



Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

**Учебное пособие**

**Е. М. Парфенов, Э. В Мысловский**

**ПРЕДПРОЕКТНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА

Е.М. ПАРФЕНОВ, Э.В. МЫСЛОВСКИЙ

**ПРЕДПРОЕКТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
по дисциплинам «Конструирование РЭС»,  
«Конструирование ЭВС» и «Предпроектные  
исследования и работы в создании РЭС (ЭВС)»*

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2000



УДК 621.37/.39(075.8)

ББК 32.85

П18

Рецензенты: В.С. Несмелов, И.И. Пахомов

П18 Парфенов Е.М., Мысловский Э.В.

Предпроектные исследования при конструировании электронных средств: Учебное пособие. -М.:

Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. -75 с., ил.

ISBN 5-7038-1698-X

Рассмотрены вопросы повышения эффективности модульного принципа проектирования электронных средств (ЭС) и содержание предпроектных исследований в жизненном цикле ЭС. Приведена последовательность оптимизации параметрических и типоразмерных рядов модулей ЭС по критерию максимального технико-экономического эффекта, сводящего к минимуму аппаратную избыточность при модульном принципе проектирования ЭС.

Для студентов радиотехнических специальностей вузов; пособие может быть полезно инженерам-конструкторам радиоэлектронной и вычислительной аппаратуры.

Ил.13. Табл.1. Библиогр. 4 назв.

УДК 621.37/.39(075.8)

ББК 32.85

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях постоянного усложнения и частой сменяемости электронных средств (ЭС), в том числе и элементной базы, наиболее эффективным и экономически оправданным является модульный принцип проектирования, предусматривающий создание аппаратуры на основе систем унифицированных модулей и базовых несущих конструкций (БНК).

Одной из актуальных задач при реализации модульного принципа проектирования ЭС является задача построения оптимальных типоразмерных рядов БНК модулей различных уровней разукрупнения, заключающаяся в определении наилучших значений числа типоразмеров и основных конструктивных параметров БНК каждого уровня с учетом защиты ЭС от механических воздействий, обеспечения тепловой и электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры. Эта задача должна решаться на ранних этапах проектирования ЭС, в частности этап предпроектных исследований, посредством разработки оптимальных типоразмерных рядов БНК, так как именно на этом этапе закладываются предпосылки достижения высокой эффективности конструкторской реализации ЭС с учетом перспективной элементной базы, обеспечения функциональной и размерной взаимозаменяемости модулей различных уровней разукрупнения, сводящих к минимуму аппаратурную избыточность при применении модульного принципа проектирования ЭС.

## Список сокращений

БНК	- базовая несущая конструкция
ВТ	- вычислительная техника
ВЧ	- высокая частота
ИС	- интегральная схема
ИЭП	- источник электропитания
КПД	- коэффициент полезного действия
ЛБВ	- лампа бегущей волны
ЛОВ	- лампа обратной волны
МП	- микропроцессор
МСБ	- микросборка
НЧ	- низкая частота
ПЭВМ	- персональная ЭВМ
РТС	- радиотехническая система
РЭА	- радиоэлектронная аппаратура
САПР	- система автоматизированного проектирования
СБИС	- сверхбольшая интегральная схема
СВЧ	- сверхвысокая частота
ФПА	- функция потерь на адаптацию
ЭВА	- электронно-вычислительная аппаратура
ЭВС	- электронно-вычислительная система
ЭМС	- электромагнитная совместимость
ЭРЭ	- электрорадиоэлементы
ЭС	- электронные средства

# 1. РОЛЬ ПРЕДПРОЕКТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

При комплексном подходе к задаче проектирования ЭС пользуются понятием жизненного цикла ЭС, имея в виду те этапы, которые проходит ЭС в течение своей «жизни» до момента морального устаревания, когда по технико-экономическим причинам целесообразным становится переход к более совершенным ЭС (рис.1, где  $\tau_1$  - предпроектные исследования;  $\tau_2$  - разработка;  $\tau_3$  - производство;  $\tau_4$  - эксплуатация. Суммарная продолжительность стадий  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  для современных ЭС составляет 3-5 лет).

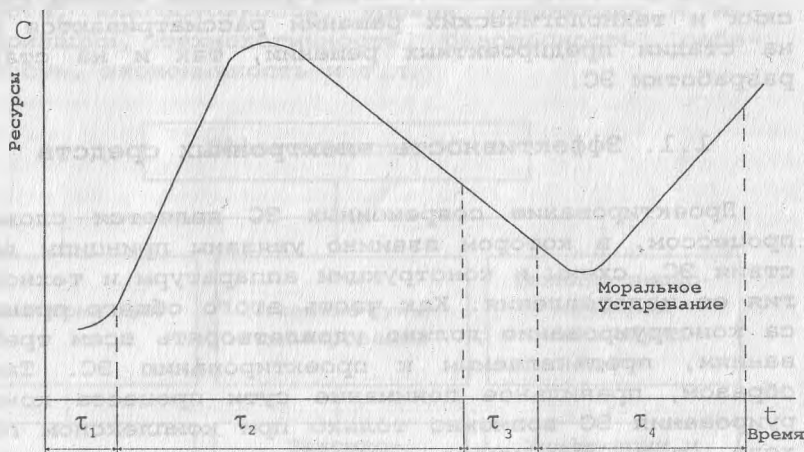


Рис.1. Стадии жизненного цикла ЭС

Оперирование понятием жизненного цикла ЭС приводит к задаче оптимального распределения ресурсов при создании новых ЭС [1].

На первой стадии жизненного цикла ЭС ( $\tau_1$ ) задачи предпроектных исследований являются: 1 - системный анализ процессов проектирования; 2 - оценка возможностей создания ЭС; 3 - формирование технических требований к ЭС; 4 - унификация и стандартизация конструкторских и технологических решений. При



системном анализе процессов конструирования определяют: количественные и качественные характеристики проектируемых ЭС и методы их проектирования; целесообразность создания ЭС и степень подготовленности системы проектирования ЭС к автоматизации.

При оценке возможностей создания ЭС выявляют: прототипы существующих ЭС и их технико-экономические характеристики; объекты возможной автоматизации; состояние нормативно-справочной базы; степень автоматизируемости выпуска проектной документации; уровень унификации и стандартизации конструкторско-технологических решений. Формирование технических требований к ЭС завершается выдачей исходных данных для разработки технического задания на создание ЭС.

Вопросы унификации и стандартизации конструкторских и технологических решений рассматриваются как на стадии предпроектных решений, так и на стадии разработки ЭС.

### 1.1. Эффективность электронных средств

Проектирование современных ЭС является сложным процессом, в котором взаимно увязаны принципы действия ЭС, схемы и конструкции аппаратуры и технология ее изготовления. Как часть этого общего процесса конструирование должно удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к проектированию ЭС. Таким образом, правильное понимание сути процесса конструирования ЭС возможно только при комплексном подходе, т.е. при учете взаимосвязи между системой, схемой, конструкцией, технологией, производством и эксплуатацией. Основное требование при проектировании ЭС состоит в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т.е. превосходило его по качеству функционирования, степени миниатюризации и технико-экономической целесообразности (рис.2), а методы конструирования обеспечивали бы электромагнитную совместимость аппаратуры [2].

В общем виде эффективность ЭС можно оценить основной целевой функцией:

$$E = f(z_1, z_2, \dots, z_n) = f(Z), \quad (1)$$

где  $Z = \{z_i; i = \overline{1, n}\}; z_i \in Z$ .

Элементами  $z_i$  множества  $Z$  являются частные целевые функции, т.е. отдельные качественные и количественные показатели, определяющие пригодность ЭС в соответствии с назначением. Такими показателями для ЭС являются: масса, объем, энергопотребление, диапазон частот, быстродействие, чувствительность, коэффициент усиления, полоса пропускания, дальность действия, выходное напряжение, точность, показатели обеспечения электромагнитной совместимости, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, влагостойкость, уровни унификации и миниатюризации, технологичность, безопасность, себестоимость, экономичность и т.д.



Рис. 2. Схема разработки эффективных ЭС

Целевую функцию (1) формируют в целях оптимизации, т.е. нахождения наиболее рационального решения проблемы проектирования ЭС и достижения компромисса между частными целевыми функциями  $z_i \in Z$ . Под этой проблемой понимают: проектирование (создание) системы, конструкции, технологического процесса, стандарта; организацию производства и т.п. Целевая функция может относиться как к техническим показателям (например, достижение максимальной мощности при минимальной массе), так и к экономическим (получение максимального экономического эффекта при принятом числе типоразмеров). При оптимизации могут встретиться случаи, когда некоторые показатели качества (размер параметрического ряда, уровень надежности и др.) заданы. Тогда задача оптимизации сводится к минимизации затрат на достижение цели с учетом требований, предъявляемых к целевой функции. Следует указать, что при решении задач оптимизации показателей качества самым ответственным моментом является определение вида целевой функции и ее составляющих, т.е. установление связи между оптимизируемыми и другими показателями качества. Для успешного определения целевой функции необходимо стремиться к минимальному числу оптимизируемых показателей, вводя комплексные, интегральные или обобщенные показатели качества.

## 1.2. Унификация и стандартизация конструкторских решений на предпроектной стадии

В основе стандартизации и унификации конструкций ЭС лежит разработка типовых проектных решений и их элементов. Это достигается созданием оптимальных рядов параметров и типоразмеров конструкций ЭС всех уровней разукрупнения, электрических межсоединений и соединителей (разъемов), т.е. параметрической и конструктивной основы модульного принципа проектирования ЭС, а также внедрением базовых технологических процессов, обеспечивающих изготовление ЭС с заданными конструкторско-технологическими характеристиками.

Под типоразмерными рядами понимают ряды подложек и корпусов микросборок (МСБ), интегральных схем (ИС) и сверхбольших интегральных схем (СВИС), геометрических размеров дискретных элементов (трансформаторов, источников электропитания, функциональных узлов и т.д.), ячеек, блоков, стоек, шкафов и т.д.

Рассмотрим подробнее процесс конструирования ЭС и связанные с ним основные понятия и определения.

Конструкцию ЭС нельзя рассматривать изолированно от системы, схемы, технологии изготовления и эксплуатации радиотехнических систем (РТС) и электронно-вычислительных систем (ЭВС). В свою очередь, РТС и ЭВС представляют собой совокупность размещенных в пространстве преобразующих сигналы устройств, операторов и ЭС, которые установлены на объектах в определенных точках Земли и действуют в условиях помех. Анализ и синтез РТС и ЭВС (проектирование РТС и ЭВС) составляет основное содержание системотехники.

Электронные средства являются главной частью РТС и ЭВС. Свойства и показатели ЭС, а также функции, которые они могут выполнять, определяются их электрической схемой и конструкцией.

Электрическая схема представляет собой совокупность схемных элементов и их соединений и вытекает из принятого принципа действия, задач, решаемых системой, и функций, выполняемых ЭС. Анализ и синтез схем составляет основное содержание схемотехники.

Конструкция является совокупностью деталей (или тел) с разными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной взаимосвязи (электрической, пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической), обеспечивающей выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях как внешних воздействий, так и внутренних помех, создаваемых элементами ЭС, и предусматривающей возможность ее повторения в условиях производства. Анализ и синтез конструкций составляет основное содержание конструирования.

Конструкция определяется совокупностью различных деталей, элементов и связей между ними. Устойчивые связи между деталями и элементами конструкции образуют различные структуры связей (рис.3).

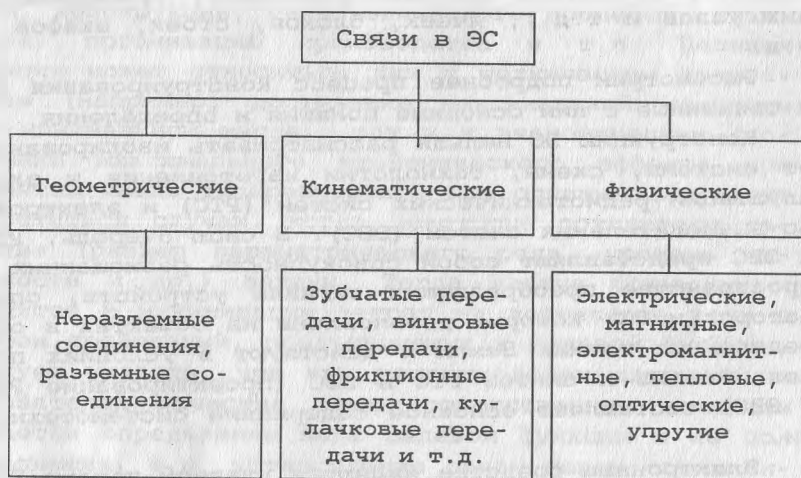


Рис.3. Виды связей в ЭС

Таким образом, обобщенно конструирование можно рассматривать как процесс исследования, инженерного расчета, организации и отражения в конструкторской документации множества деталей, элементов, связей и параметров по заданному множеству элементов, связей, параметров и воздействий (имеется в виду схема электрическая принципиальная и техническое задание).

Конструирование может быть реализовано различными методами. Существующие методы конструирования ЭС подразделяют на три взаимосвязанные группы:

- по видам связей между элементами;
- по способу выявления и организации структуры связей между элементами;
- по степени автоматизации выявления структуры связей между элементами.

### 1.3. Методы конструирования электронных средств

Методы конструирования разделяют следующим образом [2].

1. По видам связей: геометрический; машиностроительный; топологический.

2. По способу выявления структуры связей: метод моноконструкций; базовый метод (модульный принцип).

3. По степени автоматизации выявления структуры связей: эвристический метод; автоматизированный метод.

Выбор указанных методов зависит от назначения аппаратуры, ее функций, преобладающего вида связей, уровней унификации и автоматизации.

**Геометрический метод.** В основу метода положена структура геометрических и кинематических связей между элементами (детальями), представляющая собой систему опорных точек, число и размещение которых зависит от заданных степеней свободы и геометрических свойств твердого тела. Число точек зависит от необходимого числа степеней свободы. Точное сопряжение требует большой жесткости, а значит, и увеличения массы.

Метод целесообразно применять для конструкций, в которых должно соблюдаться точное взаимное положение деталей или обеспечиваться их точное перемещение при деформациях, значительно меньших погрешностей изготовления деталей.

**Машиностроительный метод.** В основу метода положена структура геометрических и кинематических связей между деталями, представляющая собой систему опорных поверхностей, число и размещение которых выбирают исходя из условия минимизации массы и допустимой прочности конструкции.

Метод целесообразно применять для конструкций с относительно большими деформациями. Для устранения деформаций при одновременном уменьшении массы изделия в конструкцию вводят дополнительные опорные точки и поверхности. Точность взаимного расположения и перемещения элементов конструкции обеспечивается высокой точностью их изготовления.

**Топологический метод.** В основу метода положена структура физических связей между элементами, т.е. представление конструктивного вида электрической схемы и ее геометрической (топологической) связности независимо от функционального содержания. Этот метод используют там, где нельзя применять геометрический и машиностроительный методы. Топологический метод может применяться для выявления структуры любых связей, в том числе геометрических и кинематических, однако конкретное его содержание проявляется там, где связность элементов может быть сопоставлена с графом.

Под графом в общем случае понимают графическое выражение структуры связей между элементами электрической схемы и элементами конструкции.

Основные черты топологического метода:

сопоставление связности элементов электрической схемы и деталей конструкции на основе теории графов;

изоморфизм графов, т.е. свойство эквивалентности строения независимо от различия в геометрическом образе, позволяющее получить множество преобразований графа, среди которых конструктору удастся найти наиболее рациональное решение;

использование свойств графов при размещении элементов и ориентации их в пространстве для трассировки линий связи и средств их соединения с элементами.

Топологический метод в первую очередь применяют для конструирования микросхем, печатных плат, гибких печатных кабелей и соединителей и т.д.

**Метод моноконструкций.** Метод основан на минимизации числа связей в конструкции и применяется для создания функциональных узлов, блоков на базе оригинальной несущей конструкции (каркас, шасси) в виде моноузла (моноблока) с оригинальными элементами в целях обеспечения ее минимальных массы и объема. Такая конструкция сложна в разработке, трудоемка в изготовлении и часто неудобна в эксплуатации.

**Базовый метод (модульный принцип).** Метод предполагает создание конструкций ЭС на основе

функционально и конструктивно законченных модулей и имеет разновидности в виде функционально-модульного, функционально-узлового и функционально-блочного методов. Базовый метод является основным при проектировании современных ЭС. Он дает преимущество по срокам и стоимости разработки, изготовления и эксплуатации, однако имеет аппаратурную избыточность.

**Эвристический метод.** Метод основан на использовании коллективного и индивидуального опыта конструкторов при разработке ЭС.

**Автоматизированный метод.** Метод основан на использовании вычислительной техники (ВТ) и систем автоматизированного проектирования (САПР) при проектировании ЭС, т.е. при компоновке элементов, трассировке электрических межсоединений, вычерчивании чертежей и выпуске конструкторской документации.

#### 1.4. Модульный принцип проектирования электронных средств

В основу модульного принципа положено деление аппаратуры на конструктивно и схемно законченные части [3]. Модульный принцип и его разновидности основаны на агрегатировании, функциональной и размерной взаимозаменяемости, схемной и конструкторской унификации. Деление модульного принципа на разновидности (функционально-модульный, функционально-узловой и функционально-блочный) связано с ограничениями схемной и конструкторской унификации уровней разукрупнения ЭС (модулей, ячеек, блоков). Модульный принцип является основным при проектировании современных ЭС. Он имеет следующие преимущества по сравнению с методом моноконструкций:

на этапе разработки позволяет одновременно проектировать многие узлы и блоки, что сокращает сроки проведения разработок, упрощает отладку и сопряжение узлов, так как функционирование любого узла (ячейки) определяется работой известных модулей и микросхем, упрощает конструирование и макетирование, сокращает объем оригинальной конструкторской



документации, дает возможность непрерывно совершенствовать аппаратуру без коренных изменений конструкции, упрощает и ускоряет внесение изменений в схему, конструкцию и конструкторскую документацию;

на этапе производства сокращает сроки освоения серийного производства аппаратуры, упрощает сборку, монтаж, дает возможность применять труд сборщиков и монтажников более низкой квалификации, снижает стоимость аппаратуры благодаря широкой механизации и автоматизации производства, повышает степень специализации производства;

при эксплуатации повышает эксплуатационную надежность ЭС, облегчает обслуживание, улучшает ремонтпригодность аппаратуры.

Модульный принцип проектирования современных ЭС приводит к необходимости рассматривать аппаратуру как структурное образование, состоящее из четырех уровней разукрупнения [2].

Нулевой уровень разукрупнения (модульности) включает в себя дискретные электрорадиоэлементы (ЭРЭ), ИС, микросборки (МСБ), микропроцессоры (МП) и другие комплектующие ЭРЭ, приобретаемые для разрабатываемых и изготавливаемых ЭС.

Первый уровень разукрупнения (модульности) образуют функциональные узлы (ячейки), т.е. конструктивно и функционально законченные сборочные единицы, состоящие из ЭРЭ, ИС, МСБ, МП и других комплектующих, устанавливаемых на печатной плате (платах).

Ко второму уровню разукрупнения (модульности) относятся блоки, представляющие собой функционально и конструктивно законченные сборочные единицы, состоящие из функциональных узлов (ячеек) и несущих конструкций, объединенных крепежом и электрическим монтажом.

Третий уровень разукрупнения (модульности) представляют РЭС и ЭВС, т.е. конструктивно и функционально законченные изделия, которые, в отличие от модулей других уровней разукрупнения, имеют самостоятельное эксплуатационное назначение. Радиоэлектронные и электронно-вычислительные системы состоят из блоков, объединенных стойкой, шкафом или стеллажом. Стойки и стеллажи могут образовывать сложные

комплексы, представляющие собой две и более РЭС или ЭВС, не оформленные конструктивно в единое целое, но неразрывно связанные между собой функционально.

Использование модульного принципа проектирования ЭС приводит к аппаратурной избыточности, так как параметры модулей, как правило, превосходят оптимальные для данных средств. Чтобы свести к минимуму аппаратурную избыточность ЭС, необходимо выбирать оптимальные типоразмерные ряды модулей.

Этот выбор осуществляют на основе критериальных уравнений, которые представляют собой целевую функцию и объективные ограничения. Целевую функцию формируют на основе математического описания типоразмерного ряда; эта функция ставит, в зависимости от выбранного критерия оптимизации, любому состоянию ряда числовую характеристику, на основе которой можно принимать решение о выборе того или иного состояния ряда.

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И ТИПОРАЗМЕРНЫХ РЯДОВ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Если рассмотреть все затраты, связанные с разработкой, изготовлением, адаптацией и эксплуатацией типоразмерного ряда модулей ЭС, то можно в общем виде дать графическую схему определения оптимального числа типоразмеров модулей при выполнении условий минимальности общего суммарного значения этих затрат (рис.4).

### 2.1. Критерии оптимизации и основные зависимости структуры параметрического и типоразмерного рядов

Разработка и внедрение оптимального типоразмерного ряда должны свести неоправданное многообразие модулей ЭС (печатных плат, ячеек, блоков, шкафов, стоек и т.д.) к ограниченному ряду модулей, применяемых при проектировании ЭС.

При этом достигается определенный технико-экономический эффект, в том числе:

сокращается номенклатура типоразмеров модулей на основе унификации;

повышается серийность изготовления ЭС;

повышается надежность и улучшается ремонтпригодность;

создаются условия для внедрения модульного принципа проектирования ЭС.

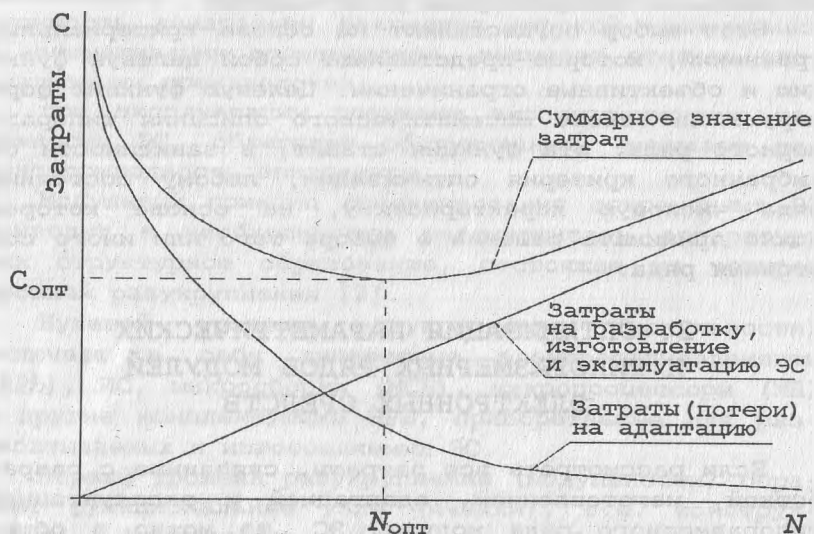


Рис. 4. Графическое определение оптимального уровня типоразмеров модулей ЭС

Рассмотрим основные понятия и определения, связанные с оптимизацией типоразмерных и параметрических рядов модулей ЭС.

**Типоразмер** — это совокупность значений электрических или геометрических параметров, характеризующих модуль ЭС (печатную плату, ИС, ячейку, блок, шкаф и т.д.).

**Размер-геометрическая характеристика модуля ЭС.**

**Параметр-электрическая характеристика модуля ЭС.**

Каждому типоразмеру модуля ЭС соответствует ряд значений параметров и геометрических размеров (по-

требляемая мощность, частота, напряжение, ток, объем, ширина, длина, высота и т.д.), характеризующих данный типоразмер.

При разработке типоразмерного ряда модулей ЭС необходимо определить такие параметрические и размерные ряды типоразмеров, которые были бы оптимальными, т.е. соответствовали некоторому выбранному критерию достижения определенной цели.

Для этого существует два подхода. Первый подход оптимизации типоразмерного ряда заключается в нахождении совокупности модулей ЭС с такими значениями параметров и размеров, при которых заданные потребности модулей удовлетворяются с наименьшими суммарными затратами. Второй подход заключается в получении максимального технико-экономического эффекта при разработке, изготовлении и эксплуатации оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС.

Оба критерия близки друг к другу, однако первый не позволяет оценить, является ли принимаемый ряд типоразмеров наилучшим и насколько, и существуют ли другие, лучшие, решения. При втором подходе такая оценка может быть дана с учетом применения промежуточного ряда.

При разработке оптимального типоразмерного ряда необходимо определить такой типоразмерный ряд, который был бы оптимальным по выбранному критерию оптимизации.

Обозначим некоторый параметр (размер)  $x$ , который принадлежит некоторому множеству значений  $X(x \in X)$ . Пусть известен вид спроса (объем требуемых модулей ЭС), а также каждому виду спроса соответствует некоторый набор характеристик (параметров и размеров), описывающих спрос. В этом случае множество потребляемой продукции с параметром (размером)  $x \in X$  соответствует вполне определенной функции спроса типоразмеров  $W(x, a_0, b_0, \dots, d_0) = W(x_j)$ , характеризующая удельный вес (плотность) некоторого параметра  $x \in X$  среди всей совокупности типоразмеров. Здесь  $a_0, b_0, \dots, d_0$  - параметры, характеризующие качество модулей ЭС.

Функция спроса модулей ЭС с параметром  $x \in X$  может быть задана в непрерывном  $W(x)$  (рис. 5, а) или дискретном  $P(x_j)$  виде (рис. 5, б).

Для простоты рассуждений параметры  $a_0, b_0, \dots, d_0$  опустим:

$$W(x) = \frac{N(x)}{N_{\Sigma}}; \quad P(x_j) = \frac{N(x_j)}{N_{\Sigma}},$$

$$j = \overline{0; k},$$

где  $N(x)$  и  $N(x_j)$  - число модулей ЭС с параметром (размером)  $x \in X$  и  $x_j \in X$  соответственно;  $N_{\Sigma}$  - общий объем модулей с параметрами  $x \in X$ , производимых или планируемых к производству в народном хозяйстве на период действия оптимального типоразмерного ряда.

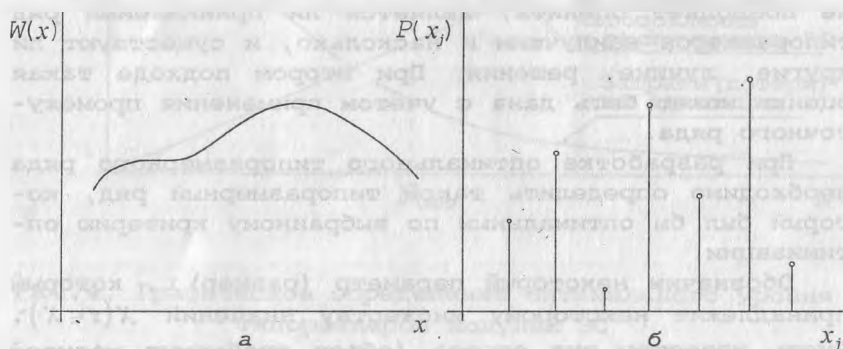


Рис. 5. Функция спроса:

а - в непрерывном виде; б - в дискретном виде

При оптимизации типоразмерного ряда модулей ЭС необходимо иметь информацию о спросе, стоимости и потерях на адаптацию при применении модулей в разрабатываемых ЭС. Рассмотрим особенности определения суммарных затрат для следующих трех возможных случаев:

полностью неупорядоченное производство;

частично упорядоченное производство;  
практически полностью упорядоченное производст-  
во.

Полностью неупорядоченное производство. Если стандарт на типоразмерный ряд отсутствует, то затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию всех ЭС  $Z(N_\Sigma)$  с параметрами  $x \in X$  описываются уравнением

$$Z(N_\Sigma) = N_\Sigma^\mu \int_{x_0}^{x_{\max}} C(x) W^\mu(x) dx,$$

а приведенные затраты

$$Z_{\text{пр}}(N_\Sigma) = \frac{Z(N_\Sigma)}{N_\Sigma} = N_\Sigma^{\mu-1} \int_{x_0}^{x_{\max}} C(x) W^\mu(x) dx \approx N_\Sigma^{\mu-1} \int_{x_0}^{x_{\max}} C(x) W(x) dx, \quad (2)$$

где  $C(x) = C(x_0) + \alpha_0(x_0 - x)$  - затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию одного типоразмера с параметром  $x$  (здесь  $\alpha_0 = \frac{\partial C(x)}{\partial x} \approx \frac{\Delta C}{\Delta x}$ ;  $C(x_0)$  - затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию одного типоразмера прототипа с параметром  $x_0$ );  $\mu$  - показатель, определяющий влияние серийности на себестоимость продукции,  $\mu = 0,8, \dots, 0,9$  для ЭС;  $x_0, x_{\max}$  - начальное и конечное значения параметров ЭС.

Частично упорядоченное производство. При наличии одного или нескольких отраслевых стандартов на типоразмерные ряды приведенные затраты соответственно составят:

$$Z_{\text{пр}}(N_\Sigma) = N_\Sigma^{\mu-1} \sum_{j=1}^L C(x_j) P_{\text{ц}}^\mu(x_j) + Z_{\text{ц}}(\eta), \quad (3)$$

где  $L$  - общее число точек параметрического ряда, регламентируемое отраслевыми стандартами;  $x_j$  - значение  $j$ -го типоразмера, регламентируемого действующими стандартами;  $P_{\text{ц}}^\mu(x_j)$  - функция спроса частично упорядоченного производства;  $Z_{\text{ц}}(\eta)$  - затраты на мероприятия по разработке и внедрению стандартов.

Практически полностью упорядоченное производство. Если разработан государственный стандарт (ГОСТ) на типоразмерные ряды модулей ЭС, регламентирующий для всех потребителей и заказчиков единые требования, то приведенные затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию этих модулей составят

$$Z_{\text{ст}}(N_{\Sigma}) = N_{\Sigma}^{\mu-1} \sum_{j=1}^k C(x_j) P_y^{\mu}(x_j) + Z_y(\eta), \quad (4)$$

где  $k$  - число точек параметрического ряда, регламентируемое ГОСТ ( $k \leq L$ );  $P_y(x_j)$  - дискретная функция спроса упорядоченного производства:

$$P_y(y_{j-1}, y_j, x_j) = \begin{cases} \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx, & j = \overline{1, k-1}, \\ y_{j-1} \leq x_j \leq y_j, \\ \int_{x_0}^{y_0} W(x) dx, & j = 0, \\ \int_{y_{k-1}}^{x_k} W(x) dx, & j = k, \end{cases}$$

(здесь  $y_j, y_{j-1}$  - некоторые граничные точки типоразмерного ряда - рис.6);  $Z_y(\eta)$  - затраты на мероприятия по разработке ГОСТа.

**Функция потерь на адаптацию (ФПА).** Необходимо отметить, что если внедрение стандарта, упорядочивающего производство, для народного хозяйства дает экономический эффект, то для индивидуального потребителя использование параметров, рекомендованных стандартом, может привести к проигрышу.

Потери индивидуального потребителя в этом случае вызваны отличием рекомендуемых стандартом точек типоразмерного ряда от необходимых индивидуальному потребителю (желаемых). Такого вида потери называют потерями на адаптацию.

Эти потери

$$r(x) = \sum_{j=1}^n \varphi(x - x_j), \quad (5)$$

где  $\varphi(x - x_j)$  - функция, описывающая приведенные экономические потери потребителя на один образец в окрестности параметра  $x_j$  ( $x_j \in X$ ), регламентируемого стандартом (рис. 7, а).

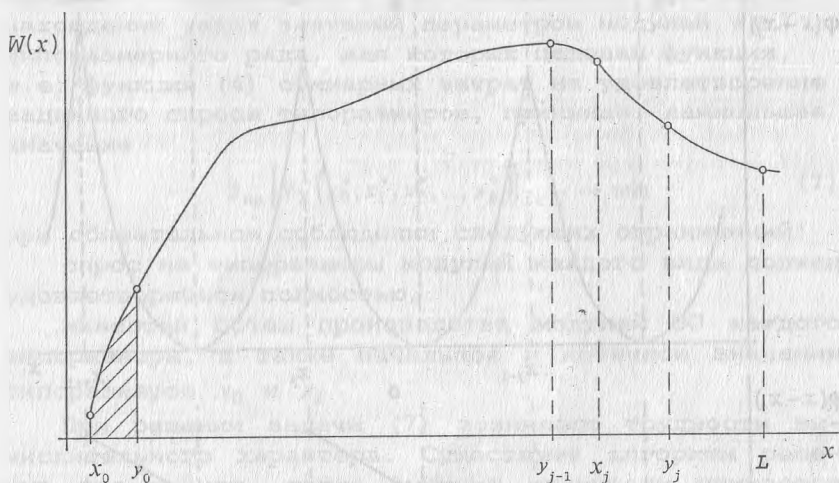


Рис. 6. функция спроса с граничными точками типоразмерного ряда

функция потерь на адаптацию может быть двусторонней (рис. 7, б) и односторонней (рис. 7, в, г).

Функция потерь на адаптацию равна нулю в точках, соответствующих положению точек типоразмерного ряда  $x = x_j$ , и отлична от нуля при других значениях  $x \neq x_j$ .

Приведенные экономические потери для индивидуального потребителя из-за внедрения стандарта можно выразить так:

$$\Pi_{\Sigma} = \frac{\Pi(N_{\Sigma})}{N_{\Sigma}} = N_{\Sigma}^{\mu-1} \int_{x_0}^{x_{max}} r(x) W(x) dx = N_{\Sigma}^{\mu-1} \sum_{j=0}^k \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x - x_j) W(x) dx. \quad (6)$$



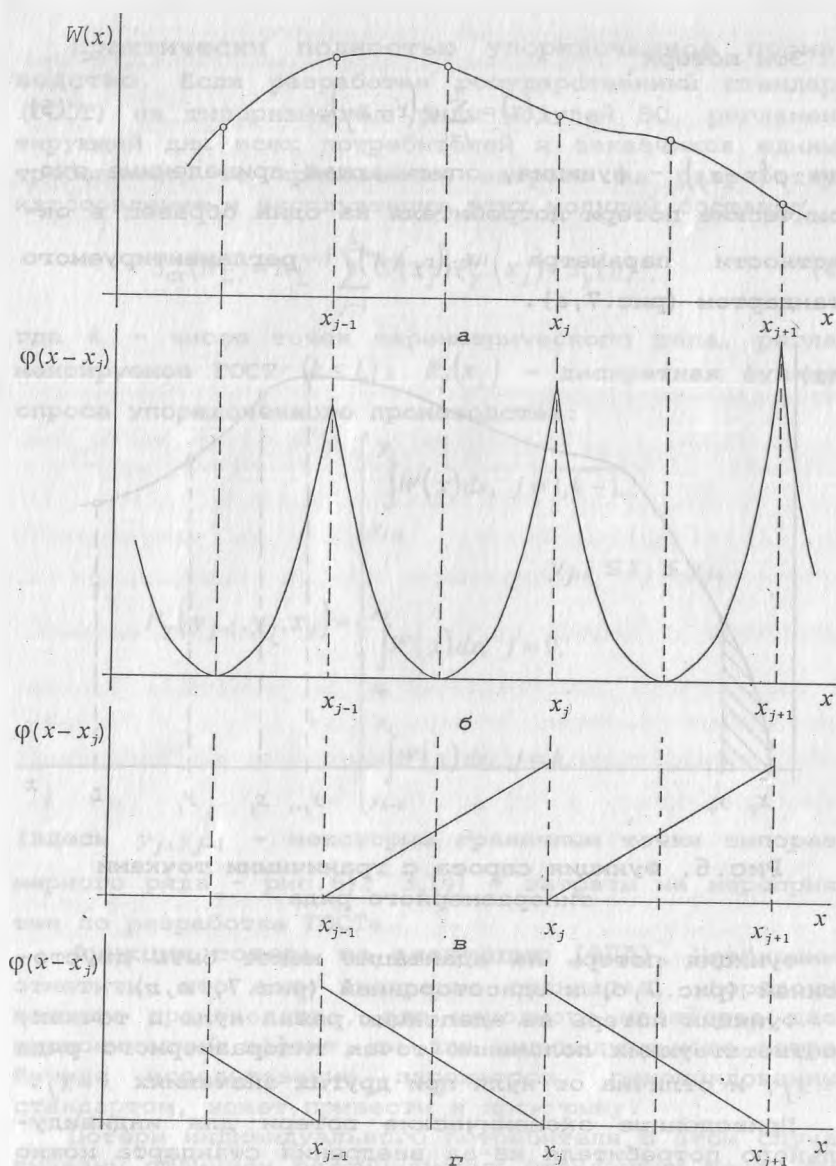


Рис. 7. функция потерь на адаптацию:  
 а - функция спроса; б - двусторонняя ФПА;  
 в, г - односторонние ФПА

Зная экономические затраты до и после упорядочения производства различных ЭС, а также потери (затраты) на адаптацию, можно принимать решение о содержании стандарта параметров (типоразмеров) по любому из критериев.

Для определения оптимального типоразмерного (параметрического) ряда существует четыре критерия.

Критерий минимума затрат при разработке, изготовлении и эксплуатации ЭС. Задача выбора оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС состоит в нахождении таких значений параметров модулей  $x \in X$  типоразмерного ряда, для которых целевая функция, т.е. функция (4) суммарных затрат на удовлетворение заданного спроса типоразмеров, принимает наименьшее значение

$$Z_{\text{пр}} \left[ N_{\Sigma} (x_0^*, x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*) \right]_{x \in X} \rightarrow \min \quad (7)$$

при обязательном соблюдении следующих ограничений:

спрос на типоразмеры модулей каждого вида должен удовлетворяться полностью;

известен объем производства модулей ЭС каждого типоразмера, а также начальное и конечное значения типоразмеров  $x_0$  и  $x_k$ .

При решении задачи (7) возникают трудности вычислительного характера. Существует алгоритм решения для случая, когда функция стоимости считается строго возрастающей и вогнутой относительно объема производства.

Недостатками целевой функции (7) являются следующие:

она не дает ответа на вопрос, является ли полученное решение глобальным минимумом или только локальным;

в полученном решении не учитываются потери на адаптацию.

Критерий минимума затрат при разработке, изготовлении и эксплуатации с учетом потерь потребителя на адаптацию. В этом случае задача выбора оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС состоит в нахождении таких значений параметров модулей  $x \in X$ , для которых целевая функция (4), выра-

жающая затраты на удовлетворение спроса, с учетом возможных потерь на адаптацию индивидуального потребителя (6), минимальна:

$$\begin{aligned}
 & Z_{\text{пр}} \left[ N_{\Sigma} (x_0^*, x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*) \right] + \Pi_{\Sigma} \left[ N_{\Sigma} (x_0^*, x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*) \right] = \\
 & = \left[ N_{\Sigma}^{\mu-1} \sum_{j=0}^k C(x_j^*) P_y^{\mu}(x_j^*) + Z_y(\eta) + N_{\Sigma}^{\mu-1} \left( \int_{x_0}^{y_0} \varphi(x - x_0^*) W^{\mu}(x) dx + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \int_{y_{k-1}}^{y_j} \varphi(x - x_k^*) W^{\mu}(x) dx + \sum_{j=1}^{k-1} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x - x_j^*) W^{\mu}(x) dx \right) \right] \Rightarrow \min
 \end{aligned} \quad (8)$$

при выполнении следующих ограничений:

спрос на типоразмеры модулей каждого вида должен удовлетворяться полностью, т.е.

$$P_y(x_j) = \begin{cases} \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx, & j = \overline{1, k-1}, \\ \int_{x_0}^{y_0} W(x) dx, & j = 0, \\ \int_{y_{k-1}}^{x_k} W(x) dx, & j = k; \end{cases} \quad (9)$$

известен объем производства модулей ЭС каждого типоразмера, а также начальное и конечное значения типоразмеров  $x_0$  и  $x_k$  ( $x \in X$ ).

Данный критерий является более общим, чем предыдущий, при этом вычислительные трудности - те же. При некоторых ограничениях, наложенных на функции спроса, затрат и потерь, можно получить решение в явной форме.

Недостатком целевой функции (8), как и (7), является то, что она не позволяет дать оценку эффективности внедрения оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС, разработанного по этому критерию, а значит, выявить проигрыш относительно оптимального

решения, если в силу конструктивных, технологических и других ограничений будет принят типоразмерный ряд, отличающийся от оптимального числом членов и положением их на числовой оси, например, из-за согласования и увязки с рядом предпочтительных чисел или международными стандартами.

Критерий минимума потерь на адаптацию. При этом критерии задача выбора оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС состоит в нахождении таких значений параметров модулей  $x \in X$ , для которых целевая функция (6), образуемая затратами, связанными с потерями на адаптацию, минимальна:

$$\begin{aligned}
 \Pi_{\Sigma} [N_{\Sigma}(x_0^*, x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)] = & \left[ N_{\Sigma}^{\mu-1} \left( \int_{x_0}^{y_0} \varphi(x - x_0^*) W^{\mu}(x) dx + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \int_{y_{k-1}}^{x_k} \varphi(x - x_k^*) W^{\mu}(x) dx + \sum_{j=1}^{k-1} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x - x_j^*) W^{\mu}(x) dx \right) \right] = \rightarrow \min
 \end{aligned} \quad (10)$$

при выполнении следующих ограничений:

спрос на типоразмеры модулей каждого вида должен удовлетворяться полностью, т.е. должно выполняться условие (9);

известен объем производства модулей ЭС каждого типоразмера, а также начальное и конечное значения типоразмеров  $x_0$  и  $x_k$  ( $x \in X$ );

затраты на разработку и изготовление являются постоянными, т.е.  $C(x) = \text{const}$ . Критерий (10) целесообразно применять в двух возможных ситуациях:

а) проектирование и производство модулей ЭС осуществляется за рубежом, сборка и продажа ЭС - внутри страны;

б) проектирование, производство модулей и сборка ЭС проводятся за рубежом, в страну ввозят и продают уже готовые ЭС.

Критерий максимума технико-экономического эффекта. Максимальный технико-экономический эффект от внедрения в практику разработки ЭС оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС определяется разностью между функцией, описывающей затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию необходимого

числа типоразмеров модулей в случае неупорядоченного - см. уравнение (2) - или частично упорядоченного - см. уравнение (3) - производства, и функциями, описывающими затраты на производство того же числа типоразмеров  $N_{\Sigma}$  при наличии стандарта (4) с учетом ФПА (6):

$$\Delta(x_j, y_j, y_{j-1}) = 3(N_{\Sigma}) - 3_{\text{ст}}[N_{\Sigma}(x_j, y_j, y_{j-1})] - \Pi(N_{\Sigma}) \rightarrow \max. \quad (11)$$

$x \in X$

В относительном виде эту функцию записывают следующим образом:

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta(x_j, y_j, y_{j-1})}{3(N_{\Sigma})} = 1 - \frac{3_{\text{ст}}(N_{\Sigma})}{3(N_{\Sigma})} - \frac{\Pi(N_{\Sigma})}{3(N_{\Sigma})} \rightarrow \max. \quad (12)$$

$x \in X$

Функция (11) зависит от суммы  $k+1$  и переменных  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_k$ .

Максимум технико-экономического эффекта (11) благодаря внедрению оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС можно получить, если значения типоразмерного ряда будут соответствовать тем значениям  $x_j^*(j = \overline{0, k})$ , которые обращают функцию (11) в максимум при начальном  $x_0$  и конечном  $x_k$  членах типоразмерного ряда, определяемых конструктивными, технологическими и эксплуатационными ограничениями. Размерная взаимозаменяемость модулей ЭС ограничивается еще и тем, что члены оптимального ряда модулей, определяющие геометрические размеры  $U_n$ , должны образовывать определенную закономерность, т.е. каждый последующий член ряда должен быть суммой двух (или более) предыдущих членов ряда:  $U_{n+1} = U_n + U_{n-1}$ , где  $U_n$  - геометрический размер  $n$ -го модуля ЭС.

Для решения целевых функций (11) и (12) составим систему уравнений, каждое из которых определяет максимум функций (11) и (12) по одной из переменных  $x_j$ , и решим эту систему при известных начальных и конечных значениях  $x_0 = a_0$  и  $x_k = b_0$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx_1} \Delta(a_0, x_1, x_2, \dots, b_0) &= 0, \\ \frac{d}{dx_2} \Delta(a_0, x_1, x_2, \dots, b_0) &= 0, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d}{dx_{k-1}} \Delta(a_0, x_1, x_2, \dots, b_0) &= 0. \end{aligned} \right\} (13)$$

Для краткости запишем систему (13) в следующем виде:

$$\frac{d}{dx_j} \Delta(a_0, x_1, x_2, \dots, b_0) = 0, \quad j = \overline{1, k-1}. \quad (14)$$

Нетрудно видеть, что по форме решения при  $Z(N_\Sigma) = \text{const}$  данный критерий совпадает с критерием (8), т.е. численные значения типоразмерного ряда, полученные по каждому из этих критериев, будут одинаковы. Однако критерий (11) и (12) позволяет оценить эффективность внедрения оптимального типоразмерного ряда, а также степень проигрыша, если типоразмерный ряд отличается от оптимального.

Численные значения типоразмеров  $x_j^* \in X$ , которые получены при решении системы уравнений (13), являются оптимальными. При этих значениях выигрыш от внедрения оптимального типоразмерного ряда максимален. При принятых ограничениях, чтобы избежать попадания в минимум функции, когда производная равна нулю, рекомендуется взять вторую производную и подставить полученные значения ряда  $x_j^*$ . Точка, в которой вторая производная отрицательна, соответствует максимуму функции. После подстановки в (13) выражений (2)-(12), дифференцирования, интегрирования по частям и замены приращений функций соответствующими значениями их производных получим систему трансцендентных уравнений оптимизации. Для убедительности приведем вывод этой системы уравнений.

Пусть затраты в случае неупорядоченного производства есть величина постоянная, т.е.  $Z(N_\Sigma) = \text{const}$ . Тогда необходимое условие максимума технико-

экономического эффекта примет вид следующего исходного выражения:

$$\frac{d\Delta_{\text{отп}}}{dx_j} = \frac{d}{dx_j} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx \right] + \frac{d}{dx_j} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x-x_j) W(x) dx \right] = 0.$$

Рассмотрим отдельно первое и второе слагаемые исходного выражения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx_j} \sum_{j=1}^{k-1} C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx &= \frac{d}{dx_j} \left[ \underbrace{C(x_{j-1}) \int_{y_{j-2}}^{y_{j-1}} W(x) dx}_{1} + \right. \\ &\quad \left. + \underbrace{C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx}_{2} + \underbrace{C(x_{j+1}) \int_{y_j}^{y_{j+1}} W(x) dx}_{3} \right]. \end{aligned}$$

Все остальные слагаемые под знаком  $\sum_{j=1}^{k-1}$  не зависят от  $x_j$ , и следовательно,  $\frac{d}{dx_j}(\dots) = 0$ . Используя для 1, 2 и 3 правило Лейбница, получим:

1.  $\frac{d}{dx_j} \left[ C(x_{j-1}) \int_{y_{j-2}}^{y_{j-1}} W(x) dx \right] = C(x_{j-1}) W(y_{j-1}) y'_{j-1};$
2.  $\frac{d}{dx_j} \left[ C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx \right] = C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx + C(x_j) [W(y_j) y'_j - W(y_{j-1}) y'_{j-1}];$
3.  $\frac{d}{dx_j} \left[ C(x_{j+1}) \int_{y_j}^{y_{j+1}} W(x) dx \right] = -C(x_{j+1}) W(y_j) y'_j.$

Тогда первое слагаемое исходного выражения приобретет вид

$$1+2+3 = C(x_{j-1})W(y_{j-1})y'_{j-1} + C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx + C(x_j)W(y_j)y'_j - C(x_j)W(y_{j-1})y'_{j-1} - C(x_{j+1})W(y_j)y'_j = W(y_j) [C(x_{j-1}) - C(x_j)] + W(y_{j-1})y'_{j-1} [C(x_{j-1}) - C(x_j)] + C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx.$$

Рассмотрим теперь второе слагаемое выражения:

$$\frac{d}{dx_j} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x-x_j)W(x) dx \right].$$

Второе слагаемое в результате использования Лейбница приобретет вид

$$1+2+3 = y'_{j-1} \varphi(y_{j-1}-x_{j-1})W(y_{j-1}) + y'_j \varphi(y_j - y_{j-1} - x_j)W(y_j) - y'_{j-1} \varphi(y_{j-1}-x_j)W(y_{j-1}) - y'_j \varphi(y_j - x_{j+1})W(y_j) + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x-x_j)W(x) dx = y'_{j-1}W(y_{j-1})[\varphi(y_{j-1}-x_{j-1}) - \varphi(y_{j-1}-x_j)] + y'_jW(y_j)[\varphi(y_j-x_j) - \varphi(y_j-x_{j+1})] + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi'(x-x_j)W(x) dx.$$

Исходная система уравнений получит вид:

$$y'_{j-1}W(y_{j-1})[C(x_{j-1}) - C(x_j)] + y'_jW(y_j)[C(x_j) - C(x_{j+1})] + y'_{j-1}W(y_{j-1})[\varphi(y_{j-1}-x_{j-1}) - \varphi(y_{j-1}-x_j)] + y'_jW(y_j)[\varphi(y_j-x_j) - \varphi(y_j-x_{j+1})] + C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi'(x-x_j)W(x) dx \quad (15)$$



экономического эффекта примет вид следующего исходного выражения:

$$\frac{d\Delta_{\text{отп}}}{dx_j} = \frac{d}{dx_j} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx \right] + \frac{d}{dx_j} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x - x_j) W(x) dx \right] = 0.$$

Рассмотрим отдельно первое и второе слагаемые исходного выражения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx_j} \sum_{j=1}^{k-1} C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx &= \frac{d}{dx_j} \left[ \underbrace{C(x_{j-1}) \int_{y_{j-2}}^{y_{j-1}} W(x) dx}_{1} + \right. \\ &\quad \left. + \underbrace{C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx}_{2} + \underbrace{C(x_{j+1}) \int_{y_j}^{y_{j+1}} W(x) dx}_{3} \right]. \end{aligned}$$

Все остальные слагаемые под знаком  $\sum_{j=1}^{k-1}$  не зависят от  $x_j$ , и следовательно,  $\frac{d}{dx_j}(\dots) = 0$ . Используя для 1, 2 и 3 правило Лейбница, получим:

1.  $\frac{d}{dx_j} \left[ C(x_{j-1}) \int_{y_{j-2}}^{y_{j-1}} W(x) dx \right] = C(x_{j-1}) W(y_{j-1}) y'_{j-1};$
2.  $\frac{d}{dx_j} \left[ C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx \right] = C(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx + C(x_j) [W(y_j) y'_j - W(y_{j-1}) y'_{j-1}];$
3.  $\frac{d}{dx_j} \left[ C(x_{j+1}) \int_{y_j}^{y_{j+1}} W(x) dx \right] = -C(x_{j+1}) W(y_j) y'_j.$

Тогда первое слагаемое исходного выражения приобретет вид

$$1+2+3 = C(x_{j-1})W(y_{j-1})y'_{j-1} + C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x)dx + C(x_j)W(y_j)y'_j - \\ - C(x_j)W(y_{j-1})y'_{j-1} - C(x_{j+1})W(y_j)y'_j = W(y_j)y'_j [C(x_j) - \\ - C(x_{j+1})] + W(y_{j-1})y'_{j-1} [C(x_{j-1}) - C(x_j)] + C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x)dx.$$

Рассмотрим теперь второе слагаемое исходного выражения:

$$\frac{d}{dx_j} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x-x_j)W(x)dx \right].$$

Второе слагаемое в результате использования правила Лейбница приобретет вид

$$1+2+3 = y'_{j-1} \varphi(y_{j-1}-x_{j-1})W(y_{j-1}) + y'_j \varphi(y_j-x_j)W(x_j) - \\ - y_{j-1} \varphi(y_{j-1}-x_j)W(y_{j-1}) - y'_j \varphi(y_j-x_{j+1})W(y_j) + \\ + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi(x-x_j)W(x)dx = y'_{j-1}W(y_{j-1})[\varphi(y_{j-1}-x_{j-1}) - \varphi(y_{j-1}-x_j)] + \\ + y'_jW(y_j)[\varphi(y_j-x_j) - \varphi(y_j-x_{j+1})] + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi'(x-x_j)W(x)dx.$$

Исходная система уравнений получит следующий вид:

$$y'_{j-1}W(y_{j-1})[C(x_{j-1}) - C(x_j)] + \\ + y'_jW(y_j)[C(x_j) - C(x_{j+1})] + y'_{j-1}W(y_{j-1})[\varphi(y_{j-1}-x_{j-1}) - \\ - \varphi(y_{j-1}-x_j)] + y'_jW(y_j)[\varphi(y_j-x_j) - \varphi(y_j-x_{j+1})] + \\ + C'(x_j) \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x)dx + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi'(x-x_j)W(x)dx = 0. \quad (15)$$

Таким образом, для обоснования оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС по критерию максимального технико-экономического эффекта должны быть известны следующие данные:

функция спроса типоразмеров модулей ЭС  $W(x)$  непрерывного или дискретного вида;

функция стоимости  $C(x)$  типоразмеров модулей ЭС с определенными характеристиками;

функция потерь  $\varphi(x-x_j)$ , описывающая потери на адаптацию в стоимостном выражении, которые несет потребитель, если значение типоразмера, регламентированного оптимальным рядом, отличается от необходимого потребителю.

## 2.2. Определение функций спроса, стоимости и потерь на адаптацию

Математические модели спроса. Разработка оптимальных типоразмерных рядов модулей ЭС требует большого объема исходной информации. Оптимальные типоразмеры модулей ЭС должны быть увязаны с модульным принципом проектирования ЭС и обеспечивать размерную и функциональную взаимозаменяемость, что выдвигает требование определения их главного и соподчиненных параметров. Модули ЭС могут иметь один или несколько главных параметров, определяющих их основное назначение (электрические, конструктивные, технико-экономические и эксплуатационные). Номенклатуру главных параметров выбирают минимальной, чтобы не ограничивать возможности совершенствования конструкции и не стеснять творческую инициативу разработчиков ЭС.

Для модулей ЭС основными из главных параметров являются энергопотребление и объем, а соподчиненными - длина, ширина и высота.

Так как в ЭС между энергопотреблением и объемом существует функциональная или корреляционная зависимость, при определении функции спроса за главный параметр можно принять любой из них. При определе-

нии функции спроса можно выделить детерминированную и вероятностную модели.

Детерминированная модель может быть выражена в дискретном и непрерывном виде:

дискретная интегральная функция спроса

$$P(x_j) = \sum_{j=1}^n V_j x_j,$$

где  $V_j$  - спрос  $j$ -го типоразмера;  $x_j$  - текущее значение типоразмера в интервале всего ряда;

непрерывная интегральная функция спроса

$$W(x) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x) dx,$$

где  $f(x)$  - дифференциальная функция спроса;  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  - наименьшее и наибольшее значения типоразмера модуля ЭС.

Годовой объем выпуска модуля с заданным значением типоразмера  $x_j$  определяется:

$$V(x_j) = \mu [W(x_j) - W(x_{j-1})],$$

где  $W(x_j)$  и  $W(x_{j-1})$  - интегральные значения годового выпуска модулей ЭС с типоразмерами  $x_1 \leq x \leq x_j$  и  $x_1 \leq x \leq x_{j-1}$ ;  $\mu$  - коэффициент, учитывающий изменение объема выпуска при изменении типоразмера.

Двухуровневая функция спроса может быть записана как

$$v(x) = f[\psi(x)],$$

где  $\psi(x) = y$  - функция, описывающая входимость модуля низшего уровня вида  $x$  в модуль высшего уровня вида  $y$ ;  $f(y)$  - функция, описывающая спрос модулей вида  $y$ .

Вероятностная модель. Если задана дисперсия флуктуации параметра  $\sigma^2$ , то наибольшей неопределенностью (максимальной энтропией) обладает функция спроса в виде распределения Гаусса:

$$W_1(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}.$$

Если дисперсия флуктуаций спроса не ограничена, а неопределенность в спросе на период действия стандарта максимальна, то функция спроса описывается равномерным распределением:

$$W_2(x) = \frac{1}{x_{\max} - x_0}, \quad x_0 \leq x \leq x_{\max}.$$

Все остальные возможные разновидности функции спроса могут быть аппроксимированы и представлены в виде комбинаций рассмотренных двух функций спроса (Гаусса и равномерного распределения). Для аналитического описания спроса, когда спрос зависит от нескольких параметров, применяют уравнения регрессии следующего вида:

$$f(x) = a_0(x) + a_1(x)Z_1 + a_2(x)Z_2 + \dots + a_m(x)Z_m,$$

$$f(x) = \alpha_0 Z_1^{\alpha_1(x)} Z_2^{\alpha_2(x)} \dots Z_n^{\alpha_n(x)},$$

где  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$  - параметры ЭС, влияющие на спрос;

$$\left. \begin{aligned} & a_0(x), a_1(x), \dots, a_m(x), \\ & \alpha_0(x), \alpha_1(x), \dots, \alpha_n(x) \end{aligned} \right\}$$

- постоянные члены регрессионного уравнения, определяемые по статистике спроса.

**Математические модели стоимости.** Функция стоимости может определяться с помощью затрат на аналоги и прототипы ЭС по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} 3 &= 3_{\text{пр}} + \sum_{i=1}^n \beta_i \Delta p_i, \\ 3 &= 3_{\text{пр}} + \sum_{j=1}^m \Delta 3_j, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $3_{\text{пр}}$  - затраты на прототип (аналог);  $\beta_i$  - коэффициенты уравнения, определяемые как

$$\beta_i = \frac{\partial 3_{\text{пр}}}{\partial p_i} \approx \frac{\Delta 3_{\text{пр}}}{\Delta p_i};$$

$\Delta p_i$  - изменение показателя качества по сравнению с прототипом;  $\Delta Z_j$  - изменение затрат на  $j$ -й элемент модуля по сравнению с прототипом;  $n$  - число учитываемых и измененных показателей качества модулей при отклонении от прототипа;  $m$  - число измененных элементов по сравнению с прототипом.

Изменение затрат  $\Delta Z_j$  определяют по регрессионно-корреляционным многофакторным моделям вида:

$$\Delta Z_j = a_0 + a_1 \Delta P_1 + \dots + a_n \Delta P_n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} \Delta P_i \Delta P_j, \quad (17)$$

$$\Delta Z_j = \alpha_0 \Delta P_1 \Delta P_2^2 \dots \Delta P_n^{\alpha_n},$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n, \alpha, a_{ij}$  - постоянные коэффициенты, определяемые по статистическим данным методом наименьших квадратов;

$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, i = j; n$  и  $m$  - число учитываемых факторов.

Зависимость затрат от одного главного параметра описывается уравнениями следующего вида:

$$Z = a_0 + a_1 P_1 \quad (18)$$

- прямая;

$$\left. \begin{aligned} Z &= a_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2^2, \\ Z &= a P_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

- парабола второго порядка;

$$\left. \begin{aligned} Z &= a_0 + \frac{a_1}{P_1}, \\ Z &= a \frac{1}{P_1 b} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

- гипербола.

Здесь  $a_0, a, b$  - постоянные коэффициенты, определяемые по статистическим данным методом наименьших квадратов;  $P_1$  - главный параметр ряда.

Эмпирические зависимости функций стоимости (в условных рублях) для конкретных изделий РЭС определяют по следующим формулам:

для КВ радиоприемников,

$$C_0 = 0,4P_{\text{вых}}^{0,58}d^{0,89}, \quad (21)$$

где  $P_{\text{вых}}$  - выходная мощность, Вт;  $d$  - плотность изделия, г/дм<sup>3</sup>;

для трансформаторов

$$C_0 = 1,76 + 0,025P + 0,38M, \quad (22)$$

где  $P$  - мощность, Вт;  $M$  - масса, кг;

для радиопередающего устройства,

$$C_0 = a_0 + b_0P, \quad (23)$$

где  $P$  - мощность передатчика, Вт;  $a_0, b_0$  - коэффициенты, определяемые по статистическим данным;

для источников электропитания (ИЭП),

$$C_0 = a_0P^{0,34}, \quad (24)$$

где  $P$  - мощность ИЭП, Вт;  $a_0$  - коэффициент, определяемый по статистическим данным.

При серийном производстве модулей ЭС затраты определяют следующим образом:

$$3(P_i) = C_0(P_i)N^\mu, \quad (25)$$

где  $C_0(P_i)$  - затраты на первый образец модуля с  $P_i$  параметром в серии;  $N$  - число образцов модулей в серии;  $\mu$  - коэффициент, учитывающий снижение затрат при серийном изготовлении модулей (для ЭС  $\mu = 0,8 \dots 0,9$ ).

Определение затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию модулей ЭС с помощью типовых представителей схемных элементов. Известно, что получение и использование статистических данных о стоимости разработки, изготовления и эксплуатации ячеек и блоков различных ЭС представляет значительные трудности.

Задача состоит в том, чтобы найти метод определения стоимости разработки, изготовления и эксплуатации различных типоразмеров модулей ЭС (блоков и ячеек) при отсутствии данных о фактических затратах на их разработку и изготовление. Для этого необходимо использовать действующие в отраслях промышлен-

ности нормативы трудозатрат на разработку, изготовление и эксплуатацию ячеек и блоков ЭС различного назначения, которые позволяют характеризовать модули ЭС определенным количеством приведенных типовых представителей схемных элементов.

Типовым представителем является наиболее характерный базовый элемент конструкции или электрической схемы в разрабатываемых модулях ЭС. Типовые представители сгруппированы по признаку одинаковых трудозатрат, приходящихся на элементарный элемент. Для оценки типового представителя используют весовые коэффициенты, называемые коэффициентами приведения.

Коэффициенты приведения (см. таблицу) определяли при разработке нормативов методами моделирования.

#### Коэффициенты приведения типовых схемных элементов

Типовой представитель схемных элементов	Коэффициент приведения
Транзистор, диод	1
Электронная лампа	2
Микросхема интегральная полупроводниковая	1.5
Микросхема интегральная гибридная	1.5
Микросхема гибридно-пленочная СВЧ	10
Один задействованный вывод трансформатора, дросселя	1
ВЧ разъем	1
НЧ разъем, переходная колодка или другое коммутирующее устройство (каждые 5 контактов)	1
Резистор, конденсатор, функционально не связанные с активными элементами	0.1
Лампа с длительным воздействием (ЛБВ, ЛОВ)	40
Реле, пакетный переключатель	1

Блоки и ячейки с одинаковыми и различными габаритными размерами получили характеристику, позволяющую производить относительное сравнение их по степени



функциональной сложности как в составе средства, так и между ЭС.

Сопоставимые стоимости разработки блоков и ячеек определяют по формулам:

$$C_{\text{разр.бл}} = \frac{C_{\text{разр.сп}} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (26)$$

$$C_{\text{разр.яч}} = \frac{C_{\text{разр.сп}} m_j}{\sum_{j=1}^l m_j}, \quad (27)$$

где  $C_{\text{разр.бл}}$  - стоимость разработки блока, входящего в рассматриваемое ЭС;  $C_{\text{разр.сп}}$  - стоимость разработки ЭС в целом;  $m_i$  - число приведенных типовых представителей в  $i$ -м блоке;  $i = \overline{1, n}$  - общее число блоков в ЭС;  $m_j$  - число приведенных типовых представителей в  $j$ -й ячейке;  $j = \overline{1, l}$  - общее число ячеек в блоке;  $C_{\text{разр.яч}}$  - стоимость разработки ячейки, входящей в рассматриваемый блок.

Аналогично рассчитывают сопоставимую стоимость изготовления блоков и ячеек ЭС:

$$C_{\text{изг.бл}} = \frac{C_{\text{изг.сп}} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (28)$$

$$C_{\text{изг.яч}} = \frac{C_{\text{изг.сп}} m_j}{\sum_{j=1}^l m_j}, \quad (29)$$

где  $C_{\text{изг.бл}}$  - стоимость изготовления блока, входящего в рассматриваемое ЭС;  $C_{\text{изг.сп}}$  - стоимость изготовления ЭС в целом;  $C_{\text{изг.яч}}$  - стоимость изготовления ячейки, входящей в рассматриваемый блок.

По такому же методу может быть определена и стоимость эксплуатации блоков и ячеек различных ЭС.

Математические модели функции потерь на адаптацию. При регламентированном числе типоразмеров модулей (блоков и ячеек) потребитель вынужден при известных коэффициентах заполнения по объему или массе размещать в блоках определенное число ячеек, а в ячейках - определенное число ЭРЭ и ИС.

Может оказаться, что регламентируемый типоразмер ячейки или блока будет больше или меньше необходимого потребителю. В первом случае возрастают объем и масса проектируемых ЭС, во втором (при меньшем объеме) - возникают трудности, связанные с получением нужных характеристик ЭС.

Известно, что в большинстве видов ЭС 90...99 % энергии питания расходуется на нагрев самой аппаратуры. Поэтому потребитель не сможет разместить элементы в меньшем объеме ЭС, чем требуется с учетом коэффициента заполнения по объему естественного или принудительного охлаждения. В этом случае, если нельзя конструктивно разделить компоновочные элементы, приходится изменять характеристики ЭС (мощность энергопотребления, выходную мощность и др.), так как энергетические параметры ЭС связаны с их объемом. На рис.8 и 9 представлены зависимости между потребляемой мощностью и объемами блоков различных ЭС.

Зависимость, показанная на рис.8 (штрихпунктирная линия), получена в результате обработки 500 типоразмеров зарубежных и 100 типоразмеров отечественных источников электропитания (ИЭП) при коэффициенте удельной объемной мощности  $2...2,5 \text{ Вт/дм}^3$ ; сплошная линия соответствует аппроксимирующей функции

$$V = \alpha P^{\xi}, \quad (30)$$

где  $\xi = 0,5$ ;  $\alpha = 1 \text{ Вт}^{-1}$ .

Зависимость, показанная на рис.9, получена на основе анализа 45 блоков бортовой самолетной аппаратуры: радиопередатчиков, преобразователей, усилителей мощности и т.д.

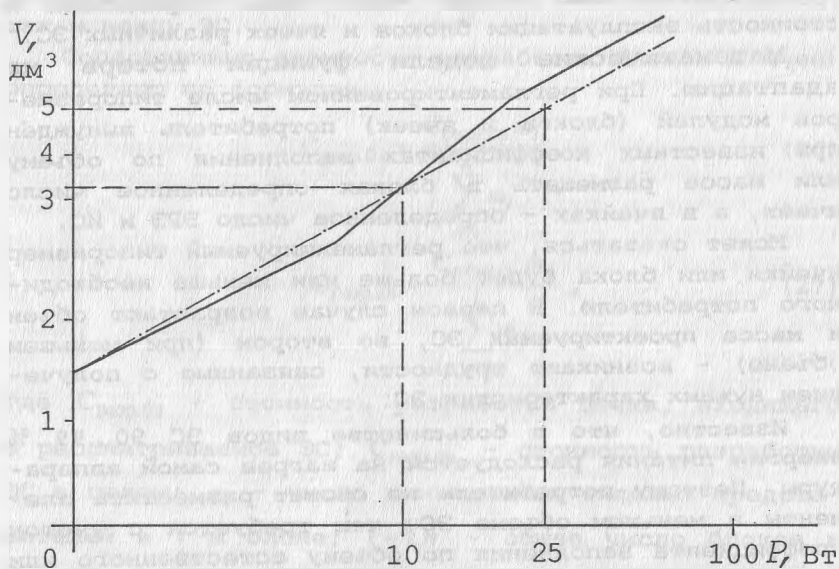


Рис. 8. Зависимость между объемами и мощностью энергопотребления блоками ИЭП ЭС

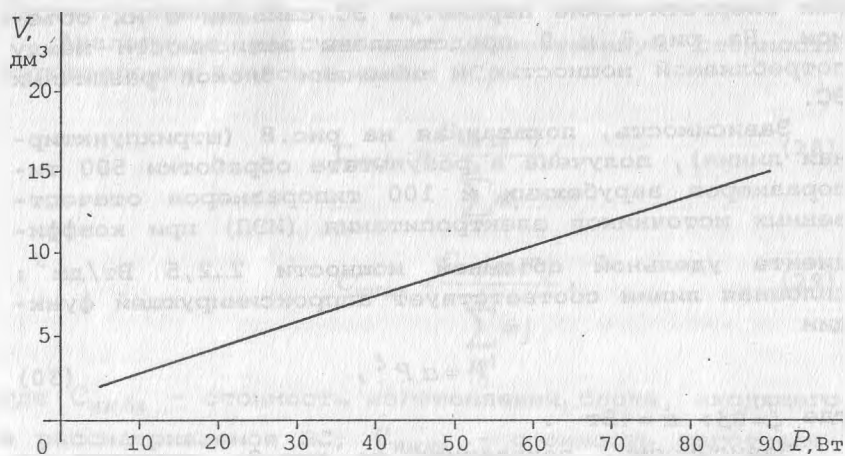


Рис. 9. Зависимость между объемами и мощностью энергопотребления блоками самолетных ЭС

Прямая на рис. 9 соответствует линейной зависимости

$$V = 1 + 0,166P. \quad (31)$$

Зависимости (30) и (31) для главных параметров позволяют найти ФПА, что обусловлено двумя факторами:

в большинстве носителей отводится определенный объем для ЭС, а также известна стоимость единицы этого объема. Превышение объема, отводимого под ЭС, сокращает объем полезного груза (например, на самолете, автомобиле, теплоходе и т.д.). Влияние увеличения объема ЭС может быть выражено в денежных или относительных единицах;

объем или мощность энергопотребления ЭС связаны с основными функциональными параметрами (например, с выходной мощностью).

Таким образом, ФПА можно находить отдельно для левой и правой ветвей.

Правая ветвь ФПА [2] учитывает потери потребителя из-за использования блоков и ячеек, объем которых больше требуемого, и определяется стоимостью единицы объема:

$$\Delta Z_{\text{п}}(\Delta V) = K_1(V_i - V_j), \quad (32)$$

где  $K_1$  - коэффициент стоимости использования единицы объема;  $V_i$  - объем блока или ячейки, рекомендуемый типоразмерным рядом;  $V_j$  - объем блока или ячейки, требуемый потребителю.

Левая ветвь ФПА [2] учитывает потери потребителя вследствие уменьшенного объема ЭС. Она определяется разностью между полученным эффектом благодаря увеличению полезного объема ЭС и потерями, обусловленными снижением характеристик ЭС:

$$\Delta Z_{\text{п}} = K_1(V_i - V_j) - \Delta Z[V(p_i) - V(p_j)], \quad (33)$$

где  $V(p_i)$  - объем с параметром  $p_i$ , регламентируемый типоразмерным рядом;  $V(p_j)$  - объем с параметром  $p_j$ , требуемый потребителю.

Первое слагаемое рассчитывают как было показано ранее. При расчете второго слагаемого необходимо принимать во внимание следующие два замечания:

1. В некоторых задачах ФПА можно считать одно-сторонней [2], например, если по условиям эксплуатации нельзя изменить характеристики РЭС (маяки, навигационная аппаратура и т.д.) и заказчик согласен увеличить объем (массу) ЭС.

2. В задачах, где уменьшение объема не позволяет получить эффект (например, в задачах, не связанных с перевозкой грузов и др.), можно принять, что левая ветвь ФПА определяется потерями из-за снижения качества функционирования ЭС.

Анализ второго слагаемого в (33) показывает, что оно связывает главные геометрические и функциональные параметры ЭС (см. рис. 8 и 9).

Второе слагаемое в (33)  $\Delta 3[V(p_i) - V(p_j)]$  определяют на основе одного из главных функциональных параметров ЭС, например, мощности, отдаваемой антенному устройству или в нагрузку усилителя. Заметим еще, что между мощностью в нагрузке, энергопотреблением и объемами блоков ЭС имеется функциональная (корреляционная) связь, а следовательно, ряды объемов  $V$  и мощности  $P$  связаны между собой (см. рис. 8 и 9).

Найдем ряды параметров, характеризующие мощность в нагрузке. В этом случае при оптимизации параметрического ряда мощности, отдаваемой блоками ЭС в нагрузку, нужно исходить из средней ФПА потребителя:

$$\Phi(x - x_i) = m[\varphi_j(x - x_n)], \quad (34)$$

где  $x_n$  - точки ряда, регламентируемые оптимальным рядом или стандартом параметров;  $m$  - знак усреднения по всем возможным потребителям.

С точки зрения системотехники [2] не обязательно знать подробности решаемой задачи - достаточно описать ее некоторым обобщенным показателем, в качестве которого можно взять вероятность выполнения задачи ЭС:

$$p(i, j) = p_1(i, j)p_2(i, j) \dots p_N(i, j) = \prod_{k=1}^N p_k(i, j),$$

где  $p_k(i, j)$  - вероятность выполнения частной задачи  $k$ -й подсистемой (передатчик, приемник, ЭВМ и т.д.);  $i$  - знак, показывающий, что данный показатель получен для  $i$ -го вида ЭС  $j$ -го потребителя.

Для определения ФПА при построении оптимального типоразмерного ряда модулей ЭС рекомендуются следующие обобщенные модели:

1. Функция потерь на адаптацию  $j$ -го индивидуального потребителя

$$P_j = \varphi(x_k - x_j)m_j, \quad (35)$$

где  $\varphi(x_k - x_j)$  - функция потерь  $j$ -го потребителя от несоответствия требуемого типоразмера модуля ЭС с параметром  $x_j$ , предлагаемого из ряда типоразмеров с параметром  $x_k$ ;  $x_k$  - значение параметра типоразмера модуля из ряда, ближайшего к значению  $x_j$ ;  $x_j$  - значение параметра типоразмера модуля, необходимое  $j$ -му потребителю;  $m_j$  - количество модулей, необходимых  $j$ -му потребителю.

2. Функцию потерь на адаптацию по всему ряду модулей (для всех потребителей) определяют по выражению

$$P_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N \sum_{x_j > x_{k-1}}^{x_j \leq x_k} \varphi(x_k - x_j)m_j \quad (36)$$

при  $x_j \leq x_k$  и  $k = \overline{1, N}$ , где  $N = n + 1$ , а  $n$  - число интервалов ряда;

$\sum_{\substack{x_j \leq x_k \\ x_j < x_{k-1}}} \varphi(x_k - x_j)m_j$  - суммарные потери

всех индивидуальных потребителей с параметрами  $x_j$ , находящимися между значениями параметров ряда  $x_{k-1} \leq x_j \leq x_k$ .

Если при этом известна функция спроса в виде плотности вероятности, то все потребности в интервале  $]x_{k-1}; x_k]$  будут определяться из выражения

$$\sum_{\substack{x_j \leq x_k \\ x_j > x_{k-1}}} \varphi(x_k - x_j) m_j = [f(x_k) - f(x_{k-1})] \varphi(x_k - \bar{x}_{jk}), \quad (37)$$

где  $\varphi(x_k - \bar{x}_{jk})$  - функция потерь, усредненная по значениям  $x_j$  в интервале  $]x_{k-1}; x_k]$ .

Тогда суммарные потери по всему ряду

$$P_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N [f(x_k) - f(x_{k-1})] \varphi(x_k - \bar{x}_{jk}). \quad (38)$$

### 2.3. Упрощенный метод решения задачи оптимизациитипоразмерных рядов модулей электронных средств

Метод состоит в том, что класс типоразмерных рядов, члены которых минимизируют затраты, определяют по виду функции спроса, стоимости и ФПА. Используя стандартные программы, на ПЭВМ определяют числовые значения ряда.

Пусть исходная система уравнений (15) записана для случая, когда ФПА симметрична:

$$\begin{aligned} \varphi(y_{j-1} - x_{j-1}) - \varphi(y_{j-1} - x_j) &= 0, \\ \varphi(y_j - x_j) - \varphi(y_j - x_{j+1}) &= 0. \end{aligned}$$

Заменим приращение функции стоимости через произведение производной в одной из точек ряда на интервал между членами ряда:

$$\begin{aligned} C(x_{j-1}) - C(x_j) &= C'(x_j)(x_{j-1} - x_j), \\ C(x_j) - C(x_{j+1}) &= C'(x_j)(x_j - x_{j+1}). \end{aligned}$$

После интегрирования по частям и приведения исходных членов уравнения получим упрощенную систему:

$$\begin{aligned}
 W(x_j) \varphi\left(\frac{x_{j+1}-x_j}{2}\right) - W(x_{j-1}) \varphi\left(\frac{x_{j-1}-x_j}{2}\right) &= \\
 = C'(x_j) W'(x_j) \left[ \left(\frac{x_{j+1}-x_j}{2}\right)^2 - \left(\frac{x_j-x_{j-1}}{2}\right)^2 \right]. & \quad (39)
 \end{aligned}$$

Приведем вывод упрощенной системы уравнений (39).

При симметричной ФПА можно записать (рис. 10):

$$\varphi(y_{j-1}-x_{j-1}) = \varphi(y_{j-1}-x_j), \quad \varphi(y_j-x_j) = \varphi(y_j-x_{j+1}),$$

$$y_j = \frac{x_j + x_{j+1}}{2}, \quad y_{j-1} = \frac{x_{j-1} + x_j}{2},$$

$$\frac{dy_j}{dx_j} = \frac{1}{2}, \quad \frac{dy_{j-1}}{dx_j} = \frac{1}{2}, \quad y_j - y_{j-1} = \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{2},$$

$$y_j - x_j = \frac{x_{j+1} - x_j}{2}, \quad y_{j-1} - x_j = \frac{x_{j-1} + x_j}{2}.$$

Тогда исходная система уравнений (15) приобретет вид

$$\begin{aligned}
 \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi'(x-x_j) W(x) dx &= \frac{1}{2} W(y_{j-1}) [C(x_j) - C(x_{j-1})] + \\
 + \frac{1}{2} W(y_j) [C(x_{j+1}) - C(x_j)] - C'(x_j) [F(y_j) - F(y_{j-1})] & \quad (40)
 \end{aligned}$$

при условии

$$F(y_j) - F(y_{j-1}) = \int_{y_{j-1}}^{y_j} W(x) dx \approx W(x)(y_j - y_{j-1}) = W'(x_j) \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{2}.$$

Рассмотрим правую часть системы уравнений (40).

При представлении приращения функции стоимости по формуле Лагранжа имеем

$$C(x_j) - C(x_{j-1}) \approx C'(x_j)(x_j - x_{j-1});$$

$$C(x_{j+1}) - C(x_j) \approx C'(x_j)(x_{j+1} - x_j).$$

При такой замене функция стоимости аппроксимируется кусочно-ломаной (линейной) зависимостью (рис. 11). Тогда правая часть системы уравнения приобретает вид



$$\begin{aligned}
 J_{\text{opt}} &= \frac{1}{2}W(y_{j-1})C(x_j)(x_j - x_{j-1}) - \frac{1}{2}W(y_j)C(x_j)(x_{j+1} - x_j) - \frac{1}{2}C(x_j)W(x_j)(x_{j+1} - x_{j-1}) = \\
 &= \frac{1}{2}C(x_j)[W(y_{j-1})(x_j - x_{j-1}) + W(y_j)(x_{j+1} - x_j) - W(x_j)(x_{j+1} - x_{j-1})] = \\
 &= \frac{1}{2}C(x_j)\{x_j[W(x_{j+1}) - W(y_j)] + x_{j+1}[W(y_j) - W(x_j)] + x_{j-1}[W(x_j) - W(y_{j-1})]\}
 \end{aligned}$$

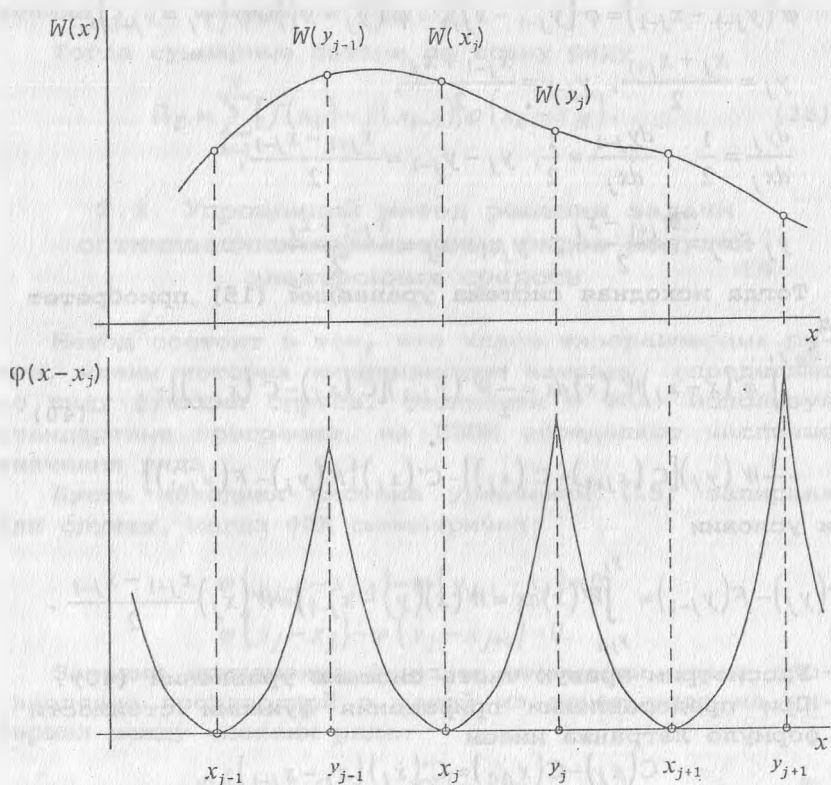


Рис. 10. Симметричная ФПА

Заменим приращение функции спроса:

$$W(y_j) - W(y_{j-1}) = W'(x_j)(y_j - y_{j-1}) = W'(x_j) \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{2}$$

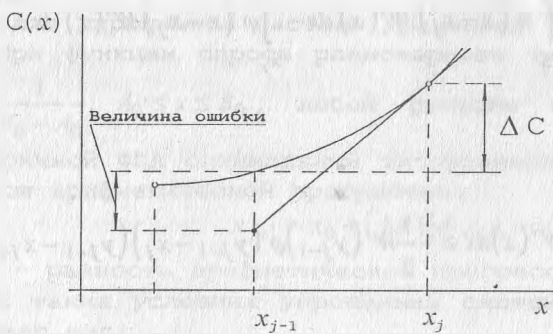
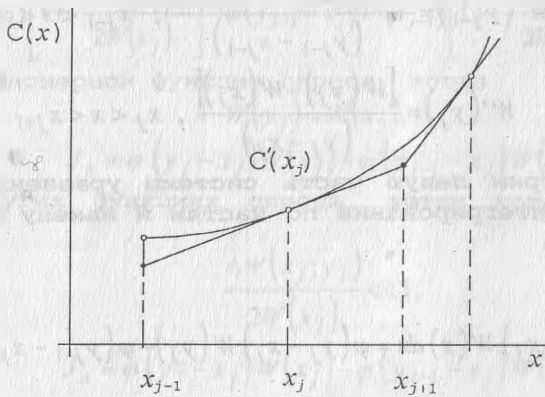
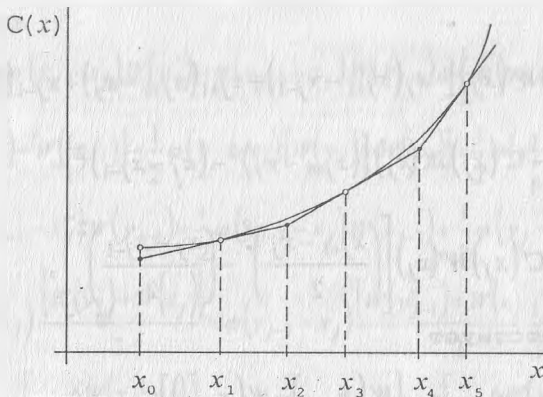


Рис.11. Аппроксимация функции стоимости кусочно-ломаной зависимостью

Тогда

$$\begin{aligned}
 J_{\text{пр}} &= \frac{1}{4} C'(x_j) W'(x_j) [-x_j(x_{j+1} - x_{j-1}) + x_{j+1}(x_{j+1} - x_j) + x_{j-1}(x_j - x_{j-1})] = \\
 &= \frac{1}{4} C'(x_j) W'(x_j) [(x_{j+1} - x_j)^2 - (x_j - x_{j-1})^2] = \\
 &= C'(x_j) W'(x_j) \left[ \left( \frac{x_{j+1} - x_j}{2} \right)^2 - \left( \frac{x_j - x_{j-1}}{2} \right)^2 \right],
 \end{aligned}$$

что соответствует

$$\begin{aligned}
 W'(y_{j-1}) &= \frac{[W(y_{j-1}) - W(x_{j-1})]}{(y_{j-1} - x_{j-1})}, \quad x_{j-1} < x < x_j, \\
 W'(y_j) &= \frac{[W(y_j) - W(x_j)]}{(y_j - x_j)}, \quad x_j < x < x_{j+1}.
 \end{aligned}$$

Рассмотрим левую часть системы уравнений (40). Проведем интегрирование по частям и замену интегралов:

$$\begin{aligned}
 J_{\text{л}} &= \int_{y_{j-1}}^{y_j} \varphi'(x - x_j) W(x) dx = \varphi(y_j - x_j) W(y_j) - \varphi(y_{j-1} - x_j) W(y_{j-1}) - \\
 &\quad - \int_{y_{j-1}}^{x_j} \varphi(x - x_j) W'(x) dx - \int_{x_j}^{y_j} \varphi(x - x_j) W'(x) dx
 \end{aligned}$$

при

$$\begin{aligned}
 \int_{y_{j-1}}^{x_j} \varphi(x - x_j) W'(x) dx &\cong -\frac{1}{2} W'(y_{j-1}) \varphi(y_{j-1} - x_j) (y_{j-1} - x_{j-1}); \\
 \int_{x_j}^{y_j} \varphi(x - x_j) W'(x) dx &\cong \frac{1}{2} W'(y_j) \varphi(y_j - x_j) (y_j - x_j).
 \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 J_{\Pi} &= \varphi(y_j - x_j)W(y_j) - \varphi(y_{j-1} - x_j)W(y_{j-1}) + \frac{1}{2}\varphi(y_{j-1} - x_j) \times \\
 &\times [W(y_{j-1}) - W(x_{j-1})] - \frac{1}{2}\varphi(y_j - x_j)[W(y_j) - W(x_j)] = \frac{1}{2}\varphi(y_j - x_j)W(y_j) - \\
 &- \frac{1}{2}\varphi(y_{j-1} - x_j)W(y_{j-1}) - \frac{1}{2}\varphi(y_{j-1} - x_j)W(x_{j-1}) + \frac{1}{2}\varphi(y_j - x_j)W(x_j) = \\
 &= \varphi(y_j - x_j) \frac{[W(y_j) + W(x_j)]}{2} - \varphi(y_{j-1} - x_j) \frac{[W(y_{j-1}) + W(x_{j-1})]}{2} = \varphi(y_j - x_j) \times \\
 &\times W(x_j) \left[ 1 + \frac{\Delta W(x_j; y_j)}{2W(x_j)} \right] - \varphi(y_{j-1} - x_j) W(x_{j-1}) \left[ 1 + \frac{\Delta W(x_{j-1}; y_{j-1})}{2W(x_{j-1})} \right].
 \end{aligned}$$

При равномерной функции спроса, когда

$$W(y_j) = W(x_j),$$

$$J_{\Pi} = \varphi(y_j - x_j)W(x_j) - \varphi(y_{j-1} - x_j)W(x_{j-1}).$$

При других функциях спроса, ветви которых падают при

$$\frac{\Delta W(x_j; y_j)}{2W(x_j)} \ll 1,$$

$$J_{\Pi} = \varphi(y_j - x_j)W(x_j) - \varphi(y_{j-1} - x_j)W(x_{j-1}).$$

В результате получим упрощенную систему уравнений (39).

Анализ упрощенной системы уравнений (39).

1. При функции спроса равномерного типа (рис.12)

$$W(x) = \frac{1}{B_0 - A_0}, \quad A_0 \leq x \leq B_0, \quad \text{любой функции стоимости и}$$

симметричной ФПА оптимальный типоразмерный ряд подчиняется арифметической прогрессии:

$$x_{j+1} = x_0 + (j+1)d,$$

где  $d$  - разность арифметической прогрессии.

При таких условиях упрощенная система уравнений принимает вид:

$$\varphi\left(\frac{d_j}{2}\right) = \varphi\left(\frac{d_{j+1}}{2}\right).$$

2. Если ФПА имеет вид

$$\varphi(x - x_j) = a \left| \frac{x_{j+1} - x_j}{2} \right|^n = a \left| \frac{d_{j+1}}{2} \right|^n,$$

то упрощенную систему уравнений (39) можно переписать в виде

$$W(x_j) a \left( \frac{d_{j+1}}{2} \right)^n - C'(x_j) W'(x_j) \left( \frac{d_{j+1}}{2} \right)^2 = W(x_{j+1}) a \left( \frac{d_j}{2} \right)^n - C'(x_j) W'(x_j) \left( \frac{d_j}{2} \right)^2, \quad j=1, 2, 3, \dots$$

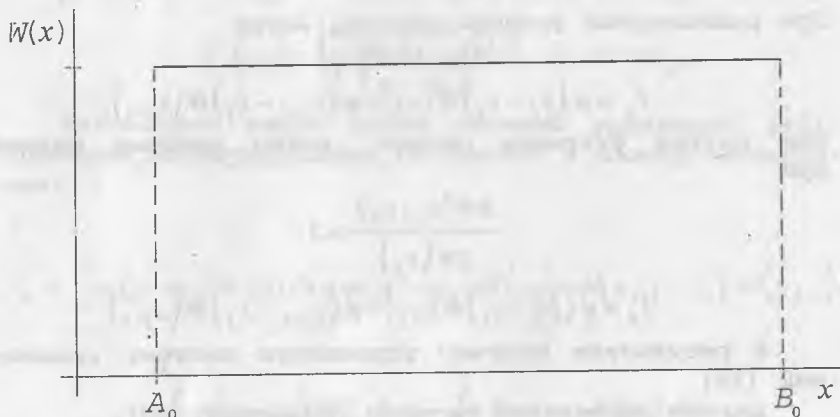


Рис. 12. Функция спроса равномерного типа

При линейной функции стоимости вида  $C(x) = a + bx$  производная функции стоимости  $C'(x) = b$  и уравнение (39) можно переписать в виде

$$W(x_j) a \left( \frac{d_{j+1}}{2} \right)^n \left[ 1 - \frac{bW'(x_j) \left( \frac{d_{j+1}}{2} \right)^{2-n}}{aW(x_j)} \right] = W(x_{j+1}) a \left( \frac{d_j}{2} \right)^n \left[ 1 - \frac{bW'(x_j) \left( \frac{d_j}{2} \right)^{2-n}}{aW(x_{j+1})} \right].$$

$$\text{Пусть } \frac{b W'(x_j) \left(\frac{d_j}{2}\right)^{2-n}}{a W(x_{j+1})} \ll 1, \quad \frac{b W'(x_j) \left(\frac{d_{j+1}}{2}\right)^{2-n}}{a W(x_j)} \ll 1,$$

тогда, пренебрегая вторым слагаемым в скобках, будем иметь

$$\frac{W'(x_j)}{W(x_{j+1})} = \left(\frac{d_j}{d_{j+1}}\right)^n = \eta_0.$$

Отсюда следует, что если отношение значений линейной функции спроса в двух любых точках есть величина постоянная, а функция стоимости - линейная, то при четной функции потерь разность двух членов оптимального типоразмерного ряда подчиняется свойствам геометрической прогрессии, т.е.

$$x_{j+1} - x_j = q(x_j - x_{j-1}),$$

где  $q = \frac{1}{\sqrt[n]{\eta_0}}$  - знаменатель геометрической прогрессии.

3. Рассмотрим функцию спроса в виде полинома второй степени (рис. 13):

$$W(x) = a - bx + cx^2 = D_0 + c \left(x - \frac{b}{2c}\right)^2, \quad A_0 \leq x \leq B_0,$$

$$\text{где } A_0 = \frac{b}{2} - \sqrt{\frac{b^2}{4} - ac}; \quad B_0 = \frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - ac}; \quad D_0 = a - \frac{b^2}{4c}.$$

На рис.13 видно, что в области значений  $x$ , удовлетворяющих условию  $0 \leq \left|x - \frac{b}{2c}\right| \leq 0,3 \sqrt{\frac{D_0}{c}}$ , когда

$D_0 \gg c \left(x - \frac{b}{2c}\right)^2$ , функция спроса может быть аппроксимирована «равномерным законом», который соответствует

условию  $\left(\frac{d_j}{d_{j-1}}\right)^n \approx 1, C_1 < x < C_2$ . Это означает, что

члены типоразмерного ряда в этой области значений подчиняются свойствам арифметической прогрессии со знаменателем  $d_{j+1} = d_j = d_{j-1} \dots d_0$ .

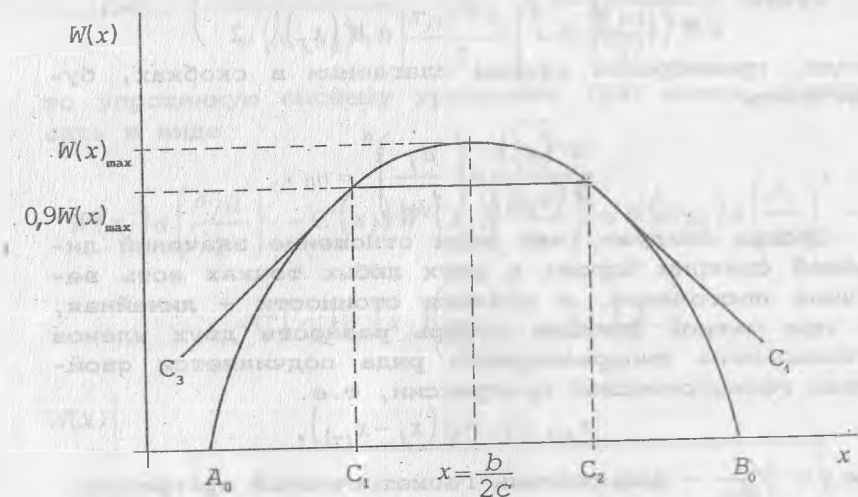


Рис. 13. функция спроса в виде полинома второй степени

В области значений  $x < C_1$  и  $x > C_2$ , где первая производная изменяется незначительно, можно аппроксимировать функцию спроса переменной линейной или кусочно-линейной зависимостью:

$$\frac{W(x_j)}{W(x_{j-1})} = \left( \frac{d_{j+1}}{d_j} \right)^n \approx \eta_0,$$

где  $\eta_0 = W'(x - C_3)(C_1 - C_3) = 2c \left( C_3 - \frac{b}{2c} \right) (C_1 - C_3)$ .

Соответственно знаменатель геометрической прогрессии на аппроксимируемом участке

$$q = \frac{1}{\sqrt[n]{\eta_0}} = \frac{1}{\sqrt{2c(C_3 - b)(C_1 - C_3)}}.$$

Для практических задач вполне достаточно аппроксимация функции спроса, описываемой полиномом второй степени, в виде трапеции (см. рис. 13), определяющей две области решения: в области максимума

члены ряда подчиняются свойствам арифметической прогрессии, а за ее пределами - свойствам геометрической прогрессии.

Такой функцией, аппроксимируемой в виде «трапецеидальной функции», является функция спроса гауссовского типа  $W(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$ , которая при па-

раметре  $\frac{1}{2\sigma^2} \ll 1$  в области максимума  $\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}$  аппрок-

симируется полиномом второго порядка.

### 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТИПОРАЗМЕРНЫХ РЯДОВ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

#### 3.1. Последовательность оптимизации типоразмерных рядов модулей электронных средств

Комплексная методика оптимизации типоразмерных рядов модулей ЭС предусматривает выполнение следующих укрупненных этапов:

техничко-экономический анализ исходных данных (определение главного и соподчиненных параметров, сбор и обработка статистических данных о модулях ЭС с учетом применения их в различных видах РТС и ЭВС, определение исходного ряда главных и соподчиненных параметров, анализ полученных исходных данных);

определение вида целевой функции и ограничений (выбор и обоснование критерия оптимизации, определение ограничений для выбранной целевой функции, определение функций спроса, стоимости и потерь на адаптацию);

оптимизация типоразмерного ряда модулей ЭС (составление и анализ алгоритмов решения задачи оптимизации и способ их реализации, анализ размерности решаемой задачи и возможности ее уменьшения, выбор методов решения целевой функции и составление программ с учетом имеющихся вычислительных средств, анализ требований по точности значений параметров типоразмерного ряда модулей, анализ полученных ре-



зультатов и составление искомого типоразмерного ряда модулей ЭС);

определение технико-экономического эффекта от внедрения оптимальных типоразмерных рядов в практику разработки модулей ЭС (определение показателей технико-экономической эффективности, расчет годовой экономии).

При оптимизации типоразмерных рядов модулей ЭС рекомендуется использовать аналитическую модель задачи оптимизации, т.е. упрощенную систему уравнений (39), и принцип параметрической идентифицируемости моделей, который позволяет определять типоразмеры модулей по их главным параметрам.

Основными исходными данными для построения оптимальных типоразмерных рядов модулей ЭС являются:

потребность (план выпуска) ЭС и модулей ЭС исходного ряда по каждому типоразмеру или функция спроса при плавном изменении параметра, по которому строится ряд;

суммарные приведенные затраты на разработку, подготовку производства, производство и эксплуатацию в зависимости от изменения главного параметра;

потери на адаптацию из-за несоответствия типоразмеров модулей, необходимых потребителю и предлагаемых типоразмерным рядом;

возможные изменения главного параметра в исходном множестве типоразмеров или диапазон изменения главного параметра.

К дополнительным исходным данным при оптимизации типоразмерного ряда модулей ЭС можно отнести:

возможный вид замены одного типоразмера на другой;

возможный вид потерь при замене требуемого типоразмера на предлагаемый из ряда;

неоднозначность спроса.

В качестве ограничений на характер разрабатываемого типоразмерного ряда модулей можно выделить следующие:

фиксированное общее число членов ряда;

частично фиксированные отдельные члены ряда, без ограничений или с ограничениями на общее число членов ряда;

ограничение на общие суммарные приведенные затраты;

ограничение на характер соотношения членов ряда по значению главного параметра;

отсутствие ограничения на общее число членов ряда и значений отдельных типоразмеров ряда при условии получения максимального технико-экономического эффекта.

При проведении технико-экономического анализа исходного ряда модулей ЭС для построения оптимального ряда модулей учитывают отличительный характер рассматриваемых ЭС, т.е. области их возможного применения, особенности их разработки, испытания, постановки на производство, изготовления, эксплуатации и стоимостные характеристики при изменении значений параметров и объемов производства.

Конструктивный уровень ЭС определяется их назначением и функциональными признаками. Анализ функциональных признаков позволяет выделить главный параметр ЭС и его возможный диапазон изменения в зависимости от применения ЭС в различных видах РТС и ЭВС. Электронная система может иметь один или несколько главных параметров.

Для ЭС различного назначения можно выделить следующие главные параметры: диапазон частот, точность, чувствительность, быстродействие, выходная мощность, энергоемкость и т.д.

В свою очередь, к соподчиненным параметрам можно отнести массу, объем, габариты, стоимость и т.д.

Номенклатуру главных параметров выбирают минимальной, чтобы не ограничивать возможности совершенствования конструкции и не стеснять творческую инициативу разработчиков ЭС.

Вместо главного параметра, по которому регламентируется ряд, можно в процессе построения типоразмерного ряда взять другой соподчиненный параметр, который связан с главным параметром функционально или стохастически и который позволяет значительно упростить вид зависимостей, входящих в математическую модель, а также снизить размерность решаемой задачи определения оптимального типоразмерного ряда

модулей ЭС сведением ее к нахождению параметров геометрической или арифметической прогрессии.

Для анализируемых ЭС должна рассматриваться возможность использования ранее разработанных типоразмеров модулей в качестве фиксированных точек при оптимизации типоразмерного ряда или разработки типоразмерного ряда с новыми размерами модулей.

В целях выявления основных исходных данных для построения оптимальных типоразмерных рядов модулей ЭС необходимо определить:

возможность построения независимого или зависимого типоразмерного ряда модулей первого и второго уровней разукрупнения ЭС;

методы получения данных для построения функции спроса (годовой программы выпуска модулей ЭС);

вид и свойства ФПА, при этом оценивают способы и методы ее определения в стоимостном виде и определяют области, где в явном или в неявном виде действуют потери на адаптацию;

вариант построения критерия оптимизации в целях выбора структуры целевой функции, наиболее полно отражающей цель задачи оптимизации типоразмерных рядов модулей, с учетом вида составляющих компонентов и зависимости от времени;

область применения типоразмера модуля в ряду для использования по назначению в различных ЭС;

характер изменения значения оптимизируемого параметра по возрастанию членов ряда в целях определения периодичности изменения параметра по членам ряда и сопоставления этого изменения с геометрической или арифметической прогрессиями, а также сопоставления этого изменения к ряду предпочтительных чисел;

возможную стратегию замены одного типоразмера модуля на другой с большим или меньшим значением параметра и возможную область замены или применения модуля в составе различных ЭС.

Наряду с определением основных исходных данных необходимо провести анализ ограничения числа членов ряда, т.е. установить фиксированное число членов ряда или определить возможность изменения числа членов ряда в определенном диапазоне.

Целями сбора, отработки и анализа исходных данных модулей ЭС являются получение соизмеримых экономических характеристик и проведение технико-экономического обоснования выбора типоразмерного ряда модулей первого и второго уровней разукрупнения по критерию максимального технико-экономического эффекта.

При проведении стоимостного анализа исходных данных необходимо определить для каждого типоразмера модуля: стоимость разработки, изготовления и эксплуатации.

Фактические затраты при разработке, изготовлении и эксплуатации модулей первого и второго уровней разукрупнения, т.е. ячеек и блоков ЭС, зависят от ряда факторов, в том числе:

- научно-технического уровня разработки;
- уровня развития техники элементной базы (комплектующих изделий);
- уровней организации и квалификации разработчиков и изготовителей;
- уровней технической оснащенности и автоматизации труда разработчиков и изготовителей;
- уровней эксплуатационных требований к ЭС;
- качества разработки и изготовления модулей ЭС;
- технологичности конструкций;
- степени заимствования технических решений и др.

### 3.2. Определение оптимальных типоразмерных рядов блоков самолетных электронных средств

При обосновании типоразмерного ряда блоков самолетных ЭС будем исходить из конкретного множества  $Z$  самолетных ЭС определенного назначения. Элементы этого множества  $z_i (z_i \in Z)$  сами являются подмножествами, состоящими из других элементов  $d_{ij}, j = \overline{1, k}; i = \overline{1, N}$ , где  $j$  - номер блока  $i$ -го вида ЭС;  $i$  - номер вида ЭС.

Согласно ГОСТ 17045-71 на габаритные размеры блоков самолетной РЭА и ЭВА, на них установлены ря-

ды объемов  $V$  и ряды значений  $B, L$  и  $H$ . Эти блоки предназначены для установки на стеллажах и рамах.

Прежде чем определять габаритные размеры блоков самолетных ЭС, найдем оптимальный ряд физических объемов блоков:

$$r(V) = \sum_{k=1}^M \delta(V - V_k), \quad (41)$$

где  $\delta(V - V_k)$  - дельта-функция;  $V = BLH$ ;  $V_k$  - объем блока, регламентированный стандартом.

Исходные данные для обоснования оптимального ряда физических объемов блоков самолетных ЭС по критерию максимального технико-экономического эффекта следующие:

$W_{\text{ст}}(V)$  - функция спроса физических объемов блоков на период действия стандарта;

$C(V)$  - функция стоимости блоков;

$\varphi(V - V_k)$  - ФПА.

Функция потерь на адаптацию учитывает потери от внедрения стандарта. Так как определение ФПА встречает значительные трудности ввиду отсутствия явной зависимости между объемом блоков и эффективностью ЭС, то объем ЭС связывают с главным параметром. К такому параметру для самолетных ЭС относится мощность энергопотребления  $P_{ij}$   $j$ -го блока  $i$ -го вида ЭС. При допустимой мощности рассеяния и заданной рабочей температуре можно для блоков самолетных ЭС записать:

$$V_{ij} = k_0(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n) P_{ij}^v, \quad (42)$$

где  $k_0(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)$  - коэффициенты, зависящие от уровня конструирования  $k_1$ , уровня технологии  $k_2$ , применяемых комплектующих изделий  $k_3$ , условий эксплуатации  $k_4$  и т.д.;  $v$  - показатель степени, меньший единицы, определяемый в результате анализа базовых ЭС.

Таким образом, условия ограничения по объему на самолетные ЭС можно записать в виде

$$\min V_{\Sigma(i)} = \min \sum_{j=1}^k k_0 P_{ij}^V = k_0 \sum_{j=1}^k \min P_{ij}^V.$$

При наличии единого комплекса конструкторской документации и комплектующих изделий коэффициент  $k_0$  можно считать постоянным на период действия стандарта на блоки самолетных ЭС. Зависимость (42) между физическими объемами блоков и мощностью энергопотребления позволяет свести задачу определения оптимального ряда физических объемов самолетных ЭС к определению параметрического ряда мощности энергопотребления  $P_k$  блоками ЭС:

$$r(P) = \sum_{k=1}^n \delta(P - P_k). \quad (43)$$

В этом случае для определения точек параметрического ряда необходимо знать функцию спроса мощности энергопотребления на время действия стандарта:

$$W_{\text{ст}}(P) = \sum_{k=1}^n P_k \delta(P - P_k),$$

а также функцию стоимости  $C(P)$  и функцию потерь  $\varphi(P - P_k)$ .

С учетом функции спроса вида (42) и функциональных преобразований случайных величин можно найти функцию спроса объемов блоков ЭС, а также ряд объемов на период действия стандарта, выраженные через мощность энергопотребления:

$$W_{\text{ст}}(P) = \sum_{k=1}^n P_k \delta(V - k_0 P_k^V), \quad (44)$$

$$r(P) = \sum_{k=1}^n \delta(V - k_0 P_k^V). \quad (45)$$

Используя формулу  $V = BLH$  и фиксируя  $H_0$  и  $L_0$ , получаем оптимальный ряд блоков ЭС, отличающийся шириной корпуса:

$$W_{\text{cr}}(B) = \sum_{k=1}^n P_k \delta \left( B H_0 L_0 - k_0 P_k^y \right) = \frac{1}{H_0 L_0} \sum_{k=1}^n P_k \delta \left( B - \frac{k_0 P_k^y}{H_0 L_0} \right), \quad (46)$$

$$r(B) = \sum_{k=1}^n \delta \left( B - \frac{k_0 P_k^y}{H_0 L_0} \right). \quad (47)$$

Таким образом, зная параметрический ряд мощности энергопотребления блоками самолетных ЭС, можно определить оптимальные типоразмерные ряды объемов и габаритных размеров блоков самолетных ЭС, что и является одной из задач обоснования численных значений стандарта на блоки самолетных ЭС.

Чтобы найти функцию потребности  $W(P)$  мощности энергопотребления блоками самолетных ЭС различного назначения, составим частично упорядоченную матрицу (счетное множество), элементами которой являются блоки  $d_{ij}$  подмножества  $Z_i (d_{ij} \in Z_i)$ . По горизонтали (вектор - строка) расположим блоки  $Z_i$ -го изделия и присвоим каждому номер так, чтобы мощность энергопотребления каждого последующего блока была меньше энергопотребления предыдущего  $[P(d_{i(j+1)}) < P(d_{ij})]$ . По вертикали (вектор-столбец) расположим виды ЭС в порядке убывания мощности  $[P(Z_{i+1}) < P(Z_i)]$ .

По теореме Цорна, в частично упорядоченном множестве всякий элемент множества подчинен некоторому максимальному элементу. В рассматриваемой матрице  $\|d_{ij}\| \rightarrow \|P_{ij}\|$ . (где  $\rightarrow$  - знак соответствия) максимальным элементом является  $d_{11} \rightarrow P_{11}$ , т.е.  $P_{11}$  представляет собой элемент максимальной мощности.

Для самолетных ЭС принцип распределения блоков (элементов матрицы) по мощности энергопотребления можно представить в виде

$$P_{ij} = P(i, j) = \frac{P_{11}}{j^{\alpha} i^{\beta}}, \quad (48)$$

где  $i, j$  - номера блока и вида самолетной ЭС;  $\alpha, \beta$  - показатели, характеризующие изменение мощности в зависимости от номера множества.

Матрица  $\|P_{ij}\|$  является случайным полем событий и описывается четырехмерной плотностью вероятности (функцией спроса)  $W(P, j, i, P_{11})$ , которую, используя формулу полной вероятности, можно записать как

$$W(P, j, i, P_{11}) = W(j)W(i)W(P_{11})W(P|i, j, P_{11}), \quad (49)$$

где  $W(P|i, j, P_{11})$  - условная вероятность мощности  $P$ , вычисленная при условии, что произошли события  $j, i, P_{11}$ , т.е. выбраны блок  $j$ , ЭС вида  $i$  и максимальная мощность энергопотребления  $P_{11}$ ;  $W(j), W(i), W(P_{11})$  - плотности вероятности, характеризующие функции спроса на  $j$ -й блок  $i$ -го вида ЭС и мощности энергопотребления  $P_{11}$ .

При разработке стандарта необходимо знать безусловную функцию спроса:

$$W(P) = \iiint W(j)W(i)W(P_{11})W(P|i, j, P_{11}) di dj dP_{11}. \quad (50)$$

Для выполнения операции интегрирования найдем основные вероятностные характеристики частично упорядоченного множества  $W(j), W(i), W(P_{11})$ . На период действия стандарта можно принять, что для самолетных ЭС при КПД = 1% требуется максимальная мощность энергопотребления одним из блоков ЭС  $P_{11} = 100 \text{ кВт}$ , т.е.  $W(P_{11}) = \delta(P - 10^5)$ .

Определение функций спроса  $W(i)$  и  $W(j)$  является трудоемкой задачей, так как требуется выявление не только общего числа тех или иных видов самолетных ЭС ( $Z_i$ ), но и блоков  $j$ -го типа  $d_{ij}$  с учетом межвидовой унификации. При этом функции спроса могут быть найдены, если известны статистические вероятности потребностей:



$$W(i) = \frac{N_i}{N}, \quad (51)$$

$$W(j) = \frac{N_j}{NK}, \quad (52)$$

где  $N_i, N_j$  - число ЭС  $i$ -го вида и блоков  $j$ -го типа, необходимое на период действия стандарта;  $N, K$  - общее число видов ЭС и типов блоков, необходимое на период действия стандарта.

Для самолетных ЭС можно рекомендовать следующие функции потребности при проведении расчетов по формуле (50):

$$W(i) = \frac{i}{\sigma_z^2} \exp - \frac{i^2}{2\sigma_z^2}, \quad i \geq 1, \quad (53)$$

$$W(j) = \frac{1}{b\Gamma(a+1)} \left(\frac{j}{b}\right)^a \exp - \frac{j}{b}, \quad j \geq 1, \quad (54)$$

где  $\sigma_z^2$  - дисперсия оценки требуемого числа видов ЭС;  $\Gamma(a+1)$  - гамма-функция;  $a, b$  - коэффициенты, определяющие характер функции потребности блоков различных видов ЭС с учетом межвидовой унификации ( $a \approx 1, b \geq 1$ ).

Подставив выражения (53), (54) в формулу (50) и проведя интегрирование при  $r(P) = \delta(P - P_k)$ , получим функцию спроса мощности энергопотребления:

$$W(P) = \frac{D_0(N, \sigma_z)}{b\Gamma(a+1)ab^a} \left(\frac{P_1}{P}\right)^{\frac{(\alpha+a+1)}{a}}, \quad (55)$$

где  $D_0(N, \sigma_z) = \frac{1}{\sigma_z^2} \int_1^N \frac{1}{i^3} \exp - \frac{i^2}{2\sigma_z^2} di$  - некоторый коэффициент.

Зная эту функцию, можно определить оптимальный параметрический ряд мощностей энергопотребления - см. уравнение (43). Для этого вычислим отношение первой производной функции спроса к функции спроса:

$$\frac{W'(P)}{W(P)} = \frac{(\alpha + a + 1)}{\alpha P} \quad (56)$$

Производная функции стоимости блоков самолетных ЭС при линейном характере ее зависимости от мощности энергопотребления блоков

$$C'(P) = \frac{d}{dP}(a_0 + b_0 P) = b_0 \quad (57)$$

Тогда упрощенная система уравнений (39), определяющая точки оптимального параметрического ряда мощности энергопотребления блоков самолетных ЭС, будет иметь вид

$$\varphi\left(\frac{P_{k+1} - P_k}{2}\right) - \varphi\left(\frac{P_{k-1} - P_k}{2}\right) = \frac{b_0(\alpha + a + 1)}{\alpha P} (P_{k+1}^2 - P_{k-1}^2), k=1, 2, 3, \dots \quad (58)$$

Систему уравнений (58) можно переписать в виде следующего тождества, которое должно выполняться для систем точек  $n_i$ , являющихся решением системы уравнений:

$$\frac{\varphi\left(\frac{P_2 - P_1}{2}\right) - \varphi\left(\frac{P_0 - P_1}{2}\right)}{\varphi\left(\frac{P_3 - P_2}{2}\right) - \varphi\left(\frac{P_1 - P_2}{2}\right)} = \dots = \frac{\varphi\left(\frac{P_{k+1} - P_k}{2}\right) - \varphi\left(\frac{P_{k-1} - P_k}{2}\right)}{\varphi\left(\frac{P_{k+2} - P_{k+1}}{2}\right) - \varphi\left(\frac{P_k - P_{k+1}}{2}\right)} \quad (59)$$

$$= \frac{P_1(P_3^2 - P_1^2)}{P_2(P_2^2 - P_0^2)} = \frac{P_2(P_4^2 - P_2^2)}{P_3(P_3^2 - P_1^2)} = \dots = \frac{P_k(P_{k+2}^2 - P_k^2)}{P_{k+1}(P_{k+1}^2 - P_{k-1}^2)} = d.$$

Так как в левой части (59) записано приращение функций потерь в двух соседних интервалах параметрического ряда  $n_i$ , отношение приращений функций потерь в соседних интервалах оптимального параметрического ряда есть величина постоянная, равная  $d$ , а сами приращения образуют геометрическую прогрессию со знаменателем  $q$ .

Таким образом, члены оптимального параметрического ряда мощности энергопотребления блоками са-

молетных ЭС должны удовлетворять тождеству (59), т.е. класс систем оптимальных точек должен обладать вполне определенными свойствами. Перепишем зависимость (59) в виде

$$\frac{P_{k-1}(P_{k+1}^2 - P_{k-1}^2)}{P_k(P_k^2 - P_{k-2}^2)} = d. \quad (60)$$

Как показывает анализ известных числовых последовательностей, условию (60) удовлетворяют последовательности чисел, образующих геометрическую ( $d \neq 1$ ) и арифметическую ( $d = 1$ ) прогрессии со знаменателем  $q = d$ , при этом отношение (60) принимает вид

$$\frac{P_{k-1}(P_{k+1}^2 - P_{k-1}^2)}{P_k(P_k^2 - P_{k-2}^2)} = q. \quad (61)$$

Найдем знаменатель геометрической прогрессии  $q$  с учетом следующего ограничения, накладываемого на размерные ряды несущих конструкций блока: размер блока по ширине  $B_k$  должен быть равен сумме других, меньших, размеров для обеспечения размерной взаимозаменяемости. Такому ограничению удовлетворяют числовые значения ряда  $B_k(P_k)$ , которые являются членами геометрической прогрессии со свойствами чисел Фибоначчи:

$$\begin{aligned} B_k &= B_{k-1} + B_{k-2}, \\ B_{2k} &= B_1 + B_3 + B_5 + \dots + B_{2n-1}. \end{aligned} \quad (62)$$

Знаменатель этой геометрической прогрессии  $q = 0,5(1 + \sqrt{5}) \approx 1,61$ , а каждый член параметрического ряда определяется зависимостью

$$P_k = P_0 q^{k-1}. \quad (63)$$

Подставив в формулы (46) и (47) выражение (63), получим функции потребности габаритных размеров несущих конструкций блоков и численные значения типоразмерного ряда несущих конструкций по ширине:

$$W(B) = \frac{1}{H_0 L_0} \sum_{k=1}^n P_k \delta \left[ B - \frac{k_0 q^{(k-1)\nu} P_0^\nu}{H_0 L_0} \right], \quad (64)$$

$$r(B) = \sum_{k=1}^n \delta \left[ B - \frac{k_0 q^{(k-1)\nu} P_0^\nu}{H_0 L_0} \right], \quad (65)$$

где  $H_0$  и  $L_0$  - фиксированные значения высоты и длины несущих конструкций блоков самолетных ЭС;

$n = \frac{1}{\ln q} \ln \left( \frac{P_{11}}{P_0} \right) + 1$  - число членов ряда;  $\nu$  - коэффициент, учитывающий серийность.

Чтобы согласовать оптимальный ряд объемов блоков самолетных ЭС различного назначения с числовыми значениями по ГОСТ 17045-71 на самолетные ЭС, находят искомый ряд числовых значений объемов  $V_{иск}$ . Этот ряд получен сравнением оптимального типоразмерного ряда - см. формулы (45) и (65) - с исходным рядом  $V_{исх}$  по ГОСТ 17045-71. При этом, чтобы сохранить технологическую оснастку для изготовления несущих конструкций самолетных ЭС по ГОСТ 17045-71, из ГОСТ были взяты значения, близкие к точкам оптимального типоразмерного ряда:

$V_{опт}$	1,6	3,2	4,8	7,7	-	12,4	-	20,2	-	32,6	52,8
$V_{исх}$	-	-	4,6	7,4	10,1	12,8	15,6	21,0	26,5	31,9	-
(ГОСТ)											
$V_{иск}$	1,6	3,2	4,6	7,4	-	12,8	-	21,0	-	31,9	52,8

Минимальный объем выбирают из условий сохранения вибропрочности несущей конструкции и размещения необходимого числа комплектующих изделий.

Максимальный объем и массу выбирают таким образом, чтобы блок без особого труда мог переносить один человек.

Выбор типоразмера блоков самолетных ЭС не представляет трудности, так как все применяемые в народном хозяйстве блоки РЭС должны соответствовать ГОСТ 17045-71. При этом необходимо учитывать максимальные размеры комплектующих изделий (ЛБВ, ЛОВ,

трансформаторы, дроссели и др.) и функциональных узлов. Фиксируя длину  $L_0$  и высоту  $H_0$  блоков (например,  $L_0=420$  мм и  $H_0=194$  мм), по формуле (65) рассчитывают ряд типоразмеров несущих конструкций по ширине:

$V, \text{ дм}^3$	1,6	3,2	4,6	7,4	12,8	21,0	31,9	52,0
$B \pm 0,8 \text{ мм}$	19,6	39,35	57,0	90,5	157,0	257,0	390,5	693,0

### 3.3. Оптимизация типоразмерного ряда радиаторов полупроводниковых приборов

Радиаторы предназначены для поддержания температуры коллекторного перехода полупроводникового прибора не выше допустимой в целях обеспечения высокой надежности работы ЭС в различных климатических условиях.

Зависимость температуры коллекторного перехода полупроводникового прибора от основных параметров радиатора выражается формулой

$$t_{п} = t_{с} + P_{пш} \left( \frac{R_p}{\Theta} + R_{п-р} \right), \quad (66)$$

где  $t_{с}$  - температура окружающей среды;  $P_{пш}$  - мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором;  $R_p$  - тепловое сопротивление радиатора;  $\Theta$  - средний коэффициент неравномерности распределения температуры по радиатору;  $R_{п-р}$  - тепловое сопротивление переход - радиатор.

Если мощность рассеяния  $P_{пш}$  увеличивается, например, при применении полупроводникового прибора другого номинала, то, согласно формуле (66), тепловое сопротивление радиатора должно уменьшиться. Тепловое сопротивление определяют по формуле

$$R_p = \frac{1}{\alpha_{пр} F_p},$$

где  $\alpha_{пр}$  - приведенный коэффициент конвективной теплоотдачи радиатора;  $F_p$  - эффективная площадь теплоотдачи радиатора.

Уменьшить  $R_p$  можно, в основном, только увеличением площади  $F_p$ . Увеличения теплоотдачи радиатора, при соблюдении наилучших соотношений между толщинами основания и ребер, шагом ребер, высотой ребра, формой его поперечного сечения и т.д., можно достигнуть только увеличением объема радиатора.

Таким образом, главным параметром радиатора, по которому следует строить типоразмерный ряд, является его объем, определяющий возможность его применения для конкретного полупроводникового прибора при заданных характеристиках окружающей среды.

Предположим, что в составе типоразмерного ряда рассматриваемые конструкции радиаторов обладают наибольшим значением относительной рассеиваемой мощности на единицу объема радиатора  $P_v$  при перегреве на  $1^\circ\text{C}$ . Это определяется выражением

$$P_v = \frac{P_{\text{III}}}{V_p \Delta t_p} = \frac{1}{V_p R_p},$$

где  $V_p$  - объем радиатора;  $\Delta t_p = t_p - t_c$  - перепад температуры на поверхности радиатора.

Следовательно, каждый типоразмер радиатора в виде высоты, ширины и глубины ( $H, B, L$ ) однозначно определяет его объем и относительную рассеиваемую мощность.

Анализ конструкций радиаторов показывает, что соотношения размеров сторон основания радиаторов находятся во взаимосвязи, тесно коррелированы и могут быть описаны регрессионной функцией линейного вида. Зная площадь основания радиатора и его объем, определяют высоту ребер, учитывая при этом, что увеличение высоты ребра при постоянной толщине уменьшает эффективность радиатора.

Потребность в радиаторах для различных электронных изделий будет определяться:

применяемой элементной базой (в той ее части, которая относится к полупроводниковым приборам с повышенной мощностью рассеяния);

числом полупроводниковых приборов, требующихся для установки на радиаторы в определенных условиях окружающей среды.

Указанные данные с учетом повторяемости составных частей ЭС будут определять функцию спроса в виде годовой потребности выпуска радиаторов соответствующих размеров.

Возможность применения радиаторов определяют из анализа конструкторской документации последовательным раскрытием состава по спецификации сборочных единиц (блоков, шкафов и т.п.).

Обработанный статистический материал по применению радиаторов позволяет оценить минимальные и максимальные значения типоразмеров радиаторов, количественную потребность каждого типоразмера в исходном ряду, а также перспективы их развития в связи с применением новых мощных полупроводниковых приборов и область их использования в различных ЭС.

Затраты, связанные с изготовлением радиаторов, как показывает технико-экономический анализ, прямо пропорциональны их объему и массе. С увеличением серийности выпуска стоимость радиаторов пропорционально снижается.

Для определения зависимости стоимости от объема радиатора (при расчете для разных типоразмеров) используют среднестатистическую эмпирическую зависимость следующего вида:

$$C_i = 0,133V_i + 35,33, \quad (67)$$

где  $C_i$  - стоимость  $i$ -го типоразмера в условных рублях;  $V_i$  - объем радиатора,  $\text{см}^3$ .

При серийном изготовлении  $i$ -го типоразмера в количестве  $N_i$  штук стоимость  $C_{N_i}$  находят по формуле

$$C_{N_i} = C_i N_i^{1-\mu} = (0,133V_i + 35,33) N_i^{1-\mu}, \quad (68)$$

где  $\mu_i$  - коэффициент серийности, определяемый на основании опытных данных (для ЭС  $\mu_i = 0,1, \dots, 0,2$ ).

Потери на адаптацию появляются в связи с несопадением нужного потребителю типоразмера радиатора с типоразмером из ряда. При использовании радиатора большего объема следует предусматривать в аппарату-

ре дополнительные объемы для размещения его, что приводит к определенным потерям из-за нерационального использования объемов, отводимых для размещения элементов и составных частей ЭС, и может ухудшить ее тактико-технические характеристики.

Увеличение объема и массы можно оценить в стоимостном выражении, используя соответствующие статистические данные по видам аппаратуры, которые позволяют определить стоимость использования единицы объема, занимаемого аппаратурой.

Проводя оценку на основе парного сравнения по всему исходному ряду, составляют квадратную матрицу адаптационных потерь, где число строк и столбцов соответствует числу членов исходного ряда. В конкретном случае для упрощения расчетов применяют аналитическое выражение, аппроксимирующее указанные потери в виде линейной функции:

$$C_{aij} = K_a (V_i - V_j), \quad (69)$$

где  $C_{aij}$  - стоимостные потери от несоответствия требуемых значений объемов  $V_j$  радиаторов имеющимся в оптимальном типоразмерном ряду  $V_i$  при  $V_i = V_j$ ,  $C_{aij} = 0$ ;

$K_a$  - коэффициент приведения стоимости использования единицы объема (массы). В соответствии с полученными статистическими данными для расчета типоразмерного ряда радиаторов можно рекомендовать значение  $K_a = 0,63$ .

На основе сформулированных зависимостей по затратам на производство - см. уравнение (68), по потерям на адаптацию - см. уравнение (69), а также учитывая затраты на разработку и подготовку производства радиаторов, находят выражение для критерия оптимизации типоразмерного ряда объемов радиаторов (целевую функцию) следующего вида:

$$S(V) = \sum_{i=1}^M [C_{H_i} + C_{N_i} + \sum_{j=1}^n (C_{aij} N_{ij})] \quad (70)$$



при ограничениях 
$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^n N_{ij} = \varphi_{ij}; \quad i = \overline{1, M}; \quad j = \overline{1, n}; \quad M \neq n,$$

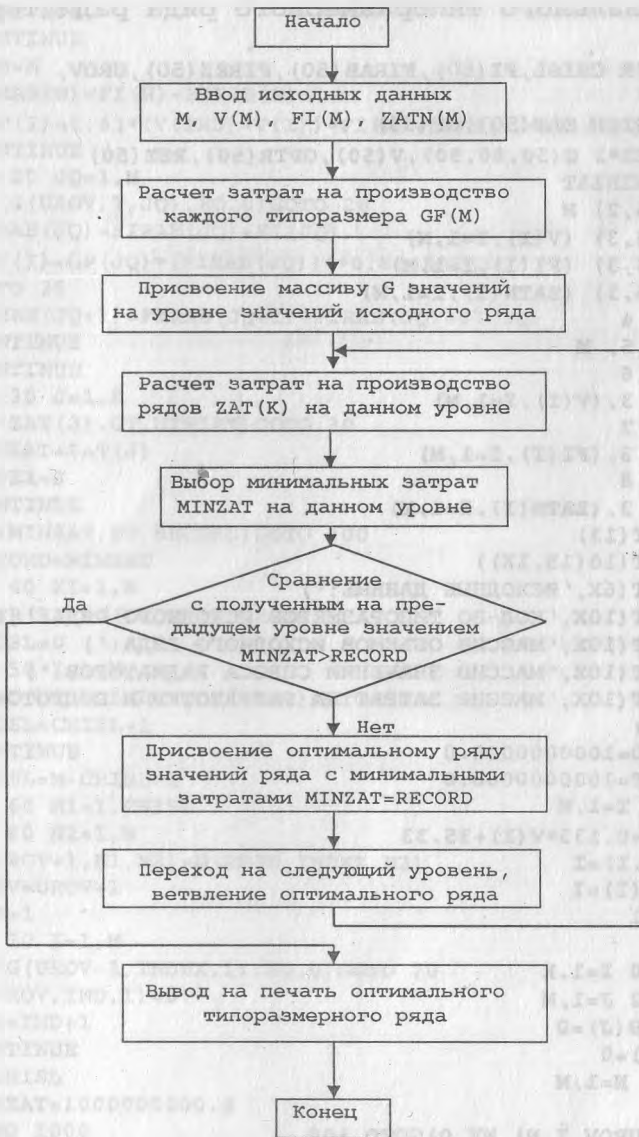
где  $C_{II_i}$  - затраты на разработку и подготовку производства  $i$ -го типоразмера радиатора;  $C_{N_i}$  - затраты на производство  $i$ -го типоразмера радиатора в количестве  $N_i$  шт.;  $C_{a_{ij}}$  - потери на адаптацию при применении  $V_i$ -го объема радиатора, отличающегося от  $V_j$ -го объема, необходимого потребителю;  $N_{ij}$  - число типоразмеров радиаторов  $i$ -го объема для удовлетворения  $j$ -го спроса потребителя;  $\varphi_{ij}$  - потребность  $i$ -го объема радиаторов для удовлетворения  $j$ -го спроса потребителя.

Для решения задачи получения оптимального типоразмерного ряда радиаторов используют метод ветвей и границ и реализованную на его основе программу. Структурная схема алгоритма и текст программы приведены в приложениях 1 и 2. Исходной информацией для этой программы являются следующие данные:  $M$  - число типоразмеров исходного ряда радиаторов;  $V(M)$  - массив объемов исходного ряда радиаторов;  $FI(M)$  - массив значений спроса радиаторов;  $ZATN(M)$  - массив затрат на разработку и подготовку производства радиаторов.

При оптимизации типоразмерного ряда по этой программе находят значение каждого типоразмера оптимального ряда и затраты на его производство. Результаты расчета оптимального ряда радиаторов приведены в приложении 3.

Получив оптимальный ряд объемов радиаторов в виде 43, 85, 113, 305, 500 см<sup>3</sup>, находят габаритные размеры радиаторов  $(H, B, L)$ , используя данные анализа статистических исследований по взаимозависимости габаритных размеров радиаторов от их объемов с помощью регрессионных моделей.

Структурная схема алгоритма расчета оптимального типоразмерного ряда



Текст программы расчета  
оптимального типоразмерного ряда радиаторов

```

INTEGER CHISL,FI(50),FIRAB(50),FIREZ(50),UROV,
ZATN(50)
DIMENSION ZAT(50),GF(50)
INTEGER*2 G(50,50,50),V(50),OPTR(50),REZ(50)
REAL MINZAT
READ(5,2) M
READ(5,3) (V(I),I=1,M)
READ(5,3) (FI(I),I=1,M)
READ(5,3) (ZATN(I),I=1,M)
PRINT 4
PRINT 5, M
PRINT 6
PRINT 3, (V(I),I=1,M)
PRINT 7
PRINT 3, (FI(I),I=1,M)
PRINT 8
PRINT 3, (ZATN(I),I=1,M)
2  FORMAT(13)
3  FORMAT(10(15,1X))
4  FORMAT(6X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')
5  FORMAT(10X,'КОЛ-ВО ТИПОРАЗМЕРОВ ИСХОДНОГО РЯДА:',13)
6  FORMAT(10X,'МАССИВ ОБЪЕМОВ ИСХОДНОГО РЯДА:')
7  FORMAT(10X,'МАССИВ ЗНАЧЕНИЙ СПРОСА РАДИАТОРОВ:')
8  FORMAT(10X,'МАССИВ ЗАТРАТ НА РАЗРАБОТКУ И ПОДГОТОВКУ
    ПР-ВА:')
RECORD=1000000000.0
MINZAT=10000000000.0
DO 10 I=1,M
GF(I)=0.133*V(I)+35.33
G(1,1,I)=I
10  OPTR(I)=I
UROV=1
K=1
1000 DO 20 I=1,K
DO 222 J=1,M
222  FIRAB(J)=0
ZAT(I)=0
DO 21 N=1,M
II=1
IF(G(UROV,I,N).NE.0)GOTO 100
C  FIRAB(N+1)= FIRAB(N+1)+FIRAB(N)+FI(N)
II=0

```

```

DO 22 N1=N,M
IF (G(UROV, I, N1) .EQ. 0) GOTO 22
IND=N1
GOTO 101
22 CONTINUE
100 IND=N
C FIRAB(N) = FI(N) + FIRAB(N)
101 ZAT(I) = 0.63 * (V(IND) - V(I)) * FI(N) + ZATN(N) * II + ZAT(I)
21 CONTINUE
DO 25 JQ=1,M
IF (G(UROV, I, JQ) .EQ. 0) GOTO 26
FIRAB(JQ) = FIRAB(JQ) + FI(JQ)
ZAT(I) = GF(JQ) * (FIRAB(JQ)) ** 0.85 + ZAT(I)
GOTO 25
26 FIRAB(JQ+1) = FIRAB(JQ+1) + FIRAB(JQ) + FI(JQ)
25 CONTINUE
20 CONTINUE
DO 30 J=1,K
IF (ZAT(J) .GT. MINZAT) GOTO 30
MINZAT = ZAT(J)
INDEX = J
30 CONTINUE
IF (MINZAT .GT. RECORD) GOTO 400
RECORD = MINZAT
DO 40 KI=1,M
40 OPTR(KI) = G(UROV, INDEX, KI)
CHISL = 0
DO 50 I=1,M
IF (G(UROV, INDEX, I) .NE. 0) GOTO 50
CHISL = CHISL + 1
50 CONTINUE
CHISL = M - CHISL - 1
DO 60 N1=1, CHISL
DO 60 N2=1, M
60 G(UROV+1, N1, N2) = G(UROV, INDEX, N2)
UROV = UROV + 1
IND = 1
DO 70 I=1, M
IF (G(UROV-1, INDEX, I) .EQ. 0) GOTO 70
G(UROV, IND, I) = 0
IND = IND + 1
70 CONTINUE
K = CHISL
MINZAT = 10000000000.0
GOTO 1000
400 PRINT 333, RECORD

```

```

333 FORMAT (20X, 'РЕЗУЛЬТАТ ПРИ MINZAT = ', F10.1)
IND=0
DO 80 IN=1,M
IF (OPTR (IN) .EQ.0) GOTO 81
IND=IND+1
INDEX=OPTR (IN)
REZ (IND) =V (INDEX)
FIREZ (IND) =FI (IN)
GOTO 80
81 FI (IN+1) =FI (IN+1) +FI (IN)
80 CONTINUE
PRINT 555, (REZ (LLL), LLL=1, IND)
555 FORMAT (9X, 70 ('_') / 9X, ' ОБЪЕМ РАДИАТОРА 1 ',
10 (14, 1X, 'I'))
PRINT 777, (FIREZ (LTT), LTT=1, IND)
777 FORMAT (9X, 70 ('_') / 9X, ' ПОТРЕБНОСТЬ, ШТ I ',
10 (14, 1X, 'I'))
STOP
END

```

Приложение 3

Результаты расчета оптимального ряда радиаторов

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

КОЛИЧЕСТВО ТИПОРАЗМЕРОВ ИСХОДНОГО РЯДА: 27

МАССИВ ОБЪЕМОВ ИСХОДНОГО РЯДА:

20	26	33	37	43	46	54	57	62	72
79	85	96	104	113	154	216	230	259	287
305	324	366	395	415	428	500			

МАССИВ ЗНАЧЕНИЙ СПРОСА РАДИАТОРОВ:

68	240	360	38	145	45	32	15	110	20
8	220	95	10	49	15	15	20	5	14
8	25	65	5	20	25	15			

МАССИВ ЗАТРАТ НА РАЗРАБОТКУ И ПОДГОТОВКУ  
ПРОИЗВОДСТВА:

3000	3300	3500	3680	4000	4500	4700	4900	5200	5430
5700	6000	6330	6830	7200	7550	7900	8300	8700	9000
9300	9550	9900	10200	10500	11000	11700			

РЕЗУЛЬТАТ ПРИ MINZAT = 89524.2

ОБЪЕМ РАДИАТОРА, см <sup>3</sup>	43	85	113	305	500
ПОТРЕБНОСТЬ, шт.	851	450	154	77	155