

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2024

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

- Научный руководитель:** **Ушкар Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, МАИ.
- Официальные оппоненты:** **Пиганов Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, профессор кафедры «Конструирование и производство радиоэлектронных средств».
- Ямпурин Николай Петрович**, доктор технических наук, профессор, Арзамасский политехнический институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Конструирование и технология РЭС».
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.12 на базе Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182738

Автореферат разослан «___» _____ 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.12, к.т.н., доцент



Ф.В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Легкие и средние беспилотные летательные аппараты (БПЛА), как правило, эксплуатируются в жестких условиях и характеризуются небольшой массой целевой нагрузки, а также низкими энергетическими возможностями.

В связи с этим проектирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) БПЛА предполагает решение следующих задач:

- 1) повышение надежности БРЭА при ужесточении условий эксплуатации;
- 2) снижение массогабаритных характеристик БРЭА;
- 3) снижение энергопотребления БРЭА;
- 4) сокращение сроков проектирования БРЭА.

При решении этих задач необходимо учитывать следующие особенности современной БРЭА:

- a) 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;
- b) 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;
- c) 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. 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. 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 Кожевникова А.М. автором рассмотрены методы оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов. 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. Целью диссертационной работы является разработки методики повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования путем выбора проектного решения, имеющего оптимальное сочетание параметров: эксплуатационная интенсивность отказов, массогабаритные параметры, потребляемая мощность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выполнить анализ особенностей построения БРЭА, на примерах БРЛС БПЛА;
- 2) разработать формализованное описание электрической схемы БРЭА, необходимое для автоматизации синтеза и анализа её проектных решений;
- 3) разработать информационную модель (ИМ) составных частей БРЭА, необходимую для автоматизации формирования конструктивного базиса БРЭА;
- 4) разработать методику генерации допустимых комплектов модулей высокой готовности (МВГ), реализующих СЧ БРЭА;
- 5) разработать алгоритм синтеза проектных решений конструкций БРЭА, удовлетворяющих требованиям ТЗ;
- 6) разработать методику обеспечения надёжности БРЭА путём синтеза эффективных систем охлаждения;
- 7) разработать методику сравнительного анализа и ранжирования проектных решений БРЭА;
- 8) 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 счёт сравнительного анализа и выбора систем охлаждения с низким потреблением мощности.
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 на ранних этапах проектирования 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 принудительного воздушного охлаждения (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:

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, 2016 г.

Внедрения. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «НПО дальней радиолокации им. академика А.Л. Минца» а также в учебном процессе кафедры 404 «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» МАИ.

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 участием автора. Личное участие автора в получении изложенных в диссертации результатов отражено в публикациях и подтверждено соавторами.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования, что позволяет повысить ее надежность и снизить потребляемую мощность, рассмотрена степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы исследования и основные результаты работы, приведены данные о структуре и объеме работы.

Первая глава диссертации посвящена анализу состояний, тенденций развития и особенностей конструкций современных БРЭА, а также постановке задачи исследования.

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

Особенности конструкций БРЭА, устанавливаемой на БПЛА, рассматриваются в работе на примере бортовой РЛС (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 ограничений на потребляемую мощность.

Сравнительный анализ данных, проведенный на примерах БРЛС, 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 БРЛС привело к росту удельной плотности теплового потока в 2-3 раза и существенному повышению аэродинамического сопротивления за счет сужения воздушных каналов между составными частями БРЭА. Указанные особенности обусловили необходимость анализа и выбора проектных решений БРЛС на ранних этапах проектирования с учётом не только параметров конструкций, но и систем охлаждения. Необходимость учёта параметров систем охлаждения обусловлена высоким аэродинамическим сопротивлением конструкций БРЛС, что требует применение высоконапорных вентиляторов, потребляющих значительную мощность. Например, при общей потребляемой мощности БРЛС «Корсар-МРЛЦН» 400 Вт, мощность потребления вентилятора составляет 135 Вт. Это приводит к необходимости снижать мощность излучения БРЛС, а следовательно, и дальность.

Проектное решения 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:

$$U_k = \{S_i \cup V_j \cup K_k \cup N_k\}, \quad (1)$$

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.

Для сравнительного анализа и выбора ПР конструкций БРЛС на ранних этапах проектирования в работе предлагается следующий критерий эффективности ПР:

$$\mathcal{E}(u_k) = \frac{P(u_k)}{R(u_k)} | \forall u_k \in U, \quad (2)$$

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:

$$R(u_k) = \sum_{p=1}^r \beta_p \overline{w_k^p}, \quad (3)$$

где $\sum_{p=1}^r \beta_p = 1$; $0 < \beta_p \leq 1$; $p = \overline{1, r}$; $\forall w_k^p \leq W_{доп}^p$.

$W(u_k) = \langle w_k^1, \dots, w_k^p, \dots, w_k^r \rangle$ — вектор параметров, которым характеризуется вариант проектного решения; $p = \overline{1, r}$, r — общее число параметров, которыми характеризуются ПР; β — коэффициент веса p -го параметра; $W_{доп}^p$ — допустимое значение p -го параметра; $\overline{w_k^p}$ — нормированное значение p -го приведенного параметра k -го варианта проектного решения;

$$\overline{w_k^p} = \frac{w_k^p}{w_k^{*p}}, \quad (4)$$

где $w_k^{*p} = \max_k w_k^p$. Все параметры приведены к единой тенденции «чем меньше, тем лучше».

Основными параметрами, определяющими эффективность ПР конструкций БРЭА, являются: эксплуатационная интенсивность отказов, массогабаритные параметры, потребляемая мощность. В ТЗ на изделие на указанные параметры накладываются ограничения. В этом случае комплексный показатель примет вид:

$$R_k = \beta_\lambda \overline{\lambda_k} + \beta_m \overline{m_k} + \beta_p \overline{P_k}, \quad (5)$$

где λ_k — эксплуатационная интенсивность отказов ПР, $\lambda_k \leq \lambda_{доп}$, $\lambda_{доп}$ — допустимая интенсивность отказов БРЭА; m_k — масса ПР; $m_k \leq m_{доп}$, $m_{доп}$ — допустимая масса БРЭА; P_k — потребляемая мощность ПР, $P_k \leq P_{доп}$, $P_{доп}$ — допустимая потребляемая мощность БРЭА.

Вероятность выполнения поставленной задачи $P(u_k)$ указывается в техническом задании на изделие, например, для БРЛС это может быть дальность обнаружения цели. Если $P(u_k) \geq P_{ТЗ}$, то можно принять $P(u_k) = 1$. Тогда формальная постановка задачи сводится к выбору предпочтительного варианта проектного решения, для которого выполняется условие:

$$\mathcal{E}(u_k^0) \rightarrow \max \frac{1}{R_{\min}(u_k)} | \forall u_k \in U. \quad (6)$$

Таким образом, для разработки методики повышения эффективности проектных решений конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования необходимо следующее.

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 (2) и имеющий возможность работы с современными системами поддержки принятия решений (СППР).
4. Разработать программный комплекс, реализующий разработанные методики и алгоритмы.

Вторая глава посвящена рассмотрению разработанной автором методики формирования конструктивного базиса проектных решений БРЭА. Конструктивный базис представляет собой множество комплектов готовых модулей, покрывающих структуру БРЭА и удовлетворяющих ограничениям ТЗ.

Данная методика позволяет автоматизировать процедуры формирования конструктивного базиса. Для реализации методики в диссертации были решены следующие задачи:

- разработано формализованное описание структуры БРЭА, позволяющее формализовать процедуру покрытия структуры БРЭА посредством информационной модели СЧ БРЭА;
- разработана структура информационной модели (ИМ) СЧ БРЭА, представляющая собой расширенное формализованное ЧТЗ на СЧ;
- разработана методика формирования исходного конструктивного базиса проектируемой БРЭА;
- разработана методика формирования допустимых комплектов модулей высокой готовности (МВГ), покрывающих структуру БРЭА и обеспечивающих выполнение ограничений ТЗ на БРЭА.

С целью повышения производительности при работе с БД хранение структуры БРЭА осуществляется в виде графовой модели. В этом случае формализованное описание структуры БРЭА отображается в виде направленного иерархического графа, где вершины графа сопоставляются составным частям БРЭА. Каждая вершина в графе раскрашивается идентификационным кодом СЧ и сохраняется в БД. В качестве примера, на рисунке 1 приведена структурная схема радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС K_U диапазона, содержащая следующие составные части: усилитель мощности (УМ) СВЧ, опорный генератор (ОГ), синтезатор частот (СЧС), приемник промежуточной частоты (ППЧ), цифровой приемник (ЦП) и БЦВМ.

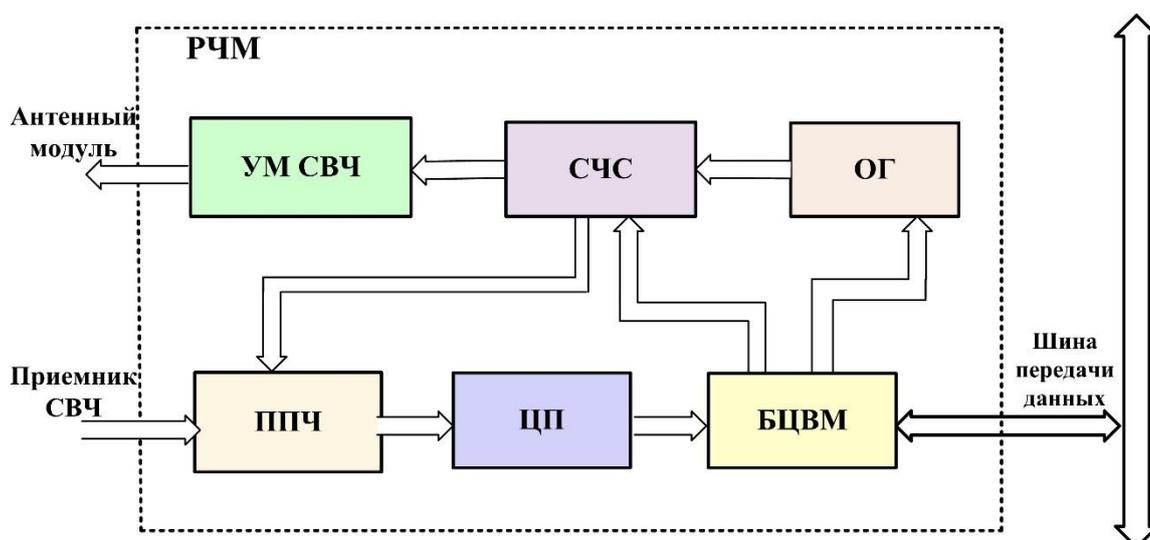


Рисунок 1 — Структура РЧМ БРЭС

Формализованное описание каждой СЧ БРЭА сохраняется в БД в виде информационной модели, которая включает в себя информационные подмассивы, представляющие собой разделы частного технического задания на СЧ БРЭА: двухмерный массив значений параметров, текстовые файлы, файлы обмена данными между системами CAD и PDM. В работе проведен анализ различных видов параметризации, который позволил обосновано выбрать для формирования параметрического подмассива табличную параметризацию.

Алгоритм формирования исходного конструктивного базиса основан на выборе из множества готовых модулей, хранящихся в электронном архиве предприятия, подмножества модулей, в котором идентификационный код каждого модуля соответствует коду покрываемой составной части, а также функциональные параметры, системные параметры и технико-экономические параметры модуля удовлетворяют требованиям ЧТЗ.

Методика формирования допустимых комплектов модулей высокой готовности (МВГ), покрывающих структуру БРЭА и обеспечивающих выполнение ограничений ТЗ на БРЭА включает следующие задачи:

- формирование альтернативных вариантов комплектов МВГ, покрывающих СЧ проектируемой БРЭА;
- определение значений конструкторских, эксплуатационных 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.

В работе был проведен анализ комбинаторно-логических методов, которые используются в автоматизированных системах для решения перечисленных выше задач. Анализ показал, что для объединения различных конструктивно оформленных модулей в единое целое и получение, тем самым, всех возможных вариантов комплектов МВГ, покрывающих СЧ проектируемой БРЭА, наиболее эффективно применять математический аппарат многодольных графов.

В этом случае структура БРЭА интерпретируется D — дольным графом $G=(D,R)$, в котором каждой СЧ изделия ставится в однозначное соответствие доля графа D_e ; $D_e \in D$. В свою очередь, $\forall D_e \in D$ графа G представляет собой множество вершин $M_e = m_{1e}, \dots, m_{ge}, \dots, m_{ne}$, каждая из которых отображает модуль, покрывающий соответствующую СЧ проектируемой системы. Дуги (R) графа $G=(D,R)$ направлены связывают вершины m_{eg} и $m_{(e+1)g}$, входящие в разные подмножества D_e и D_{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.

Количество альтернативных комплектов МВГ соответствует числу возможных маршрутов, которые формируются в графе $G = (D, R)$ методом поиска в глубину. В результате получаем множество комплектов: $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$, где $i = \overline{(1, n)}$; n — общее число альтернативных комплектов МВГ. Каждый комплект S_i характеризуется подмассивом параметров: $Q_i = \langle q_i^1, \dots, q_i^b, \dots, q_i^d \rangle$. При этом, на $\forall q^b \in Q$ накладывается ограничение типа $q^b \leq Q_{\text{доп}}^b$.

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 . Вес комплекта S_i по параметру Q^p определяется для $\forall S_i \in S$ как сумма:

$$Q_i^b = \sum_{e=1}^m q_{eg}^b. \quad (7)$$

На рисунке 2 представлены взвешенные многодольные графы с различным количеством вершин в каждой доле, сформированные на основе структурной схемы РЧМ БРЛС, приведенной на рисунке 1.

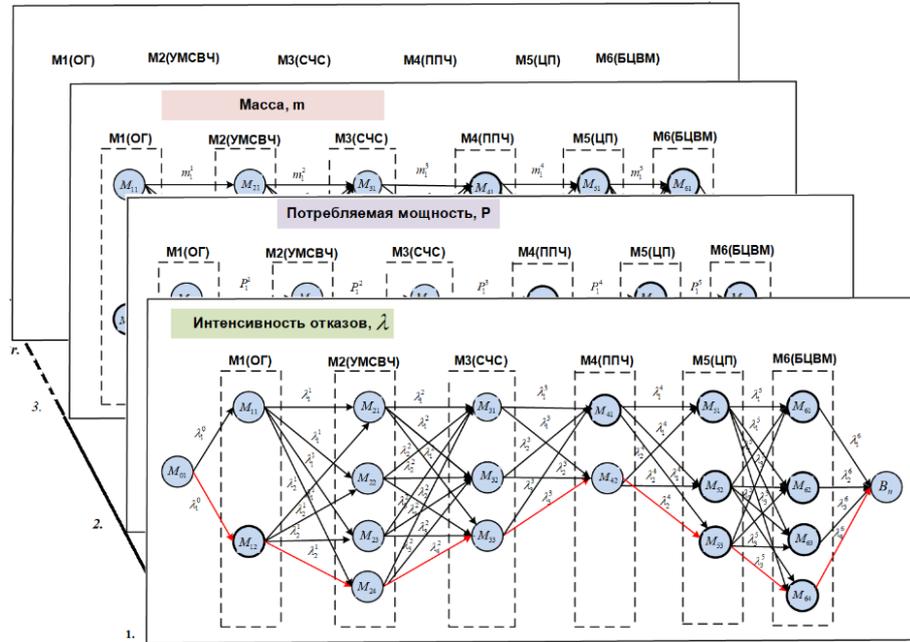


Рисунок 2 — Взвешенные графы по параметрам: λ_k^\exists — интенсивность отказов комплекта МВГ; P_k — мощность, потребляемая комплектом МВГ; m_k — масса комплекта МВГ; C_k — стоимость комплекта МВГ

Множество комплектов S^b распределяется на два подмножества: $S^b = S_{\text{доп}}^b \cup S_{\text{отк}}^b$ согласно условию:

$$S_i^b \in \begin{cases} S_{\text{доп}}^b & | q_i^b \leq Q_{\text{доп}}^b \\ S_{\text{отк}}^b & | q_i^b > Q_{\text{доп}}^b \end{cases}, \quad (8)$$

где $S_{\text{доп}}^b$ — допустимые комплекты МВГ; $S_{\text{отк}}^b$ - отклоненные комплекты МВГ.

Таким образом, предложенная методика позволяет сформировать, с учетом всех заданных ограничений на конструкторские, эксплуатационные и технико-экономические параметры, допустимые комплекты МВГ на основе имеющихся в распоряжении разработчика базовой структуры и исходного конструктивного базиса проектируемой БРЭА.

В третьей главе рассматривается выбор допустимых вариантов систем охлаждения теплонагруженных модулей, а также синтез и ранжирование 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.

Для обеспечения надёжности и повышения точности сравнительного анализа проектных решений БРЭА осуществляется анализ их теплового режима, с целью выбора и определения параметров СО, которые оказывают существенное влияние на конструкторские параметры ПР, и в том числе, на потребляемую мощность БРЭА.

Для сокращения временных затрат на проектирование БРЭА в работе предлагается использовать разработанную автором экспериментально — расчётную методику синтеза допустимых проектных решений БРЭА, которая объединяет САД систему и программный комплекс, с помощью которого анализируется тепловой режим БРЭА, определяются допустимые проектные решения и осуществляется их ранжирование. Последовательность решаемых задач можно представить в виде алгоритма, приведенного на рисунке 3.

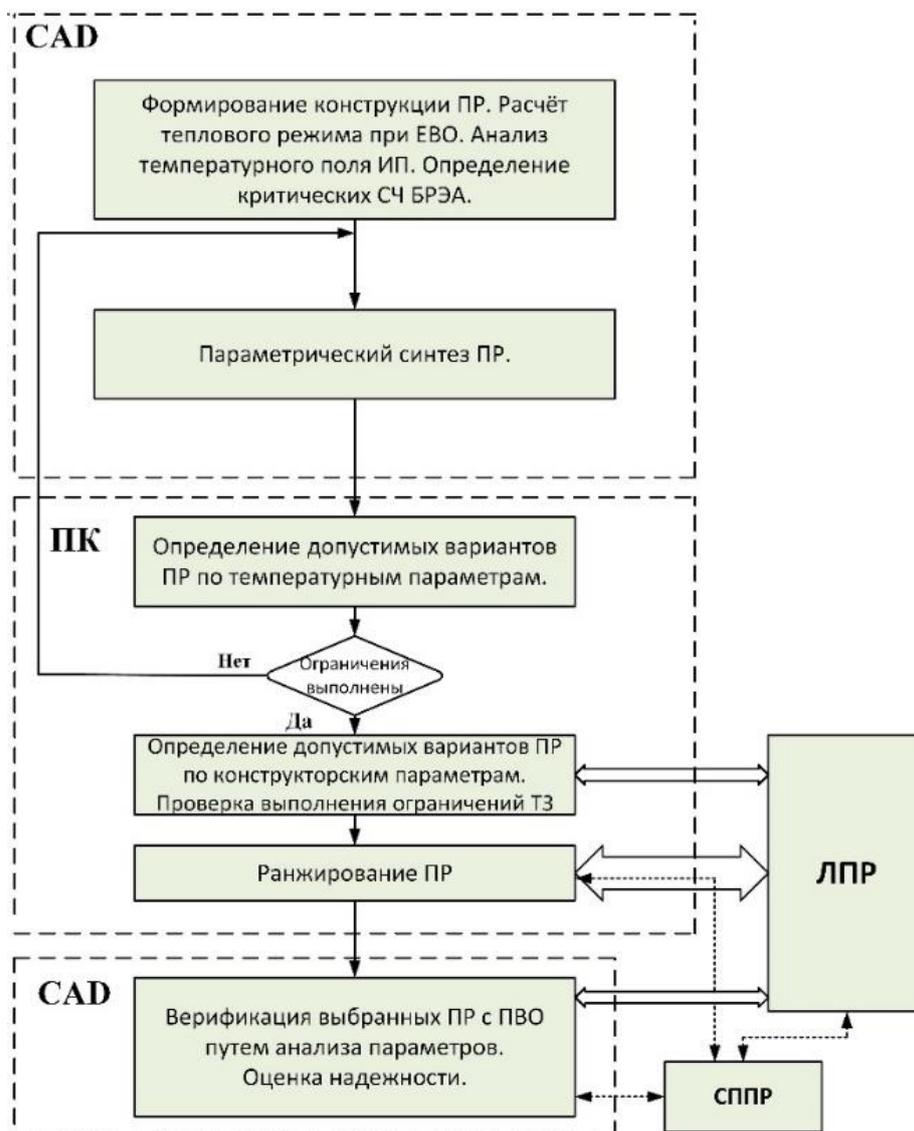


Рисунок 3 — Алгоритм синтеза и анализа ПР конструкций БРЭА

Система САД обеспечивает решение следующих задач:

- формирование ПР в первом приближении, которое заключается в разработке 3D модели конструкции БРЭА для выбранного комплекта МВГ;
 - расчёт теплового режима при ЕВО и формирование температурного поля БРЭА;
 - определение критических СЧ, т.е. СЧ, температура которых превышает допустимые значения;
 - синтез вариантов СО путём анализа параметров температурного поля БРЭА и её СЧ.
- Разработанный программный комплекс позволяет решать следующие задачи:
- анализ теплового режима БРЭА для каждого варианта СО;

- определение допустимых вариантов проектных решений конструкций БРЭА;
- ранжирование допустимых проектных решений конструкций БРЭА.

В работе были рассмотрены два типа систем принудительного воздушного охлаждения (ПВО): на основе радиаторов, устанавливаемых непосредственно на корпус теплонагруженных модулей, и на основе контурных тепловых труб (КТТ) с удаленным радиатором, в качестве которого используется основание несущей конструкции. Анализ и выбор допустимых ПВО осуществляется по следующим параметрам: расход охлаждающего воздуха, аэродинамическое сопротивление, мощность потребления, масса ПВО.

Определение параметров и оптимизация альтернативных вариантов конструкторских проектных решений БРЭА требует обработки большого объема многомерных данных. Для сокращения времени обработки информации используются тензоры, которые позволяют представлять многомерные данные и манипулировать ими. При этом использование языка программирования Python и дополнительной библиотеки NumPy значительно сокращают трудозатраты на реализацию операций с тензорами. 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 ${}^{(1)}T_m \{U_{im}\} = \vec{V}_m$, который приведен на рисунке 4.

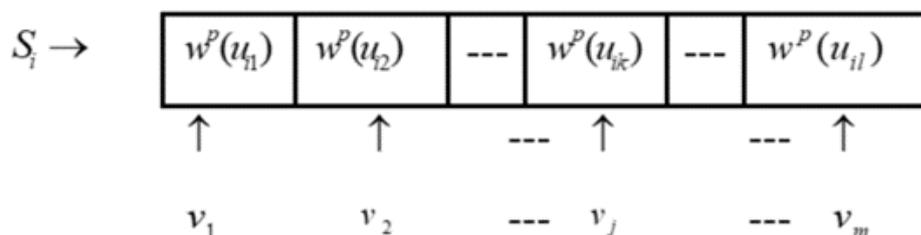


Рисунок 4 — Тензор 1 — тензор первого ранга

Аналогичным образом, в виде тензора второго ранга, представленного на рисунке 5, отображается значение конструкторских проектных решений БРЭА для всего множества комплектов модулей, входящих в множество S .

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

Рисунок 5 — Тензор 2 — тензор второго ранга

На рисунке 6 представлен тензор третьего ранга $[(^3)T\{W(U_{lnr})\}] = (\vec{V}_l \& \vec{S}_n \& \vec{W}_r)$, который включает в себя данные о числе вариантов систем ПВО: вектор V (ось X), данные о количестве комплектов, покрывающих СЧ проектируемого изделия — вектор S (ось Y) и вектор параметров — вектор (W) , характеризующих каждое ПР $u_{ik} \in U$ (ось Z).

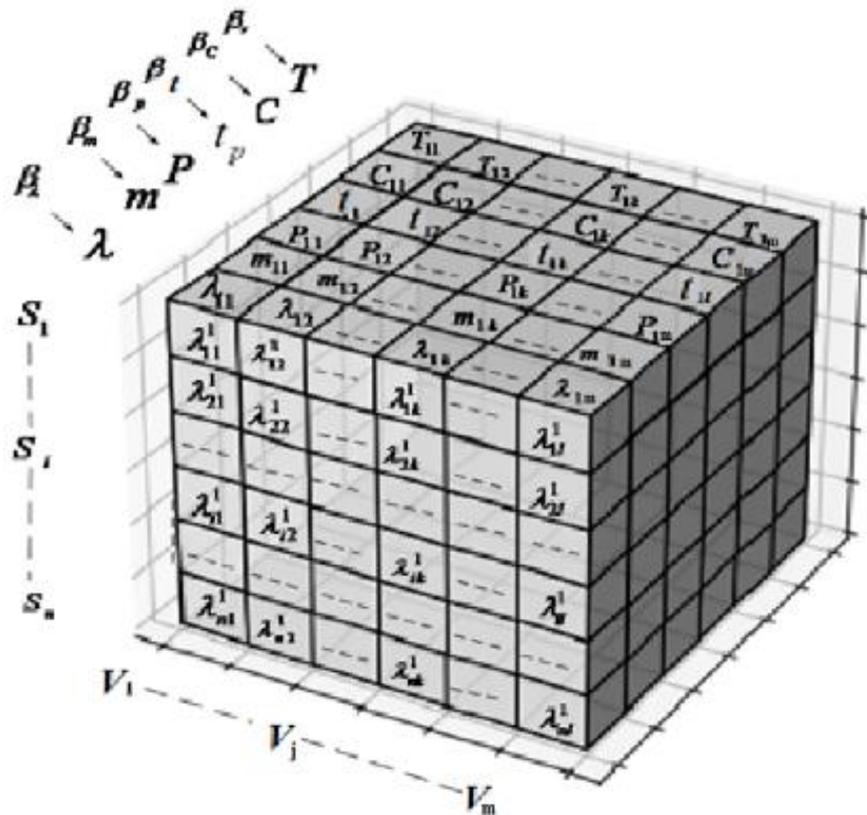


Рисунок 6 — Тензор третьего ранга $[(^3)T\{W(U_{lnr})\}] = (\vec{V}_l \& \vec{S}_n \& \vec{W}_r)$

Данный тензор включает в себя все сформированные ПР БРЭС, а также значения параметров, характеризующих эти ПР. Используя зависимости (2), (3), (4), и комплексный показатель качества (5), рассмотренные в первой главе, определяется эффективность каждого ПР, и осуществляется их ранжирование по эффективности.

К недостаткам метода комплексного показателя качества можно отнести необходимость знания точного значения весовых коэффициентов. В том случае, если это не представляется возможным, выбор эффективного варианта ПР может быть осуществлен методом анализа иерархий (МАИ) с предварительной кластеризацией вариантов ПР с применением нейронной сети «Кохонена». Данный метод основан на парных сравнениях альтернативных вариантов проектных решений по различным критериям с использованием девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по всем критериям и целям. Выбор того или иного метода выбора эффективного варианта зависит от лица, принимающего решение (ЛПР).

Обобщенный алгоритм методики повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования приведен на рисунке 7.

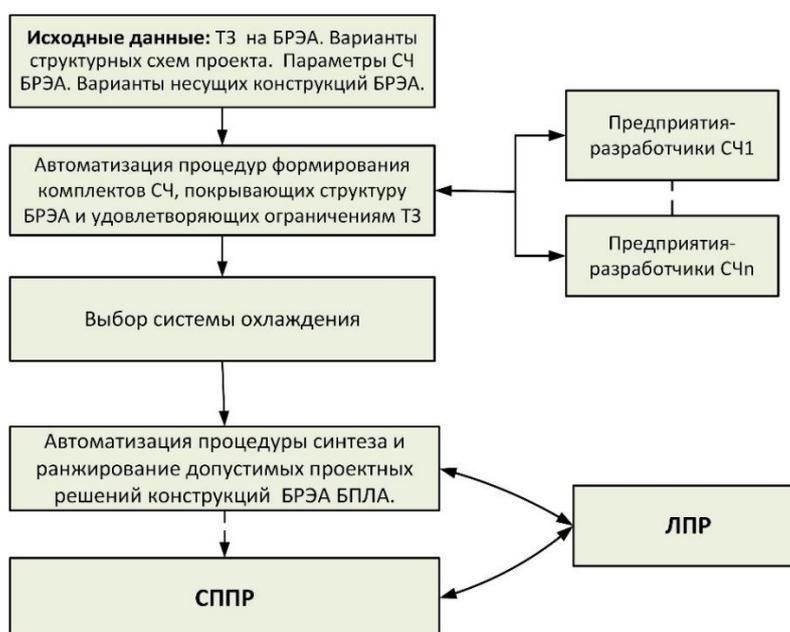


Рисунок 7 — Обобщенный алгоритм методики повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования

В четвертой главе рассматриваются экспериментальные исследования методики повышения эффективности проектных решений конструкций БРЭА на ранних этапах проектирования.

Выбор эффективного варианта конструкции осуществлялся с помощью разработанного автором программного комплекса (ПК) синтеза ПР БРЭА, позволяющего автоматизировать все методы и алгоритмы, рассмотренные выше.

Структурная схема ПК синтеза ПР БРЭА отображена на рисунке 8.

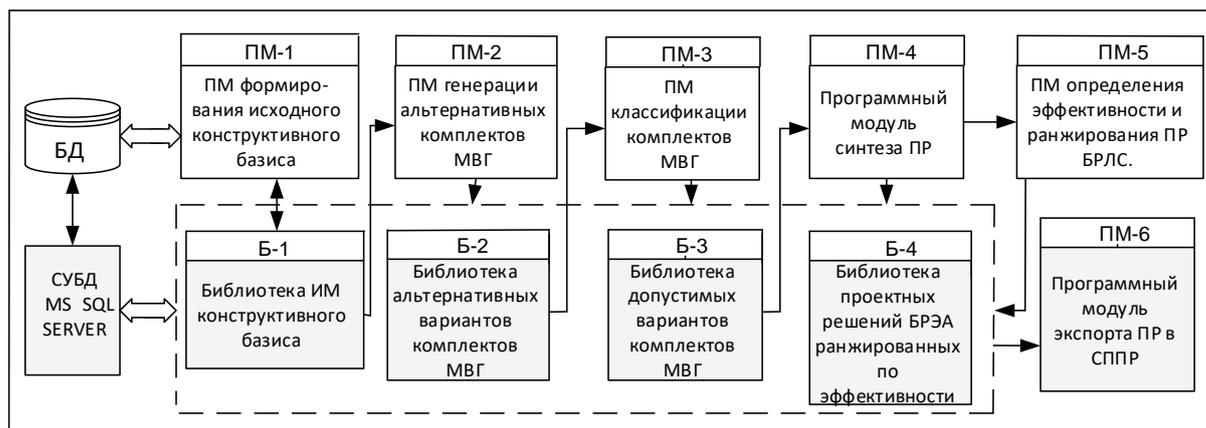


Рисунок 8 — Структурная схема ПК синтеза ПР БРЭА

Программный комплекс синтеза ПР реализован в виде программных модулей в среде программирования Microsoft Visual Studio 2012 на платформе .NET Framework 4.7.2. Управление данными между библиотеками и программными модулями ПК синтеза ПР осуществляется при помощи системы управления базами данных (СУБД) MSSQL Server 2017 версии Standard.

Экспериментальные исследования были проведены на примере проектирования радиочастотного модуля (РЧМ) бортовой РЛС K_U диапазона, предназначенного для установки на легкие и средние БПЛА. Структурная схема РЧМ БРЛС приведена на рисунке 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: исходный конструктивный базис, покрывающий СЧ проектируемого РЧМ бортовой РЛС; допустимые альтернативные комплекты модулей, покрывающих структуру РЧМ; рассчитаны их основные конструкторские параметры.

С помощью САД системы Solidworks было проведено моделирование теплового режима РЧМ БРЛС при естественном воздушном охлаждении (ЕВО). Было определено, что наиболее теплонагруженным модулем является усилитель мощности СВЧ, температура которого достигает 174°C . Для уменьшения температуры УМ СВЧ было проанализировано 7 вариантов принудительного воздушного охлаждения (ПВО), из которых 5 являются допустимыми, обеспечивающие снижение температуры УМ СВЧ до заданной величины (86°C). Варианты 1,2,3 с различными радиаторами, установленными на корпусе УМ СВЧ — два штыревых с различными размерами и один пластинчатый. Два варианта (6, 7) систем ПВО с контурными тепловыми трубками (КТТ) и удаленным радиатором, методика расчета которых для РЧМ БРЛС предложена автором. Контурные тепловые трубки позволяют отводить тепло от нагретой зоны на удаленный радиатор, в качестве которого используется основание РЧМ БРЛС.

В качестве допустимых систем ПВО были выбраны пять вариантов: три с различными вариантами радиаторов, установленных на корпусе УМ СВЧ - два штыревых с различными размерами и один пластинчатый (варианты 1, 2, 3 соответственно), и две системы ПВО с контурными тепловыми трубками (КТТ) и удаленным радиатором, в качестве которого

использовалось основание БРЛС. Проведенные расчеты показали, что наиболее эффективным вариантом, с точки зрения потребляемой мощности, является ПВО с КТТ и штыревым оребрением удаленного радиатора (вариант 6). Контурные тепловые трубки позволяют отводить тепло от нагретой зоны на удаленный радиатор.

На основании выбранного комплекта модулей и альтернативных допустимых СО были синтезированы пять допустимых ПР РЧМ, была осуществлена оценка их эффективности по методу комплексного критерия и методом анализа иерархий. На рисунке 9 приведены диаграммы результатов ранжирования эффективности ПР по каждому методу.

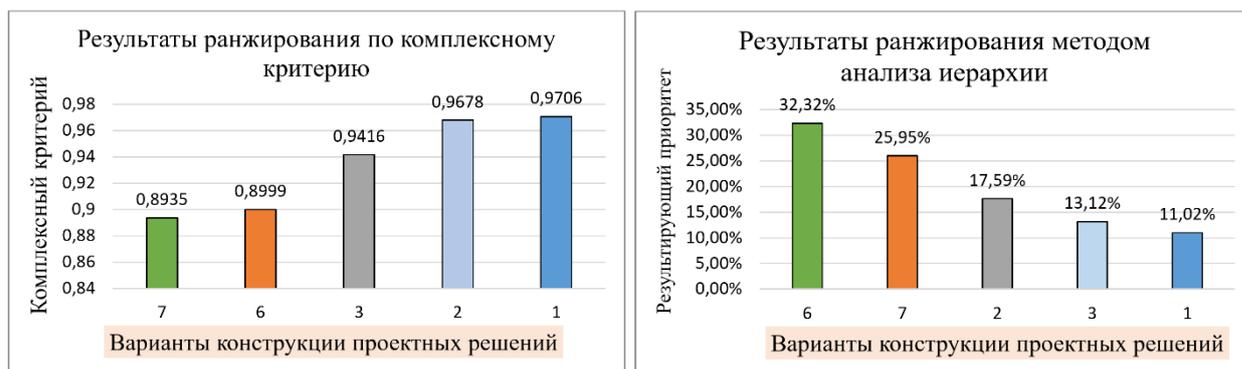


Рисунок 9 — Диаграммы результатов ранжирования проектных решений БРЭА

В первом случае наиболее эффективным считается вариант, который имеет наименьшее значение интегральной оценки R , так как все параметры — масса, потребляемая мощность, интенсивность отказов характеризуются качеством «чем меньше — тем лучше». При использовании второго метода лучшим вариантом считается вариант, который имеет наибольший вектор приоритетов. Как видно из диаграмм, оба метода показали один и тот же результат — наиболее эффективным вариантом ПР РЧМ является вариант № 6, — ПВО с КТТ и штыревым оребрением удаленного радиатора, что подтверждает достоверность полученного результата.

Проверка на адекватность расчетного метода повышения эффективности ПР конструкций БРЭА была проведена с помощью 3D моделирования тепловых режимов РЧМ БРЛС. Моделирование конструкторского проектного решения проводилось для типовой несущей конструкции РЧМ БРЛС с помощью САПР Solidworks. Моделирование было проведено для 4-х вариантов ПР с различными системами ПВО теплонагруженного модуля УМ СВЧ с мощностью потребления 200 Вт. Были смоделированы 4 тепловых режима ПР с различными ПВО. В качестве примера на рисунке 10 приведены две тепловые модели РЧМ БРЛС с различными системами ПВО — с радиатором на УМ СВЧ и с КТТ для отвода тепла от УМ СВЧ.

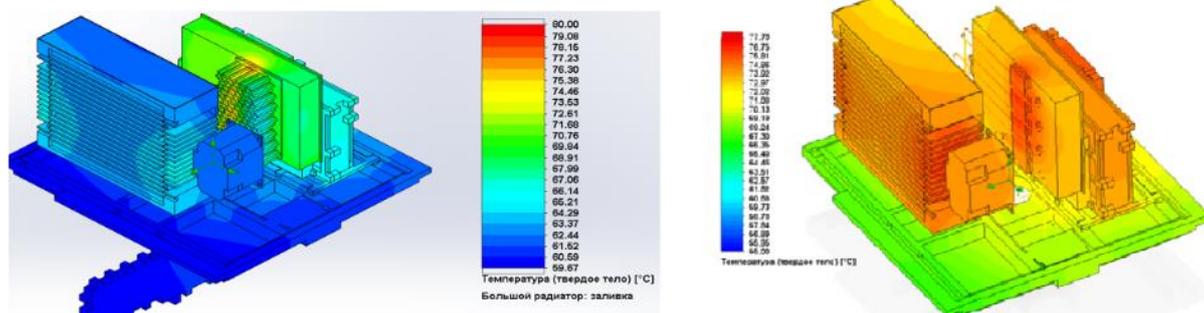


Рисунок 10 — Две тепловые модели РЧМ БРЛС с различными системами ПВО

Результаты сравнения расчетов и моделирования тепловых режимов представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты сравнения расчета и моделирования максимальной температуры нагретой зоны УМ СВЧ

Теплонагруженный модуль УМ СВЧ с системой охлаждения:	Тепловой расчет ПК, $t, ^\circ C$	Тепловое моделирование 3D модели SW, $t, ^\circ C$	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 ПК, реализованный на основе предложенных методик, разработанных алгоритмов и программ.

Тепловой расчет ПР БРЭА с различными вариантами ПВО можно реализовать путем использования 3D модели, сформированный с помощью системы CAD. Однако, 3D моделирование требует больших временных затрат (так, например, для моделирования одного проектного решения требуется с одной СО требует минимум 3 часа). Сократить время получения результата сравнительного анализа различных вариантов допустимых СО позволяет разработанный автором программный комплекс синтеза ПР БРЭА.

В таблице 2 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 2 — Результаты сравнения временных затрат на проведение теплового расчета РЧМ БРЛС с помощью программного комплекса и 3D моделирования

	Метод расчета	Количество ПР		Результат сравнения:
		1	4	
Время получения результата для ПР с СО на основе пластинчатого радиатора, час.	ПК	0,5	2	~ 6раз.
	CAD	3	12	
Время получения результата для ПР с СО на основе штыревого радиатора, час.	ПК	0,45	1,8	~ 8раз.
	CAD	3,5	14	
Время получения результата для ПР с СО на основе КТТ, час.	ПК	0,45	1,8	~ 8раз.
	CAD	3,5	14	

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

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Выполнен анализ конструкций БРЭА, на основании которого определены особенности и тенденции их построения, в частности, установлено, что опережающее снижение объема

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 синтеза и анализа БРЭА в 6-8 раз на рассмотренных примерах.

Работы, опубликованные автором по теме диссертации.

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ по специальности 2.2.9.

1. Кузнецов А.С., Ушкар М.Н. Методика формирования конструктивного базиса бортовых РЛС БПЛА // *Успехи современной радиоэлектроники» №9*, 2023 г. — с. 51-62.
2. Кузнецов А.С., Кручинин А.А., Ушкар М.Н. Методика повышения надежности и эффективности конструкций бортовой радиоаппаратуры на ранних этапах проектирования [Электронный ресурс]/ А.С. Кузнецов // *Труды МАИ*. 2024. No 137. — URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181879> (Дата обращения: 08.09.2024).
3. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Постникова В.Н. Методы конвертации параметрических моделей модулей компонентов при проектировании РТС [Электронный ресурс]/А.С. Кузнецов // *Труды МАИ*. — 2015. № 83. — URL: https://mai.ru/upload/iblock/253/kuznetsov_kuznetsov_postnikova_rus-.pdf (0,667Mb), (Дата обращения: 21.07.2024).
4. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Формирование параметрических моделей электронных модулей РЭС // *Электромагнитные волны и электронные системы №9*, 2019 г. — с.44-50.

В изданиях, включенных в международную реферативную базу данных SCOPUS.

1. Kuznetsov A.S. The Method of the synthesis of the optimal design solution of radio electronic system [Electronic resource] // Department of Radio Electronics, Info communications and Information Security, Moscow, MTUCI 2021. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9416069> (0,776Mb). (Дата обращения: 08.09.2024).
2. Kuznetsov A.S., Kuznetsov S.N., Ushkar M. N. Automation of the Learning Process of a Neural Network as Classifier in the Formation of a Design Basis of Complex TS [Electronic resource] // Department of Radio Electronics, Info communications and Information Security, Moscow, MTUCI 2020. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9078556> (1,046Mb), (Дата обращения: 02.09.2024).
3. Kuznetsov A.S., Starenchenko A.V., Ushkar M. N. Methodology of design high heat flux for on-board radars of small-sized aircraft [Electronic resource] // Department of Radio Electronics, Info communications and Information Security, Moscow, MTUCI 2021. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9416047> (0,862 Mb), (Дата обращения: 08.09.2024).
4. Kuznetsov A.S., Kuznetsov S.N., Starenchenko A.V., Ushkar M. N. Formation and optimization of the constructive basis of airborne radars [Electronic resource] // Department of Radio Electronics, Info communications and Information Security, Moscow, MTUCI 2022. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9744277> (0,932Mb), (Дата обращения: 04.09.2024).

В других изданиях.

1. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Графоаналитический метод синтеза эффективных структур РТС // *Электросвязь № 7*, 2018. — с. 29-33.
2. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Методика выбора оптимальной структуры РЭС // *Электросвязь, № 11*, 2016. — с. 56-60.

3. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Параметрическое моделирование радиотехнических устройств на системном этапе проектирования // Электросвязь, № 5, 2017. — с. 29-33.
4. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Нейронный классификатор электронных модулей РЭС // Электросвязь, № 11, 2019. — с. 62-67.
5. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н. Автоматизированная информационная система выбора изделий высокой производственной готовности при проектировании РЭС // Динамика сложных систем — XXI век. 2015, Т.9, №3. — с. 47-54.
6. Кузнецов А.С. Методика синтеза проектного решения конструкции РЭС // Молодежь и будущее авиации и космонавтики, Москва, МАИ, 2022.
7. Кузнецов А.С. Принципы построения автоматизированной информационной системы выбора изделия и документов высокой производственной готовности при проектировании РЭС // Сборник тезисов докладов «Гагаринские чтения», Москва, 12-17 апреля 2016. — с.546-547.
8. Кузнецов А.С. Оптимизация структуры базы данных, входящей в информационное обеспечение САПР радиотехнических систем // Сборник тезисов докладов «Инновации в авиации и космонавтике-2015». МАИ, Москва, 21-23 апреля 2015. — с. 44-47.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

1. Кузнецов А.С. Программа формирования ранжированного ряда комплектов конструкторских модулей проектируемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023615662 от 06.03.2023.
2. Кузнецов А.С. Программа расчета системы принудительного воздушного охлаждения бортовой радиоаппаратуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024662501 от 24.04.2024.