

УДК 621.396.69.001.66:53.2

Показано, що конструкція апаратури є ключем до забезпечення стабільних характеристик РЕА, її надійності і довговічності. Доведено, що питання синтезу параметрів конструкції РЕА стоять в ряду найважливіших при розробці сучасних наукових методів проектування

Ключові слова: тепловий режим, конструювання РЕА

Показано, что конструкция аппаратуры является ключом к обеспечению стабильных характеристик РЭА, ее надежности и долговечности. Доказано, что вопросы синтеза параметров конструкции РЭА стоят в ряду важнейших при разработке современных научных методов проектирования

Ключевые слова: тепловой режим, конструирование РЭА

It was shown that the equipment design is a key to REE stable features ensuring, its reliability and durability. It was proved that the REE parameters design synthesis problem is used to be one among the most important in the modern scientific design methods of development

Keywords: thermal mode, REE design

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ РЭА

В. И. Азаренков

Старший преподаватель

Кафедра системного анализа и управления

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.: 050-524-84-84

E-mail: azarnikov@ukr.net

1. Введение

Конструкторское проектирование является предпоследним этапом процесса разработки изделий РЭА [1]. При этом осуществляется выбор оптимальных конструктивных параметров, характеризующих расположение функциональных и логических элементов и электрических связей в некотором объеме с соблюдением заданных конструктивно-технологических и эксплуатационных ограничений и требований электрической и тепловой совместимости, вибропрочности, обеспечивающих их функциональную работоспособность. Оптимальный выбор характеристик конструкции представляет математически чрезвычайно трудную задачу синтеза со сложной системой начальных условий и ограничений. Поэтому при ее решении осуществляется ее декомпозиция на более простые подзадачи, рассматриваемые отдельно, или, реже, композиция, при которой несколько критериев или параметров объединяют в один, обобщенный.

Многие отдельные конструктивные задачи решаются сегодня строгими математическими методами [2]: электрические, тепловые, механические расчеты, анализ надежности, точности, технологичности и т. д. Однако, в целом, процесс проектирования еще недостаточно формализован, отсутствует общая теория конструирования. Поэтому разработка конструкции часто ведется методом многочисленных проб и последовательных приближений. При этом велика роль личного опыта, интуиции конструктора.

В подавляющем большинстве случаев ограниченность времени позволяет конструктору обдумать и сопоставить лишь небольшое число вариантов. Со-

вершенно очевидно, что вероятность ошибок здесь не исключена и может быть достаточно большой. При традиционных методах конструирования, заметим, с ростом сложности РЭА накопление ошибок будет резко ускоряться.

Вполне очевидно, что автоматизация решения отдельных видов конструкторских задач несколько не упрощает проблему. Необходим системный подход к вопросам проектирования и их автоматизации, когда будут учитываться не один, а все или подавляющее большинство основных факторов сразу. Такая задача сегодня не решена. Не решены также задачи формализованного составления технического задания, выбора принципов построения конструкций и элементной базы.

Но и такого подхода сегодня уже мало. Возрастающая сложность РЭА с одной стороны, значительные математические трудности с другой, не позволяют быстро и полно проанализировать все приемлемые варианты и выбрать наилучший даже в случае применения современных ЭВМ. Необходим новый качественный подход. Чтобы в этом убедиться, рассмотрим традиционный на сегодняшний день метод разработки конструкции РЭА.

Функциональные характеристики любого изделия РЭА могут быть описаны системой E электрических и системой K конструктивных параметров [3]:

$$F=F(E,K). \quad (1)$$

При этом система электрических параметров состоит из двух подсистем:

$$E=E_1 \cup E_2, \quad (2)$$

где

E_1 - подсистема параметров, не зависящих от конструкции;

E_2 - подсистема параметров, определяемых конструкцией.

Декомпозиция параметров узла, определяющих систему F его функциональных характеристик, позволяет разделить всю задачу на последовательные этапы схмотехнического проектирования, где синтезируются электрические параметры подсистемы E_1 , конструкторского проектирования, где синтезируются конструктивные параметры системы K , и комплексного проектирования, где учитываются все параметры подсистем E_1 и E_2 и системы K . Последний этап комплексной оптимизации, как уже говорилось, имеет обычно итерационный характер последовательного улучшения всех параметров системы.

В процессе конструкторского проектирования каждого узла все функционально-логические элементы требуется разместить в заданном объеме, а также необходимо осуществить трассировку всех электрических соединений. Этап предполагает оптимизацию конструктивно-технологических и эксплуатационных характеристик системы с обеспечением выполнения заданных ограничений и требований электромагнитной и тепловой совместимости. Последнее сводится к обеспечению значений параметров подсистемы E_2 в необходимых пределах. Однако, как отмечалось выше, непосредственный синтез конструктивных параметров с учетом ограничений, накладываемый подсистемой параметров E_2 , является чрезвычайно сложной задачей и может быть выполнен только для простейших конструктивных элементов. Поэтому в большинстве случаев синтез конструктивных параметров изделий осуществляется на начальном этапе без учета ограничений, накладываемых подсистемой E_2 [2, 3]. Таким образом, риск получения неудовлетворительного решения весьма велик. На практике это приводит к тому, что время разработки конструкции оказывается значительно меньше, чем время ее доработки и усовершенствования, иначе говоря, оптимизации.

Вот почему на повестке дня – решения задачи синтеза РЭА, при котором по заданным показателям надежности, массы, габаритов, экономичности и допустимых уровнях теплового и электромагнитного взаимодействия определяется оптимальный вариант конструкции и способ ее охлаждения.

2. Анализ последних исследований

Отметим особенности задач оптимального проектирования:

1) *Задачи такого класса являются многокритериальными.* Причем, как правило, не существует такого выбора параметров, который одновременно оптимизировал бы все критерии. Т. о. выбор наилучшего решения связан с компромиссом, а методов решения таких задач одновременно простых и надежных пока нет.

2) *Постановка задач осуществляется в процессе их решения.* Это связано с тем, что конструктор, как правило, до проведения специальных расчетов не может указать обоснованные значения всех ограничений. При этом в процессе проектирования зачастую це-

лесообразно корректировать комплексный критерий оптимальности или отдельные его составляющие и ограничения по результатам предварительных оптимизационных расчетов. Такой подход носит название адаптивного способа формирования критерия.

3) *Трудность выбора единого критерия.* Этот вопрос и проблема его решения возникла из-за математической сложности решения задачи многокритериальной оптимизации. Причем сложность математических моделей конструкции настолько большая, что исключается возможность прямого («лобового») поиска оптимальных решений. Отметим некоторые весьма распространенные подходы к решению таких задач:

замена многих критериев единым:

$$\Phi = \beta_1 \Phi_1 + \beta_2 \Phi_2 + \dots + \beta_n \Phi_n, \quad (3)$$

где

Φ – общий критерий;

$\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ – различные критерии;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ - весовые коэффициенты, причем $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n = 1$.

Основная трудность здесь в определении коэффициентов β_i , другими словами, в установлении ранжирования критериев. Последнее же до приведения расчетов чаще всего не представляется возможным.

4) *Оптимизация главного из многих критериев.* При таком подходе один из критериев, наиболее важный с точки зрения конструктора, оставляют в качестве единственного, а все остальные заменяют ограничениями. Но, как правило, указать главный критерий зачастую составляет собственную проблему.

5) *Последовательная оптимизация всех критериев.* Реально это бесконечный процесс последовательного улучшения изделия по каждому из критериев. Если учесть, что в большинстве реальных задач критериев много и среди них всегда есть антагонистические, то ясно, что процесс оптимизации будет сильно зависеть от конкретного подхода, последовательности оптимизации и квалификации конструктора.

Для точных методов дискретной оптимизации характерны две особенности [4, 5]: *во-первых*, экспоненциальный рост трудоемкости решений с увеличением размерности, *во-вторых*, доказательство оптимальности решения нередко требует существенно большего времени, чем его нахождение.

В последнее время существенное внимание уделяется разработке приближенных методов, не гарантирующих нахождение глобального оптимума, однако обеспечивающих достаточно близкое к нему приближение [6 - 8]. Кроме того, для многих прикладных задач, в том числе и конструкторского проектирования, достижение глобально оптимальных результатов не является первостепенным [3], и с практической точки зрения вполне достаточно получить близкое к ним значение. Ориентация с самого начала решения задачи на поиск приближенных решений с оценкой точности может существенно повысить эффективность методов дискретной оптимизации.

Таким образом, при постановке и решении конструкторских задач оптимизации от разработчиков требуется гораздо больше информации, чем те могут дать без предварительных расчетов. Но после того, как получен ответ на вопрос, где искать наилучшее

решение, вопрос, как его искать, в известной мере утрачивает остроту.

3. Цель работы

Осветить современное состояние вопросов проектирования конструкции РЭА с заданными параметрами на примере теплофизического конструирования аппаратов и их комплектующих. Сформулировать алгоритм реализации научных основ подхода к вопросам разработки конструкции аппаратуры с заданными характеристиками.

4. Методика и результаты исследований

Для достижения цели исследований проведем обзорный анализ методов проектирования РЭА заданного теплового режима по литературным источникам.

Сегодня как никогда перед конструкторами стоит задача синтеза РЭА, в ходе которой по заданным показателям надежности, массы, габаритов, экономичности и по допустимой температуре определялся бы оптимальный вариант конструкции и требуемый способ охлаждения. Но ещё к сожалению не реализован в полном объеме системный подход к оптимизации проектирования, к достижению сквозной автоматизации всех его этапов.

Мы далеко не всегда можем вести разработку конструкции без дробления этого процесса на отдельные частные задачи: обеспечение электромагнитной совместимости, обеспечение виброустойчивости, обеспечение минимальной суммарной длины связей между элементами, обеспечение теплового режима и т. п.

Хотя уже сейчас считается бесспорным, что "... процесс конструирования радиоэлектронного комплекса нельзя представить как последовательную разработку отдельных его элементов различными специалистами; конструирование РЭА – это комплексное и параллельное решение всех вопросов..." [9]. Только при этом условии возможно создание высоконадежной аппаратуры оптимальной конструкции. Однако анализ научно-технической литературы показал, что вопрос решения комплексного подхода к конструированию остается открытым, что на сегодняшний день отдельные вопросы оптимального конструирования РЭА излагаются самостоятельно [10 - 51]. Это, несомненно, способствует более глубокому и детальному изучению рассматриваемого вопроса. Но это же одновременно уводит авторов в сторону от решения комплексной задачи, поскольку отдельные воздействующие на РЭА факторы (например, обеспечение виброустойчивости и теплового режима) не связаны между собой, а зачастую и противоречивы (например, минимизация длины межэлементных соединений и обеспечение электромагнитной совместимости). Не решена задача формализованного составления технического задания, а главное – выбора принципов построения конструкции и элементной базы, хотя значительные предпосылки для этого уже есть.

В работах [10 - 46] осуществляется компоновка аппаратуры с целью обеспечения теплового режима отдельных элементов последней или всего изделия, изучение влияния различных конструктивных характеристик на температурное поле РЭА, выбор способа охлаждения или улучшения надежности за счет обеспечения теплового режима. Мы особо на них останавливаться не будем. Отметим несколько интересных, на наш взгляд, работ. В [26, 34, 37] сделана попытка на основании аналитических и экспериментальных исследований показать зависимость параметров, определяющих максимальный перегрев от конструктивных и теплофизических характеристик РЭА. При этом получены не столько количественные, сколько качественные результаты. В [26, 52] исследовалось влияние теплопроводности элементов, плат, их взаимного размещения, влияния расстояния между элементами и платами, ориентация плат на значение эффективной теплопроводности нагретой зоны. Полученные зависимости позволяют решать и обратную задачу: по значениям теплофизических коэффициентов определять ориентацию и расстояние, как между платами, так и между элементами. Подавляющее большинство остальных методов сводится к перебору большого количества вариантов, либо вычисляется свободная зона вокруг источника тепла, где размещается следующий источник, либо различными методами осуществляется корректировка какого-то первоначального размещения. Эти методы за редким исключением обладают существенным недостатком: они разработаны для определенного класса конструкции, т.е. не обладают универсальностью. Причиной этого служит слабая математическая постановка задачи.

Существенно отличаются работы [47 - 51], где сделана попытка рассмотреть вопросы комплексной оптимизации РЭА при помощи ЭВМ, в [49] предполагаются обобщенные показатели качества конструктивного проектирования. При этом выделены три критерия, используемые на различных этапах конструирования: компоновки, размещения, трассировки.

Нетрудно заметить, что последние очень тесно между собой связаны, и их разделение для получения глобальной оптимизации вряд ли оправдано, хотя уже сам факт выявления формальных критериев – большой шаг на пути к машинной оптимизации. Но в том то и дело, что характерной особенностью оптимального конструкторского проектирования РЭА является трудность установления единого критерия качества, обладающего определенным физическим смыслом и приводящего к действительной оптимизации конструкции. В настоящее время этот вопрос решается путем использования нескольких критериев качества, каждый из которых может стать превалирующим по желанию конструктора в зависимости от основной целевой функции.

Решение задач, возникающих при конструировании РЭА, является следствием решения задач глобальной оптимизации структуры и конструктивного воплощения аппаратуры в целом. Однако практически осуществить полную оптимизацию конструкции РЭА невозможно из-за сложности математической формализации задачи, а также трудностей вычис-

лительного плана, возникающих при большом числе переменных и ограничений.

В существующих работах по вопросу проектирования РЭА ряд авторов [53, 54] при оценке качества конструкции считают затруднительным установление одного общего показателя эффективности, обладающего определенным физическим смыслом и приводящего к действительной оптимизации конструкции.

Другие считают, что таким показателем могут служить минимум или фиксированное значение материальных затрат [55, 56]. Хотя общая точка не найдена, но идея единого показателя весьма заманчива, так как значительно упрощает решение задачи оптимизации.

При нескольких показателях качества появляется возможность вариации весовых коэффициентов каждого качества (условных критериев предпочтения последних), что придает алгоритму определенную гибкость и позволяет легко организовать стратегию, приводящую к наиболее быстрому решению. Недостаток метода – субъективное обоснование каждого показателя и нестрогий учет возможной корреляционной связи между ними. Хотя первый может при определенных условиях превращаться в достоинство.

Сегодня наиболее доступным, а потому и самым распространенным методом, является вариантный, при котором оценивается некоторое множество вариантов конструкции РЭА по разным показателям качества. Множество вариантов можно выбрать либо случайным способом, либо на основании каких-либо практических соображений, либо используя методы математического программирования, когда последующий вариант выбирается на основании оценки предыдущего [57].

Резюмируя все вышесказанное, по нашему мнению, все существующие на сегодня способы обеспечения теплового режима элементов и синтеза РЭА в целом по тепловому критерию можно условно разделить на две группы:

1) рациональное размещение тепловыделяющих источников в некоторой области, параметры которой заданы или подлежат определению;

2) расчет и обеспечение параметров конструкции, исходя из энергетических, а иногда и габаритно-массовых характеристик проектируемой РЭА; при этом способ охлаждения или задан, или подлежит определению.

Для получения решения задач первого типа возможны два подхода:

1. компоновка осуществляется таким образом, чтобы температура любого источника не превышала значение, или перегрев системы был минимальным;

2. компоновку осуществляют таким образом, чтобы оконечные и предоконечные активные источники тепла и активные источники тепла, управляющие обратной связью, в процессе эксплуатации нагревались одинаково.

Последнее приводит к слабой зависимости коэффициента усиления или иных параметров конструкции от температуры.

В качестве примера можно привести компоновку микросхемы [59], в которой пары оконечных тран-

зисторов расположены эквидистантно относительно центральной изотермы и оси симметрии изотерм. Следовательно, коэффициенты усиления транзисторных пар одинаковы и общий коэффициент усиления каждой усилительной секции остается практически независимым от температуры.

Характерной особенностью задач первого типа является то, что окончательное размещение должно удовлетворять некоторой наперед заданной системе ограничений, которая включает в себя как ограничения геометрического характера (условия размещения источников в области, непересечения их с областями запрета, взаимного непересечения областей источников и т. п.), так и условия, наложенные на количественные и качественные характеристики поля. Например, на характер поля могут накладываться условия не превышения заданных величин полей в точках области размещения, в частности, ими могут быть точки локальных или глобальных экстремумов и т. д.

В настоящее время созданы эффективные методы решения задач данного типа под руководством профессора Стояна Ю. Г. [60].

Широкое применение разработанных методов ограничивается, на наш взгляд, следующими факторами:

– размещение большого количества различных источников тепла на плоскости, а тем более в пространстве, требует введения значительного количества ограничений, очень много времени на подготовку данных и счет на ЭВМ;

– при комплексном рассмотрении воздействующих факторов (электромагнитного, теплового, вибрационного) решение усложняется, если таковое вообще возможно получить, так как данные факторы часто компромиссны, взаимосвязаны и описываются весьма сложными зависимостями;

– трудность, а зачастую и невозможность получения инженерных методов, методик и алгоритмов решения задач данного типа, отсюда и определенная ограниченность применения.

Что касается задач второй рассматриваемой группы, то в настоящее время отсутствует единое мнение на подход к решению задач данного типа с точки зрения конструкции с соответствующими теплофизическими параметрами.

Задачи обеспечения заданного теплового режима могут решаться при проектировании на различных уровнях разработки: при конструировании микросхем, транзисторов, микромодулей, узлов, плат, каскадов, субблоков, блоков, стоек, шкафов, радиоэлектронных комплексов.

При рассмотрении в дальнейшем любого из перечисленных устройств элементы и изделия, из которых оно состоит, будем называть для удобства конструктивными единицами.

Задача конструкторов заключается в первую очередь в сведении к минимуму рассеиваемой мощности и тепловых сопротивлений от конструктивных единиц в окружающую среду, а затем, в проведении дополнительных мероприятий для снижения температуры, окружающей этот конструктивный элемент (увеличение габаритов изделия и зазоров между источниками, применение систем охлаждения).

Анализ и практика показали, что улучшение тепловых характеристик конструктивных единиц является более эффективным для совершенствования тепловых режимов РЭА, чем оптимальное конструирование изделия и системы охлаждения. Так, например, улучшение тепловых характеристик транзисторов на 10-15% равноценно улучшению условий охлаждения аппарата в два раза (увеличение удельной мощности рассеивания РЭА в два раза), что позволяет в ряде случаев отказываться от принудительного охлаждения.

Именно поэтому попытки решать проблему отвода тепла в уже готовой конструкции (традиционный подход) разработанной без учета тепловых критериев, обречены на провал. И если все-таки удастся получить какое-либо решение таким образом, то оно в подавляющем большинстве случаев малоэкономично и малоэффективно.

Вот почему конструкция как аппаратуры, так и ее элементов является ключом к обеспечению стабильных характеристик РЭА, ее надежности и долговечности при комплексном подходе к проектированию. Вот почему вопросы синтеза конструкции РЭА стоят в ряду важнейших при разработке научных методов проектирования.

5. Заключение

Проведен анализ задач конструкторского проектирования, в котором показана важность комплексного

подхода к вопросам создания высоконадежных изделий радиоэлектроники. Установлено, что на повестке дня – решение задач синтеза конструкции РЭА по нескольким показателям, разработка научных основ конструирования.

Показано, что попытки решать проблему отвода тепла в уже готовой конструкции (традиционный подход) разработанной без учета тепловых критериев, обречены на провал. И если все-таки удастся получить какое-либо решение таким образом, то оно в подавляющем большинстве случаев малоэкономично и малоэффективно.

Показано, что методы обеспечения заданного теплового режима можно объединить в две группы: рациональное размещение источников тепла в некоторой области, расчет и обеспечение параметров конструкции исходя из некоторых заданных параметров.

Показано, что методике синтеза конструкции РЭА следует разбить на два этапа:

1) *расчет параметров проектируемой конструкции*

2) *конструктивное обеспечение рассчитанных параметров.*

Суммируя все сказанное, хочется особо отметить, что задача разработки научных основ конструирования РЭА и его методологии стоит очень остро, так как без них невозможно создать алгоритм синтеза параметров и оптимизации конструкции, объединить частные методики в систему, полностью перейти на автоматизированные методы проектирования изделий.

Литература

1. Глушков, З. М. Автоматизация проектирования вычислительных машин [Текст] / З. М. Глушков, Ю. В. Капитонова, А. А. Летичевский - Киев: Наукова думка, 1975.-232 с.
2. Медведев, В. А. Конструкторско-технологические проблемы радиоэлектроники [Текст] / В. А. Медведев - М.: Знание, 1976. -64 с.
3. Базилевич, Р. П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств [Текст] / Р. П. Базилевич - Львов: Вища школа, 1981.-168 с.
4. Современное состояние теории исследования операций [Текст] / Под редакцией Н. Н. Моисеева. - М.: Наука, 1976. -464 с.
5. Корбут, А. А. Метод ветвей и границ [Текст] / А. А. Корбут, И. Х. Сигал, Ю. Ю. Финкельштейн - М.: Наука, 1977. -280 с.
6. Финкельштейн, Е. Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования [Текст] / Е. Ю. Финкельштейн - М.: Наука, 1976. -264 с.
7. Кани К. Применение теории графов и комбинаторных алгоритмов в автоматизации проектирования [Текст] / К. Кани, Т. Оцуки // Дзёхо сэри. - 1975. - Т.16, № 7. - С. 581-590.
8. Ковалев, М. М. Дискретная оптимизация [Текст] / М. М. Ковалев - Минск: издательство БГУ, 1977. -192 с.
9. Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА [Текст] / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный - М.: Советское радио, 1976. -230 с.
10. Вопросы радиоэлектроники. Аннотированный указатель статей, опубликованных в научно-техническом сборнике в 1967-1976 гг [Текст] // Серия ТРТО - 1977. - С.3 - 23.
11. Оксман, А.Л. Исследование и разработка алгоритмической базы машинного проектирования электронных аппаратов, оптимальных по тепловому режиму [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Л. Оксман ; [ХИРЭ]. — Харьков, 1974. - 30 с.
12. Пуятин, В. П. Методы и алгоритмы рационального размещения дискретных стационарных тепловых источников [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. П. Пуятин ; [ХИРЭ]. - Харьков, 1977. - 24 с.
13. Хажмурадов, М. А. Оптимизация размещения тепловых источников произвольной формы в прямоугольной области [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. А. Хажмурадов ; [ХИРЭ]. - Харьков, 1979. - 28 с.

14. Стоян, Ю. Г. Об оптимизации температурного поля в задаче размещения дискретных источников энергии [Текст] / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин // Сб. "Проблемы машиностроения" - Киев: Наукова думка, 1977. - Вып. 4. - С.67-70.
15. Путятин, В. П. Оптимизация тепловых режимов элементов микроэлектронной аппаратуры посредством их рационального размещения [Текст] / В. П. Путятин, М. А. Максименко, А. В. Коновко, М. А. Хажмурадов // Сб. «Вычислительная техника» -Каунас, 1977. -Т.9.-С.55.
16. Хажмурадов, М. А. Алгоритмы итерационного процесса размещения тепловых источников заданной геометрической формы на пластине конечных размеров [Текст] / М. А. Хажмурадов // РФАП - 84, ИК АН УССР. - Киев, 1977, -16 с.
17. Боскис, И. А. Обеспечение заданного теплового режима гибридных интегральных микросхем и микросборок при "ручном" и автоматизированном проектировании [Текст] / И. А. Боскис // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1976. - Вып.1. - С.3-13.
18. Абрамов, Ф. Г. Расчет температурных полей и оптимизация размещения транзисторов в гибридных схемах [Текст] / Ф. Г. Абрамов, Ю. Н. Минин // Ядерная электроника - 1975. - Вып.5. - С. 45.
19. Ellison, G. N. Тепловое конструирование БИС [Текст] / G. N. Ellison // IEEE on Parts and Packaging - 1976. - Vol.12, № 12. - P.371.
20. Paul, S. W. Конструирование СВЧ устройств с учетом электрических, тепловых и механических факторов [Текст] / С. W. Paul // Electronic Packaging - 1976. - Vol.12, №2.- P.115.
21. Спокойный, Ю. Е. Проектирование топологии гибридной интегральной схемы по заданному тепловому режиму [Текст] / Ю. Е. Спокойный, И. А. Боскис // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1970. - Вып.2. - С. 3-10.
22. Боскис, И. А. Учет требований по тепловому режиму при проектировании конструкции ГИС [Текст] / И. А. Боскис, Ю. Е. Спокойный // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1972. - Вып.1. - С. 51-54.
23. Боскис, И. А. К решению обратных задач теплопроводности в элементах и узлах РЭА [Текст] / И. А. Боскис // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1977. - Вып.2. - С. 17-25.
24. Кузнецов, А. М. Обеспечение тепловой устойчивости транзисторов в радиоэлектронной аппаратуре [Текст] / А. М. Кузнецов // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1977. - Вып.2. - С. 3-13.
25. Роткоп, Л. Л. О двух подходах к заданию температуры элементов [Текст] / Л. Л. Роткоп // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1971. - Вып.3. - С. 10-16.
26. Роткоп, Л. Л. Методика выбора коэффициентов нагрузки радиоэлементов [Текст] / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный, В. Б. Гидалевич, Л. А. Гун, В. Д. Максименко // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1973. - Вып.2. - С. 37-50.
27. Майко, И. М. Статистические исследования теплофизических коэффициентов одноблочных радиоэлектронных аппаратов [Текст] / И. М. Майко, Ю. М. Дединов, А. М. Синотин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1975. - Вып.2. - С.100-103.
28. Рейзин, И. И. Рациональное конструирование охлаждаемых элементов РЭА [Текст] / И. И. Рейзин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1974. - Вып.1. - С. 61-73.
29. Роткоп, Л. Л. Анализ влияния тепловых характеристик радиоэлементов на габариты и надежность радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный, И. Н. Кравченко // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1969. - Вып.1. - С. 3-12.
30. Спокойный, Ю. Е. Выбор плотности компоновки элементов радиоаппаратуры при оптимальном ее охлаждении [Текст] / Ю. Е. Спокойный, И. Л. Бейгельмахер, В. Б. Гидалевич // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1968. - Вып.1. - С. 89-93.
31. Роткоп, Л. Л. Оптимальное размещение радиоэлектронной аппаратуры с принудительным охлаждением [Текст] / Л. Л. Роткоп, В. Б. Гидалевич // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1970. - Вып.1. - С. 69-82.
32. Дмитриев, Г. А. Влияние конструктивных факторов на теплообмен в радиоэлектронной аппаратуре кассетного исполнения [Текст] / А. Г. Дмитриев // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1970. - Вып.2. - С. 16-20.
33. Роткоп, Л. Л. Влияние размещения радиоэлектронной аппаратуры с принудительным охлаждением на ее надежность [Текст] / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный, И. И. Рейзин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1971. - Вып.1. - С. 3-8.
34. Роткоп, Л. Л. Об оптимальном размещении элементов в радиоэлектронных аппаратах кассетной конструкции с естественной вентиляцией [Текст] / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный, А. А. Васильев, В. Б. Гидалевич. // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1973. - Вып.3. - С.10 3-107.
35. Майко, И.М. О теплофизическом конструировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом [Текст] / И. М. Майко, Ю. М. Дединов, А. М. Синотин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1974. - Вып.1. - С. 60-87.
36. Давыдов, В.Л. Метод выравнивания температурного поля в блоках микроэлектронной аппаратуры [Текст] / В. Л. Давыдов, Ю. П. Мироненко // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1970. - Вып.2. - С. 3-10.
37. Боскис, И.А. Обеспечение заданного теплового режима пленочных резисторов [Текст] / И. А. Боскис // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1971. - Вып.3. - С. 27-32.

38. Спокойный, Ю.Е. Исследование влияния конструктивных характеристик на тепловой режим плоскостной микроэлектронной аппаратуры с естественным охлаждением [Текст] / Ю. Е. Спокойный, Ю. П. Мироненко // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1972. - Вып.1. - С. 43-50.
39. Мироненко, Ю. П. Особенности конструирования бортовой микроэлектронной аппаратуры с учетом тепловых режимов [Текст] / Ю. П. Мироненко, В. Ф. Давыдов, Е. В. Кайдаш, О. Я. Пышный // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1974. – Вып.2. - С. 62-66.
40. Бочкарев, Д. А. Проектирование мощной интегральной гибридной схемы с учетом тепловых режимов [Текст] / Д. А. Бочкарев, С. М. Грездев, Б. Г. Русайкин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1974. - Вып.2. - С. 67-69.
41. Спокойный, Ю. Е. Оптимизация конструктивных характеристик принудительно вентилируемой микроэлектронной аппаратуры, обеспечивающая эффективный отвод тепла [Текст] / Ю. Е. Спокойный // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1975. - Вып.3. - С. 92-99.
42. Спокойный, Ю. Е. Оптимизация конструктивных характеристик естественно вентилируемой микроэлектронной аппаратуры, обеспечивающая эффективный отвод тепла [Текст] / Ю. Е. Спокойный // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1976. - Вып.1. - С. 17-26.
43. Глушицкий, И. В. О выборе теплоотвода для одноблочных аппаратов [Текст] / И. В. Глушицкий // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1970. - Вып.3. - С. 51-57.
44. Роткоп, Л. Л. О выборе способа охлаждения РЭА [Текст] / Л. Л. Роткоп, В. Б. Гидалевич, И. Г. Коба, И. И. Рейзин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1973. - Вып.2. - С. 3-6.
45. Мыриков, В. И. Принципы выбора и оценки основных технических решений при проектировании систем охлаждения РЭА [Текст] / В. И. Мыриков // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1974. - Вып.1. - С. 8-10.
46. Воронин, З. Г. Выбор оптимального варианта системы охлаждения РЭА. - Вопросы радиоэлектроники [Текст] / З. Г. Воронин, В. П. Муравьев // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО - 1974. - Вып.3. - С. 6-16.
47. Стоян, Ю. Г. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов [Текст] / Ю. Г. Стоян, Н. И. Гиль - Киев: Наукова думка, 1976. -228 с.
48. Селютин, В. А. Машинное конструирование электронных устройств [Текст] / В. А. Селютин - М.: Советское радио, 1977. -384 с.
49. Тетренко, А. И. Формальное конструирование электронно-вычислительной аппаратуры [Текст] / А. И. Тетренко, А. Я. Телельбаум - М.: Советское радио, 1979, -256 с.
50. Карапетян, А. М. Автоматизация оптимального конструирования ЭВМ [Текст] / А. М. Карапетян - М.: Советское радио, 1973, –150 с.
51. Морозов, К. К. Использование ЭЦВМ при конструировании некоторых узлов РЭА [Текст] / К. К. Морозов, В. Г. Одинокоев - М.: Советское радио, 1972. -144с.
52. Исследование эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА [Текст] : отчет по НИР № 71-52 / ХИРЭ - Харьков, 1972. - 238с.
53. Морозов, К. К. Методы разбиения схем РЭА на конструктивно законченные части [Текст] / К. К. Морозов - М.: Советское радио, 1978. -136 с.
54. Гафт, М. Г. Принятие решений при многих критериях [Текст] / М. Г. Гафт – М: Знание, 1979. -94 с.
55. Подиковский, В. В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям [Текст] / В. В. Подиковский, В. М. Гавриков - М.: Советское радио, 1975, -326 с.
56. Карапетян, А. М. Оптимизация надежности как фактор эффективности конструирования РЭА [Текст] / А. М. Карапетян // Сб.: Стандартизация и качество продукции - Ереван: ЕрГУ, 1970. - С.23-27.
57. Пестряков, В. Б. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / В. Б. Пестряков - М.: Советское радио, 1969. -256 с.
58. Разработка алгоритма синтеза одноблочных РЭА, удовлетворяющих заданному тепловому режиму [Текст] : отчет по НИР № 74-2 / ХИРЭ, 1975. - 192с.
59. Grossman, E. St the thermal demands of electronic design [Текст] / E. Grossman // Electronics. - 1973.- V.66, №26. - P. 8-101.
60. Стоян, Ю.Г. Размещение источников физических полей [Текст] / Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин - Киев: Наукова думка, 1981. -184 с.