графы образованы на основе графа, приведенного на Рисунке 2.11. Каждой дуге графа приписывается значение параметра, которым характеризуется соответствующий узел. Узел, обозначенный символом  $A$ , является корневой вершиной, расположенной на нулевом уровне и имеет нулевой вес. Данный узел является корневой вершиной и служит для начала обхода графа. Узел, обозначенный символом  $B$ , служит для завершения всех маршрутов.

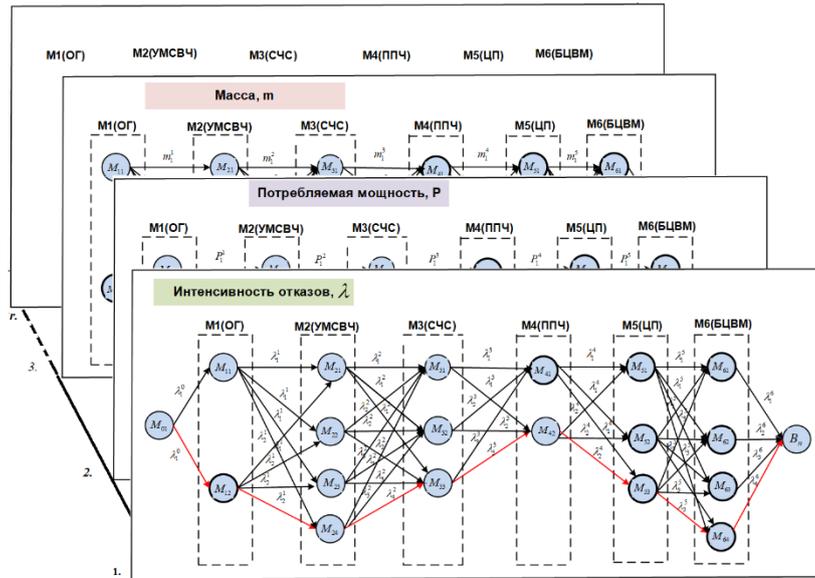


Рисунок 2.14 - Взвешенные графы по параметрам:  $\lambda_k^\ominus$  - интенсивность отказов комплекта МВГ,  $P_k$  - мощность, потребляемая комплектом МВГ;  $m_k$  - масса комплекта МВГ;  $C_k$  - стоимость комплекта МВГ

На основании взвешенного графа формируется матрица  $Q^b(S)$  в которой определяются весовые значения комплектов МВГ по параметру  $Q^b$ ;  $Q^b \in Q$ . Строка матрицы представляет собой кортеж весовых значений всех модулей, входящих в комплект  $S_i$ . Вес комплекта  $S_i$  по параметру  $Q^b$  определяется для  $\forall S_i \in S$  как сумма:

$$Q^b(S_i) = \sum_{e=1}^f Q^b(M_{ieg}) ,$$

где  $Q^b(M_{ieg})$  - значение  $b$ -го параметра модуля  $M_{eg}$ , входящего в комплект  $S_i \in S$ . Суммарное значение веса  $Q^b(S_i)$  комплекта  $S_i \in S$  записывается в последнем столбце матрицы. Ниже, на Рисунке 2.15 показаны матрицы суммарных весовых значений комплектов МВГ для трех параметров -  $\lambda_k^\ominus$ ,  $P_k$ ,  $m_k$ , сформированные на основе графов, приведенных на Рисунке 2.14.

$S_K$	M1(ОГ)	M2(УМСВЧ)	M3(СЧС)	M4(ППЧ)	M5(ЦП)	M6(БЦВМ)	$\sum m$	
1	$m_1^1$	$m_1^2$	$m_1^3$	$m_1^4$	$m_1^5$	$m_1^6$	$\sum m(S_1)$	
2	$m_2^1$	$m_2^2$	$m_2^3$	$m_2^4$	$m_2^5$	$m_2^6$	$\sum m(S_2)$	
3	$m_3^1$	$m_3^2$	$m_3^3$	$m_3^4$	$m_3^5$	$m_3^6$	$\sum m(S_3)$	
4. р-й параметр	$S_K$	M1(ОГ)	M2(УМСВЧ)	M3(СЧС)	M4(ППЧ)	M5(ЦП)	M6(БЦВМ)	$\sum P$
574	1	$P_1^1$	$P_1^2$	$P_1^3$	$P_1^4$	$P_1^5$	$P_1^6$	$\sum P(S_{574})$
575	2	$P_2^1$	$P_2^2$	$P_2^3$	$P_2^4$	$P_2^5$	$P_2^6$	$\sum P(S_{575})$
576	3	$P_3^1$	$P_3^2$	$P_3^3$	$P_3^4$	$P_3^5$	$P_3^6$	$\sum P(S_{576})$
3. Масса	$S_K$	M1(ОГ)	M2(УМСВЧ)	M3(СЧС)	M4(ППЧ)	M5(ЦП)	M6(БЦВМ)	$\sum \lambda$
574	1	$\lambda_1^1$	$\lambda_1^2$	$\lambda_1^3$	$\lambda_1^4$	$\lambda_1^5$	$\lambda_1^6$	$\sum \lambda(S_{574})$
575	2	$\lambda_2^1$	$\lambda_2^2$	$\lambda_2^3$	$\lambda_2^4$	$\lambda_2^5$	$\lambda_2^6$	$\sum \lambda(S_{575})$
576	3	$\lambda_3^1$	$\lambda_3^2$	$\lambda_3^3$	$\lambda_3^4$	$\lambda_3^5$	$\lambda_3^6$	$\sum \lambda(S_{576})$
2. Потребляемая мощность	$S_K$	M1(ОГ)	M2(УМСВЧ)	M3(СЧС)	M4(ППЧ)	M5(ЦП)	M6(БЦВМ)	$\sum \lambda$
574	1	$\lambda_1^1$	$\lambda_1^2$	$\lambda_1^3$	$\lambda_1^4$	$\lambda_1^5$	$\lambda_1^6$	$\sum \lambda(S_{574})$
575	2	$\lambda_2^1$	$\lambda_2^2$	$\lambda_2^3$	$\lambda_2^4$	$\lambda_2^5$	$\lambda_2^6$	$\sum \lambda(S_{575})$
576	3	$\lambda_3^1$	$\lambda_3^2$	$\lambda_3^3$	$\lambda_3^4$	$\lambda_3^5$	$\lambda_3^6$	$\sum \lambda(S_{576})$
1. Интенсивность отказов	$S_K$	M1(ОГ)	M2(УМСВЧ)	M3(СЧС)	M4(ППЧ)	M5(ЦП)	M6(БЦВМ)	$\sum \lambda$
574	1	$\lambda_1^1$	$\lambda_1^2$	$\lambda_1^3$	$\lambda_1^4$	$\lambda_1^5$	$\lambda_1^6$	$\sum \lambda(S_{574})$
575	2	$\lambda_2^1$	$\lambda_2^2$	$\lambda_2^3$	$\lambda_2^4$	$\lambda_2^5$	$\lambda_2^6$	$\sum \lambda(S_{575})$
576	3	$\lambda_3^1$	$\lambda_3^2$	$\lambda_3^3$	$\lambda_3^4$	$\lambda_3^5$	$\lambda_3^6$	$\sum \lambda(S_{576})$

Рисунок 2.15 - Матрицы суммарных весовых значений комплектов

МВГ, сформированные по трем параметрам -  $\lambda_k^{\ominus}$ ,  $P_k$ ,  $m_k$

Третья часть задачи - формирования допустимых комплектов МВГ решается путем распределения множества комплектов  $S$  на два подмножества:  $S = S_{\text{ДОП}} \cup S_{\text{ОТК}}$  согласно условию:

$$S_i^b \in \begin{cases} S_{\text{ДОП}}^b & | Q_i^b(S_i) \leq Q_{\text{ДОП}}^b \\ S_{\text{ОТК}}^b & | Q_i^b(S_i) > Q_{\text{ДОП}}^b \end{cases}$$

где  $S_{\text{ДОП}}^b$  - допустимые комплекты МВГ по параметру  $b$ ;  $S_{\text{ОТК}}^b$  - отклоненные комплекты МВГ по параметру  $b$ .

Аналогичным образом определяются допустимые комплекты МВГ с учетом всех остальных ограничений, входящих в вектор (2.2).

Определение подмножества комплектов, входящих в допустимую область по всем параметрам, представляет собой итерационный процесс. Подмножество допустимых значений первого параметра становится проверочным множеством следующего параметра и так далее, до полного перебора всех параметров. В результате формируется множество допустимых комплектов, которые удовлетворяют всем ограничениям, входящих в вектор (2.2):

$$S_{\text{ДОП}} = S_{\text{ДОП}}^d \subseteq S_{\text{ДОП}}^{d-1} \subseteq \dots \subseteq S_{\text{ДОП}}^b \subseteq \dots \subseteq S_{\text{ДОП}}^2 \subseteq S_{\text{ДОП}}^1 \mid S_{\text{ДОП}} \in S; S_{\text{ДОП}} \subseteq S; S = S_{\text{ДОП}} \cup S_{\text{ОТК}}$$

Применительно к параметрам, указанным в матрицах на Рисунке 2.15, множество допустимых комплектов определяется выражением:

$$S_{\text{доп}} = S_{\text{доп}}^m \subseteq S_{\text{доп}}^P \subseteq S_{\text{доп}}^\lambda$$

Для реализации процесса выбора допустимых комплектов МВГ используются операторы SELECT с конструкцией фильтрации WHERE, входящие в СУБД SQL SERVER [66,130].

Таким образом, предложенная методика позволяет сформировать в автоматизированном режиме, с учетом всех заданных ограничений на системные и технико-экономические параметры, допустимые комплекты МВГ на основе имеющихся в распоряжении разработчика базовой структуры и конструктивного базиса проектируемой БРЭА. Применение данной методики позволяет значительно сократить временные затраты на формирование допустимых комплектов модулей.

## Выводы по главе 2

1. Предложено формализованное описание структуры БРЭА, обеспечивающее автоматизацию решения задачи покрытия СЧ БРЭА модулями высокой готовности.
2. Предложена информационная модель СЧ проектируемых БРЭА, которая включает в себя требования к параметрам СЧ, текстовые файлы, файлы обмена данными САД и позволяет создавать электронные библиотеки МВГ, а также осуществлять автоматизированный поиск и выбор модулей в соответствии с заданным идентификационным номером и требованиями ТЗ на функциональные, конструктивные и технико-экономические параметры модулей.
3. Разработан обобщенный алгоритм формирования исходного конструктивного базиса, в который входят МВГ, обеспечивающие покрытие СЧ проектируемой БРЭА, с учетом требований к классификационным и функциональным параметрам.
4. Рассмотрены возможности использования комбинаторно-логических методов для формирования допустимых комплектов МВГ. Отмечено, что возможности математического аппарата многодольных графов

позволяют эффективно применять его как для решения задачи объединения различных конструктивно оформленных модулей в единое целое и получение, тем самым, всех возможных вариантов комплектов МВГ, так и для решения задачи формирования допустимых комплектов модулей, покрывающих СЧ проектируемого изделия.

5. Разработана методика формирования альтернативных комплектов МВГ, реализованная на основе математического аппарата многодольных графов, и обеспечивающих покрытие структуры БРЭА при условии выполнения требований ТЗ на БРЭА.

### **Глава 3 Синтез и ранжирование допустимых проектных решений БРЭА**

В общем случае проектные решения БРЭА представляют собой совокупность модулей, покрывающих СЧ проектируемого изделия, систему охлаждения теплонагруженных модулей, несущую конструкцию и кабельную сеть. Параметры альтернативных проектных решений в основном отличаются из-за отличия параметров используемых МВГ и систем охлаждения. Поэтому, в данной главе анализируется влияние параметров комплектов модулей и различных вариантов систем охлаждения на параметры проектных решений в целом. Также рассматриваются различные методы сравнительного анализа и ранжирования по эффективности альтернативных вариантов проектных решений БРЭА.

#### **3.1. Постановка задачи синтеза допустимых конструкторских проектных решений БРЭА**

Возможность использования большого числа допустимых альтернативных комплектов модулей, входящих в конструктивный базис, а также различные варианты систем охлаждения теплонагруженных модулей порождает множество вариантов конструкторских проектных решений БРЭА, отличающихся по надежности, конструкторским, эксплуатационным и технико-экономическим параметрам [99]. В связи с этим актуальной является задача прогнозирования на ранних этапах проектирования основных параметров всех конкурирующих вариантов конструкции БРЭА, с целью выбора варианта, который наилучшим образом отвечал бы заданным требованиям или, иными словами, задача принятия проектного решения.

Рассматриваемую проблему можно сформулировать следующим образом:

- обозначим через  $S$  множество допустимых вариантов комплектов МВГ, покрывающих СЧ структурной схемы проектируемого изделия

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ ; где  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  – общее число допустимых вариантов комплектов МВГ;

Предположим теперь, что для  $\forall S_i \in S$  может быть выбрано множество альтернативных вариантов систем охлаждения (СО) -  $V_{ig} = \{v_{ig1}, v_{ig2}, \dots, v_{igj}, \dots, v_{igm}\}$ , которые позволяют обеспечить выполнение условия  $t_{ig}^{max} \leq t_{доп}$ ; где  $j = \overline{1, m}$ ;  $m$  - общее число альтернативных вариантов СО для  $g$ -го теплонагруженного модуля.

Каждый комплект МВГ характеризуется вектором параметров, структура которого рассмотрена в 2.1. Значения этих параметров формировались по значениям соответствующих параметров всех МВГ, входящих в комплект, при этом не учитывались параметры несущей конструкции, кабельной сети и системы охлаждения. Поэтому значения параметров проектных решений (ПР) конструкции БРЭА требуют корректировки.

На основании множеств  $S$  и  $V$  можно сформировать множество ПР БРЭА  $U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_l\}$ ; где  $k = \overline{1, l}$ ,  $l$  – общее число допустимых вариантов ПР.

Поскольку для каждого комплекта МВГ с учетом возможных различных вариантов СО может быть сформировано несколько ПР, следовательно, мощность множества ПР  $U$  больше мощности множества комплектов МВГ- $S$ . В общем случае проектное решения конструкций БРЭА представляет собой объединение допустимого комплекта МВГ, несущей конструкции, кабельной сети и системы охлаждения (СО):

$$U_k = \{S_i \cup V_j \cup K_k \cup N_k\},$$

где  $V_j$  - система охлаждения,  $N_k$  - несущая конструкция,  $K_k$  - кабельная сеть.

Основным признаком лучшего варианта является выполнение требований ТЗ, причём эти требования должны быть определены количественно. Для БРЭА, с учётом особенностей её построения, рассмотренных в разделе 1.1,

такими параметрами являются: эксплуатационная интенсивность отказов, потребляемая мощность, масса, стоимость, диапазон рабочих температур. Стоимость БРЭА, в основном, определяется аналогичными параметрами СЧ БРЭА. Система охлаждения оказывает влияние на массу, потребляемую мощность, эксплуатационную интенсивность отказов. Значения параметров несущей конструкции и кабельной сети можно с достаточной точностью оценить по значениям соответствующих параметров аналогов, поскольку габариты и место установки БРЭА определено в ТЗ.

Как было показано в разделе 1.1, значения параметров СО могут оказать существенное влияние не только на параметры конструкции БРЭА, но и на тепловой режим БРЭА, надёжность, потребляемую мощность.

Для обеспечения надёжности и повышения точности сравнительного анализа проектных решений БРЭА требуется выполнить анализ её теплового режима [23]. Для чего необходимо для каждого комплекта МВГ синтезировать проектное решение конструкции БРЭА, что включает решение следующих задач :

1. Построить 3D модель конструкции БРЭА, используя для этого САД системы.
2. Адаптировать 3D модель к расчёту теплового режима.
3. Выполнить расчёт теплового режима и сформировать температурное поле конструкции при естественном воздушном охлаждении (ЕВО).
4. Выполнить анализ температурного поля. Сформировать исходные данные для синтеза проектных решений БРЭА.
5. Выполнить синтез проектных решений, обеспечивающих нормальный тепловой режим и удовлетворяющих всем ограничениям ТЗ.

Задачи 1-4 решаются разработчиком с использованием САД систем. Для синтеза проектных решений необходимо выполнить следующие действия:

- провести анализ особенностей распределения температурного поля конструкции БРЭА;
- по результатам анализа синтезировать варианты реализации СО;

- для каждого варианта СО с использованием САД систем выполнить анализ теплового режима БРЭА;
- провести анализ температурного поля каждого варианта на предмет обеспечения ограничений по температуре и надёжности;
- для вариантов, удовлетворяющих ограничению, осуществить коррекцию значения параметров БРЭА (масса, потребляемая мощность, стоимость).

Недостатком данного подхода является большие временные затраты на синтез проектных решений. Например, для 6 вариантов комплектов МВГ и 5 вариантов СО необходимо провести 30 расчётов теплового режима БРЭА. С учётом того, что каждый расчёт, в среднем занимает 1-2 рабочих дня, временные затраты составят не менее 30 человеко-дней. Такие затраты недопустимы при современных требованиях к срокам выполнения ОКР.

Для сокращения затрат в работе предлагается экспериментально-расчётная методика синтеза допустимых проектных решений БРЭА, которую можно представить в виде алгоритма, приведенного на Рисунке 3.1.

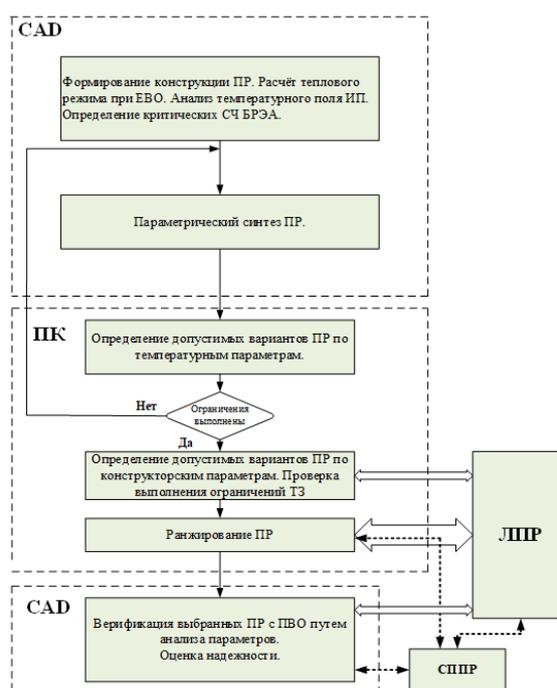


Рисунок 3.1 - Алгоритм синтеза ПР конструкций БРЭА

Предлагаемая методика объединяет САД систему, программный комплекс (ПК) анализа теплового режима БРЭА, систему поддержки принятия решения (СППР) и лицо, принимающее решение (ЛПР).

Разработчик, с помощью САД системы, обеспечивает решение следующих задач [59,60,65]:

- формирование ПР в первом приближении, которое заключается в разработке 3D модели конструкции БРЭА для выбранного комплекта МВГ;
- расчёт теплового режима при естественном воздушном охлаждении (ЕВО) и формирование температурного поля БРЭА;
- определение критических СЧ, т.е. СЧ температура которых превышает допустимые значения;
- генерация вариантов СО и ПР БРЭА путём анализ параметров температурного поля БРЭА и СЧ;

Программный комплекс анализа теплового режима БРЭА реализует известные методики расчёта тепловых режимов ПР БРЭА [16,31,93]. Такой подход позволяет кратно сократить время формирования допустимых проектных решений (ДПР);

Допустимые проектные решения загружаются в СППР, где ЛПР анализирует полученные варианты для принятия окончательного решения. Если этих вариантов много, то в СППР предусмотрена программа ранжирования ДПР по комплексному критерию, сформированному на основе параметров, характеризующих ДПР и с учетом весовых коэффициентов, которые определяются ЛПР [80,95,111,121].

Для решения задачи оптимизации конструкторских проектных решений БРЭА и выбора предпочтительного варианта, необходимо определить их показатели качества [94,102].

Скалярные показатели качества конструкторских проектных решений БРЭА, такие как масса, потребляемая мощность, стоимость могут быть скорректированы с учётом аналогичных показателей системы охлаждения путем их суммирования:

$$m_k^U = m_k^S + m_k^V + m_k^H + m_k^K ;$$

Где  $m_k^U$  - масса  $k$ -го варианта ПР,  $m_k^S$  - масса комплекта МВГ,  $m_k^V$  - масса СО,  $m_k^H$  - масса кабельной сети,  $m_k^K$  - масса несущей конструкции;  
 $m_k \leq m_{\text{Доп}}$ .

$$P_k^U = P_k^S + P_k^V$$

Где  $P_k^U$  - потребляемая мощность  $k$ -го варианта ПР,  $P_k^S$  - потребляемая мощность комплекта МВГ,  $P_k^V$  - потребляемая мощность СО;  
 $P_k^U \leq P_{\text{Доп}}$ .

$$C_k^U = C_k^S + C_k^V + C_k^H + C_k^K$$

Где  $C_k^U$  - стоимость  $k$ -го варианта ПР,  $C_k^S$  - стоимость комплекта МВГ,  $C_k^V$  - стоимость СО,  $C_k^H$  - стоимость кабельной сети,  $C_k^K$  - стоимость несущей конструкции;  $C_k \leq C_{\text{Доп}}$

Исключение составляет эксплуатационная интенсивность отказов. Этот параметр может быть определён количественно при наличии зависимости:

$$\lambda_{ig}^{\text{Э}} = f(t_{ig})$$

Указанная зависимость для УМ СВЧ приведена на Рисунке 1.7. Если такая зависимость отсутствует, то этот показатель можно оценить через зависимость от перегрева. При этом можно получить только вероятностную оценку окрестности значений эксплуатационной интенсивности отказов. Этот метод основан на утверждении того, что все ЭРЭ, входящие в СЧ БРЭА имеют

положительную производную зависимости интенсивности отказов от температуры [99].

Эксплуатационная интенсивность отказов модулей определяется с учетом прогнозируемых температур их корпусов, а также данных от производителей модулей о базовой интенсивности отказов и температурном коэффициенте модуля. В информационных моделях СЧ БРЭА указываются значения максимально-допустимой температуры корпуса СЧ и значение интенсивности отказов при этой температуре.

При положительном перегреве СЧ  $\lambda_{ig}^{\ominus}$  будет увеличиваться, при отрицательном – уменьшаться. Поэтому лучшим вариантом СЧ будет вариант с максимальным отрицательным перегревом.

С другой стороны, каждая СЧ имеет различное значение интенсивности отказов и её вклад в соответствующий параметр БРЭА разный. Поэтому для оценки лучшего варианта предлагается использовать весовую свёртку перегревов:

$$\Delta t_i^{\Sigma} = \sum_{g=1}^h k_{ig} \times \Delta t_{ig}$$

$k_{ig}$  - коэффициент значимости влияния перегрева  $g$ -ой СЧ,

определяется как:  $k_{ig} = \frac{\lambda_{ig}}{\lambda_{ig \min}}$ .

Эксплуатационная интенсивность отказов модулей определяется с учетом прогнозируемых температур корпусов модулей, а также данных от производителей модулей о базовой интенсивности отказов и температурном коэффициенте модуля [12]:

$$\lambda_{igj}^{\ominus} = \lambda_{igj}^B \times K_{igj} \times \prod_{v=1}^z K_{ig}^v;$$

где  $\lambda_{igj}^B$  - базовая интенсивность отказов модуля;  $K_{igj}$  - коэффициент режима, учитывающий изменение  $\lambda_{igj}^B$  в зависимости от температуры;  $K_{ig}^v$  -

коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов;  $z$  - число учитывающих факторов. Значения коэффициентов  $K_{ig}^v$  для одного типа модулей, как правило, одинаковые и определяются из справочников [84,90].

Эксплуатационная интенсивность отказов модулей  $\lambda_{ig}^{\text{ЭМ}}$  с учетом СО определяется суммой:

$$\lambda_{igj}^{\text{ЭМС}} = \lambda_{ig}^{\text{ЭМ}} + \lambda_{igj}^{\text{ЭВ}},$$

где  $\lambda_{ig}^{\text{ЭМ}}$  - эксплуатационная интенсивность отказов модуля  $m_{ig} \in M_i$ ;  $\lambda_{igj}^{\text{ЭВ}}$  - эксплуатационная интенсивность отказов системы охлаждения  $v_{ij} \in V_i$ .

Суммарная эксплуатационная интенсивность отказов каждого варианта  $u_{ik} \in U_i$  определяется как сумма интенсивностей отказов модулей:

$$\lambda_{ik}^U = \sum_{g=1}^h \lambda_{igj}^{\text{ЭМС}}$$

Аналогичным образом получаем значения  $\lambda_{ik}^U$  для всех проектных решений, входящих в множество  $U$ .

Допустимыми проектными решениями (ДПР) БРЭА -  $U_{\text{доп}} \subseteq U$  являются такие ПР, которые удовлетворяют всем ограничениям ТЗ:  $m_k \leq m_{\text{доп}}; P_k \leq P_{\text{доп}}; C_k \leq C_{\text{доп}}; T_k \leq T_{\text{доп}}; \lambda_k \leq \lambda_{\text{доп}}$ ; где  $m_k$  - масса;  $P_k$  - потребляемая мощность;  $\lambda_k$  - интенсивность отказов;  $C_k$  - стоимость;  $T_k$  - время разработки  $k$ -го варианта ПР БРЭА.

### 3.2. Параметрический синтез и сравнительный анализ допустимых систем охлаждения теплонагруженных модулей проектных решений БРЭА

Предлагаемая расчётно-экспериментальная методика основывается на системном подходе и учитывает следующие особенности построения БРЭА:

- «латентность конструкции их СЧ, которые обычно разрабатываются смежными организациями и разработчику БРЭА неизвестна их конструкция. Поэтому, при решении задач моделирования тепловых режимов, границей раздела ответственности разработчика СЧ и разработчика БРЭА является температура поверхности корпусов, которая определяется по результатам либо теплового моделирования разработчиком СЧ, либо испытаний. Поэтому можно считать, что значения допустимой температуры каждой СЧ для стационарного теплового режима  $\{t_{доп}\}$ , известны» [92];
- применение систем принудительного воздушного охлаждения (ПВО);
- существенная неравномерность распределения температурного поля конструкции БРЭА, что обуславливает возможность применения удалённых радиаторов;

Для решения задачи анализа теплообмена в конструкциях БРЭА используются различные тепловые макромодели [16,65,93]. В данном случае рассматривается система ПВО, где теплообмен, осуществляется между внешними поверхностями корпусов СЧ БРЭА и охлаждающим воздухом (ОВ). Поэтому, адаптированную к расчёту теплового режима, конструкцию БРЭА можно представить в виде системы воздушных каналов, образованных внешними поверхностями корпусов СЧ БРЭА.

Температура нагретой зоны составной части БРЭА складывается из температуры окружающей среды, температуры нагрева внутренних элементов, входящих в СЧ и температуры, передаваемой от других нагретых СЧ.

В этом случае можно предположить, что стационарная температура конструкции БРЭА устанавливается путем теплообмена между изотермическими поверхностями составных частей БРЭА.

Макромодель теплового режима конструкции БРЭА можно представить либо в виде тепловой схемы, либо в виде матрицы термических проводимостей между ИП СЧ БРЭА и ОВ.

Формирование тепловой макромодели рассмотрим на примере радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС. Исходными данными являются потребляемая тепловая мощность составными частями РЧМ и допустимая температура СЧ (см. Таблицу 3.1).

Таблица 3.1 – Потребляемая тепловая мощность составными частями РЧМ

№ п/п	Наименование СЧ	$P_{в}$ , Вт	$t_{идоп}$ , °С
1	Усилитель мощности СВЧ	P1	$t_{1доп}$
2	Синтезатор частот (СЧ)	P2	$t_{2доп}$
3	Задающий генератор (ЗГ)	P3	$t_{3доп}$
4	БЦВМ	P4	$t_{4доп}$

Методику синтеза допустимых систем охлаждения теплонагруженных модулей можно представить в виде следующей последовательности основных этапов.

На первом этапе выполняется анализ температурного поля тепловой макромодели БРЛС. Как уже отмечалось выше распределение значений температуры поверхности СЧ имеет существенный разброс. Поэтому на СЧ БРЭА необходимо выделить изотермические поверхности (ИП).

«Для каждой поверхности  $g$ -ой СЧ БРЛС с использованием матрицы температуры  $\{t_{ij}\}$ , формируются ИП  $\{\prod_{ij}\}$ . Из матрицы температур выбирается максимальное значение  $(t_{\max}, j=1)$ . При этом одна ИП объединяет все значения температур, которые меньше максимального на  $f\%$  (значение выбирается в соответствии с требуемой точностью формирования макромодели). Затем выбирается следующая максимальная температура  $(j = j+1)$ , которая меньше  $t_{\max j}$  более, чем на  $f\%$ » [92]. Рассмотрим пример формирования тепловой макромодели радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС, отображенный на Рисунке 3.2.

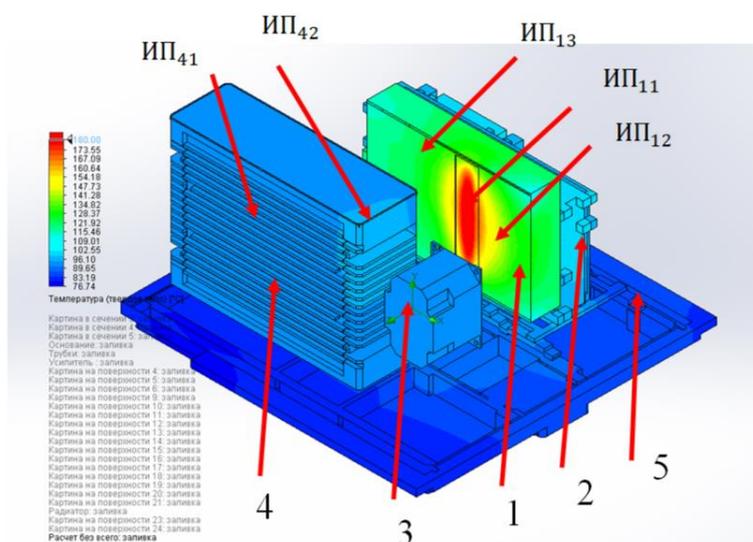


Рисунок 3.2 - Температурное поле поверхностей СЧ радиочастотного модуля БРЛС при естественном воздушном охлаждении, где: 1- усилитель мощности СВЧ, 2- синтезатор частот (СЧ), 3- задающий генератор, 4- БЦВМ 5 – несущее основание

На первом этапе определяются *ИП* и формируется тепловая схема РЧМ.

Тепловая схема РЧМ представлена на Рисунке 3.3.

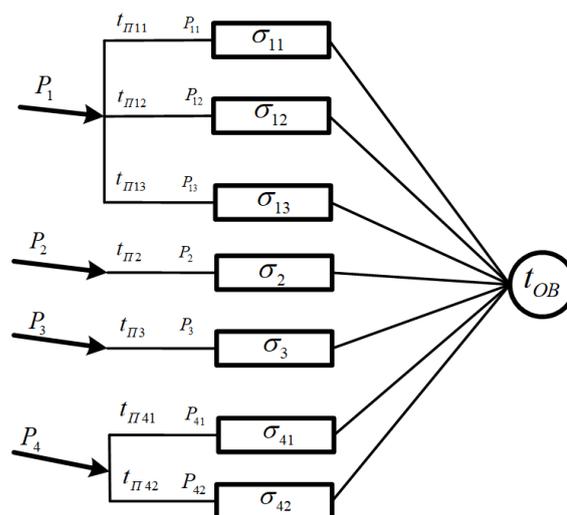


Рисунок 3.3 - Тепловая макро модель РЧМ БРЛС

Экспериментально определяем значения тепловых проводимостей  $\sigma_{ij}$  и далее находим значения тепловых потоков  $P_{ij}$ . Самым теплонагруженным блоком является УМ СВЧ. Рассмотрим методику синтеза допустимого ПР на его примере.

На втором этапе выполняется генерация вариантов ПР. Анализ тепловой макро модели РЧМ позволяет сформировать, как минимум, следующие варианты ПР:

1. Система ПВО с радиатором на ИП<sub>11</sub>, ИП<sub>12</sub> УМ СВЧ.
2. Система ПВО с удалённым радиатором, в качестве которого используется несущее основание 5.
3. Система ПВО с удалённым радиатором (основание 5), обдуваемым вентилятором.
4. Прочие варианты СО.

На третьем этапе выполняется расчёт теплового режима. Проверка выполнения ограничений ТЗ

Существуют различные методики оценки теплоотдачи радиаторов [16,32,65]. Применим методику, изложенную в [16].

Вариант 1. Исходными данными для решения задачи синтеза, взятыми из модели РЧМ и результатов расчёта теплового режима, являются значения площадей и тепловых потоков изотермических поверхностей с максимальной температурой  $ИП_{11}, ИП_{12}$ , размеры канала между основанием УМ СВЧ и БЦВМ  $(b, l)$ , аэродинамическое сопротивление конструкции РЧМ [3,4,23,81,88].

Представим процесс синтеза в виде алгоритма:

1. По исходным данным выбираем площадь основания радиатора равную площадям  $ИП_{11}, ИП_{12}$  а длину штырей  $-b$ , выбираем тип радиатора (например, штыревой).
2. Задаёмся формой штыря и шагом его установки. Определяем число штырей  $(n_{ш})$ , формируем модель штыревого радиатора [31,73].
3. Определяем необходимую теплоотдачу штыревого радиатора  $(P_{рад})$ :

$$P_{рад} > (P_{11} + P_{12})$$

4. Определяем необходимую теплоотдачу одного штыря радиатора:

$$P_{ш} = \frac{P_{рад}}{n_{ш}}$$

5. Определяем коэффициент теплоотдачи штыря:

$$\alpha = \frac{P_{ш}^2}{(1,14\Theta th(Xh))^2 \times US \lambda_p} \left( \frac{Bm}{m^2 \times ^\circ C} \right),$$

где  $\lambda_p$  - коэффициент теплопроводности материала радиатора,

$\Theta$  - температурный напор между основанием штыря и окружающей

средой  $\Theta = t_{ог} - \frac{t_{ог} - 10}{2}$

$U$  - периметр поперечного сечения штыря,

$S$  - площадь поперечного сечения штыря,

$X = 3,7$  - поправочный коэффициент

$h$  – высота штыря ( $h \leq b$ ).

6. Определяем скорость ОБ, обеспечивающую требуемую теплоотдачу штыря:

$$V = \left( \frac{\alpha \times d_{\text{э}}^{0,42}}{K} \right)^{1,72},$$

где  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр штыря радиатора,

$K$  – коэффициент, учитывающий свойства окружающей среды:

$$K = \rho_0 \times t_m + 1,41 \left[ \frac{Bm}{m^4 * C^4} \right]$$

$$\rho_0 = -1,8 \times 10^{-3} \left[ \frac{1}{C} \right]$$

$t_m$  – средняя температура между радиатором и ОБ.

7. Определяем требуемый расход ОБ:  $W = V \times D_{\text{э}}$ ,

где  $D_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр канала,  $D_{\text{э}} = \frac{2(b \times l)}{b + l}$ .

8. Корректируем 3D модель РЧМ с учётом установки на основании СВЧ усилителя радиатора.
9. Выбираем вентилятор, статическое давление которого превышает аэродинамическое сопротивление РЧМ а расход ОБ не менее расхода, определённого в п.7.
10. Если подходящего вентилятора нет, необходимо изменить исходные данные, например, увеличить площадь радиатора. При этом необходимо учесть снижение теплоотдачи периферийных штырей, которое может составлять (40-50)%.
11. Фиксируем параметры выбранного вентилятора: потребляемую мощность, массу, стоимость. Корректируем параметры ПР БРЭА.
12. Проверяем выполнения ограничения (1). Если это ограничения выполнено, данный вариант ПР является допустимым.

Вариант 2. Анализ температурного поля РЧМ, представленного на Рисунке 3.2 показывает, что несущее основание конструкции может быть использовано в качестве удалённого радиатора, поскольку его температура существенно ниже температуры УМ СВЧ. Перенос теплового потока с основания УМ СВЧ на несущее основание может быть обеспечено контурными тепловыми трубами (КТТ), которые имеют низкое значение термического сопротивления [60,114,119,123,124].

Тепловая схема СО с удалённым радиатором представлена на Рисунке 3.4.

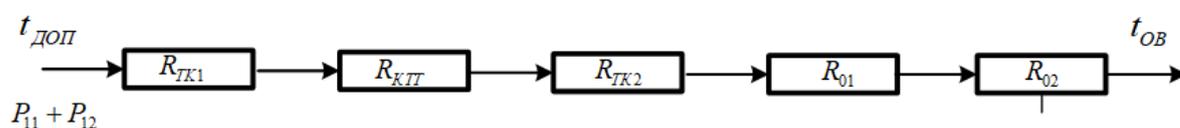


Рисунок 3.4 - Тепловая схема СО с удалённым радиатором

где  $R_{TK1}$ ,  $R_{КТТ}$ ,  $R_{TK2}$ ,  $R_{O1}$ ,  $R_{O2}$  – термические сопротивления теплового контакта УМ СВЧ и термоинтерфейса испарителя КТТ, теплового контакта термоинтерфейса конденсатора КТТ и основания РЧМ, теплопроводности основания РЧМ, теплоотдачи основания РЧМ [6,27,34,45,84].

Исходные данные: площади ИП<sub>11</sub>, ИП<sub>12</sub> ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ) значения тепловых потоков -  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ , значения допустимой температуры УМ СВЧ -  $t_{доп}$  и охлаждающего воздуха  $t_{ОВ}$ , 3D модель конструкции РЧМ.

Представим процесс синтеза в виде алгоритма:

1. По исходным данным определяем требуемое, для обеспечения нормального теплового режима, значение термического сопротивления системы ПВО с удалённым радиатором (основанием РЧМ):

$$R_{TP} < \frac{t_{доп} - t_{ОВ}}{P_{11} + P_{12}}.$$

2. Исходя из значений  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  и свободной площади основания, определяем количество КТТ, которое можно разместить в конструкции -  $n_{КТТ}$  [53].

3. По данным [59,60] определяем тепловую проводимость КТТ.
4. Выбираем термопасту и определяем значения термического сопротивления контактов интерфейсов КТТ с УМ СВЧ и несущим основанием  $R_{TK1}, R_{TK2}$ .
5. Корректируем 3D модель РЧМ с учётом размещения КТТ.
6. Определяем термическое сопротивление удалённого радиатора при ЕВО -  $R_{O1}$ .
7. Находим термическое сопротивление СО ( $R_{CO}$ ), которое определяется КТТ и удалённым радиатором. Например, при размере несущего основания 400x400мм  $R_{O1} \approx 0,01 \text{Вт} \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ ,  $R_{O2} \approx 0,33 \text{Вт} \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$  (при ЕВО),  $R_{TK} \approx (10^{-2} - 10^{-3}) \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ ,  $R_{КТТ} \approx 0,15 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$  (для одной КТТ);  $R_{CO} \approx R_{O2} + \frac{R_{КТТ}}{n_{КТТ}}$ .
8. Проверяем выполнение условия  $R_{CO} < R_{ТР}$ . Если условие не выполняется необходимо снизить значение  $R_O$  путём его обдува ОВ.
9. Определяем минимальное значение тепловой проводимости удалённого радиатора:  $R_{O2,мин} < R_{ТР} - \frac{R_{КТТ}}{n_{КТТ}}$ . Система охлаждения БРЭА с удалённым радиатором показана на Рисунке 3.5.

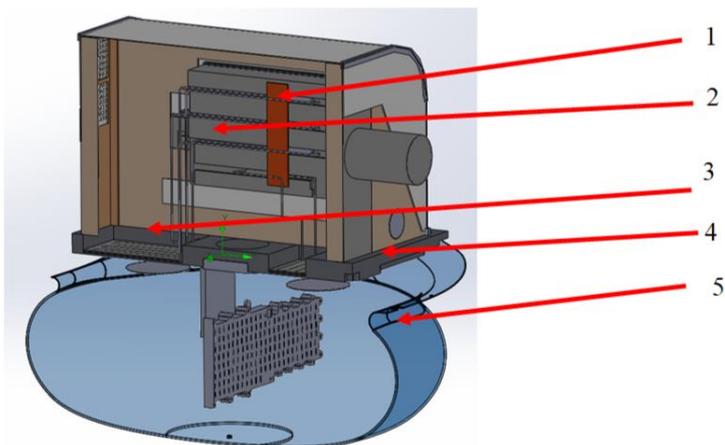


Рисунок 3.5 - Система охлаждения БРЭА с удалённым радиатором, где:

испаритель КТТ, 2 – КТТ, 3 – конденсатор КТТ, 4- несущее основание (радиатор), 5 – радиопрозрачный обтекатель (РПО)

10. Определяем минимальное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_{O_{\min}} = \frac{1}{R_{O2_{\min}} \times S_O}$$

11. Определяем минимальное значение критерия Нуссельта ОВ:

$$Nu_{\min} = \frac{\alpha_{O_{\min}} \times l}{\lambda},$$

где  $\lambda$ - коэффициент теплопроводности ОВ ( $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}^\circ$ );  $k$  – определяющий размер удалённого радиатора.

12. Определяем минимальное значение критерия Рейнольдса для случая турбулентного движения ОВ:

$$Re_{\min} \approx \left( \frac{Nu_{\min}}{0,032} \right)^{1,25}$$

13. Определяем минимальное значение скорости ОВ, обеспечивающее  $Re_{\min}$ :

$$v_{\min} = \frac{Re_{\min} \times a}{l},$$

Где  $a$  - коэффициент температуропроводности ОВ ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

14. Определяем требуемый расход ОВ, обеспечивающий  $v_{\min}$ .

15. Выбираем вентилятор. Фиксируем параметры выбранного вентилятора: потребляемую мощность, массу, стоимость. Корректируем параметры ПР БРЭА.

16. Определяем значение термического сопротивления теплоотдачи основания РЧМ при расходе воздуха выбранного вентилятора.

17. Проверяем выполнения ограничения (1). Если это ограничения выполнено, данный вариант ПР является допустимым.

Рассмотренная выше расчётно-экспериментальная методика позволяет на ранних этапах проектирования оценить параметры надёжности БРЭА с учётом реальных значений температур СЧ БРЭА.

### **3.3. Синтез и ранжирование допустимых вариантов проектных решений БРЭА**

Как было рассмотрено в разделе 1.2. основной задачей ранних этапов проектирования является сравнительный анализ и выбор предпочтительного варианта конструкции БРЭА. В параграфах 3.1 и 3.2 было показано, что возможность использования большого числа допустимых альтернативных комплектов модулей, входящих в конструктивный базис, а также различные варианты систем охлаждения (СО), обеспечивающие отвод тепла от теплонагруженных модулей порождает множество вариантов конструкторских проектных решений БРЭА, отличающихся по надёжности, конструкторским, эксплуатационным и экономическим параметрам. В связи с этим возникает необходимость выбора из допустимых вариантов ПР варианта, который наилучшим образом отвечал бы заданным требованиям или, иными словами, принятие проектного решения, что в свою очередь требует реализовать синтез ПР и их ранжирование по эффективности. Критерий выбора эффективного варианта был определен в параграфе 1.4 .

Синтез и ранжирование альтернативных вариантов конструкторских проектных решений БРЭА требует обработки большого объема многомерных данных. Для этих целей целесообразно использовать тензоры, которые позволяют представлять многомерные данные и манипулировать ими, а также дают возможность сократить время обработки информации [46,49,50,86]. При этом, использование языка программирования Python и дополнительной

библиотеки NumPy значительно сокращают трудозатраты на реализацию операций с тензорами [30,116,129,131].

В этом случае множество конструкторских проектных решений  $U_i \in U$ , включающих в себя комплект модулей  $S_i$  и множество альтернативных вариантов ПВО -  $V$ , может быть отображено тензором первого ранга  $\left[ {}^{(1)}T_m \{U_{im}\} \right] = \vec{V}_m$ , который приведен на Рисунке 3.6.

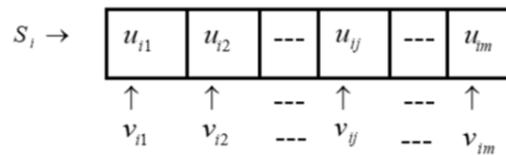


Рисунок 3.6 - Тензор 1 – тензор первого ранга  $\left[ {}^{(1)}T_m \{U_{im}\} \right] = \vec{V}_m$

На основании тензора 1 формируется тензор  $\left[ {}^{(1)}T_{il} \{U(W_{il}^p)\} \right] = \vec{V}_l$ , отображающий параметр  $w_{ik}^p \mid w_{ik}^p \in W_i^p$ , характеризующий  $\forall u_{ik} \in U$  (см. Рисунок 3.7)

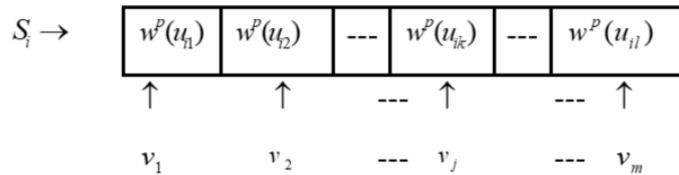


Рисунок 3.7 - Тензор 2 – тензор первого ранга  $\left[ {}^{(1)}T_{im} \{U(W_{im}^p)\} \right] = \vec{V}_m$

Аналогичным образом отображается значение  $\forall w_{ij}^p \in W^p$  конструкторских проектных решений БРЭА для всего множества комплектов модулей, входящих в множество  $S$ . В этом случае используется транспонированный вектор  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ . Для объединения двух векторов в матрицу используется метод `NumPy.concatenate` [40,97]. Так как число элементов в векторе может динамически меняться и иметь разное количество проектных решений, то с помощью функции `numpy.linalg.norm` вычисляется длина всех векторов. Вектор с максимальной длиной элементов в строке берется за основу формируемой матрицы. Количество строк в новой матрице совпадает с количеством комплектов, входящих в множество  $S$ .

Таким образом, получаем тензор 2 - тензор второго ранга значений параметров  $w_{ik}^p \in W^p$ , характеризующих множество проектных решений  $U$ ,  $[(2)T\{W^p(U_{ln})\}] = \vec{V}_l \& \vec{S}_n$ . На Рисунке 3.8 приведен тензор 3, отображенный в виде матрицы значений параметров  $w_{ik}^p | w_{ik}^p \in W^p$  для всех проектных решений, входящих в множество  $U$ . Количество проектных решений в тензоре 3 определяется произведением  $n \times m$ ; где  $n$  - число вариантов комплектов МВГ,  $m$  - число альтернативных систем ПВО.

$S_1 \rightarrow$	$w^p(u_{11})$	$w^p(u_{12})$	---		$w^p(u_{1k})$	---	$w^p(u_{1j})$
$S_2 \rightarrow$	$w^p(u_{21})$	$w^p(u_{22})$	---		$w^p(u_{2k})$	---	$w^p(u_{2j})$
---	---	---	---		---	---	---
$S_i \rightarrow$	$w^p(u_{i1})$	$w^p(u_{i2})$	---		$w^p(u_{ik})$	---	$w^p(u_{ij})$
---	---	---	---		---	---	---
$S_n \rightarrow$	$w^p(u_{n1})$	$w^p(u_{n2})$	---		$w^p(u_{nk})$	---	$w^p(u_{nj})$
	↑	↑	---		↑	--	↑
	$v_1$	$v_2$	---		$v_j$	--	$v_m$

Рисунок 3.8 - Тензор 3 - тензор второго ранга  $[(2)T\{W^p(U_{ln})\}] = \vec{V}_l \& \vec{S}_n$

Для сравнительной оценки конкурирующих вариантов ПР по всем параметрам, характеризующих  $\forall u_{ik} \in U$ , на основании тензора 3 формируется тензор 4 - тензор третьего ранга  $[(3)T\{W(U_{lnr})\}] = (\vec{V}_l \& \vec{S}_n \& \vec{W}_r)$ , где  $\vec{W}_r$  - вектор параметров, которыми характеризуется  $\forall u_{ik} \in U$ . В параграфе 1.4 было отмечено, что основными параметрами ПР конструкций БРЭА являются: эксплуатационную интенсивность отказов -  $\lambda$ , масса -  $m$ , потребляемая мощность -  $P$ , стоимость -  $C$ , рабочая температура -  $t_p$ , временные затраты на проектирование -  $T$ . В этом случае, тензор третьего ранга примет вид, показанный на Рисунке 3.9:

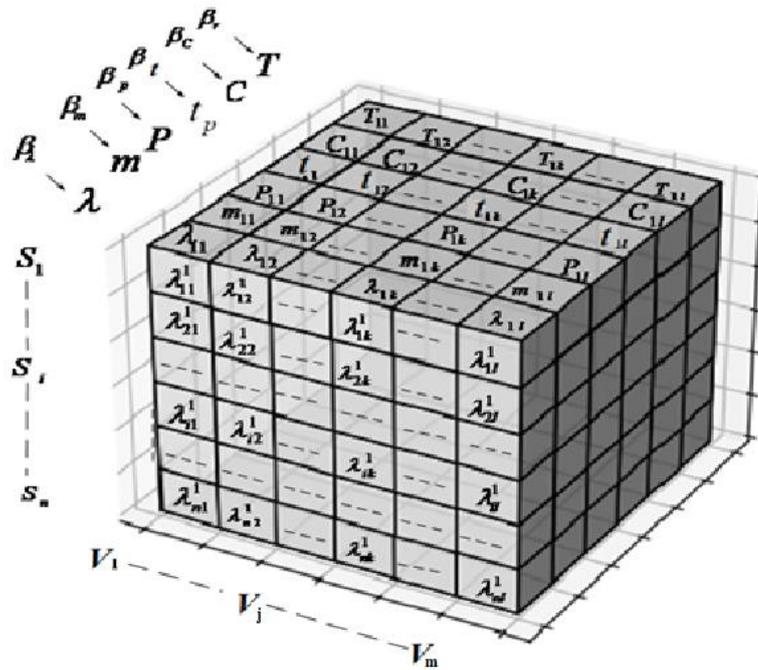


Рисунок 3.9 - Тензор 4 - тензор третьего ранга  $[(^{(3)}T_{lnr})] = (\bar{U}_l \& \bar{S}_n \& \bar{W}_r)$ .

Данный тензор включает в себя все сформированные ПР БРЛС, а также значения параметров, характеризующих эти ПР.

Задача определения эффективности  $\forall u_{ik} \in U$  является многокритериальной и, как было показано в параграфе 1.4, для ее решения требуется свертка критериев.

Вообще говоря, существует большое количество методов свертывания, основанных на использовании условного критерия предпочтения. Однако, на практике, наибольшее распространение получили следующие [8,70,82,107,108,117]:

- метод, основанный на переводе всех показателей качества, кроме одного, в разряд ограничений;
- метод последовательных уступок;
- минимаксный метод;
- метод комплексного критерия оптимальности;

Каждый из указанных выше методов имеет свои достоинства и недостатки. Анализ указанных методов, проведенный в работе [74] показал, что первые три метода требуют выделения основного параметра. При

оптимизации по техническим показателям качества это, как правило, не представляется возможным. В тоже время, имеющиеся априорные сведения относительно важности различных показателей качества о назначении БРЭА позволяют эффективно применить метод комплексного критерия или метод анализа иерархий. Данный метод основан на введении весовых коэффициентов каждого параметра и оценки комбинированного показателя качества БРЭА. К недостаткам метода комплексного критерия можно отнести необходимость для ЛПР определения точного значения весовых коэффициентов параметров БРЭА, что не всегда представляется возможным на ранних этапах проектирования.

В том случае, если не представляется возможным с достаточной точностью определить весовые коэффициенты параметров, для выбора эффективного варианта ПР может быть использован «метод анализа иерархий (МАИ)», который в последнее время находит широкое применение. [87,100,101].

Рассмотрим применение каждого из этих методов для классификации и ранжирования ПР БРЛС по трем основным параметрам, характеризующих ПР БРЛС:  $\lambda_K$ ,  $P_K$ ,  $m_K$ .

Метод комплексного критерия.

В этом случае, с учетом выражений 1.5, 1.6, 1.7 комплексный критерий будет определяться как:

$$R(u_k) = \beta_\lambda \bar{\lambda}(u_k) + \beta_P \bar{P}(u_k) + \beta_m \bar{m}(u_k) \mid \sum_{p=1}^r \beta_p = 1; 0 < \beta_p \leq 1 \quad (3.1)$$

а эффективность ПР БРЛС :

$$\mathcal{E}(u_k) = \frac{1}{R(u_k)} \quad (3.2)$$

при условии:  $\lambda_K \leq \lambda_{\text{ДОП}}; P_K \leq P_{\text{ДОП}}; m_K \leq m_{\text{ДОП}}$

В результате ранжирования определяется наиболее эффективный вариант ПР БРЛС:

$$\mathcal{E}(u_k^{\exists\Phi}) = \arg \min_{\substack{m_k \leq m_{\text{ДОП}} \\ P_k \leq P_{\text{ДОП}} \\ \lambda_k \leq \lambda_{\text{ДОП}}} R_k(\lambda_k, P_k, m_k)$$

Алгоритм определения комплексного показателя  $R$  для  $\forall u_{ij} \in U$  включает в себя следующую последовательность действий:

а) Определение в каждой матрице тензора 3  $[(^{(2)}T_{\ln r})] = (\overline{U}_l \& \overline{S}_n)$ ,

входящего в тензор 4  $[(^{(3)}T_{\ln r})] = (\overline{U}_l \& \overline{M}_n \& \overline{W}_r)$  значения параметра

$w_{ik}^{*p} = \max_{ik} w_{ik}^p : w_{ik}^p \in W^p$ , которое реализуется с помощью

математической функции 'max()', входящей в библиотеку NumPy, дополнения к языку Python;

б) Вычисление нормированных значений параметров  $\overline{\forall w_{ik}^p} \in W^p$ , входящих в состав тензора 3;

с) Умножение нормированного значения  $\overline{\forall w_{ik}^p} \in W^p$  на скалярное значение весового коэффициента  $\beta_p$  во всех элементах тензора 3;

д) Повторение действий а), в), с) для всех тензоров второго порядка  $[T_{\ln r}] = (\overline{U}_l \& \overline{S}_n)$ , входящих в тензор третьего порядка  $[(^{(3)}T_{\ln r})] = (\overline{U}_l \& \overline{S}_n \& \overline{W}_r)$  и определение всех нормированных значений параметров, входящих в вектор параметров  $W^p$ ;

е) Аналогичным образом отображается значение  $\overline{\forall w_{ik}^p} \in W^p$  конструкторских проектных решений БРЭА для всего множества комплектов  $S$ ;

Суммирование значений полученных произведений согласно выражению

3.1 и определение значений комплексного критерия  $R_{ij}$  для  $\forall u_{ij} \in U$ . В результате получаем тензор второго порядка отображающий значения комплексного критерия  $R$  для всего множества проектных решений  $U$ , показанный на Рисунке 3.10:

f)

$S_1$	→	$R_{11}$	$R_{12}$	---	$R_{1k}$	---	$R_{1l}$
$S_2$	→	$R_{21}$	$R_{22}$	---	$R_{2k}$	---	$R_{2l}$
---	---						
$S_i$	→	$R_{i1}$	$R_{i2}$	---	$R_{ik}$	---	$R_{il}$
---	---						
$S_n$	→	$R_{n1}$	$R_{n2}$	---	$R_{nk}$	---	$R_{nl}$
		↑	↑	---	↑	---	↑
		$v_1$	$v_2$	---	$v_j$	---	$v_m$

Рисунок 3.10 - Тензор 4 – тензор второго порядка  $\left[ {}^{(2)}T_{lnr} \right] = (\vec{U}_l \ \& \ \vec{S}_n)$ , отображающий значения комплексного критерия  $R$  для всего множества проектных решений  $U$

На основании тензора 4, путем поэлементного вычисления значений  $\mathcal{E}_k$  в соответствии с формулой (3.2), формируется тензор 5 значений эффективностей проектных решений, который отображается матрицей, представленной на Рисунке 3.11:

$S_1$	→	$\mathcal{E}_{11}$	$\mathcal{E}_{12}$	---	$\mathcal{E}_{1k}$	---	$\mathcal{E}_{1l}$
$S_2$	→	$\mathcal{E}_{21}$	$\mathcal{E}_{22}$	---	$\mathcal{E}_{2k}$	---	$\mathcal{E}_{2l}$
---	---	---	---	---	---	---	---
$S_i$	→	$\mathcal{E}_{i1}$	$\mathcal{E}_{i2}$	---	$\mathcal{E}_{ik}$	---	$\mathcal{E}_{il}$
---	---	---	---	---	---	---	---
$S_n$	→	$\mathcal{E}_{n1}$	$\mathcal{E}_{n2}$	---	$\mathcal{E}_{nk}$	---	$\mathcal{E}_{nl}$
		↑	↑	---	↑	---	↑
		$v_1$	$v_2$	---	$v_j$	---	$v_m$

Рисунок 3.11 - Матрица значений эффективностей проектных решений, отображающая тензор 5

Ранжирование матрицы значений эффективностей выполняется по всей матрице, с понижением ранга до вектора [5,64].

В результате формируется вектор ранжированных значений:

$$\mathcal{E}(t) = \langle \mathcal{E}_1(t), \dots, \mathcal{E}_e(t), \dots, \mathcal{E}_f(t) \rangle;$$

где  $e = \overline{1, f}$ ;  $f$  - общее число значений в ранжированном векторе; В данном векторе любые два соседних компонента связаны соотношением:  $\mathcal{E}_e(t) \prec \mathcal{E}_{e+1}(t)$ .

Ранжированные варианты анализируются лицом, принимающим решение (ЛПР), либо при наличии у разработчика системы поддержки принятия решений (СППР) передаются в систему, где анализируются ЛПР [127].

Таким образом, рассмотренная выше методика позволяет на ранних этапах проектирования оценить эффективность конструкторских проектных решений БРЭА, и выбрать наиболее эффективный вариант.

Метод анализа иерархий.

Данный метод основан на парных сравнениях альтернативных вариантов по различным критериям с использованием девятибалльной шкалы и позволяет выбрать наиболее эффективный вариант ПР. К достоинствам метода относится то, что он позволяет исключить необходимость установления точного значения весовых коэффициентов параметров. Недостатком данного метода можно считать ограничения на количество одновременно сравниваемых альтернатив – от 5 до 9 [87,101,112,126]. В связи с этим, возникает необходимость в предварительной кластеризации вариантов ПР, используя нейронную сеть «Кохонена», описание которой приведено в приложении В [48].

Применительно к решению задачи выбора из допустимых вариантов ПР варианта, который наилучшим образом отвечал бы заданным требованиям, данный метод включает следующую последовательность действий.

1. Определение основных критериев и альтернатив. В качестве выбираемых альтернатив применяется множество допустимых

альтернативных ПР:  $U = \{U_1, \dots, U_k, \dots, U_l\}$ , а в качестве критериев – вектор критериев  $W(u_k) = \langle W_k^1, \dots, W_k^p, \dots, W_k^r \rangle$ , которыми характеризуются альтернативные ПР; где  $p = \overline{1, r}$ ;  $r$  – общее число критериев, которыми характеризуется  $\forall u_k \in U$ .

2. Построение иерархического дерева с уровнями иерархии: эффективное ПР, вектор критериев, альтернативные ПР. Иерархическая структура задачи выбора эффективного варианта ПР показана на Рисунок 3.12

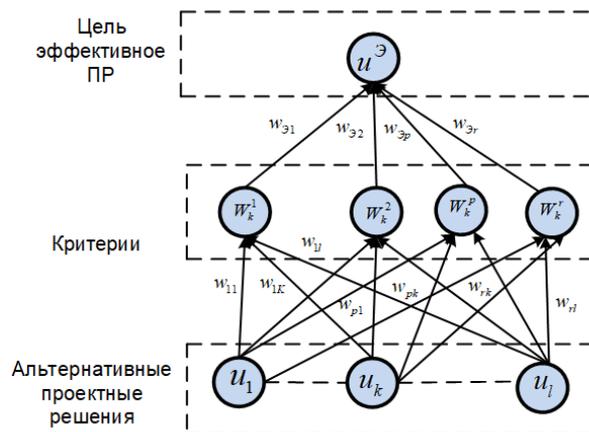


Рисунок 3.12 - Иерархическая структура задачи выбора эффективного варианта ПР

В данном графе множество альтернативных ПР  $U = \{U_1, \dots, U_k, \dots, U_l\}$  характеризуется относительными весовыми коэффициентами  $w_{11}, w_{1k}, w_{1l}$ , а вектор критериев  $W(u_k) = \langle W_k^1, \dots, W_k^p, \dots, W_k^r \rangle$  – относительными весовыми коэффициентами  $w_{Э1}, w_{Э2}, w_{Эp}, w_{Эr}$ .

3. Построение матрицы попарных сравнений альтернатив по критериям показаны на Рисунке 3.13.

	$W_k^1$	$W_k^2$	-----	$W_k^p$	$W_k^r$
$W_k^1$	$\frac{w_{\partial 1}}{w_{\partial 1}} = 1$	$\frac{w_{\partial 1}}{w_{\partial 2}}$		$\frac{w_{\partial 1}}{w_{\partial p}}$	$\frac{w_{\partial 1}}{w_{\partial r}}$
$W_k^2$	$\frac{w_{\partial 2}}{w_{\partial 1}}$	$\frac{w_{\partial 2}}{w_{\partial 2}} = 1$		$\frac{w_{\partial 2}}{w_{\partial p}}$	$\frac{w_{\partial 2}}{w_{\partial r}}$
-----					
$W_k^p$	$\frac{w_{\partial p}}{w_{\partial 1}}$	$\frac{w_{\partial p}}{w_{\partial 2}}$		$\frac{w_{\partial p}}{w_{\partial p}} = 1$	$\frac{w_{\partial p}}{w_{\partial r}}$
$W_k^r$	$\frac{w_{\partial r}}{w_{\partial 1}}$	$\frac{w_{\partial r}}{w_{\partial 2}}$		$\frac{w_{\partial r}}{w_{\partial p}}$	$\frac{w_{\partial r}}{w_{\partial r}} = 1$

Рисунок 3.13 - Матрица попарных сравнений критериев  $W_k^1 \dots W_k^r$

4. Построение матрицы попарных сравнений альтернативных ПР по каждому критерию.

Пример попарных сравнений альтернативных ПР по критерию:  $W_k^1$  показан на Рисунке 3.14:

$W_k^1$	$u_1$	$u_k$	-----	$u_l$
$u_1$	$\frac{w_{11}}{w_{11}} = 1$	$\frac{w_{11}}{w_{1k}}$		$\frac{w_{11}}{w_{1l}}$
$u_k$	$\frac{w_{1k}}{w_{11}}$	$\frac{w_{1k}}{w_{1k}} = 1$		$\frac{w_{1k}}{w_{1l}}$
-----				
$u_l$	$\frac{w_{1l}}{w_{11}}$	$\frac{w_{1l}}{w_{1k}}$		$\frac{w_{1l}}{w_{1l}} = 1$

Рисунок 3.14 - Пример попарных сравнений альтернативных ПР по критерию:  $W_k^1$ .

Выполняется исходно попарное сравнение по качественной шкале, с последующим преобразованием в весовые коэффициенты всех критериев.

Используется диапазон со значениями от 1 до 9; где 9 – очень сильное влияние, 3- есть влияние, 1 – равно и др. Необходимо, чтобы ЛПР при проставлении весовых коэффициентов учитывал относительную степень

влияния, например, если 1-й критерий, например, интенсивность отказов имеет весовой коэффициент 6, а второй, например, масса – 3, следовательно ЛПР предполагает, что 1-й фактор имеет влияние в 2 раза сильнее, чем второй. Аналогичная методика выполняется при присваивании степени влияния альтернативных ПР. Реализация данной методики на примере параметра  $W_k^1$  показаны на Рисунке 3.15.

	$W_k^1$	$W_k^2$	-----	$W_k^p$	$W_k^r$
$W_k^1$	$\frac{w_{\mathcal{E}1}}{w_{\mathcal{E}1}} = 1$	$\frac{w_{\mathcal{E}1}}{w_{\mathcal{E}2}}$		$\frac{w_{\mathcal{E}1}}{w_{\mathcal{E}p}}$	$\frac{w_{\mathcal{E}1}}{w_{\mathcal{E}r}}$
$W_k^2$	$\frac{w_{\mathcal{E}2}}{w_{\mathcal{E}1}}$	$\frac{w_{\mathcal{E}2}}{w_{\mathcal{E}2}} = 1$		$\frac{w_{\mathcal{E}2}}{w_{\mathcal{E}p}}$	$\frac{w_{\mathcal{E}2}}{w_{\mathcal{E}r}}$
-----					
$W_k^p$	$\frac{w_{\mathcal{E}p}}{w_{\mathcal{E}1}}$	$\frac{w_{\mathcal{E}p}}{w_{\mathcal{E}2}}$		$\frac{w_{\mathcal{E}p}}{w_{\mathcal{E}p}} = 1$	$\frac{w_{\mathcal{E}p}}{w_{\mathcal{E}r}}$
$W_k^r$	$\frac{w_{\mathcal{E}r}}{w_{\mathcal{E}1}}$	$\frac{w_{\mathcal{E}r}}{w_{\mathcal{E}2}}$		$\frac{w_{\mathcal{E}r}}{w_{\mathcal{E}p}}$	$\frac{w_{\mathcal{E}r}}{w_{\mathcal{E}r}} = 1$

Рисунок 3.15 - Матрица попарных сравнений критериев  $W_k^1 \dots W_k^r$

По каждому критерию:  $W_k^1, W_k^2, \dots, W_k^p, \dots, W_k^r$  строим матрицу попарных сравнений альтернативных проектных решений между собой. (Рисунок 3.16)

$W_k^1$	$u_1$	$u_k$	-----	$u_l$
$u_1$	$\frac{w_{11}}{w_{11}} = 1$	$\frac{w_{1k}}{w_{1k}}$		$\frac{w_{1l}}{w_{1l}}$
$u_k$	$\frac{w_{1k}}{w_{11}}$	$\frac{w_{1k}}{w_{1k}} = 1$		$\frac{w_{1k}}{w_{1l}}$
-----				
$u_l$	$\frac{w_{1l}}{w_{11}}$	$\frac{w_{1l}}{w_{1k}}$		$\frac{w_{1l}}{w_{1l}} = 1$

Рисунок 3.16 - Пример матрицы попарных сравнений альтернативных

проектных решений для критерия:  $W_k^1$

5. Применение метода анализа иерархий для анализа полученных матриц.

Находим сумму значений элементов каждого столбца.

$$Su_k = \left( \frac{w_{11}}{w_{11}} + \dots + \frac{w_{1k}}{w_{11}} + \dots + \frac{w_{1l}}{w_{11}} \right) \quad (3.3)$$

Делим каждый элемент текущего столбца на сумму элементов, полученную согласно выражению 3.3:

$$\bar{Nu}_k = \frac{w_{1k}}{Su_k},$$

где  $Su_k$  - сумма значений текущего столбца.

Данные значения, полученные в столбце среднего значения, являются в дальнейшем локальными приоритетами критериев (ЛП КР)  $W_k^1, W_k^2, \dots, W_k^p, \dots, W_k^r$ . Аналогичные расчеты локальных приоритетов (ЛП) проводятся для всех матриц попарного сравнения альтернативных проектных решений  $U_k$ .

В итоге получаем вектор альтернативных ПР с точки зрения соответствия по текущему критерию с последующем объединением в матрицу по всем остальным критериям.

6. Определение результирующего вектора приоритетов альтернативных ПР по системе иерархии.

Умножая полученную матрицу локальных приоритетов альтернативных ПР по каждому критерию на вектор критериев по эффективному проектному решению по правилу строка на столбец, получаем результирующий вектор приоритетов альтернативных проектных решений  $Pu_k$  (РВП АПР) с точки зрения достижения цели. Результаты умножения весовых коэффициентов показаны на Рисунке 3.17.

$$\begin{array}{cccc}
 & \text{ЛП АПР} & & \text{ЛП КР} \quad \text{РВП АПР} \\
 & Mv_1 & Mv_2 & Mv_k & Mv_l \\
 \left( \begin{array}{ccccc}
 Mu_1^1 & Mu_1^2 & \dots & Mu_1^k & \dots & Mu_1^l \\
 \dots & \dots & & \dots & & \dots \\
 Mu_k^1 & Mu_k^2 & \dots & Mu_k^k & \dots & Mu_k^l \\
 \dots & \dots & & \dots & & \dots \\
 Mu_l^1 & Mu_l^2 & \dots & Mu_l^k & \dots & Mu_l^l
 \end{array} \right) & \times & \left( \begin{array}{c}
 Mv_1 \\
 Mv_2 \\
 \dots \\
 Mv_k \\
 \dots \\
 Mv_l
 \end{array} \right) & = & \left( \begin{array}{c}
 Pu_1 \\
 Pu_2 \\
 \dots \\
 Pu_k \\
 \dots \\
 Pu_l
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Рисунок 3.17 - Результирующий вектор приоритетов альтернативных ПР

Все перечисленные процедуры связаны с обработкой информации, поступающей от экспертов. Так, сначала экспертами генерируется множество допустимых альтернативных вариантов, после этого осуществляется выбор лучшего варианта или ранжирование всех вариантов.

### 3.4. Методика повышения эффективности проектирования конструкций БРЭА

Проведенный анализ состояний, тенденций развития и особенностей конструкций современной БРЭА, а также разработанные в предыдущих разделах алгоритмы и методики, позволили сформулировать методику повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования, которую можно представить следующим образом:

#### 1. Формирование исходных данных.

Исходными данными являются:

- ТЗ на БРЭА, включая требования к конструкции:  $m, V, P_n, \lambda^{\text{э}}$ ; технико-экономические требования  $T, C$ , требования к ВВФ, внешние подключения;

- варианты электрических структурных схем БРЭА, полученные в результате системотехнического проектирования и обеспечивающие выполнение тактико-технических требований ТЗ;
- требуемые параметры СЧ БРЭА, включая функциональные параметры, ориентировочные параметры конструкций СЧ, ориентировочные технико-экономические параметры на СЧ, обеспечивающие выполнение требований ТЗ;
- Ориентировочные параметры несущих конструкций БРЭА и кабельной сети, определенные методом аналогии, исходя из места размещения БРЭА на ЛА.

## 2. Разработка формализованного описания структурных схем БРЭА.

Формализованное описание структурных схем БРЭА предназначено для компьютерного представления и хранения электрических схем БРЭА и должно включать: идентификаторы СЧ БРЭА, связи между ними и обеспечивать параллельную обработку нескольких уровней иерархии, отражающей варианты модулей альтернативной реализации СЧ БРЭА. Идентификатор СЧ определяется на основании классификатора ЕСКД.

## 3. Разработка информационной модели (ИМ) СЧ БРЭА.

Информационная модель, в соответствии с ГОСТ Р 57412—2017, это модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде совокупности элементов данных и отношений между ними. Применительно к проектированию БРЭА информационную модели СЧ БРЭА можно определить как совокупность представленных в электронном виде документов, текстовых и графических данных по СЧ БРЭА, 3D моделей СЧ, размещаемая в компьютерной базе данных и представляющая собой достоверный источник информации по СЧ.

Примерная структура ИМ СЧ представлена на Рисунке 3.18.

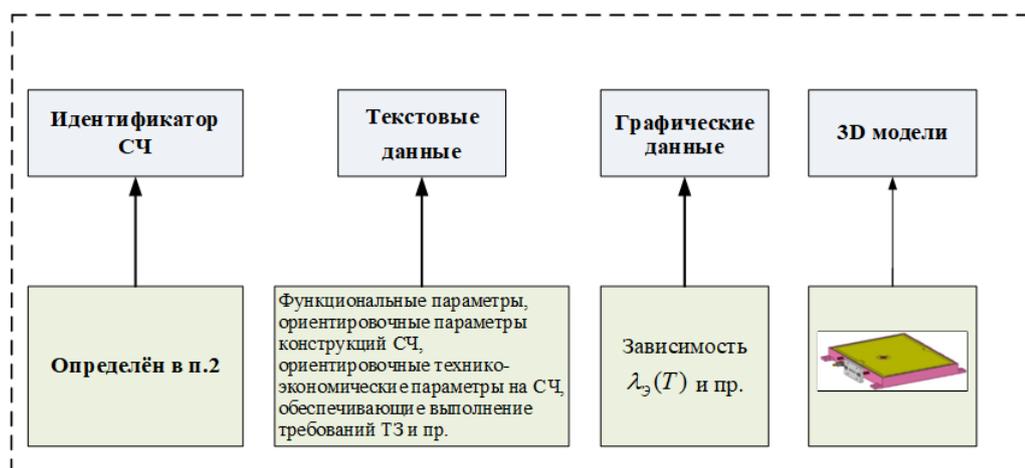


Рисунок 3.18 - Примерная структура ИМ СЧ

#### 4. Формирование исходного конструктивного базиса проектируемой БРЭА.

Задача формирования исходного конструктивного базиса включает в себя последовательное выполнение следующих шагов:

- формирование запроса на поставку СЧ БРЭА. Запрос представляет собой ИМ СЧ, в которой предусмотрены позиции для размещения всех данных о СЧ БРЭА, поставляемой по запросу;
- предприятие – поставщик СЧ БРЭА формирует ответ, заполняя полученную ИМ своими данными о СЧ;
- полученные ИМ о СЧ БРЭА размещаются в БД предприятия в разделе хранения электрической структурной схемы по идентификатору СЧ. Таким образом, для каждой СЧ формируются альтернативы её реализации. Совокупность этих альтернатив представляет собой исходный конструктивный базис реализации БРЭА:  $M^{KB} = M_1^{KB} \cup \dots \cup M_j^{KB} \cup \dots \cup M_m^{KB}$ ; где  $M_j^{KB} = \{M_{1j} \dots M_{gj} \dots M_{hj}\}$  - подмножество модулей, покрывающих  $j$ -ю составную часть;  $g = \overline{1, h}$ ;  $h$  - общее число модулей, покрывающих  $j$ -ю составную часть.

#### 5. Формирование допустимого конструктивного базиса проектируемой БРЭА.

Допустимый конструктивный базис представляет собой множество комплектов модулей  $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ , причем  $\forall S_i \in S$  реализует все СЧ

проектируемого БРЭА и удовлетворяет ограничениям на параметры БРЭА в целом:

$$m_i \leq m_{\text{доп}}; P_i \leq P_{\text{доп}}; V_i \leq V_{\text{доп}}; \lambda_i^{\Theta} \leq \lambda_{\text{доп}}; C_i \leq C_{\text{доп}}; T_i \leq T_{\text{доп}};$$

где  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  - общее число модулей, покрывающих  $j$ -ю составную часть.

Такие параметры комплекта модулей как масса, стоимость и время разработки с высокой точностью определяют аналогичные параметры ПР БРЭА. А потребляемая мощность, интенсивность отказов и температура СЧ не могут быть достоверно определены без выбора системы охлаждения и определения температурного поля конструкции БРЭА.

#### 6. Параметрический синтез ПР БРЭА.

Для  $\forall S_i^{\text{доп}} \in S^{\text{доп}}$  может быть выбрано множество альтернативных вариантов систем охлаждения (СО) -  $V_{ig} = \{v_{ig1}, v_{ig2}, \dots, v_{igj}, \dots, v_{igm}\}$ , которые позволяют обеспечить выполнение условия  $t_{ig}^{\text{max}} \leq t_{\text{доп}}; \lambda_g < \lambda_{\text{доп}}$ , где  $j = \overline{1, m}$ ;  $m$  - общее число альтернативных вариантов СО.

На основании множеств  $S$  и  $V$  формируется множество ПР БРЭА  $U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_l\}$ , в котором  $\forall u_k \in U$  представляет собой объединение допустимого комплекта МВГ, несущей конструкции, кабельной сети и системы охлаждения (СО):

$$U_k = \{S_i \cup V_j \cup K_k \cup N_k\},$$

где  $V_j$  - система охлаждения,  $N_k$  - несущая конструкция,  $K_k$  - кабельная сеть;  $k = \overline{1, l}$ ,  $l$  - общее число допустимых вариантов ПР.

#### 7. Ранжирование ПР БРЭА.

Ранжированные варианты анализируются лицом, принимающим решение (ЛПР), либо при наличии у разработчика системы поддержки принятия решений (СППР) передаются в систему, где анализируются ЛПР. Современные системы поддержки принятия решений позволяют собирать и обрабатывать большие объемы данных. Впоследствии данная информация

преобразуется в знания для улучшения процесса принятия решений, что позволяет быстро и точно анализировать информацию.

Обобщенный алгоритм методики повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования приведен на Рисунке 3.19.

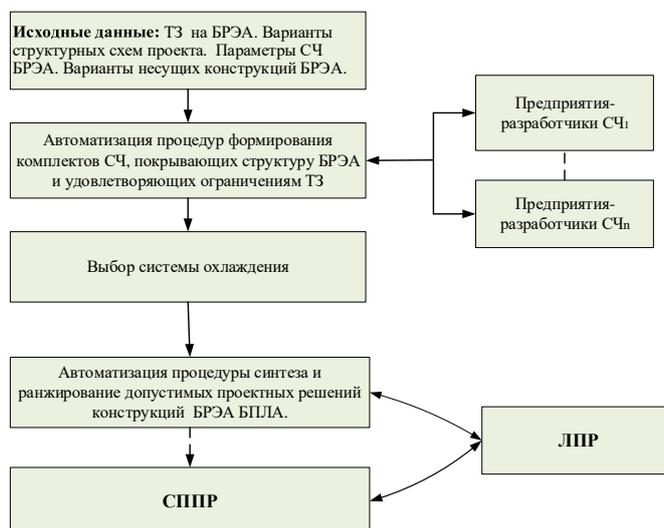


Рисунок 3.19 - Обобщенный алгоритм методики повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования

### Выводы по главе 3

1. Разработана концепция синтеза ПР конструкций БРЭА, которая объединяет САД систему, программный комплекс анализа теплового режима БРЭА, систему поддержки принятия решения и лицо, принимающее решение, и позволяет на ранних этапах проектирования повысить качество этих решений за счёт выбора эффективных систем охлаждения.

2. Предложено и обосновано использование не теплонагруженных элементов конструкции БРЭА в качестве удалённых радиаторов, что позволяет существенно снизить потребляемую мощность СО.

3. Разработана расчетная экспериментальная методика синтеза проектных решений БРЭА, позволяющаякратно сократить время формирования допустимых проектных решений по сравнению с 3D моделированием.

4. Разработана методика синтеза систем ПВО БРЭА, позволяющая, исходя из конкретных условий применения, выбрать вариант ПВО, обеспечивающий максимальное снижение температуры при минимальном потреблении мощности.

5. Разработаны алгоритмы двух методов выбора эффективных проектных решений: метод комплексного критерия и метод анализа иерархий. Отмечено, что выбор алгоритма зависит от количества рассматриваемых вариантов ПР и точности определения значений весовых коэффициентов параметров.

## **Глава 4 Экспериментальные исследования методики повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования**

Основное содержание работ по экспериментальной проверке и внедрению результатов исследования.

Вся работа по экспериментальной проверке и внедрению результатов исследования может разбита на три основные части:

1. Программная реализация разработанных методик повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования.
2. Выбор и экспериментальное исследование эффективного конструкторского проектного решения РЧМ БРЛС с помощью разработанного программного комплекса.
3. Проверка на адекватность методики повышения эффективности проектных решений с помощью 3D моделирования.

К числу работ первой группы относится:

- а) разработка программного комплекса, позволяющего автоматизировать процедуры синтеза и анализа ПР БРЭА.

Вторая группа работ включает в себя:

- а) формирование исходного конструктивного базиса РЧМ БРЛС;
- б) формирование альтернативных вариантов комплектов МВГ, покрывающих структуру РЧМ;
- в) выбор допустимых комплектов МВГ, удовлетворяющих требованиям ТЗ;
- д) выбор допустимых вариантов систем охлаждения теплонагруженных модулей РЧМ БРЛС;

- e) формирование допустимых вариантов конструкторских ПР РЧМ;
- f) анализ параметров сформированных вариантов конструкторских ПР РЧМ и выбор эффективного варианта.

Третья группа работ состоит из:

- a) исследование теплового режима конструкторского ПР РЧМ методом 3D моделирования на CAD «SolidWorks»;
- b) определение требуемого расхода воздуха для охлаждения РЧМ методом 3D моделирования на CAD «SolidWorks».

#### 4.1. Структура программного комплекса синтеза и анализа ПР БРЭА

Программная реализация рассмотренных в предыдущих главах методик осуществляется с помощью программного комплекса (ПК) синтеза и анализа ПР БРЭА, структура которого приведена на Рисунке 4.1.

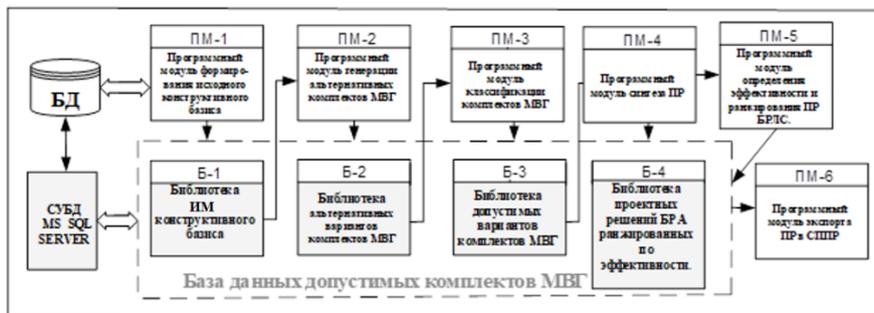


Рисунок 4.1 - Структурная схема программного комплекса синтеза и анализа ПР БРЭА

Программный комплекс синтеза ПР реализован в виде программных модулей в среде программирования Microsoft Visual Studio 2012 на платформе .NET Framework 4.7.2. и включает в себя: программный модуль (ПМ) формирования исходного конструктивного базиса проектируемой БРЭА (ПМ-1), ПМ генерации альтернативных комплексов МВГ, покрывающих составные части проектируемой БРЭА (ПМ-2), ПМ синтеза конструкторских проектных решений БРЭА (ПМ-3); ПМ ранжирования и выбора эффективного проектного решения БРЭА (ПМ-5), ПМ экспорта проектных решений в СППР

(ПМ-6). В состав ПК входят, также следующие библиотеки: библиотека информационных моделей (ИМ) конструктивного базиса (Б-1), библиотека альтернативных вариантов комплектов МВГ (Б-2), библиотека допустимых вариантов МВГ БРЭА (Б-3), библиотека проектных решений БРЛС ранжированных по эффективности (Б-4). Управление данными между библиотеками и программными модулями ПК синтеза ПР, осуществляется при помощи системы управления базами данных (СУБД) MSSQL Server 2017 версии Standard [78,96,110].

Применение разработанного ПК позволяет значительно сократить временные затраты на проектирование БРЭА. В качестве примера, была проведена экспериментальная оценка временных затрат на формирование допустимых комплектов модулей. Результаты экспериментальной оценки временных затрат показаны в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты экспериментальной оценки временных затрат на формирование комплектов модулей

Комплекты модулей (КМ)	Количество сформированных комплектов модулей:				
	192	576	30000	196000	512000
Время затраченное на формирование КМ, сек	0.0100	0.0200	0.1400	0.48	1.8
Задействованный объем ОЗУ, Мб	8.344	8.368	10.844	31.6	61.656

Для выполнения экспериментального исследования формирования комплектов модулей, использовалась рабочая станция со следующими основными характеристиками: процессор Intel™ Core™ i5-8600, оперативная память DDR4 16.0 Гб., 64-разрядная операционная система Windows 10 Pro.

#### 4.2. Экспериментальные исследования методики формирования конструктивного базиса БРЭА

Экспериментальные исследования методики формирования конструктивного базиса БРЭА были проведены на примере проектировании

радиочастотного модуля (РЧМ) бортовой РЛС  $K_U$  диапазона, предназначенной для установки на легкие и средние БПЛА. Структурная схема РЧМ БРЛС приведена на Рисунке 2.1 и включает в себя следующие составные части (СЧ): усилитель мощности СВЧ (УМ СВЧ), опорный генератор (ОП), синтезатор частот и синхросигналов (СЧС), приемник промежуточной частоты (ППЧ), цифровой приемник (ЦП) и БЦВМ.

На основе структурной схемы РЧМ БРЛС и требований к СЧ БРЛС были сформированы запросы на предприятия изготовители и получена от них информация о каждой СЧ БРЛС, которая включает в себя параметрический подмассив, текстовые и графические файлы. Передача информации осуществлялась способами, описанными в параграфе 2.2. На основании полученной информации, были сформированы информационные модели МВГ, покрывающие СЧ РЧМ и изготавливаемые предприятиями в настоящее время. С помощью программного модуля ПМ-1, входящего в ПК, реализованного на основе разработанного алгоритма, который рассмотрен в параграфе 2.3, был сформирован исходный конструктивный базис, покрывающий СЧ проектируемого РЧМ бортовой РЛС. Сформированный исходный конструктивный базис включает в себя: усилители мощности СВЧ – 4 шт. (УМ СВЧ), синтезаторы частот и синхросигнала (СЧС)- 3 шт. , опорные генераторы (ОГ)-2 шт, приемники промежуточной частоты (ППЧ)- 2 шт, цифровые приемники (ЦП)-3 шт и бортовые цифровые вычислительные машины (БЦВМ)- 4 шт.

Сформированный исходный конструктивный базис РЧМ БРЛС приведен в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Исходный конструктивный базис РЧМ БРЛС

№	Тип модуля/ параметры	Масса, кг	Габариты, мм	Мощность потребления, Вт	Испенивн ость отказа, $\times 10^{-4}$ , 1/час	Цена, млн. руб.	Изображение
<b>Усилитель мощности СВЧ, 200 Вт, Кв диапазона. Идентификатор СЧ: 454224</b>							
1	УМ СВЧ 200 Вт	2,5	232x155x39	210	8,4	5,2	
2	УМ СВЧ 200 Вт	1,9	199x137x32	210	9,30	4,8	
3	УМ СВЧ 200 Вт	2,5	269x187x50	230	9,6	4,6	
4	УМ СВЧ 200 Вт	2,5	232x159x39	220	8,4	5,2	
<b>Синтезатор частот и синхросигнала. Идентификатор СЧ: 431322</b>							
1	СЧС	1,9	285x140 x40	27	1,20	1,3	
2	СЧС одномодульный с приёмником ПЧ	2,6	285x140 x62	35,4	0,87	1,7	
3	СЧС многомодульный с приёмником ПЧ	3,9	325x182x65	36 (58)	0,87	1,5	
<b>Опорный генератор. Идентификатор СЧ: 468769</b>							
1	Опорный генератор	1,5	130x110x90	4	0,25	0,7	
2	Опорный генератор	0,85	100x71x71	4	0,33	0,5	
<b>Приемник ПЧ. Идентификатор СЧ: 434857</b>							
1	Приемник ПЧ	1,8	285x40x130	10	1,11	0,5	
2	Приемник ПЧ	1,8	285x40x130	10	1,11	0,55	
<b>Цифровой приемник. Идентификатор СЧ: 464552</b>							
1	Цифровой приёмник (ЦП)	0,45	238x123x49	22	1	0,7	
2	Цифровой приемник (без корпуса)	0,15	220x100x 27	22	1	0,6	
3	Цифровой приемник	0,45	238x123x49	22	1	0,7	
<b>Бортовые цифровые вычислительные машины. Идентификатор СЧ: 466266</b>							
1	БЦВМ	5,1	280x89x 140	62	1,11	4	
2	БЦВМс ЦП	5,5	280x210x 90	69	1,3 (9000ч)	4,8	
3	БЦВМ м-60 Констр. 2К	8	318x124x194	80	1,42		
4	БЦВМ м-70 Констр. 3К	7	318x190x194	60	0,87		

На Рисунке 4.2 приведен программный интерфейс исходного конструктивного базиса РЧМ БРЛС

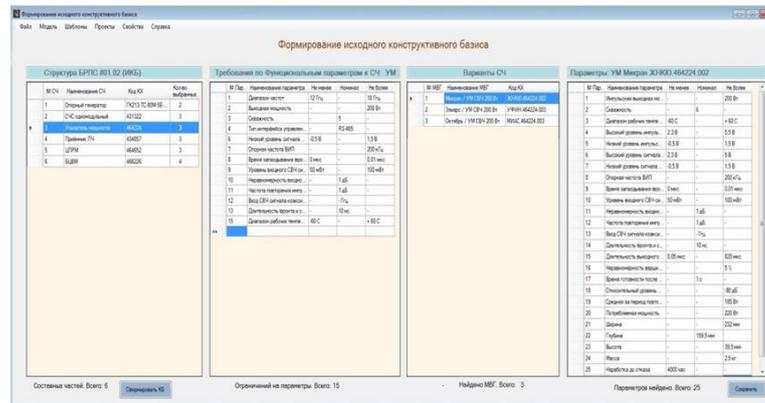


Рисунок 4.2 - Программный интерфейс исходного конструктивного базиса РЧМ БРЛС, сформированный разработанным программным комплексом синтеза ПР

Формирование альтернативных комплектов модулей высокой готовности выполняется при помощи математического аппарата многодольных графов и алгоритма поиска в глубину, рассмотренных в параграфе 2.4. Множество значений параметров, характеризующих МВГ, входящих в комплекты модулей, загружаются из ИМ, хранящихся в БД. В результате, получаем таблицу альтернативных комплектов модулей, в которую входят также значения параметров комплектов. Ниже приведена Таблица 4.2, которая включает составы сформированных альтернативных вариантов комплектов МВГ, и значение их параметров по потребляемой мощности ( $P$ ). Таблицы формируются с помощью ПМ 2, входящего в ПК.

На основании заданного ограничения на потребляемую мощность комплектом МВГ ( $P \leq 340 \text{ Вт}$ ) с помощью ПК 3 осуществляется отсеивание множества комплектов неудовлетворяющих требованиям ТЗ и формирование допустимых комплектов МВГ. Результат приведен в Таблицах 4.3, 4.4, 4.5.



допустимых вариантов комплектов, удовлетворяющих ТЗ по параметрам  $P$  и  $m$  - Таблица 4.5 .

Таблица 4.5 - Допустимые альтернативные комплекты МВГ, удовлетворяющие ТЗ по параметрам  $P$  и  $m$

№ КМ	Состав комплекта модуля	Взвешенный параметр: Масса, кг	Взвешенная сумма КМ, кг
381	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.15] -->[5.1]	11,68
369	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.15] -->[5.1]	11,7
373	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 1]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.45] -->[5.1]	11,98
377	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 2]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.45] -->[5.1]	11,98
365	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 2]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.45] -->[5.1]	12
361	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 1]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.45] -->[5.1]	12
382	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 2]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.15] -->[5.5]	12,08
370	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 2]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.15] -->[5.5]	12,10
525	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 4]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[2.5] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.15] -->[5.1]	12,28
309	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 1]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[2.5] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.15] -->[5.1]	12,28
297	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 1]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[2.5] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.15] -->[5.1]	12,3
513	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 4]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[0.85] -->[2.5] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.15] -->[5.1]	12,3
93	[ОГ 1]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[1.5] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.15] -->[5.1]	12,33
81	[ОГ 1]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 3]--->[БЦВМ 1]	[1.5] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.15] -->[5.1]	12,35
374	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 1]--->[БЦВМ 2]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.45] -->[5.5]	12,38
378	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 2]--->[ЦП 2]--->[БЦВМ 2]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.78] -->[0.45] -->[5.5]	12,38
366	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 2]--->[БЦВМ 2]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.45] -->[5.5]	12,4
362	[ОГ 2]--->[УМ СВЧ 2]--->[СЧС 1]--->[ППЧ 1]--->[ЦП 1]--->[БЦВМ 2]	[0.85] -->[1.9] -->[1.9] -->[1.8] -->[0.45] -->[5.5]	12,4
<b>Всего: 18</b>			

В результате получаем множество комплектов модулей, допустимых по трем параметрам:  $\lambda$ ,  $P$ ,  $m$ . Причем множество допустимых комплектов определяется как:  $S_{\text{доп}} = S_{\text{доп}}^{\lambda} \subseteq S_{\text{доп}}^m \subseteq S_{\text{доп}}^P$ :  $\lambda \leq 3 \times 10^{-3}$  з;  $m \leq 12,5$  кг;  $P \leq 340$  Вт. Программный интерфейс с результатами отсечения и классификации комплектов МВГ приведен на Рисунке 4.3.

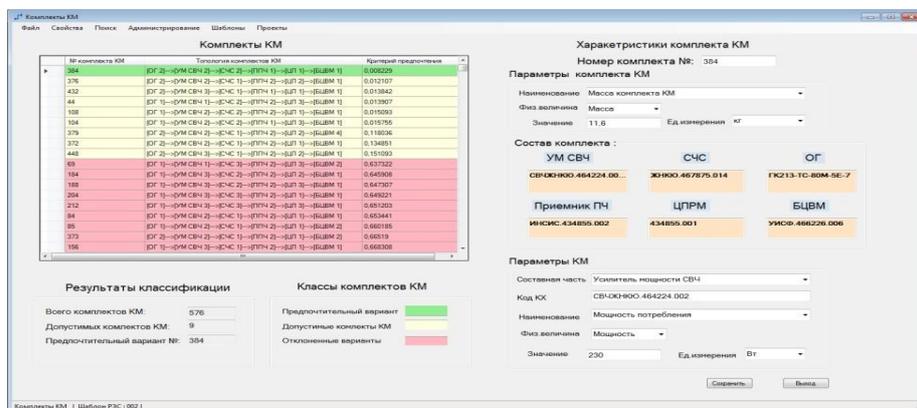


Рисунок 4.3 - Программный интерфейс определения допустимых комплектов модулей. Результаты классификации комплектов модулей высокой готовности

### 4.3. Экспериментальные исследования методики синтеза и ранжирования ПР БРЭА

Параметрический синтез конструкторского проектного решения (ПР) был проведен для типовой несущей конструкции РЧМ с помощью САПР Solidworks. Далее, было проведено тепловое моделирование сформированной 3D модели конструкции РЧМ для случая ЕВО. Результаты теплового моделирования представлены на Рисунке 4.4.

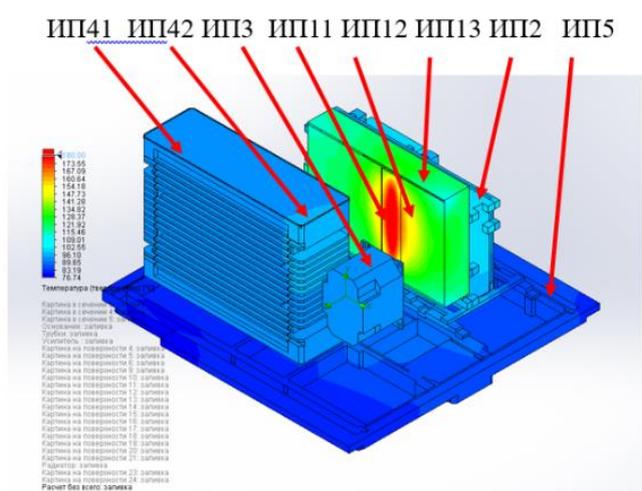


Рисунок 4.4 - Тепловое моделирование 3D модели РЧМ при ЕВО

Внешние поверхности корпусов СЧ БРЛС были разбиты на изотермические поверхности, показанные на Рисунке 4.4.

Результаты теплового моделирования РЧМ при ЕВО приведены в Таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Результаты теплового моделирования РЧМ при ЕВО

ИП	ИП1.1	ИП1.2	ИП1.3	ИП2	ИП3	ИП4.1	ИП4.2	ИП5
t, °C	173	147	120	109	95	89	92	76

На основании полученных результатов теплового моделирования определена теплонагруженная СЧ (УМ СВЧ). Для обеспечения нормального теплового режима средствами ПК синтезированы варианты ПВО, обеспечивающие температуру СЧ БРЛС, в соответствии с ТЗ не выше 80°C.

На Рисунке 4.5 показан программный интерфейс синтеза варианта системы охлаждения с помощью ПК .

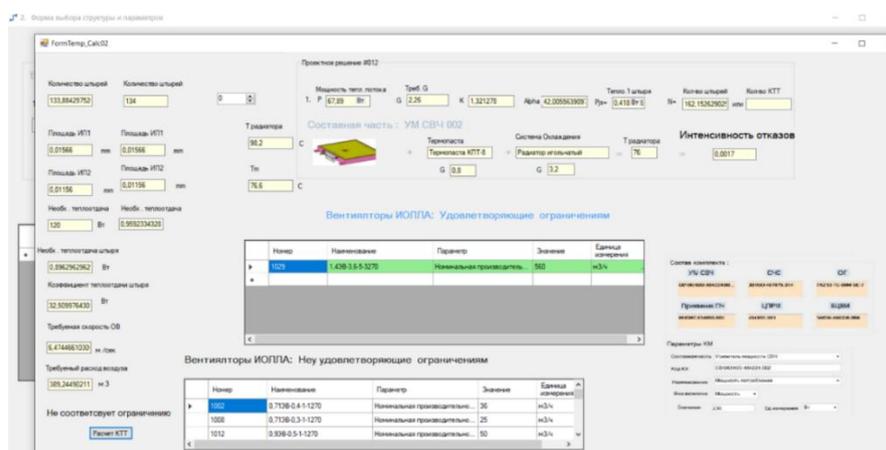


Рисунок 4.5 - Программный интерфейс синтеза СО

Параметры сгенерированных вариантов СО, обеспечивающие температуру поверхности корпусов СЧ БРЛС не выше 80°C представлены в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Параметры систем ПВО, обеспечивающие температуру поверхности корпусов СЧ БРЛС не выше 80°C

№	Наименование	Скорость ОВ, м/с	Расход ОВ, $\frac{м^3}{с}$	Треб. $R_{тр}, \frac{°C}{Вт}$	Расч. $R_{р}, \frac{°C}{Вт}$
	<b>ПВО с радиаторами на основании УМ СВЧ (аэродинамическое сопротивление 220 Па)</b>			0,16	
1	Штыревой радиатор на всей площади основания	3,46	162	0,16	0,125
2	Штыревой радиатор на ИП 1.1, 1.2	4,4	179	0,16	0,12
3	Пластинчатый радиатор на ИП 1.1, 1.2	2,54	118	0,16	0,135
	<b>ПВО с КТТ и удалённым радиатором на основании БРЛС (ИП5) (аэродинамическое сопротивление 50 Па)</b>			0,18	
4	ЕВО с использованием КТТ и удалённого радиатора (ИП5)	-	-	0,18	0,36
5	ПВО с использованием КТТ удалённого радиатора (ИП5)	4,7	140	0,18	0,26
6	ПВО с использованием КТТ и штыревого оребрения удалённого радиатора (ИП5)	Зона 1- 3,4	28,6	0,18	0,15
		Зона 2 – 1,5	12,6		
7	ПВО с использованием КТТ и пластинчатого оребрения удалённого радиатора (ИП5)	Зона 1- 3,82	32,13	0,18	0,13
		Зона 2 - 1,86	15,65		

В Таблице 4.7 приводятся требуемое и расчётное значения термического сопротивления СО - ( $R_{тр}$ ,  $R_p$ ), а также приводятся минимально допустимые скорости и расход охлаждающего воздух (ОВ).

Результаты расчетов показали, что удовлетворяют требованиям обеспечения нормального теплового режима варианты с расчётным значением термического сопротивления  $R_p < R_{тр}$ , т.е варианты 1,2,3,6,7.

Корректируем значение расхода ОВ с учётом снижения эффективности ПВО на высоте:

$$V_{ОВ}(H) = V_{ОВ}(0) \times K_H$$

Значения  $K_H$ , в зависимости от высоты полета для турбулентного потока ОВ, приведены в Таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Результат зависимости значения  $K_H$  от высоты полета

Н, км	1	3	5	7
$K_H$	0,92	0,78	0,66	0,55

Если принять высоту полёта 3км, получим требования к вентилятору, приведенные в Таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Таблица требований к вентилятору СО

<b>Вариант СО</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Расход ОВ, <math>\frac{м^3}{с}</math></b>	207	229	151	36,7	41,2

С учётом требуемого давления и бортового питания выбираем вентиляторы фирмы ИОЛЛА. В Таблице 4.10 приведены параметры СО.

Таблица 4.10 - Параметры системы охлаждения

Параметры	Вариант СО				
	1	2	3	6	7
Тип вентилятора	0,71ЭВ-2-50-4620	0,8ЭВ-2,8-50-4620	0,63ЭВ-1,4-32-4620	0,36ЭВ-0,2-6-4625	0,36ЭВ-0,2-6-4625
Расход ОВ, $\frac{м^3}{с}$	200	280	140	20	20
Статическое давление, Па	500	500	300	65	65
Мощность потребления, Вт	121,5	135	69	5,4	5,4
Масса вентилятора, кг	0,73	0,85	0,5	0,05	0,05
Масса радиатора, кг	0,98	0,31	0,66	0,81	0,96

Результаты расчетов показали, что для обеспечения требуемого расхода воздуха в вариантах 6 и 7 будет применено 4 вентилятора.

Таким образом, на основании каждого допустимого варианта комплектов модулей может быть сформировано пять ПР. Следовательно, на основании сформированных 18 допустимых комплектов может быть сформировано 90 допустимых ПР.

Для проведения синтеза ПР с помощью БД по методике, рассмотренной в параграфе 2.4. из 18 допустимых вариантов комплектов модулей был выбран предпочтительный вариант комплекта. Состав и параметры комплекта модулей, выбранного для формирования ПР, приведены в Таблице 4.11.

Таблица 4.11. Состав и параметры комплекта модулей, выбранного для формирования ПР

Параметры	Состав комплекта модулей						$\Sigma$
	ОП-2	УМ СВЧ-2	СЧС-1	ПЧ-1	ЦП-2	БЦВМ-1	
Мощность потребления P, Вт	4	210	27	10	22	62	273
Масса m, кг	1,5	1,9	1,9	1,8	0,15	5,1	12,35
Интенсивность отказов, $* 10^{-3}$	0,025	0,84	0,12	0,11	0,1	0,11	1,305

На основании выбранного комплекта модулей и сформированных альтернативных СО были синтезированы ПР РЧМ, значения параметров которых приведены в Таблице 4.12.

Таблица 4.12. - Параметры ПР, сформированных на основе выбранного комплекта модулей и различных вариантов СО

Параметры	Вариант ПР				
	1	2	3	6	7
Мощность потребления $P$ , Вт	496,5	510	444	396,6	396,6
Масса $m$ , кг	39,61	38,96	38,96	38,91	38,93
Интенсивность отказов, $\cdot 10^{-3}$	1,6399	1,5732	1,6928	1,6376	1,6805

Для повышения достоверности результатов, ранжирование проводилось двумя методами: методом комплексного критерия и методом анализа иерархий. Ранжирование, в обоих случаях, проводилось по трем параметрам: интенсивность отказов-  $\lambda^3$ , мощность потребления-  $P$ , масса- $m$ .

Результаты ранжирования по методу комплексного критерия приведены в таблице 4.13, а результаты ранжирования методом анализа иерархий – в таблице 4.14.

Таблица 4.13 - Результаты ранжирования ПР по методу комплексного критерия

Параметры	Весовые коэффициенты	Вариант ПР				
		1	2	3	6	7
Мощность потребления $P$ , Вт	$\beta^2(P) = 0,33$	0,973	1	0,870	0,777	0,777
Масса $m$ , кг	$\beta^3(m) = 0,33$	1	0,9835	0,9835	0,9821	0,9828
Интенсивность отказов, $\cdot 10^{-4}$	$\beta^1(\lambda^3) = 0,34$	0,9687	0,9493	1	0,9683	0,9673
(Интегральная оценка) $R$		0,970761	0,967824	0,941655	0,893507	0,899943

Таблица 4.14- Результаты ранжирования ПР методом анализа иерархий

Параметры	Вариант ПР				
	1	2	3	6	7
Мощность потребления $P$ , Вт	0,078783	0,040009	0,161709	0,359749	0,359749
Масса $m$ , кг	0,040009	0,078783	0,161709	0,359749	0,359749
Интенсивность отказов, * $10^{-4}$	0,177435897	0,352307692	0,09610256	0,196410256	0,177435897
Результирующий вектор приоритетов	11,02%	17,59%	13,12%	32,32%	25,95%

На Рисунке 4.6 а) приведена диаграмма результатов ранжирования ПР по комплексному критерию, а на Рисунке 4.6 б) - диаграмма результатов ранжирования ПР по методу анализа иерархий.



Рисунок 4.6 а) - Диаграмма результатов ранжирования ПР по комплексному критерию



Рисунок 4.6 б) - Диаграмма результатов ранжирования ПР по методу анализа иерархий

В первом методе наиболее эффективным считается вариант, который имеет наименьшее значение интегральной оценки  $R$ , так как все параметры характеризуются качеством «чем меньше-тем лучше». Во втором методе

лучшим вариантом считается вариант, который имеет наибольший вектор приоритетов.

Как видно из таблиц, оба метода показали один и тот же результат – лучшим вариантом является вариант № 6, что подтверждает достоверность полученного результата. Таким образом, наиболее эффективный вариант проектного решения, это вариант с ПВО, в котором используются КТТ и штыревое оребрение удаленного радиатора.

#### **4.4. Проверка на адекватность методов повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования**

Проверка на адекватность методов повышения эффективности ПР конструкций БРЭА была проведена с помощью 3D моделирования тепловых режимов РЧМ БРЛС. Моделирование конструкторского проектного решения (ПР) проводилось для типовой несущей конструкции РЧМ БРЛС с помощью САПР «Solidworks». В частности, было проведено тепловое моделирование сформированной 3D модели конструкции РЧМ для случая ЕВО. Результаты теплового моделирования представлены на Рисунке 4.4. Моделирование было проведено для 4-х вариантов ПР с различными системами ПВО теплонагруженного модуля УМ СВЧ с мощностью потребления 200 Вт. Были смоделированы тепловые режимы для следующих ПВО: с пластинчатым радиатором, со штыревым радиатором, с контурными тепловыми трубками (КТТ) с пластинчатым радиатором, с КТТ и штыревым радиатором. Контурные тепловые трубки позволяют отводить тепло от нагретой зоны на удаленный радиатор, в качестве которого может выступать основание БРЛС. Вариант контурных труб и их крепление на УЧ СВЧ приведена Рисунке 4.7 и Рисунке 4.8 соответственно.

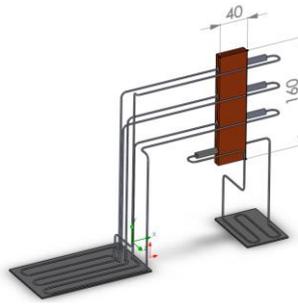


Рисунок 4.7 - Вариант исполнения КТТ

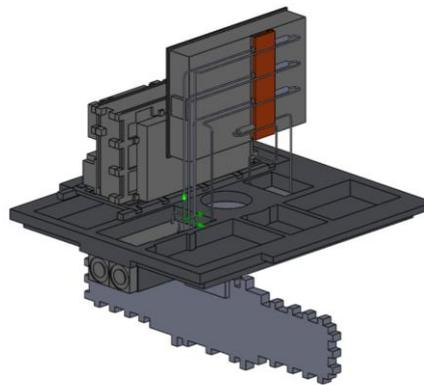


Рисунок 4.8 - Вариант установки КТТ на УМ СВЧ БРЛС

На Рисунке 4.9 приведен результат теплового моделирования РЧМ с ПВО на основе штыревого радиатора, справа дана температурная шкала со значением максимальной температуры нагретой зоны.

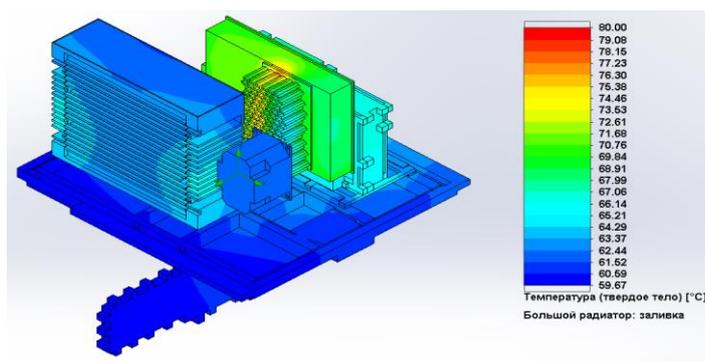


Рисунок 4.9 - Тепловая модель РЧМ БРЛС с ПВО на основе штыревого радиатора.

На Рисунке 4.10 показана тепловая модель РЧМ БРЛС с системой ПВО с КТТ и штыревым оребрением основания.

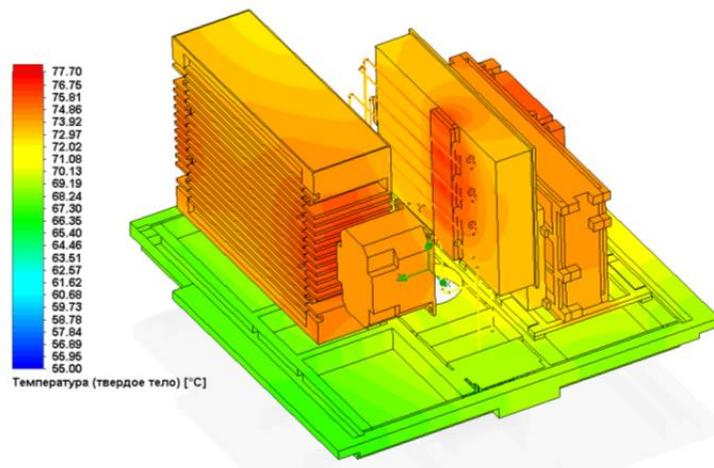


Рисунок 4.10 - Тепловая модель РЧМ БРЛС с системой ПВО с КТТ и штыревым оребрением основания

На Рисунке 4.11 показана тепловая модель РЧМ БРЛС с системой ПВО с КТТ и пластинчатым оребрением основания.

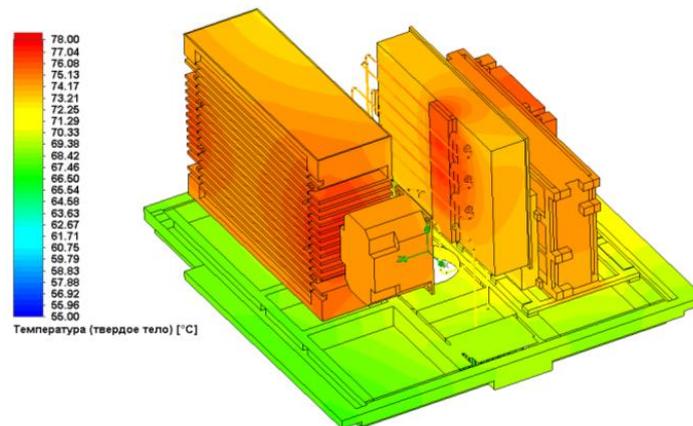


Рисунок 4.11 - Тепловая модель РЧМ БРЛС с системой ПВО с КТТ и пластинчатым оребрением основания

В Таблице 4.15 приведены сравнительные значения максимальных температур нагретой зоны УМ СВЧ, при применении различных систем ПВО, полученные путем расчета с помощью разработанных методик и с помощью моделирования.

Таблица 4.15 - Результаты расчета максимальной температуры нагретой зоны УМ СВЧ

Теплонагруженный модуль УМ СВЧ с системой охлаждения:	Тепловой расчет ПК, t, °C	Тепловое моделирование 3D модели SW t, °C	Отклонение $\Delta t$ , %
Система ПВО с пластинчатым радиатором	86	76	11%
Система ПВО с штыревым радиатором	84	77	9%
Система ПВО с КТТ и штыревым оребрением.	83	78	6%
Система ПВО с КТТ и пластинчатым оребрением.	84	81	4%

Совпадение результатов составило 94%, что свидетельствует о достаточно высокой точности расчетов, которые позволяет проводить ПМ- 4 и ПМ-5, входящие в ПК, реализованный на основе предложенных методик, разработанных алгоритмов и программ.

В Таблице 4.16 приведены сравнительные оценки времени, затраченного на проведение теплового расчета ПР с различными вариантами ПВО. с применением ПК и с применением 3D моделирования, для одного и четырех синтезированных ПР.

Таблица 4.16 Результаты сравнения временных затрат на проведение теплового расчета с помощью программного комплекса и 3D моделирования

Количество синтезируемых ПР	Вариант расчета	1	4	Результат сравнения:
Затраченное время на синтез ПР с СО на основе пластинчатого радиатора, час.	ПК	0,5	2	~ 6 раз
	3D	3	12	
Затраченное время ПР с СО на основе штыревого радиатора, час.	ПК	0,45	1,8	~ 8 раз
	3D	3,5	14	
Затраченное время ПР с СО на основе КТТ, час.	ПК	0,45	1,8	~ 8 раз
	3D	3,5	14	

Из таблицы видно, что применение программного комплекса позволяет в 6-8 раз сократить время получения результата.

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработан программный комплекс, реализующий предлагаемые методики и обеспечивающий повышение эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования, при сокращении времени проектирования.
2. Проведены экспериментальные исследования предлагаемых методик на примере синтеза проектных решений конструкций БРЛС, которые показали приемлемую точность при существенном сокращении сроков проектирования ( на рассматриваемом примере в 6-8 раз).

## Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Выполнен анализ конструкций БРЭА, на основании которого определены особенности и тенденции их построения, в частности установлено, что опережающее снижение объёма конструкций БРЭА привело к существенному росту удельной плотности теплового потока БРЭА БПЛА, что требует применения эффективных систем охлаждения для обеспечения нормального теплового режима БРЭА.
2. Рассмотрен маршрут построения БРЭА, показано, что работы, выполняемые на системотехническом этапе проектирования должны в полной мере учитывать требования ТЗ, для чего необходимо глубокая проработка конструкции БРЭА и оценка конструкторских параметров уже на ранних этапах проектирования.
3. Предложена методика повышения эффективности ПР БРЭА на ранних этапах проектирования, которая базируется на автоматизации процедуры формирования комплектов МВГ, покрывающих структуру БРЭА и удовлетворяющих требованиям ТЗ, а также на синтезе и ранжировании допустимых проектных решений БРЭА.
4. Разработана методика решения задачи автоматизации процедуры формирования конструктивного базиса БРЭА на ранних этапах проектирования с применением предложенных информационной модели составных частей БРЭА, графовой модели структуры БРЭА и методики автоматизированной генерации допустимых комплектов модулей высокой готовности.
5. Предложен обобщенный алгоритм формирования исходного конструктивного базиса, в который входят МВГ, обеспечивающие покрытие СЧ проектируемой БРЭА, с учетом требований к классификационным и функциональным параметрам.
6. Разработана методика генерации допустимых альтернативных комплектов МВГ, реализованная на основе математического аппарата

многодольных графов, и обеспечивающая покрытие составных частей структуры БРЭА готовыми модулями при условии выполнения требований ТЗ на БРЭА.

7. Предложено и обосновано использование не теплонагруженных элементов конструкции БРЭА в качестве удалённых радиаторов, что позволяет существенно снизить потребляемую мощность СО.

8. Разработана методика синтеза систем принудительного воздушного охлаждения БРЭА, позволяющая, исходя из конкретных условий применения, выбрать вариант ПВО, обеспечивающий максимальное снижение температуры при минимальном потреблении мощности.

9. Разработан алгоритм и его программная реализация синтеза проектных решений БРЭА, обеспечивающий повышение точности оценки параметров проектных решений, за счёт учёта реальных параметров систем охлаждения.

10. Проведена проверка на адекватность расчета теплового режима РЧМ БРЛС с помощью разработанной расчетной методики синтеза проектных решений и методом 3D моделирования с помощью САПР «Solidworks». Совпадение результатов составило 94%, что свидетельствует о достаточно высокой точности расчетов, которые позволяет проводить разработанный ПК.

11. Разработан программный комплекс информационной поддержки формирования и анализа проектных решений БРЭА, позволяющий сократить сроки создания БРЭА в 6-8 раз на рассмотренных примерах.

## Список сокращений

**БРЭА** - бортовая радиоэлектронная аппаратура

**БРЛС** – бортовая радиолокационная станция

**БПЛА** – беспилотный летательный аппарат

**КМ** – комплект модуля

**ТЗ** – техническое задание

**ПР** – проектное решение

**МАИ** – метод анализа иерархии

**ЕВО** – естественное воздушное охлаждение

**ПВО** – принудительное воздушное охлаждение

**МРЛЦН** – многофункциональная радиолокационная целевая нагрузка

**РЧМ** – радиочастотный модуль

**СЧ** – составная часть

**МВГ** – модуль высокой готовности

**ЛА** – летательный аппарат

**КПД** – коэффициент полезного действия

**КД** – конструкторская документация

**ВЩАР** – волноводно-щелевая антенная решетка

**СППР** – система поддержки принятия решения

**ЛПР** – лицо принимающие решение

**КБ** – конструктивный базис

**ИМ** – информационная модель

**ПК**- программный комплекс

**СО** – система охлаждения

**УМ** – усилитель мощности

**КТТ** – контурные тепловые трубы

**ИП**- изотермическая поверхность

**РПО** – радиопрозрачный обтекатель

## Список литературы

1. Абрамов О.В. , Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем // Проблемы управления. - 2006 №4 – С. 3-8.
2. Алексеев В.Е., Таланов В.А. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений.– М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.- 320 с.
3. Альмовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А.И., Понамарев Н. Б. SolidWorks Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ- Петербург, 2005-800с.
4. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation /– М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
5. Андерсон, Джеймс А. Дискретная математика и комбинаторика. - Пер. с англ. — М. : Издатель- Издательский дом "Вильямс", 2004. — 960 с.
6. Бакалдин А.В., Баранов А.М., Кандалов П.И., Мадера А.Г, Современные технологии охлаждения с применением контурных тепловых труб в корпусах бортовых серверов с повышенной мощностью потребления // Тепловые процессы в электронных системах. 2018. №8 –С. 98–105.
7. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2015. – 440 с.
8. Белов В.В., Лопатин А.К. Оригинальная свертка двух критериев для задачи выбора лучшего варианта // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 8. – С. 14-19.
9. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика: Учебник для вузов / Под редакцией В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. — 3-е издание, стереотипное. — М.: Издательство МГТУ 2004. – 724 с.
- 10.Белоусов Е.Л., Ушкар М.Н., Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи Учебное пособие. Нижний Новгород : НГТУ, 2005. -237 с.
- 11.Берж К. Теория графов и ее применение.– М.: ИЛ, 1962 - 319 с.

12. Божко А.Н., Толпаров А.Ч., Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью // <https://www.metodolog.ru/00562/00562.html> (дата обращения: 23.11.2020).
13. Бойтяков А.А., Филинских А.Д., Соснина О.А. Иерархическое пространство параметров геометрической модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова - 2015. №2 С. 131–134.
14. Борисов В.Ф., Лавренов О.П., Назаров А.С., Чекмарев А.Н. Конструирование радиоэлектронных средств/ Под.ред. .Назарова А.С.- М.:Изд-во МАИ, 1996. - 380 с.
15. Бородин С.М. «Общие вопросы проектирования радиоэлектронных средств» – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 103 с.
16. Бородин С.М. Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных средств : методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Проектирование РЭС» для студентов, обучающихся по специальности 21020165 направления 200800 «Проектирование и технология электронных средств» / Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 52 с
17. Бортовые радиолокационные станции самолетов тактической авиации зарубежных стран (2003). Зарубежное военное обозрение №11 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://factmil.com/publ/soderzhanie/vvs/bortovye\\_radiolokacionnye\\_stancii\\_samoletov\\_takticheskoi\\_\\_2003/5-1-0-1380](http://factmil.com/publ/soderzhanie/vvs/bortovye_radiolokacionnye_stancii_samoletov_takticheskoi__2003/5-1-0-1380) (дата обращения: 12.08.2024)
18. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. - М.: Советское радио, 1973. - 439 с.
19. Бусленко Н.П., Метод статистического моделирования. / Статистика, 1970. — 109 с.
20. Введение и классификация графов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/564594/> (дата обращения: 14.03.2024)
21. Введение в графовые базы данных SQL Server 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

- <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/518586/> (Дата обращения: 12.05.2024)
22. Вирт Н. «Алгоритмы и структуры данных». — М.: Мир, 1989. — 360 с.
  23. Глушицкий И.В. Охлаждение бортовой аппаратуры авиационной техники. Москва : Машиностроение, 1987.-184 с., ил.
  24. ГОСТ 2.701-2008 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Дата введения 01 июля 2009 г.
  25. ГОСТ Р 52003-2003 г. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Дата введения 9 января 2003 г.
  26. Гуськов Ю.Н., Жибуртович Н.Ю. Основные направления конструирования бортовых радиолокационных систем и выбор элементной базы // Радиотехника 2023. №5 –С.93-101.
  27. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. – М.: Энергия, 1979. 272 с
  28. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных -М.:Вильямс,2005
  29. Дембицкий ДН. Моделирование задачи автоматизированного управления проектированием РЛС на базе единой аппаратно-программной платформы. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. МАИ (НИУ), 2015 г.
  30. Дронов В. Прохоренок Н. «Python 3 и PyQt 5. Разработка приложений» - М.:ВНУ, 2016. – 838 с.
  31. Дульнев Г.Н. Теория тепло - и массообмена - СПб: НИУ ИТМО, 2012 г., - 195 с.
  32. Дульнев Г.Н., Тепло – и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. «Конструир. и произв. радио–аппаратуры». – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
  33. Евгеньев Г.Б. Системология инженерных знаний. М.: МГТУ 2001. – 376 с.
  34. Егоров В.И., Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие.-СПб:СПб ГУ ИТМО,2006.- 77 с.
  35. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. , Лекции по теории графов, Наука 1990. – 408 с.

36. Ильин Е.М., Полубехин А.И., Севастьянов В.Ю., Самарин О.Ф., Черевко А.Г. Малогабаритный многофункциональный бортовой РЛК для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Сиб ГУТИ, 2017 № 4 - С. 104 – 109.
37. Ильин Е.М., Севастьянов В.Ю., Самарин О.Ф., Черевко А.Т. Состояние и перспективы создания малогабаритных радиолокационных систем // Вестник Сиб ГУТИ, №2 2015г, с.156-163
38. Инструментальные системы. АО «ИнСис». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.insys.ru> (Дата обращения 20.09.2024).
39. Ицик Б., Деян С., Рон Т. Microsoft SQL Server 2012. Создание запросов. Учебный курс Microsoft - М: Высшая школа, 2014. 700 с.
40. Казеннов Г.Г., Соколов А.Г. Основы построения САПР и АСТПП / М.: Высшая школа, 1989г -200 с.
41. Канащенков А. И., Новиков С. В. Основные методологические принципы проектирования радиолокационных систем летательных аппаратов нового поколения // Надёжность и качество сложных систем, №3 2018. - С. 71-84.
42. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение.– СПб.: БХВ-Петербург,2003. 1104 с.
43. Каталог продукции «Иолла». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iolla.info/product/>, (дата обращения: 12.05.2024)
44. Кожевников А.М. Методы оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов. диссертация д.т.н., 2005, с. 274.
45. Коннов А.В., Владыкина И.С., Полянская Т.И., Жарихин С.В. Моделирование системы принудительного воздушного охлаждения коллектора многолучевого клистрона // "Электроника и микроэлектроника" Т.1 №12015. - С 234-238
46. Коренев Г.В. Тензорное исчисление. – М.: Изд-во МФТИ, 1996 – 134 с.

47. Корнеев В.М. Особенности конструирования и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов самолетного типа - М.: "Издательские решения" 2018. - 42 с.
48. Кохонен Т., Самоорганизующиеся карты, Москва : Бином. Лаб. знаний, 2008 - 655 с.
49. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. – М.: Наука, 1965 -427 с
50. Криворотько О.И., Звонарева Т.А. Учебно-методическое пособие курса "Векторный и тензорный анализ" Новосибирск, 2021 – 40 с.
51. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход . – М.: Мир, 1978. 432 с.
52. Кротова Е.И. Основы конструирования и технологии производства РЭС. Учебное пособие, Ярославль, ЯрГУ, 2013 - 192 с.
53. Физическая электроника : учебное пособие / Е. И. Кротова ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Ярославский гос. ун-т им. П. Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2009. - 136 с.
54. Кузнецов А.С., Кручинин А.А, Ушкар М.Н. Методика прогнозирования надежности и эффективности конструкций бортовой радиоаппаратуры на ранних этапах проектирования. Труды МАИ, 2024 №137 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181879> (дата обращения: 30.08.2024).
55. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Формирование параметрических моделей электронных модулей РЭС // «Электромагнитные волны и электронные системы» №9, 2019. – С 44-45.
56. Кузнецов А.С., Ушкар М.Н. Методика формирования конструктивного базиса бортовых РЛС БПЛА. Успехи современной радиоэлектроники - Москва: Радиотехника, № 9 2023 –С. 51-62.
57. Кузнецов Г.А, Кудрявцев И.В., Крылов Е.Д. ,Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных

- беспилотных летательных аппаратов // Наука и инновации № 9·2018. – С. 1-21.
58. Липский В. Комбинаторика для программистов. – М.: Мир, 1988. – 213 с.
59. Майданик Ю, Ф. Вершинин С.В. Разработка и исследование контурных тепловых труб. Теплофизика высоких температур - 2022, №3, - С. 407-414.
60. Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы -высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники. Электроника НТБ, №6, 2017 -С. 122-130.
61. Малюх, В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций [Текст] / В.Н. Малюх. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
62. Малюх В.Н. Революция в САПР неизбежна и она уже началась [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=14182](https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=14182) (дата обращения: 10.07.2024).
63. Массовая загрузка XML-данных, статья [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/relational-databases/xml/load-xml-data?view=sql-server-ver16> (дата обращения: 10.07.2024).
64. Машинное обучение, нейронные сети: Тензоры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://qudata.com/ml/ru/NN\\_Base\\_Numpy.html](https://qudata.com/ml/ru/NN_Base_Numpy.html) (Дата обращения: 01.04.2024).
65. Муратов А.В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС: учеб. пособие/ А.В. Муратов, Н.В. Ципина. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. 96 с
66. Мурдаханов С., Разработка на языке С# приложений с графическим интерфейсом : использование Windows Forms , Издательский Дом НИТУ «МИСиС» , 2019, 396 с.
67. Нечепуренко М.И. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях/ — Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990
68. Новиков, Ф.А. Дискретная математика: учебник для вузов / Ф.А. Новиков. – СПб.: Питер, 2017 – 496 с.

69. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 176 с.
70. Носков С.И., Построение свертки критериев адекватности регрессионных моделей, Иркутский государственный университет, 2022
71. Носов В.А. Комбинаторика и теория графов - Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет) : Москва, 1999 – 112 с.
72. Обработка графов в SQL Server и Базы данных SQL Azure [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/relational-databases/graphs/sql-graph-overview?view=sql-server-ver16> (Дата обращения 05.05.2024).
73. Овчинников С.В. Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи: Учеб.-метод. пособие для студентов физического факультета направлений подготовки 03.03.02 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://elibrary.sgu.ru/uch\\_lit/1483.pdf](http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf) (Дата обращения 02.06.2024).
74. Орлов А.И. Теория принятия решений. М.: Экзамен, 2010. 574 с.
75. Пашин В.М., Рост стоимости и проблемы управления созданием военной техники. Доклад на 6-й международной конференции NSN-2013. Санкт-Петербург: Военно-морской салон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4677> (Дата обращения 09.06.2024).
76. Паспорт научной специальности 2.2.9. «Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры» Режим доступа: [https://dissov.pnzgu.ru/files/dissov.pnzgu.ru/2022/pasporta\\_special\\_/2\\_2\\_9\\_\\_proektirovanie\\_i\\_tehnologiya\\_priborostroeniya\\_i\\_radioelektronnoy\\_apparatury.pdf](https://dissov.pnzgu.ru/files/dissov.pnzgu.ru/2022/pasporta_special_/2_2_9__proektirovanie_i_tehnologiya_priborostroeniya_i_radioelektronnoy_apparatury.pdf) (дата обращения: 10.08.2024)
77. Полозов, В.С. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи [Текст] / В.С. Полозов, О.А. Будеков, С.И. Ротков [и др.]. – М.: «Машиностроение», 1983. – 280 с.

78. Полякова, Лариса Николаевна. Основы SQL : учебное пособие для вузов / Л.Н. Полякова. - 2-е изд., испр. - М. : Интернет-Университет Информационных Технологии : Бином. Лаборатория знаний, 2007. - 223 с
79. Проектирование радиоэлектронных средств: учебное пособие / А.В. Безруков и [др.]; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 190 с
80. Прокопенко Н.Ю., Системы поддержки принятия решений на базе Deductor Studio Academic 5.3, Учебное пособие Нижний Новгород 2017.
81. Резников Г.В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ/ Г.В.Резников. -М.:Радио и связь., 1988. - 222 с.:ил.
82. Рекомендации по оценке показателей критериев экономической значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Методический документ (Проект). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/proekty/proekt-metodicheskogo-dokumenta-2> (дата обращения: 10.08.2024)
83. Рибсон Я., Вебер Д., Эйфрем Э. , Графовые базы данныхю -ДМК-Пресс, 2016. -256 с
84. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. –М.: Сов. радио, 1976. – 232 с.
85. Румянцев А.В. Методы конечных элементов в задачах теплопроводности: Учебное пособие / Калинингр. ун-т. Калининград. 1995. -170 с.
86. Сандаков Е.Б., Селиванова С.Г. Начала тензорного исчисления Методические рекомендации - М. : Интернет-Университет Московский инженерно-физический институт 2009. - 40 с.
87. Семенихина Н.Б. , Метод анализа иерархий как системный подход к проблеме принятия решений // Математические и вычислительные методы 2023 – С.38-40.
88. Сорокин А.Д. Расчет ребристого радиатора как элемента теплообменника с принудительной конвекцией [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: <http://www.electrosad.ru/Ohlajd/MetRR.htm> (Дата обращения: 10.02.2024)

89. Состояние и тенденции развития рынка беспилотных авиационных систем в мире и России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.csr.ru/ru/research/sostoyanie-i-tendentsii-razvitiya-rynkabespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-v-mire-i-rossii/> (Дата обращения: 10.04.2024).
90. Справочник надежности электрорадиоизделий: / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, - 2006. – 641 с.
91. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольникова. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1 М.: Техносфера, 2014. - 672 с
92. Старенченко А.В. Разработка методики конструирования теплонагруженных БРА малоразмерных ЛА, диссертация к.т.н., 2018 - 118 с.
93. Улитенко А.И., Гуров В.С., Пушкин В.А., Принципы построения индивидуальных систем охлаждения электронных приборов и устройств. - М.: Горячая линия - Телеком, 2012 г. – 286 с.
94. Хаггарти Р. , Дискретная математика для программистов / Р. Хаггарти. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016 – 400 с.
95. Халин В.Г., Чернова Г.В., Системы поддержки принятия решений : учебник и практикум для вузов / Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 494 с.
96. Хендерсон, Кен. Профессиональное руководство по Transact-SQL : [Пер. с англ.] / К. Хендерсон. - СПб. : Питер, 2005. - 558 с.
97. Хилл К. , «Научное программирование на Python» ДМК-Пресс - 2020. – С. 646 с.
98. Хорафас Д., Легг С. Конструкторские базы данных. М.: Машиностроение, 1990. 429 с.
99. Чеканов А.Н. Расчёты и обеспечение надёжности электронной аппаратуры. КноРус, 2014, 438 с.

100. Чеканов А. Н., Носов В. И., Резчикова Е. В. Расчет вероятностных характеристик и оптимизация несущих конструкций при стратегическом нагружении / Чеканов А. Н., Носов В. И., Резчикова Е. В. - М., 1989. - Труды / МВТУ им. Н. Э. Баумана ; № 532.
101. Шевченко Д.В., Метод Анализа иерархии, Лекции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/204810376?ysclid=lzxhspc3gx310997755> (дата обращения: 12.08.2024)
102. Шемелова А.Д., Клейменова Н.Л. Разработка методики оценки уровня качества конструкторской документации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. –С. 142-147.
103. Шихобалов Л.С., Матрицы и определители / Учебное пособие , Математико-Механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, 2015. – 55с.
104. Шляпников Н.С., Конструирование РЭС / Учебное пособие к практике, Ульяновский государственный технический университет, 2001. -127 с.
105. Шубарев В., Меткин Н., Зверев В.. Магистрально-модульное построение РЭС // стратегическое направление радиоэлектронного приборостроения. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ , Бизнес. Научно-технический журнал • Спецвыпуск • 2008. –С. 134 -139.
106. Шахнов В.А., Билибин К.И., Власов А.И. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры - МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002 - 528 с.
107. Brahman T.R. Multicriteria choice and alternatives in engineering. М.: Radio i svyaz, 1984. 288 p.
108. Courtney J. Decision Support Models and Expert Systems. Houston: Dame, 1997.ms. Houston: Dame, 1997.
109. Dijkstra E., “A note on two problems in connexion with graphs”, Numerische Mathematik 1 (1959), 269–271.
110. Driscoll B., Gupta N., Vettor R., Entity Framework 6 Recipes, Apress 2013

111. Dunbar N., Jacobs R., Supper R. Design, Development and Testing of a Miniature Capillary Pumped Loop. Proc. of the 6th European Symposium on
112. Enriquez J.G., Sanchez-Begines J.M., Dominguez-Mayo F.J., Garcia-Garcia J.A., Escalona M.J. An approach to characterize and evaluate the quality of Product Lifecycle Management Software Systems // Computer Standards & Interfaces. 2019. Vol. 61. P. 77–88
113. Griffiths I. Programming C# 8.0 O'Reilly Media, 2020
114. Goncharov K., Kolesnikov V. Development of Propylene LHP for Spacecraft Thermal Control System. – Proceedings of the 12-th Int. Heat Pipe Conference, Moscow, Russia, 2002, p. 171–176.
115. Hassnain Mohsan S., Yanlong Li, Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends, Intelligent Service Robotics (2023) 16 p 109–137
116. Idris I. Numpy Cookbook – Second Edition , Packt Publishing 2012
117. Irzaev G.Kh. Expert management methods of industrial product manufacturability. M.: Infra-Inzheneriya, 2010. 192 p.
118. Magennis T. LINQ in Action Paperback - AddisonWesley Professional -2010
119. Maidanik Y., Fershtater Y., Pastukhov V. et al. Some Results of Loop Heat Pipes Development, Tests and Application in Engineering. Proc. of the 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, Australia, 1996, pp.406-412.
120. Marguerie F., Eichert S., Wooley J., LINQ in Action Paperback, Hanning - 2008 – 540 p.
121. Mockler R. Computer Software to Support Strategic Management Decision Making. New York: Macmillan, 1992.
122. Noble E., Pro T-SQL 2022 , APRESS 2022. 570 p.
123. Ogushi T, Murakami Yao A. et al. Heat Transfer Performance of Flexible Loop Heat Pipe. 10th Int. Heat Pipe Conf. Stuttgart, Germany, Prep. #A2-3
124. Reay D., McGlen R., Kew P. Heat Pipes: Theory, Design and Applications? ELSEVIER, Sixth edition, 2014 Germany, 1994
125. Russo M., Pialorsi P., Programming Microsoft LINQ Paperback Publisher Microsoft Press US, 2008. – 660 p.

126. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. New York : McGraw Hill, 1980.
127. Safronov V.V. Ranking hyper-vector of complex systems // Informatsionnye tekhnologii. 2003. № 5. P. 23-26
128. Sharir M., “A strong connectivity algorithm and its applications to data flow analysis”, Computers and Mathematics with Applications, 7:1 (1981), 67–72.
129. Shaw Z. Learn Python 3 the Hard Way, 4th, 2017. – 285 p.
130. Syverson B Murach's SQL Server 2022 for Developers Adidev Press PVT Ltd, 2023. - 656 p.
131. Vanderplas J. Python Data Science Handbook, O'Reilly, 2016 Vanderplas J. Python Data Science Handbook, O'Reilly, 2016. - 529 p.

## Приложение А

### Акт внедрения

«Утверждаю»

Проректор по учебной работе

ФГБОУ «Московский авиационный институт»

Д.А. Козорез



#### Акт внедрения результатов

диссертационной работы Кузнецова Андрея Сергеевича

«Методика повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования» в учебный процесс.

В учебном процессе кафедры 404 внедрены следующие результаты диссертационной работы Кузнецова А.С.:

- алгоритм синтеза систем принудительного воздушного охлаждения (ПВО) БРЭА,
- алгоритм синтеза и ранжирования проектных решений БРЭА на ранних этапах проектирования.

Указанные результаты оформлены в виде рукописного учебного пособия «Синтез проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования», утверждённого на заседании кафедры 404 (Протокол № 1 от 30 августа 2023г.).

Учебное пособие использовано в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 11.03.03 в дисциплине «Основы конструирования ЭС», а также в учебном процессе подготовки магистров по программе «Проектирование РТУ и С».

Директор дирекции института №4

В.В. Кирдяшкин

Зав. кафедрой 404

М.Н. Ушкар

## Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
АО «Радиотехнический институт им.  
академика А.Л. Минца»

«17» 2018 г. И. Сучков

### АКТ

#### об использовании результатов исследования

диссертационной работы Кузнецова А.С.,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

председатель: Тимошенко Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, начальник комплексного отдела

члены комиссии: Буханец Дмитрий Иванович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела;

Панкратов Валерий Анатольевич, ведущий инженер рассмотрела результаты диссертационной работы Кузнецова А.С. «Информационное обеспечение автоматизированной системы анализа и синтеза проектных решений РЭС».

В рамках выполнения НИР «Прожектор» (47310-04080), тема 1307/035-ФЗП от 1.12.2013 года, в соответствии с договором, заключенного с МАИ (НИУ), были разработаны следующие аппаратно-программные комплексы (АПК):

1. АПК формирования проектов автоматизированного эскизно-технического проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения (РЛС ДО).
2. АПК формирования шаблонов компонентов автоматизированного эскизно-технического проектирования РЛС ДО.
3. АПК формирования прототипов компонентов автоматизированного эскизно-технического проектирования РЛС ДО.
4. АПК формирования функционально-параметрической модели автоматизированного эскизно-технического проектирования РЛС ДО.
5. Программный модуль управления базой данных, входящий в состав комплекса аппаратно - программной платформы проектирования РЛС ДО и

предназначенный для структурирования, обработки и хранения информации, относящейся к проектным решениям РЛС ДО.

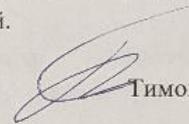
Комиссия пришла к следующим выводам:

1. При разработке перечисленных выше АПК были использованы следующие результаты диссертационной работы Кузнецова А.С.:

- методика синтеза магистрально-модульных структур РЭС.
- графоаналитический метод анализа магистрально-модульных структур РЭС и выбор эффективного проектного решения на этапе системного проектирования.
- методика формирования параметрических моделей электронных модулей РЭС.

2. Использование, указанных в п.1 результатов позволило расширить возможности аппаратно-программной платформы проектирования РЛС ДО и сократить сроки проектирования новых изделий.

Председатель комиссии:



Тимошенко А.В.

Члены комиссии:



Буханец Д.И.  
Панкратов В.А.

## Акт внедрения

### УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «НПО дальней радиолокации им.  
академика А.Л. Минца»

«    »

### АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.9. – «Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры» старшего преподавателя НИУ МАИ Кузнецова Андрея Сергеевича

Комиссия в составе: председатель комиссии – Соколов Константин Сергеевич, директор научно-тематического центра-4;

члены комиссии: Буханец Дмитрий Иванович, ученый секретарь – заместитель начальника управления, доктор технических наук, начальник отдела; Перлов Анатолий Юрьевич, заместитель начальника отдела, кандидат технических наук; Казанцев Андрей Михайлович, начальник лаборатории, кандидат технических наук, составила настоящий акт о том, что результаты диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата технических наук Кузнецова Андрея Сергеевича, а именно:

основные положения методики повышения эффективности проектных решений конструкций радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования, апробирована и использована АО НПОДАР в ходе выполнения ОКР «Республика-П» при подготовке материалов технического проекта в книге 6 часть 3 «Технический облик изделия и его составных частей».

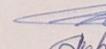
Указанные результаты работы рассмотрены и обсуждены на заседании секции №1 НТС АО НПОДАР.

**Вывод:** Апробация результатов диссертационных исследований Кузнецова А.С. показала, что использование положений предложенной методики позволило расширить возможности аппаратно-программной платформы проектирования РЛС ДО и сократить сроки проектирования новых изделий.

Председатель комиссии:

 К.С. Соколов

Члены комиссии:

 Д.И. Буханец  
 А.Ю. Перлов  
 А.М. Казанцев



## Приложение Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2023615662**

**«Программа формирования ранжированного ряда комплектов конструктивных модулей проектируемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА)»**

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

Автор(ы): **Кузнецов Андрей Сергеевич (RU)**

Заявка № **2023614148**  
Дата поступления **06 марта 2023 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **16 марта 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности  
  
**Ю.С. Зубов**



**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2024662501**

**Программа расчета системы принудительного  
воздушного охлаждения бортовой радиоаппаратуры**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)» (RU)*

Автор(ы): *Кузнецов Андрей Сергеевич (RU)*

Заявка № **2024618950**  
Дата поступления **24 апреля 2024 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **29 мая 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*  
  
**Ю.С. Zubov**



## Приложение В

### Кластеризация альтернативных вариантов проектных решений БРЭА

Кластеризация альтернативных вариантов проектных решений БРЭА осуществляется с помощью нейронной сети Кохонена, которая представляет собой сеть с обратной связью и состоит из следующих элементов: множества входных узлов  $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ; нейронов выходного слоя  $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_m)$ ; линий связи (синапсов) входных узлов и нейронов выходного слоя, характеризующиеся весовыми коэффициентами  $w_{ij}$ .

Структура нейронной сети Кохонена показана на Рисунке В.1.

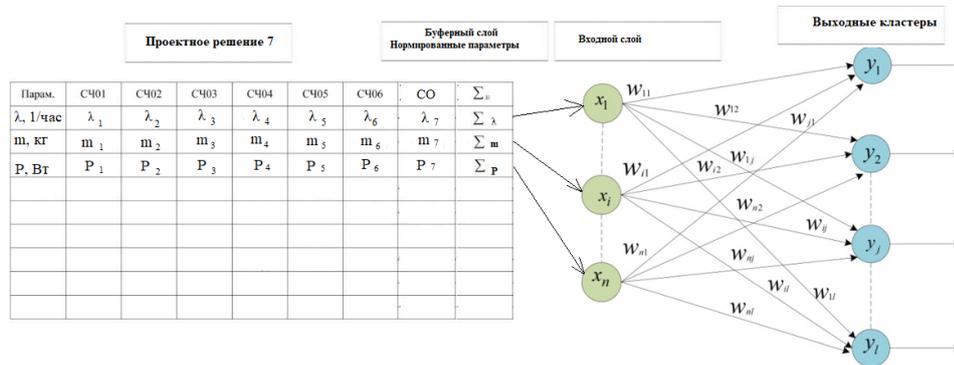


Рисунок В.1. Структура нейронной сети Кохонена.

Количество входных узлов  $X$  соответствует множеству параметров которыми характеризуется  $k$ -ый варианта проектного решения;  $W(u_k) = \langle W_k^1, \dots, W_k^p, \dots, W_k^r \rangle$  - вектор параметров, которым;  $p = \overline{1, r}$ ,  $r$  - общее число параметров, которыми характеризуются ПР ;  $U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_v\}$ ; где  $k = \overline{1, v}$ ,  $v$  - общее число допустимых вариантов ПР БРЭА. . Количество нейронов выходного слоя  $Y$  соответствует множеству классов, среди которых происходит начальное распределение и последующее перераспределение ПР. В результате происходит отнесение ПР к одному из классов.

Инициализация сети реализуется присвоением случайных значений весовым коэффициентам связей  $w_{ij}$  входных нейронов с выходными

нейронами. Значения задаются произвольно в интервале от 0 до 1. (Как правило, от 0,3 до 0,9 ). Далее находятся «расстояния» между входными узлами и выходными нейронами путем определения Евклидовой длины вектора  $D_j$  :

$$\|D_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ij})^2}$$

Каждый вектор  $D_j$  относится к определенному выходному нейрону  $y_j$ . Количество векторов  $D_j$  для каждого ПР соответствует количеству классов  $-l$ . Модуль приписывается к классу, для которого выполняется условие:

$$\|D_j\| = \min_{1 < j < l} \|D_j\|$$

В результате все множество ПР  $U'$  распределяется по классам, образуя соответствующие подмножества:

$$U' = \{U'_1 \cup U'_2 \cup \dots \cup U'_l\};$$

Сети Кохонена относятся к сетям с самообучением, т.е. применяется обучение без учителя, которое заключается в корректировке значений весовых коэффициентов  $w_{ij}$  выбранного выходного нейрона в направлении нормированных значений параметров. В результате обучения модули, имеющие близкие величины нормы векторов  $\|D_j\|$ , размещаются в одном и том же классе. Принцип работы сети Кохонена показан на Рисунке В 2.

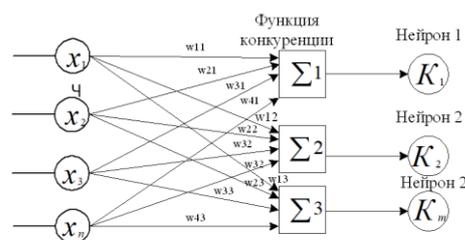


Рисунок В.2. Принцип работы сети Кохонена

Результат кластеризации с применением нейронной сети Кохонена показан на Рисунке В.3.

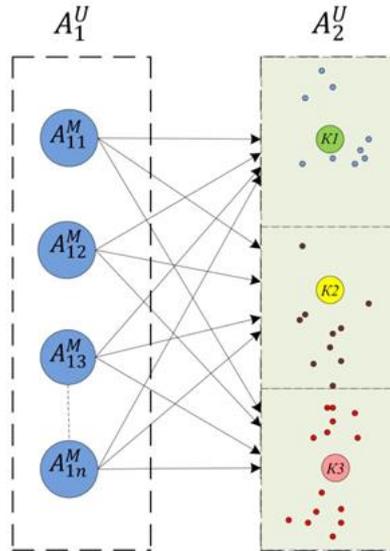


Рисунок В.3. Результат кластеризации с применением нейронной сети Кохонена.

В таблице В.1 приведены значения расстояния ПР до центра кластера, полученные в результате выполнения кластеризации альтернативных проектных решений по трем кластерам с помощью нейронной сети Кохонена, с применением специализированного программного обеспечения Loginom.

Таблица В.1. значений расстояния ПР до центра кластера, полученные в результате выполнения кластеризации альтернативных проектных решений по трем кластерам.

Класс 0															
	COL1	COL2	COL3	COL4	COL5	COL6	COL7	COL8	COL8_OUT	Номер ячейки	Расстояние до центра ячейки	Номер кластера	Расстояние до центра кластера		
КТТ -1 Комплект	0,881081081	1	1	0,834146341	0,880845161	0,195263156	0,0395	0,272727273	0,272727273	167	1,824131090793208	15	0	0,811202957395746	
Радиатор - КТТ -2 Комплект	0,891891892	1	0,357142857	0,219101219	0,06674194	0,162620156	1	0	0	8	1,724702524015028	15	0	0,881353677608237	
КТТ -2 Комплект	0,525252523	1	1	0,697669376	0,886645161	0,157994737	0,75	0,454545455	0,454545455	89	2,0398760384271E-15	15	0	0,250003650348212	
Четыре КТТ -2 Комплект	0,702702703	0,5	1	0,697669376	0,848367097	0,157994737	0,75	0,181818182	0,181818182	14	1,82524967279300E-15	15	0	0,44115930625616	
Класс 1															
	COL1	COL2	COL3	COL4	COL5	COL6	COL7	COL8	COL8_OUT	Номер ячейки	Расстояние до центра ячейки	Номер кластера	Расстояние до центра кластера		
Четыре КТТ -1 Комплект	0,810810811	0,5	1	0,82439244	0,849367097	0,878947368	0,825	0,181818182	0,181818182	167	2,19824443615961E-15	15	1	0,29664308260213	
Восемь КТТ -3 Комплект	0,810810811	0	1	0	0	0	0,825	0,181818182	0,181818182	191	1,2951655205142E-15	15	1	0,26664694765666	
Восемь КТТ -2 Комплект	0,702702703	0	1	0,848700488	0,816129032	0,885789474	0,75	0,363636364	0,363636364	95	1,172290263873E-15	15	1	0,504142448673464	
Класс2															
	COL1	COL2	COL3	COL4	COL5	COL6	COL7	COL8	COL8_OUT	Номер ячейки	Расстояние до центра ячейки	Номер кластера	Расстояние до центра кластера		
Без СО -1 Комплект	0,108108108	1	0,714285714	0,98121812	0,827181358	0,847368423	0	0,808080809	0,808080809	176	2,0989119968754E-15	15	2	1,3370719300223	
Радиатор -1 Комплект	0,922929293	1	1	0	0,317072171	0,387036727	0,23842105	0,0125	0,090909091	0,090909091	81	1,572502631722E-15	15	2	0,33089496800532
Радиатор -КТТ -1 Комплект	1	1	0,357142857	0,182328289	0,84516129	0,626315789	0	0	0	85	1,3039771038466E-15	15	2	0,51609536918846	
Без СО -2 Комплект	0	1	0,714285714	1	1	1	0,75	1	0,808080809	180	0,7818515376273	15	2	1,3370719300223	
Радиатор -2 Комплект	0,86484865	1	0	0,414634146	0,330709677	0,288473884	0,625	0,090909091	0,090909091	0	2,13627805716115E-15	15	2	0,597037173810053	

## Фрагмент исходного текста программного модуля формирования исходного конструктивного базиса БРЭА.

(Реализован на языке C#, LINQ)

```
private void buttonMVG_Click_2(object sender, EventArgs e)
{
    try
    {
        STicketContainer db = new STicketContainer();
        object tbValue = textBoxCodeCH.Text;
        int codeInputCH = Convert.ToInt32(tbValue);
        //Выполняем запрос-выборку MBГ с параметрами из локальной БД.
        var queryModulHR = (from Modul in db.TemplateNumber
            join ESCD_tbl in db.ESCD on Modul.TemplateNumber.FK_ESCDESCD_ID equals
            ESCD_Table.ESCD_ID
            join Doc_tbl in db.Doc on Modul.TemplateNumber.FK_DocDoc_ID equals Doc_tbl.Doc_ID

            join Modul_tbl db.Modul on Modul.TemplateNumber.FK_ModulModul_ID equals
            Modul.Modul_ID

            join Modul_Param_tbl in db.Modul_Param on
            Modul_Param_tbl.FK_ModulModul_ID equals Modul.Modul_ID

            join Param_EI_tbl in db.Param_EI on Modul_Param.FK_ParamEIEI_ID equals
            Param_EI_tbl.EI_ID

            join Phys_Quantity_tbl in db.Param_EI on
            Modul_Param.FK_ParamEIEI_ID equals Param_EI_tbl.EI_ID

            join PARAM_VALUE_LIST_tbl in
            db.PARAM_VALUE_LIST on PARAM_VALUE.VALUE_ID equals
            PARAM_VALUE_LIST.FK_PARAM_VALUE

            join Modul_project_tbl in
            db.Modul_Project on Modul_Project_tbl.FK_ModulModul_ID equals Modul.Modul_ID

            where ESCD_Number == codeInputCH
            select new
            { // Перераспределяем объекты
                mIdent = Modul_tbl.Modul_ID,
```

```

mName = Visitor.VisitorLastNme,
pName = Modul_Param_tbl.mdParamName,
Modul_project_tbl.projectName,
PARAM_VALUE_LIST.Value,
Modul_Param_tbl.mdParamValue,
pName =
pValueList =
pValue =
paramEI = Param_EI_tbl.PymentID,
Phys_Quantity = Phys_Quantity_tbl.PQ_Sname
}).Tolist();

```

```

//Проверяем на пустые входные данные и результат пустого запроса
queryModulHR

```

```

if (textBox1.Text == String.Empty || !queryModulHR.Any() )
{
    MessageBox.Show("Необходимо ввести уникальный индификатор ККХ");
}

else
{
    //Отображаем все выбранные МВГ в таблице.

    dataGridViewMVG.DataSource = queryModulHR;
}
}
catch
{
    MessageBox.Show("Модулей МВГ, по данному ККХ:"+ textBoxCodeCH.Text+ "Не
найдено!");
}
}

```