

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС С УЧЕТОМ ЭМС

Грачев Николай Николаевич

К.т.н., профессор, Московский институт
электроники и математики (МИ-ЭМ НИУ ВШЭ)
nnggrachev@mail.ru

Лазарев Дмитрий Владимирович

К.т.н., доцент, Московский институт
электроники и математики (МИЭМ НИУ ВШЭ)
qsk@mail.ru

05.12.04

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оптимизации проектирования ра-диоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости. В зависимости от наличия и вида ограничений, количества этапов в модели, ее вида находят применение аналитические или численные методы математического программирования. Рассматриваются и анализируются алгоритмы оптимизации на графах и сетях.

Ключевые слова: Электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства, численные методы, математическое программирование, методы оптимизации.

QUESTIONS OF OPTIMIZATION OF DESIGN WITH REGARD TO EMC OF RED

Grachev N.N., Lazarev D.V.

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

Abstract. The article deals with the optimization of radio-electronic means priektirovaniya based EMC. Depending on the availability and type of constraints, number of phases in a model of its kind are used analytical or numerical methods in mathematical programming. Considered and analyzed optimization algorithms on graphs and networks.

Key words: Electromagnetic compatibility and radio electronics, numerical methods, mathematical programming and optimization techniques.

Под оптимальным решением задачи проектирования понимают такое решение (управление), которое минимизирует или максимизирует некоторый критерий (целевую функцию, функцию качества) при заданной системе ограничений. Критерий S – это некоторая функция (функционал) от принятого решения (управления U), которая позволяет количественно оценить целесообразность принятого решения. В нем должна быть формализована цель проектирования.

Методологически процесс проектирования можно разделить на следующие этапы: составление математической модели проектирования РЭС, выбор критерия эффективности, определение информации, необходимой для исследования модели, и исследование матема-

тической задачи для отыскания оптимального решения.

Одной из основных является задача выбора оптимального сочетания проектных параметров. К ней можно отнести и проблему проектирования РЭС с учетом ЭМС. Повышение помехоустойчивости требует дополнительных затрат, в связи с чем и возникает задача выбора минимально необходимого набора способов и устройств, предназначенных для повышения помехоустойчивости РЭС. Кроме этой задачи при проектировании РЭС возникает большое число вопросов, которые приходится решать с учетом противоречивых требований (увеличение пропускной способности при снижении стоимости; увеличение точности измерения параметров сигналов при сокращении време-

ни измерения и т.д.) при сохранении высоких показателей помехоустойчивости РЭС.

При использовании методов оптимизации для решения технических задач приходится формировать большое количество вариантов технических устройств, чтобы в последующем их сравнивать. Поэтому применение традиционных методов проектирования в этом случае затруднено из-за их большой громоздкости. Более того, при этом обычно и не требуется детальная разработка узлов до степени, позволяющей их изготовлять. В связи с этим процесс проектирования РЭС автоматизируется и применяются современные ЭВМ.

Блок проектирования РЭС с учетом ЗМС представляет собой математическую модель процесса проектирования, позволяющую по заданным основным характеристикам этого РЭС и параметрам, определяющим ЭМС (отражающим в конечном итоге уровень помехоустойчивости и помехозащищенности) вычислить все необходимые для последующего анализа параметры РЭС, спроектированного оптимальным образом. В зависимости от объема информации, которую необходимо получить в результате проектирования, блок проектирования может представлять собой либо набор небольшого числа простейших формул, либо сложнейший алгоритм.

В общем случае блок проектирования представляет собой иерархическую структуру задач проектирования, вверху которой находится проектирование РЭС в целом, последующие уровни – проектирование блоков, устройств и ячеек. При этом используют стандартные приемы расчленения задач оптимизации на более простые подзадачи.

Нужно отметить, что ряд задач оптимизации может решаться и внутри уровня. Само проектирование можно подразделить на три этапа: выбор принципиальной основы (схемы) технического устройства, проведение расчетов для определения типа и размеров деталей и узлов, а также компоновка технического устройства; причем, эти этапы могут повторяться как на разных стадиях проектирования (этапы предэскизного, эскизного и технического про-

ектирования), так и внутри каждого из этих этапов.

Наиболее сложен первый этап проектирования РЭС, так как он основан на комбинациях существующих принципов, идей, схем, узлов при соблюдении определенных логических связей между ними. При этом то, что довольно легко выполняется опытным конструктором весьма трудно описать алгоритмом, реализуемым в ЭВМ.

Построение модели второго этапа проектирования обычно более просто, чем других этапов, так как подавляющее большинство стадии этого процесса достаточно хорошо формализовано и имеются математические зависимости позволяющие произвести необходимый расчет параметров модели.

Компоновка РЭС состоит в пространственном размещении его блоков при выполнении определенных ограничений (например, массо-габаритных) и в стремлении к выполнению некоторых условий (например, минимум расстояний между отдельными блоками и т.д.). В этом случае задача может сводиться к упрощенной геометрической путем представления компонентов РЭС в форме оболочек простейших очертаний. В более сложных случаях приходится изображать область в поле рецепторов с помощью двоичного кода. Третий этап обычно более прост, чем первый, и более сложен, чем второй.

Основная трудность, с которой приходится сталкиваться при построении блока проектирования, состоит в том, что существует огромное количество схем построения РЭС, как правило, оно превышает сотни тысяч вариантов. Расчет всех возможных сочетаний, даже если расчет каждого из них достаточно прост, представляет огромные технические трудности даже для современных высокопроизводительных ЭВМ. Для преодоления этих трудностей используют теоретические и эвристические методы и приемы. Тщательный анализ основных принципов функционирования технических устройств и опыта их проектирования позволяет в ряде случаев установить определенные логические правила конструирования, которые

могут выражаться в невозможности сочетания определенных типов узлов или, наоборот, в целесообразности некоторых сочетаний и т.д. Применение некоторых из этих правил может существенно сократить количество рассматриваемых вариантов или хотя бы установить рациональный порядок их анализа, когда в первую очередь будут рассматриваться наиболее эффективные варианты. Эвристические методы состоят в формализации опыта проектирования, которая может осуществляться как в виде логических правил типа указанных выше (но в данном случае отсутствуют строгие их обоснования), так и во введении всякого рода эмпирических формул, порядка действий, оценок по эмпирическим правилам и т.д. При формировании различных вариантов построения РЭС обычно можно вводить существенные упрощения и получать простые алгоритмы. Однако надо помнить, что при упрощении модели можно “выплеснуть ребенка” и исключить влияние на отдельные процессы тех параметров, которые исследуются.

Критерий или целевая функция должен отвечать следующим основным требованиям: он должен быть представительным, критичным к исследуемым параметрам, по возможности простым, включать в себя результаты всех основных существенных процессов, происходящих в РЭС.

Представительность критерия означает оценку основной, а не второстепенных, задач проектирования. Несмотря на очевидность этого требования, при решении практических задач возникают ошибки, связанные с тем, что не выясняется основная цель оптимизации и поэтому неправильно формируется критерий.

Критичность к исследуемым параметрам состоит в значительных изменениях числового значения критерия при сравнительно малых изменениях исследуемых параметров. Высокая критичность в ряде случаев облегчает проведение математических исследований.

Как правило, функционирование современных РЭС производится в сложной электромагнитной обстановке, параметры которой могут изменяться непредсказуемым образом.

По этой причине используется вероятностное описание работы РЭС и критерий является случайной величиной. В таких случаях обычно рассматривают математическое ожидание критерия и ищут его минимум или максимум. В тех случаях, когда дисперсия его велика, рассматривают и доверительные интервалы, чтобы оценить, в какой мере выбранное решение является гарантированным.

Основная постановка задачи оптимизации: оптимальным решением является такое, которое обеспечивает выполнение поставленной перед РЭС задачи при минимуме материальных затрат. Возможна обратная постановка: оптимальным решением является такое, которое обеспечивает максимум эффективности при фиксированных материальных затратах. Отсюда общей формой критерия при прямой постановке задачи исследования операций будет математическое ожидание материальных затрат (которые в общем случае выражаются в стоимости) при заданной эффективности (в данном случае она является ограничением), т.е.

$$\min S = \min M \left(\sum_{i=1}^N C_i \right) j; \mathcal{E} \geq \mathcal{E}_{\text{дон}} \quad (1)$$

В случае обратной постановки задачи общей формой критерия будет эффективность \mathcal{E} при заданных материальных затратах, которые являются ограничением, т.е. $\max \mathcal{E}$, (2)

Отметим, что не всегда есть необходимость в использовании критериев самого общего вида. В самом деле, если материальные затраты выражаются в однородных продуктах, то нет необходимости переходить к их стоимости, а можно ограничиться определением их количества, веса, объема и т.д. Общей формой критерия следует пользоваться тогда, когда более простые его формы не пригодны.

Выбор критерия – достаточно сложная задача, требующая в ряде случаев самостоятельных исследований и, в частности, анализа моделей более высоких классов.

Помимо ограничений, связанных с общей формой задач оптимизации, при решении практических задач приходится сталкиваться

и с другими видами ограничений. Ими могут быть ограничения на вес и габаритные размеры подсистем, ограничения по допустимым техническим характеристикам (например, на суммарную вероятность ложных тревог F_z), вызванных совокупностью естественных и взаимных помех при работе РЛС и т.д. Эти ограничения связаны главным образом с тем, что рассматривается только часть общей модели и разорванные связи с другими частями заменяются ограничениями.

В зависимости от используемых математических методов ограничения могут усложнять или упрощать решение задачи.

После того как составлена модель проектирования, выбран критерий, определены ограничения и получена входная информация, необходимо найти оптимальное решение (план, программу). Решение этой задачи и составляет предмет математического программирования, которое не имеет ничего общего с составлением программ для ЭВМ.

Под управлением (программой) понимается определенный план действий, который может быть непрерывным, многоэтапным и одноэтапным. В первом случае управление представляет собой функцию независимой переменной, чаще всего времени. В частном случае задача сводится к отысканию параметров, определяющих эту функцию. Во втором случае ищется набор параметров, определяющих управление на каждом этапе. В третьей случае рассматривается только один этап и отыскивается набор параметров, характеризующих управление.

В зависимости от наличия и вида ограничений, количества этапов в модели, ее вида находят применение аналитические или численные методы математического программирования. К первым относятся дифференциальное и вариационное исчисление и принцип максимума Л.С. Понтрягина. Ко второй группе относится динамическое, линейное, нелинейное программирование, методы регулярного и случайного поиска.

Для использования аналитических методов необходимо, чтобы расчетная формула

критерия, ограничения и связи между координатами, управлениями и независимой переменной, а также начальные и конечные условия были представлены в форме функций, которые должны быть по крайней мере один раз дифференцируемыми и иметь конечное число точек разрывов. Для использования классических методов (дифференциального и вариационного исчисления) обязательно, кроме того, отсутствие ограничений. Если управление представляет собой набор чисел, то могут использоваться методы дифференциального исчисления, если управление – функция, то к задаче применимы методы вариационного исчисления. Для использования численных методов необходимо знать возможную область изменения управлений и чем область уже (чем больше ограничений), тем эффективнее применение численных методов.

В случае, когда имеются ограничения и управление является функцией независимых переменных, но модель представляет собой набор аналитических зависимостей, могут применяться принцип максимума Л.С. Понтрягина и методы, основанные на достаточных условиях В.Ф. Кротова [1].

Для исследования многоэтапных процессов используется динамическое программирование, которое формально может быть применено в любых случаях, и ограничено только возможностями используемой ЭВМ. Аналогичными свойствами обладает и дискретный принцип максимума, являющийся распространением принципа максимума Л.С. Понтрягина на дискретные процессы.

В случае, когда критерий представляет собой линейную функцию управлений, а ограничения являются набором линейных неравенств (уравнений) и процесс одноэтапный, то это – классическая задача линейного программирования, в ряде случаев к ней можно свести и многоэтапные задачи.

Если критерий и ограничения – нелинейные функции управлений, а процесс одноэтапный, мы приходим к задаче нелинейного программирования. Такие задачи могут решаться с использованием регулярных и случайных

методов поиска, применение поисковых методов ограничено в основном трудоемкостью расчетов.

К сожалению, хорошо разработанные аналитические методы мало пригодны для решения задач проектирования РЭС с учетом ЭМС. Это связано как с большой размерностью задач, так и с разрывным и неаналитическим характером функций, применяемых для описания критериев, ограничений и связей. Во многих практически интересных случаях эти задачи можно характеризовать линейной целевой функцией и линейными ограничениями, так что для их решения, вообще говоря, могли бы успешно применяться известные методы линейного программирования. Однако большая размерность обуславливает необходимость поиска более эффективных алгоритмов оптимизации, которые позволяли бы экономить вычислительные ресурсы ЭВМ и обеспечивать их гибкость по отношению к изменениям исходных данных. Плодотворной основой для построения таких алгоритмов могут служить их представления на сетях и графах [2].

Граф – это совокупность множества X , элементы которого называются вершинами, и множества A упорядоченных пар вершин, элементы которого называются дугами. Граф обозначается как (X, A) . Если направления дуг не задаются, то такой граф называется неориентированным. Неориентированные дуги называются ребрами.

Сеть – это не что иное, как граф, каждой дуге которого поставлены в соответствие одно или несколько чисел.

Ниже будут рассмотрены постановки задач проектирования РЭС с учетом ЭМС с использованием процедур оптимизации на графах или сетях. Ввиду ограниченного объема для более полного понимания излагаемого материала рекомендуем обратиться к работам [2,3].

Постановки задач оптимизации. Напомним ряд терминов теории графов.

01. Вершина и дуга инцидентны друг другу, если вершина является для этой дуги концевой или начальной точкой.

02. Две дуги инцидентны друг другу, если обе они инцидентны одной и той же вершине.

03. Паросочетанием графа называется некоторое множество его дуг, такое, что каждая вершина графа инцидентна не более чем одной дуге этого множества.

04. Покрытием графа называется некоторое множество дуг, такое, что каждая его вершина инцидентна по крайней мере одной дуге этого множества.

Как будет видно из дальнейшего изложения, отыскание паросочетаний и покрытий оказывается плодотворным при решении задач оптимизации РЭС с учетом с ЭМС. Проиллюстрируем четыре типа задач:

- Задача о покрытии максимальной мощности.
- Задача о паросочетании максимальной мощности.
- Задача о паре-сочетании с максимальным весом.
- Задача о покрытии с минимальным весом.

Пример 1. Пусть РЭС содержит k источников и l рецепторов. Построим граф, в котором каждый источник представляется вершиной и каждый рецептор также представляется вершиной. Таким образом, граф будет иметь $m = k+l$ вершин. Соединим дугой вершину, соответствующую источнику, и вершину, соответствующую рецептору, в том случае, когда имеет место электромагнитная совместимость рассматриваемых средств. Производя такую процедуру с остальными вершинами, получим некоторое паросочетание. Это паросочетание графа представляет собой допустимое множество ЭМС -пар средств, которые могут работать, не мешая друг другу. Нас интересует поиск такого паросочетания этого графа, которое содержит наибольшее количество дуг, т.е. паросочетание максимальной мощности. Естественно, при малых m задача решается простым перебором всех возможных пар “источник-рецептор”. Однако при больших m задача – резко усложняется и ее решение становится проблематичным, особенно при использовании мини-ЭВМ. В то же время ис-

пользование алгоритма поиска паросочетания максимальной мощности [13] приводит к эффективным в вычислительном отношении процедурам, которые могут быть реализованы и на мини-ЭВМ.

Пример 2. Пусть в результате экспериментальных проверок ЭМО на объекте выявлена электромагнитная несовместимость M пар “источник-рецептор”. Для реализации ЭМС на объекте в нашем распоряжении имеется набор (комплекс) мер системотехнического и конструкторско-технологического характера. Набор мер ограничен, в то же время каждая из мер может быть применена к повышению ЭМС более чем одной пары “источник-рецептор”. Считается, что мы можем достаточно точно прогнозировать эффект от применения конкретной меры для повышения ЭМС каждой несовместимой пары “источник-рецептор”. Мы заинтересованы в максимизации общего эффекта от применения набора мер по повышению ЭМС. Возникает вопрос: каким образом может быть достигнут этот максимум? Пусть каждая мера и каждая несовместимая пара “источник-рецептор” представляются отдельными вершинами графа; соединим две соответствующие вершины дугой в случае, когда конкретная мера из комплекса мер использована для повышения ЭМС данной пары “источник-рецептор”. Каждая дуга при этом представляет возможный вариант использования меры из заданного комплекса мер. Присвоим каждой дуге графа вес, равный величине эффекта от применения конкретной меры для данной несовместимой пары “источник-рецептор”. Мы можем максимизировать общий эффект от реализации мер повышения ЭМС, если назначение мер будет соответствовать паросочетанию графа с наибольшим общим весом. Иными словами, нужно решить задачу поиска паросочетания с максимальным весом.

Пример 3. Пусть заданы состав и номенклатура средств, входящих в систему, повышением помехозащищенности которой мы занимаемся. Каждое средство имеет свои характерис-

тики ЭМС. при работе в составе системы. В то же время возможны различные варианты сочетания средств, решающих в комплексе поставленную перед системой целевую задачу. Нужно спроектировать систему таким образом чтобы в нее входили по крайней мере по одному средству из заданной номенклатуры средств. Число допустимых для применения средств превышает количество возможных мест применения средств. Необходимо определить конкретный состав системы, включающий наименьшее число средств-претендентов и удовлетворяющий всем отмеченным выше требованиям.

Построим граф, в котором каждый вариант исполнения средства представляется вершиной и каждое конкретное место использования средства представляется вершиной. Пусть любое средство, которое мы отбираем для работы в составе системы, представляется дугой графа, соединяющей вершины, соответствующие данному средству и конкретному месту его использования. Любой набор средств, решающий поставленную перед системой функциональную задачу, соответствует покрытию этого графа. Набор средств с наименьшим числом средств и удовлетворяющий отмеченным выше требованиям соответствует покрытию графа с наименьшим количеством дуг, иными словами – покрытию минимальной мощности.

Пример 4. Пусть аналогично примеру 2 на объекте выявлена электромагнитная несовместимость M пар “источник-рецептор”. Для реализации ЭМС на объекте в нашем распоряжении имеется набор из N мер системотехнического и конструкторско-технологического характера. Размер затрат (стоимость реализации, трудоемкость осуществления, требуемое время) на осуществление ЭМС каждой конкретной пары “источник-рецептор” различен в зависимости от конкретных мероприятий, требуемых для ее реализации. Как с минимальными затратами обеспечить ЭМС для всех пар “источник-рецептор”?

Построим граф, в котором каждой паре “источник-рецептор” соответствует вершина

и каждой мере из набора мер по повышению ЭМС соответствует вершина. Тогда соединим вершины дугой в том случае, когда конкретная мера использована для повышения ЭМС конкретной пары “источник-рецептор”. Каждой дуге припишем вес, равный затратам на реализацию соответствующей меры в каждом конкретном случае применения. Любое покрытие этого графа представляет собой вариант реализации комплекса мероприятий по повышению ЭМС на объекте. Необходимо найти покрытие графа с наименьшими общими издержками, другими словами – покрытие с минимальным весом. Эту постановку иллюстрирует рис. 1. Здесь все меры как системотехнического, так и конструкторско-технологического характера упорядочены в один набор мер $1, 2, \dots, N-1, N$. Места возможного приложения мер также упорядочены и объединены в другой набор пар $1, 2, \dots, M$, которые нуждаются в применении к ним мер, повышающих ЭМС. Дугам $1-1, 2-1, 3-2$ и т.д. приписан вес $a(i, j)$ равный затратам на реализацию меры i в случае применения ее к паре j . Введем $x(i, j) = 1$, если ребро (i, j) принадлежит покрытию; в противном случае $x(i, j) = 0$.

Получим следующую задачу: минимизировать

$$\sum_{i,j} a(i, j)x(i, j) \quad (3)$$

При ограничениях

$$\sum_{i,j} \left[\left[x(i, j) + x(j, i) \right] \right] \geq 1 \text{ для всех } i \text{ и } j$$

$$\sum_{i,j} \downarrow (i, j) \left[\left[x(i, j) \right] \right] \geq n_m + 1, m = 1, 2, \dots, z, x(i, j) \geq 0$$

для всех (i, j)

В соответствии с первым ограничением требуется, чтобы по крайней мере одно ребро, принадлежащее покрытию, было бы инцидентно вершине i . Второе ограничение означает, что по крайней мере $(n_m + 1)$ ребер, принадлежащих множеству U_m , должно входить в покрытие. Целевая функция представляет собой

общий вес покрытия. Алгоритм, с помощью которого на графе $G = (X, E)$ находится покрытие с минимальным весом, представлен в [2]. Основной процедурой в этом алгоритме является процедура построения так называемого чередующегося дерева [2]. Алгоритм выполняется в два этапа. На первом этапе строится некоторое паросочетание; на втором этапе это паросочетание преобразуется в покрытие, которое является покрытием с минимальным весом.

Вопросы программирования алгоритмов оптимизации на сетях и графах рассмотрены в [4].

Постановка задачи оптимизации структуры РЭС. Изложенный выше материал позволяет сформулировать достаточно общую задачу оптимизации структуры РЭС с учетом параметров ЭМС.

При проектировании сложных радиоэлектронных систем необходимо иметь, объем задач, решаемых системой, условия работы и параметры электромагнитной обстановки (см. рис. 2). Сущность задачи сводится к отысканию такого набора характеристик РЭС, который обеспечит бы минимум оценочного критерия. Для генерации вариантов возможного построения структуры системы необходимо иметь модель проектирования. Эффективность выбранного варианта оценивается с помощью модели функционирования РЭС. Отметим, что как в модели проектирования технического устройства или системы. Так и в модели функционирования РЭС может производиться внутренняя оптимизация (оптимизация более низкого иерархического уровня). Вычисление заданного критерия качества для каждого варианта реализации структуры РЭС позволяет сравнить варианты и выбрать лучший. Это достигается с помощью блоков оптимизации и управления структурой.

Вопрос выбора критерия оценки ЭМС рассматривался выше. Его решение определяется конкретными требованиями к проектируемой системе. Оценка ЭМС радиолокационного комплекса может быть произведена, например, по суммарной вероятности ложных тревог $F \Sigma$,

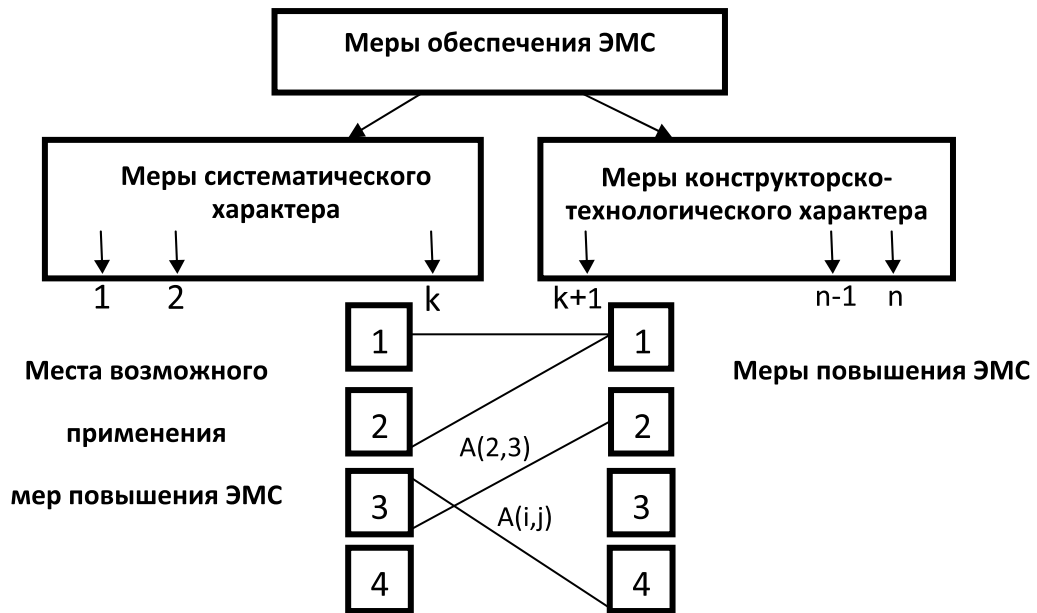


Рис. 1. Постановка задачи оптимизации с использованием теории графов.

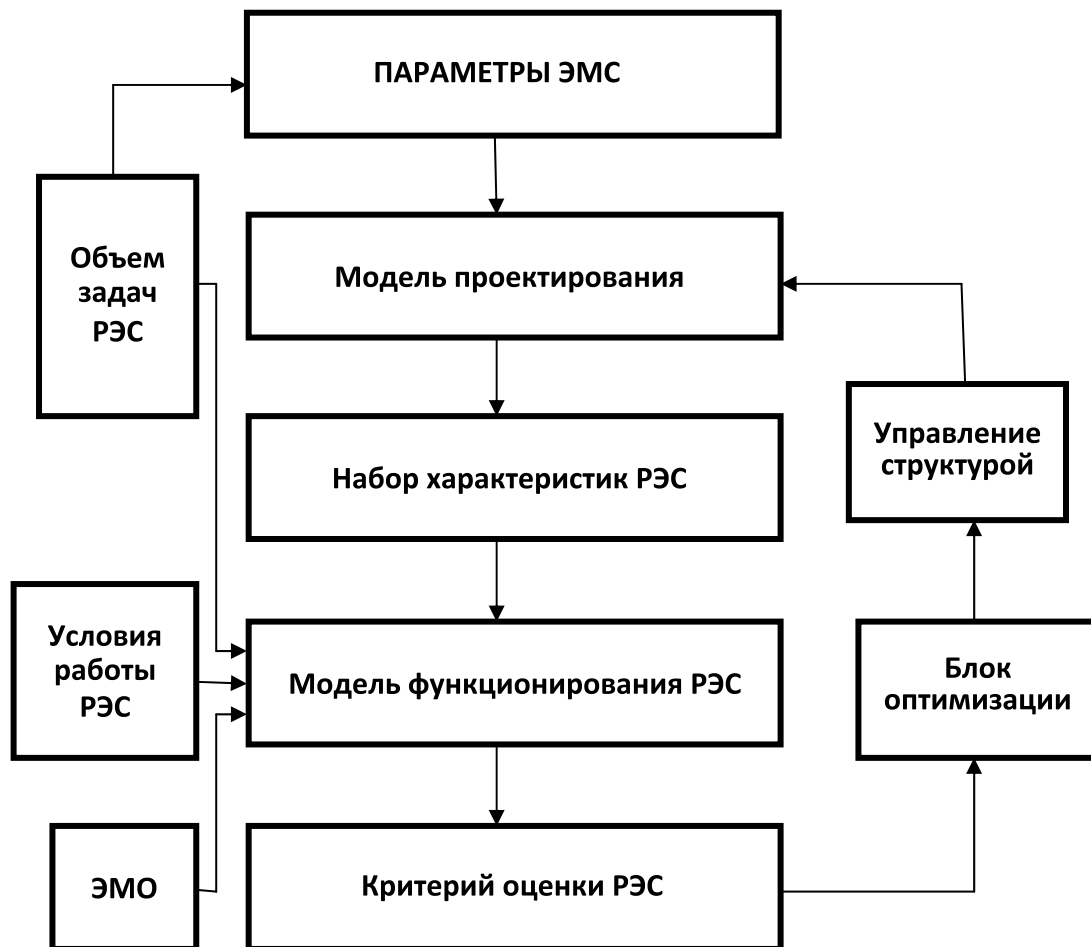


Рис. 2. Оптимизация структуры РЭС с учетом параметров ЭМС.

вызванных совокупностью естественных и перекрестных помех или по величине $S = F/F_{\Sigma}$ характеризующей относительное изменение вероятности ложных тревог при работе станции в комплексе, по сравнению с вероятнос-

тью ложных тревог F в отсутствии взаимных помех [17].

При построении блока оптимизации рекомендуется использовать приведенные выше алгоритмы оптимизации на графах и сетях.

Список литературы

1. Чуев Ю.В. Спехова Г.П. Технические задачи исследования операций. – М.: Сов. Радио, 1971, -214 с.
2. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 323с.
3. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.-496 с.
4. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. – М.: Мир, 1974.