

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

И. П. Бушминский, Э. Н. Камышная,
Е. М. Парфенов, В. П. Усачов

**КОНСТРУИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ РЭА**

Учебное пособие
по выполнению курсового проекта по курсу
«Конструирование РЭА»

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э. Баумана

И.П. Бушминский, Э.Н. Камышная, Е.М. Парфенов, В.П. Усачов

Утверждено редсоветом МВТУ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ РЭА
Учебное пособие
по выполнению курсового проекта
по курсу "Конструирование РЭА"

Под редакцией Е.М.Парфенова

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом. Рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 ИЭ.12.82 г., методической комиссией факультета П и учебно-методическим управлением.

Рецензенты: д.т.н., проф. МЭИ В.Ф.Взятых; к.т.н., доц. МЭИ Ю.С.Сахаров.



Московское высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

В учебном пособии рассмотрены существующие методы оценки уровня миниатюризации. Особое внимание уделено методу оценки уровня миниатюризации с помощью комплексного показателя уровня миниатюризации, основанного на сравнении исследуемой аппаратуры с базовой на интегральных схемах. Раскрыты методы определения уровня миниатюризации НЧ узлов и блоков, устройств СВЧ, источников питания, электромеханики, антенн, волноводов и др. Приведены примеры расчета.

Учебное пособие может быть полезно при выполнении дипломного проекта.

Оглавление

1. Основные понятия и определения	3
2. Критерии оценки уровня миниатюризации РЭА	6
3. Методика оценки уровня миниатюризации РЭА	11
4. Примеры расчета уровня миниатюризации	21
Литература	29
Приложение	81

Редактор Ю.Н.Хлебинский

Корректор В.Т.Карасева

Заказ 1520 Объем 2,0 п.л. (1,9 уч.-изд.л.) Тираж 200 экз.
Л-100136 от 21.11.83г. Цена 7 коп. План 1983 г., № 54

Типография МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5

I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под миниатюризацией РЭА понимается реализация совокупности технических решений, направленных на эффективное использование объема, массы и потребляемой энергии при обеспечении качественных и эксплуатационных характеристик РЭА, определяющих пригодность ее применения по заданному назначению.

Разрабатываемая РЭА должна быть эффективнее своего аналога, т.е. должны выполняться требования (рис. 1):

- миниатюризации,
- качества функционирования,
- технико-экономической целесообразности.

Таким образом, миниатюризация является обязательным условием создания эффективной РЭА.

Комплексная миниатюризация предполагает одновременную или последовательную миниатюризацию, а в отдельных случаях и микроминиатюризацию блоков и устройств, входящих в РЭА, и предусматривает:

- создание РЭА с минимально возможными массой, габаритами и энергопотреблением;
- выбор рациональной структуры прохождения и обработки сигналов, использование новых физических принципов и технических решений;
- применение унифицированных базовых несущих конструкций, многослойного печатного монтажа, гибких печатных кабелей и плоских жгутов, малогабаритных разъемов, облегченных высокопрочных материалов, обеспечивающих повышенные эксплуатационные характеристики;
- широкое внедрение интегральных микросхем, миниатюрных и малогабаритных изделий электронной техники и элементов автоматики, соответствующих современному уровню микроэлектроники;
- применение микрополосковых микроминиатюрных элементов и устройств СВЧ, полупроводниковых СВЧ активных приборов, ГИС СВЧ.

В табл. I приведены рекомендуемые соотношения количества функциональных узлов на интегральных микросхемах к общему количеству функциональных узлов при разработке различных видов современной РЭА.

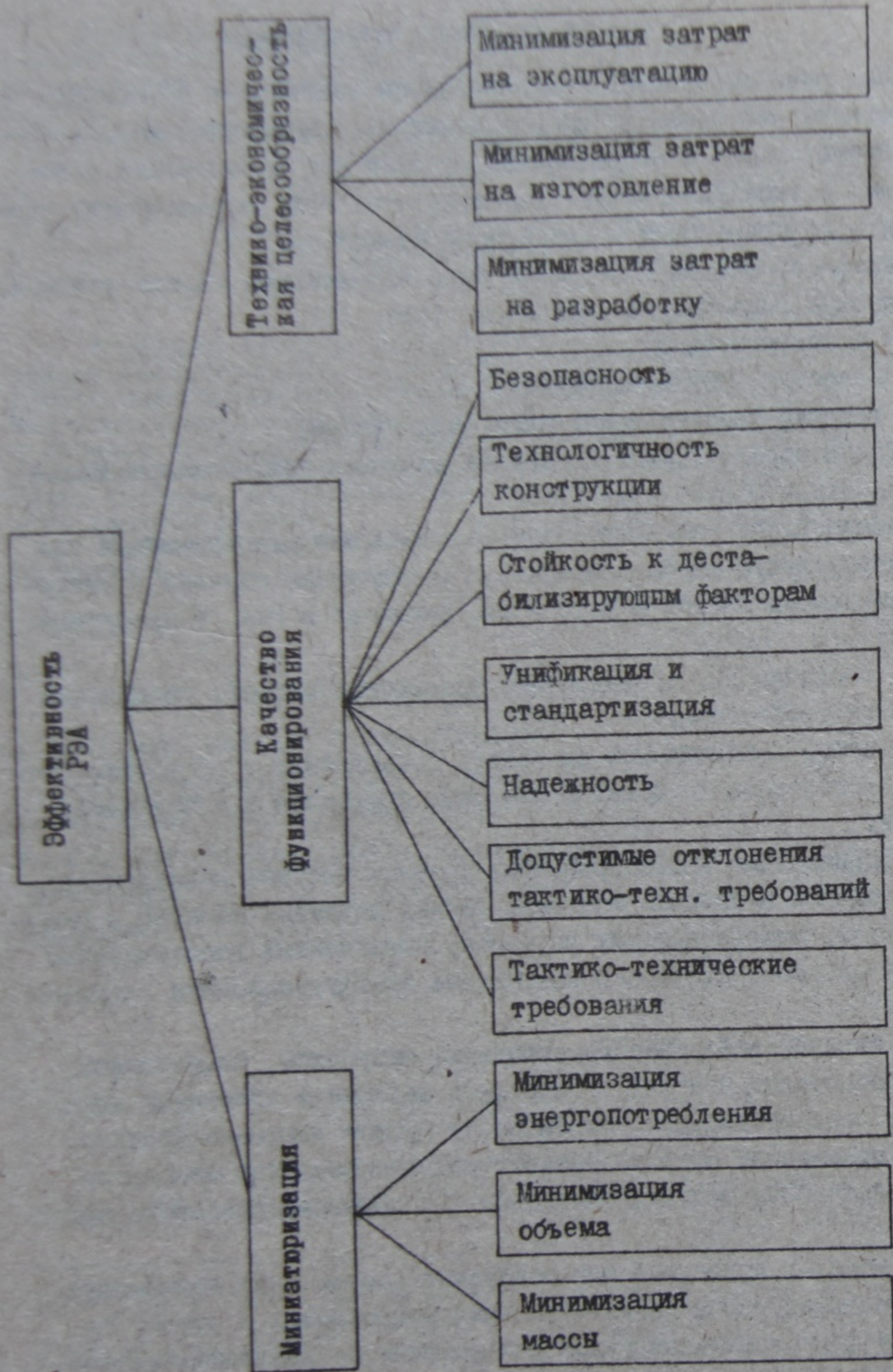


Рис. 1. Схема разработки эффективной РЭА

Минимальное допустимое соотношение количества функциональных узлов на интегральных микросхемах к общему числу функциональных узлов РЭА

Группа	Вид аппаратуры	Соотношение, %
I	Аппаратура и устройства электронной вычислительной техники - наземные, корабельные и бортовые ЭВМ, ЭВМ АСУ и др.	80-90
2	Аппаратура и устройства приема, обработки и кодирования информации - телеметрические системы, аппаратура автоматизации радиосвязи и др.	70-80
3	Аппаратура и устройства навигации, средств связи и РЛС малой мощности - бортовое радионавигационное оборудование, доплеровские измерители, радиостанции КВ и УКВ, бортовая радиоэлектронная аппаратура ракет и др.	60-70
4	Аппаратура и устройства дальней связи, гидроакустических систем и автоматизированных систем управления - информационно-управляющие системы, радиоизмерительные комплексы и системы автоматизированного контроля, системы управления полетом летательных аппаратов и другие, кроме ЭВМ	50-60
5	Аппаратура, устройства и комплексы наземного и бортового радиоэлектронного оборудования большой мощности - стационарные наземные средства радионавигации, наземные, корабельные и бортовые РЛС и др.	40-50

2. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ МИНИАТУРИЗАЦИИ РЭА

Современная радиоэлектронная аппаратура по своему конструктивному исполнению, функциональному назначению и составу представляет собой совокупность сложных разнородных устройств.

Функциональные узлы, блоки и устройства РЭА имеют отличающиеся друг от друга конструктивно-технологические решения в зависимости от применяемой элементной базы и назначения аппаратуры (табл. 1). Поэтому оценку уровня миниатюризации РЭА целесообразно проводить по отдельным устройствам, различая части аппаратуры, которые не могут быть созданы методами микроэлектроники.

Основными блоками современной РЭА, в которых сосредоточена наибольшая часть элементов схемы, являются блоки, содержащие маломощные низкочастотные функциональные узлы. Конструирование таких блоков ведется на основе широкого применения унифицированных функциональных узлов, т.е. функционально-узловым методом, с применением микромодулей, интегральных микросхем и больших интегральных схем. Характеристики различных поколений элементной базы РЭА приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная характеристика различных поколений элементной базы

Параметры	Элементная база			
	Микро-модули	Гибридные пленочные микро-модули	Полупроводниковые интегральные микросхемы	Большие интегральные схемы
Плотность упаковки, эл./см ³	10	10 ²	10 ³	10 ⁴ -10 ⁵
Интенсивность отказов, 1/ч	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
Интенсивность отказов на один элемент, 1/ч	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁰

Деление на интегральные микросхемы и большие интегральные схемы достаточно условное. В последнее время появилась следующая

Градация изделий микроэлектроники по сложности. Степенью интеграции g называют логарифм от числа эквивалентных элементов, образующих интегральную микросхему: $g = \lg n$, где n - число эквивалентных элементов в схеме. Тогда можно представить следующие градации интегральных микросхем:

$n = 1, g = 0$ - дискретные элементы;

$n = 10, g = 1$ - интегральные микросхемы с малой степенью интеграции;

$n = 100, g = 2$ - интегральные микросхемы со средней степенью интеграции;

$n = 1000, g = 3$ - интегральные микросхемы с высокой степенью интеграции.

Кроме микромодулей и микросхем в состав функциональных узлов и блоков РЭА входят миниатюрные дискретные элементы электроники, автоматики и электротехники, классификация которых приведена в приложении.

2.1. Одним из критериев при оценке уровня миниатюризации РЭА должен быть показатель, характеризующий насыщенность аппаратуры изделиями микроэлектроники - микромодулями, микросхемами, БИСами. Данный критерий показывает, насколько удалось привести в соответствие функциональную схему РЭА с современными возможностями микроэлектроники, и в некоторой степени характеризует качество схемотехнической проработки электронного устройства с точки зрения его микроминиатюризации. В качестве такого критерия целесообразно использовать $K_{пр.м}$ - коэффициент применимости модулей, микромодулей, интегральных микросхем и т.п.

2.2. Размещение элементов в радиоэлектронном устройстве, как правило, сопровождается снижением эффективности использования объема РЭА. При объединении микромодулей, микросхем и дискретных элементов в функциональные узлы, а функциональных узлов в блоки, увеличиваются масса и габариты конструкции за счет элементов крепления, разъемов, плат, несущих конструкций, монтажа и т.д. Вместе с тем потери объема зависят и от таких субъективных факторов, как опыт конструктора, тщательность конструктивно-технологической проработки, рациональность компоновки всех деталей и элементов с учетом тепловыделения, возможность вибраций и ударов, влаги и защиты от паразитного влияния схемы. Как правило, в РЭА электронные элементы занимают 3-5% всего объема аппаратуры. Это обуславливает необходимость

введения критерия, оценивающего конструкторскую проработку РЭА в части эффективного использования объема.

Используемый в РЭА показатель плотности компоновки

(эл./см³) слабо характеризует качество конструкторской проработки радиоэлектронных устройств различного конструктивного уровня и определяется в основном степенью интеграции применяемых покупных элементов.

Наиболее целесообразно использовать два показателя плотности компоновки:

- отношение количества элементов M_0 к полезному объему

$$V_n : \quad K_{п.к1} = \frac{|M_0|}{V_n} ; \quad (1)$$

- отношение количества элементов к общему объему устройства V_y :

$$K_{п.к2} = \frac{|M_0|}{V_y} . \quad (2)$$

Отношение (1) к (2) показывает, во сколько раз ухудшается показатель плотности компоновки из-за несущих конструкций, плат, разъемов, деталей крепления, зазоров и т.п., т.е.

$$K_{з.о} = \frac{K_{п.к2}}{K_{п.к1}} = \frac{V_n}{V_y} , \quad (3)$$

где $K_{з.о}$ - коэффициент заполнения объема устройства, характеризующий меру дезинтеграции радиоэлектронного устройства.

Для схем СВЧ невозможно вычислить показатель плотности компоновки, так как элементы СВЧ узлов являются распределенными. Физический смысл имеет коэффициент заполнения объема устройства $K_{з.о}$, который может быть рассчитан по формуле (3), где V_n - объем, занимаемый волноводными или микрополосковыми узлами. Для микросхем СВЧ, выполненных на подложке размерами $h \times a \times b$,

$$K_{з.о} = \frac{S_n}{a \cdot b} , \quad (4)$$

где S_n - площадь проводникового покрытия.

2.3. Для характеристик качества конструкторско-технологической проработки радиоэлектронного устройства необходимо использовать коэффициенты заполнения объема его составных ча-

стей. Одна и та же аппаратура, построенная на элементной базе разного поколения (дискретные элементы, микромодули, микросхемы, БИСы), будет иметь различные технико-экономические характеристики. С ростом сложности элементной базы все более усиливается влияние ее качества на эффективность РЭА. Поэтому с целью объективной оценки уровня миниатюризации радиоэлектронного устройства необходимо ввести критерий, характеризующий качество элементной базы, используемый при его разработке - F_k . Обобщенный показатель качества элементной базы должен определяться с учетом значимости частных показателей. Таким образом, для оценки уровня миниатюризации радиоэлектронных устройств будем использовать как отдельные критерии, представленные в табл. 3, так и обобщенный показатель

$$M = f(K_{прм}, K_{30}, F_k). \quad (5)$$

Показатель M характеризует уровень миниатюризации электронных устройств с точки зрения схемотехники, конструкции и качества использованной элементной базы.

Таблица 3

Показатели уровня миниатюризации РЭА

Наименование показателя	Обозначение	Определение
1	2	3

 Единичные показатели уровня миниатюризации

 функциональных узлов

Показатель применимости миниатюризованных изделий, %

$K_{пр.м}$

Отношение суммарного количества элементов и компонентов в микроселектронных изделиях и дискретных миниатюрных ЭРЭ к общему количеству элементов в функциональном устройстве. Показатель применимости характеризует качество схемотехнической проработки

1	2	3
Показатель плотности компоновки элементов, I/cm^3	$K_{ПК}$	<p>устройства. Он показывает, какая часть схемы устройства выполнена на микроэлектронных изделиях</p> <p>Отношение общего количества элементов в устройстве к объему устройства. Показатель плотности компоновки характеризует качество конструкторской проработки устройства</p>
Показатель использования массы устройства, $эд/г$	K_M	<p>Отношение общего количества элементов в устройстве к массе устройства. Показатель использования массы характеризует качество конструкторской проработки устройства в части материалоемкости</p>
Показатель плотности записи информации ЗУ, $бит/cm^3$	ρ	Количество бит в $I cm^3$ объема ЗУ

Комплексные показатели уровня миниатюризации

Комплексный показатель уровня миниатюризации функционального устройства

Средневзвешенное геометрическое значение единичных показателей уровня миниатюризации функционального устройства с учетом их весомости в устройстве. Является результирующим показателем. Характеризует степень использования в устройстве новой элементной базы и уровень конструкторской проработки

1	2	3
Комплексный показатель уровня миниатюризации комплекса РЭА	K_k	Средневзвешенное арифметическое значение комплексных показателей уровня миниатюризации функциональных устройств РЭА с учетом их весомости в комплексе РЭА. Является результирующим показателем. Характеризует степень использования во всех устройствах комплекса РЭА новой элементной базы и уровень их конструкторской проработки

Показатели эффективности комплексной миниатюризации

Показатель технической эффективности комплексной миниатюризации	Q	Средневзвешенное арифметическое значение единичных показателей качества РЭА. Является результирующим показателем. Характеризует изменение тактико-технических характеристик РЭА за счет ее комплексной миниатюризации
Показатель экономической эффективности комплексной миниатюризации	E	Отношение полученного экономического эффекта за счет комплексной миниатюризации к затратам на создание и эксплуатацию РЭА. Характеризует экономическую эффективность комплексной миниатюризации оцениваемой РЭА

3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ МИНИАТЮРИЗАЦИИ РЭА

3.1. Качество схемотехнической проработки РЭА, как было отмечено выше, характеризуется коэффициентом $K_{пр.м}$ применимости модулей, микромодулей, микросхем и т.д. Обозначим множе-

ство всех эквивалентных элементов, входящих в рассматриваемое устройство, через M_0 , а количество этих элементов — через $|M_0|$.

Множество M_0 можно разбить на:

подмножество θ эквивалентных элементов, входящих в модуль;

подмножество A дискретных элементов.

Количество элементов в этих подмножествах обозначим соответственно через $|\theta|$ и $|A|$.

Количество эквивалентных элементов в модулях одного поколения определяется по формуле

$$|\theta_k| = \sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki}, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$;

n_{ki} — число эквивалентных элементов в модуле i -го типа k -го поколения;

N_{ki} — число модулей i -го типа k -го поколения.

Для модулей всех поколений, примененных в радиоэлектронном устройстве, количество эквивалентных элементов

$$|\theta| = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki}. \quad (7)$$

Общее число эквивалентных элементов в радиоэлектронном устройстве

$$|M_0| = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki} + |A|. \quad (8)$$

Коэффициент применяемости элементов k -го поколения

$$K_{пр.м.к} = \frac{|\theta_k|}{|\theta| + |A|} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki}}{\sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^m n_{ki} N_{ki} + |A|}. \quad (9)$$

Значение $K_{пр.м.к}$ лежит в пределах от нуля до единицы. Она показывает, какая часть от общего количества элементов выполнена в виде эквивалентных элементов модулей k -го поколения.

3.2. Качество конструкторской проработки РЭА оценивается коэффициентом заполнения объема устройства

$$K_{з.о} = \frac{V_n}{V_y}, \quad (10)$$

Для более детального анализа уровня конструкторской проработки радиоэлектронного устройства конструкцию РЭА разделили на иерархические уровни (рис. 2), где уровень РЭА определяется исходя из конструктивной и функциональной законченности устройства:

0-й уровень - детали, микросхемы, БИСы и дискретные электрорадиоэлементы, ЭРЭ;

1-й уровень - микромодули, микросборки и т.п.;

2-й уровень - функциональные узлы, ячейки, кассеты, платы и т.п.;

3-й уровень - блоки, РТУ и т.п.;

4-й уровень - РЭА.

Коэффициент заполнения объема на 0- и 1-м уровнях

$$K_{3.0 0,1} = 1.$$

Коэффициент заполнения объема на 2-м уровне

$$K_{3.0 2} = \frac{\sum_{q=1}^p m_q V_q}{V_2}, \quad (II)$$

где m_q - число корпусов модулей q -го типа в устройстве 2-го уровня;

V_q - объем корпуса модуля q -го типа;

V_2 - объем устройства 2-го уровня;

$q = 1, 2, \dots, p$ - номер типа корпуса.

Коэффициент заполнения объема на уровне d :

$$K_{3.0 d} = \frac{t \cdot V_{d-1}}{V_d}, \quad (I2)$$

где t - число устройств уровня $d-1$;

V_{d-1} - объем устройства уровня $d-1$;

V_d - объем устройства уровня d .

Если устройства различны по объему, то

$$K_{3.0 d} = \frac{\sum_{l=1}^t V_{d-1}}{V_d}, \quad (I3)$$

где $l = 1, 2, \dots, t$ - номер устройства уровня $d-1$.

Коэффициент заполнения объема всего радиоэлектронного устройства

$$K_{3.0} = \frac{\sum_{q=1}^p m_q^* V_q}{V_y}, \quad (I4)$$

Поколения РЭА

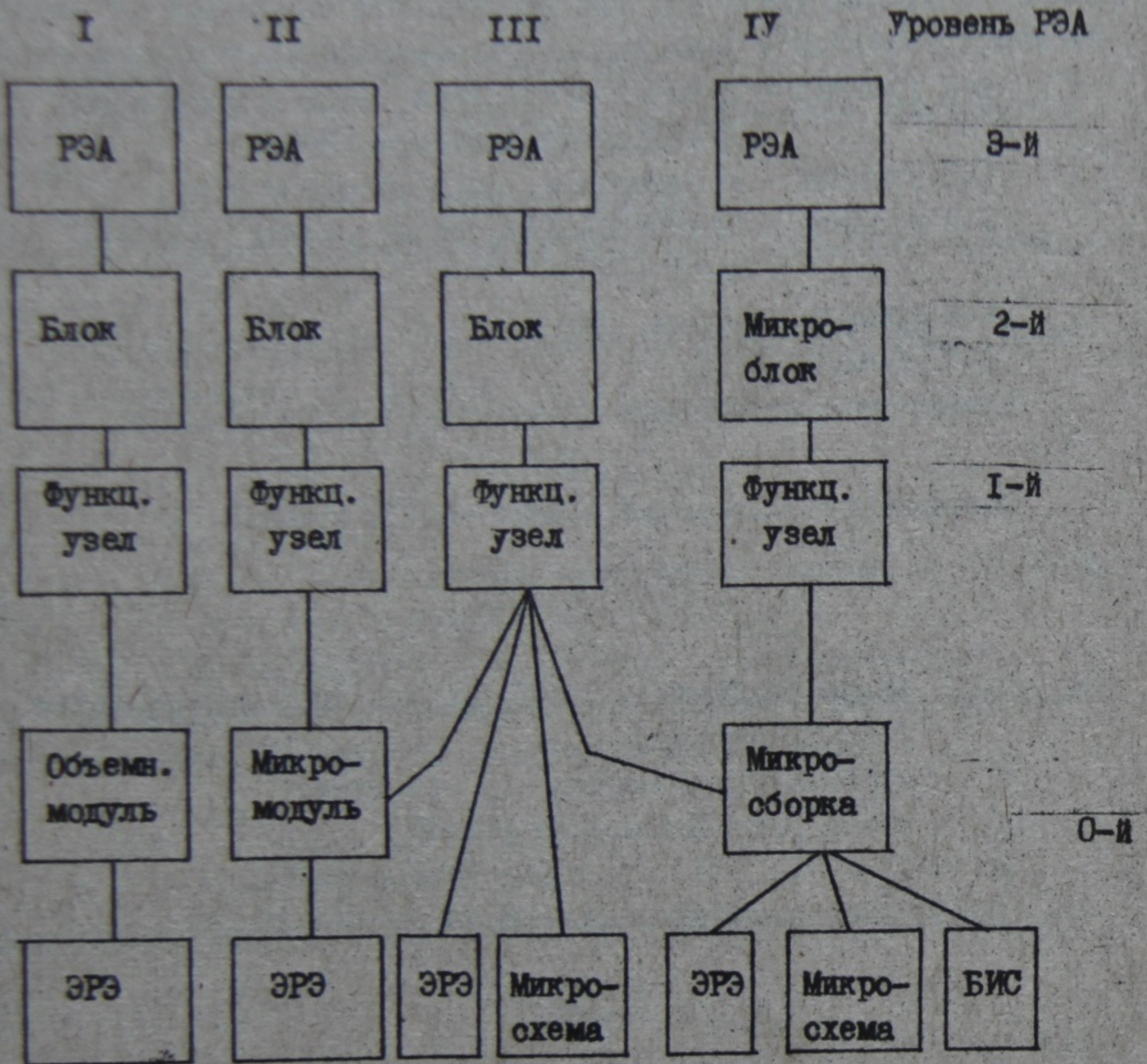


Рис. 2. Конструктивные уровни РЭА

где m_q^* - общее число корпусов модулей q -го типа в устройстве. Значение $K_{3,0}$ лежит в пределах от нуля до единицы. Она показывает, какую часть от общего объема радиоэлектронного устройства составляет объем элементов, необходимых для преобразования сигнала.

Коэффициент заполнения объема радиоэлектронного устройства уменьшается с увеличением уровня конструктивной иерархии, поскольку значение $K_{3,0d} < 1$.

3.3. Численные значения коэффициентов $K_{пр.м}$ и $K_{3,0}$ для различных поколений РЭА могут быть близкими, хотя качество аппаратуры при этом существенно отличается.

В целях объективной оценки уровня конструктивно-технологической проработки образца РЭА вводится коэффициент F_K качества для модулей элементной базы каждого поколения. За высший уровень, по отношению к которому ведется сравнение, принимается количественный показатель качества поколения БИС, которому присваивается единица.

Коэффициент качества модуля K -го поколения определяется из выражения

$$F_K = \sum_{j=1}^r \frac{\bar{y}_{j,БИС}}{y_{j,K}} \cdot \varphi_{j,K}, \quad (15)$$

где $\varphi_{j,K}$ - значимость j -го показателя качества модулей;
 $j = 1, 2, \dots, r$ - номер показателя качества.

Все показатели приводятся к одному эквивалентному элементу:

$$\bar{y}_{j,K} = \frac{y_{j,K}}{n_K}, \quad (16)$$

где $y_{j,K}$ - значение j -го показателя качества модуля K -го поколения;

n_K - число эквивалентных элементов в функциональном узле K -го поколения.

Все сравниваемые показатели должны иметь одинаковую направленность влияния на качество изделия. Например, с уменьшением значений выбранных показателей качество повышается. Показатели, не удовлетворяющие этому условию, пересчитываются по формуле

$$\bar{y}'_{j,K} = \frac{1}{\bar{y}_{j,K}}. \quad (17)$$

В качестве критериев сравнения модулей выбираются следующие показатели:

масса G_k ; y_{1k} ;
 объем V_k ; y_{2k} ;
 энергопотребление W_k ; y_{3k} ;
 надежность $H_k = |\cos \lambda_k|$; $y_{4k} = \frac{1}{y_{4k}}$;
 стоимость C_k ; y_{5k} .

Эти показатели определяют эффективность микроминиатюризации модулей элементной базы различных поколений. Оценка показателей надежности в логарифмическом масштабе обусловлена необходимостью приведения в соответствие величин, отличающихся друг от друга на один-два порядка для различных поколений модулей.

Коэффициенты значимости y_j можно определить исходя из следующих соображений. Из ряда сравниваемых комплексов интегральных микросхем и дискретных элементов выберем схемы, имеющие значения интенсивностей отказов λ_{min} и λ_{max} . Тогда такую же вероятность безотказной работы, как у более надежной интегральной микросхемы $P_1(t)$, можно получить, используя эквивалентный модуль, выполненный на менее надежных схемах путем их n -кратного резервирования.

Значение кратности резервирования определяется для случая "горячего" резервирования без восстановления. При этом под отказом резервированной системы понимается такое ее состояние, когда выходят из строя все n схем. Для таких условий вероятность отказа узла

$$Q_{зкв}(t) = \prod_{l=1}^n q_{l2}(t), \quad (18)$$

где q_{l2} - вероятность отказа l -й интегральной микросхемы из менее надежного комплекса интегральных микросхем.

В общем случае можно записать

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad (19)$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы устройства.

Принимая, что все интегральные микросхемы одного комплекса, изготавливаемые по одной технологии, имеют фактически равную надежность, можно записать

$$P_{зкв}(t) = 1 - [1 - P_2(t)]^n, \quad (20)$$

где $P_{экр}(t)$ - вероятность безотказной работы эквивалентного модуля на менее надежных схемах с учетом резервирования;

$$P_2(t) = 1 - q_2(t). \quad (21)$$

Кратность резервирования n определяется из условия

$$P_1(t) = P_{экр}(t). \quad (22)$$

Раскроем выражение (22):

$$P_1(t) = 1 - [1 - P_2(t)]^n. \quad (23)$$

Преобразуя и логарифмируя, получаем

$$n = \left| \frac{\ln[1 - P_1(t)]}{\ln[1 - P_2(t)]} \right|. \quad (24)$$

С достаточной степенью точности (при $\lambda t \ll 0,1$) можно записать

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{min} t} \approx 1 - \lambda_{min} t, \quad (25)$$

$$P_2(t) = e^{-\lambda_{max} t} \approx 1 - \lambda_{max} t.$$

В этом случае выражение (24) упрощается и кратность резервирования можно определить по формуле

$$n = \left| \frac{\ln(\lambda_{min} t)}{\ln(\lambda_{max} t)} \right|. \quad (26)$$

В результате n -кратного резервирования масса эквивалентного модуля увеличится и может быть определена из выражения

$$G_{экр} = n \sigma_1 g_2, \quad (27)$$

где σ_1 - коэффициент конструкции, учитывающий изменение массы за счет элементов конструкции и межсоединений;

g_2 - масса одной резервируемой интегральной микросхемы. Соответственно объем эквивалентного модуля

$$V_{экр} = n \sigma_2 V_2, \quad (28)$$

где σ_2 - коэффициент конструкции, учитывающий изменение объема блока за счет элементов конструкции и межсоединений;

V_2 - объем одной резервируемой интегральной микросхемы.
Мощность, потребляемая эквивалентным модулем, запишется в следующем виде:

$$W_{экр} = n \beta_3 \cdot \omega_2, \quad (29)$$

где β_3 - коэффициент изменения мощности;
 ω_2 - мощность, потребляемая одной резервируемой схемой.
Стоимость эквивалентного модуля

$$C_{экр} = n \beta_4 \cdot C_2, \quad (30)$$

где β_4 - коэффициент стоимости, учитывающий изменение стоимости за счет платы и других резервируемых элементов;
 C_2 - стоимость одной резервируемой интегральной микросхемы с учетом монтажа.

Таким образом, получение заданной надежности для модулей элементной базы, отличных от БИСов, достигается путем ухудшения показателей массы, энергопотребления, стоимости, объема. Откуда следует, что значимость показателя безотказности интегральных микросхем выше значимости других показателей во столько раз, во сколько они ухудшаются при резервировании по сравнению с одной интегральной микросхемой. Таким образом, выражения, определяющие соотношения между коэффициентами значимости эксплуатационных критериев интегральных микросхем, можно записать в виде

$$\varphi_G = \frac{\varphi_H}{n \beta_1}, \quad \varphi_V = \frac{\varphi_H}{n \cdot \beta_2}, \quad (31)$$

$$\varphi_W = \frac{\varphi_H}{n \cdot \beta_3}, \quad \varphi_C = \frac{\varphi_H}{n \cdot \beta_4},$$

где φ_H - значимость критерия надежности (безотказности) интегральных микросхем, ЭРЭ.

Индексы при других коэффициентах соответствуют эксплуатационным критериям сравнения.

В общем виде выражения для коэффициентов φ_i запишутся так:

$$\varphi_{GK} = \frac{\varphi_{HK}}{\left| \frac{e^{-\lambda_{бис} \cdot t}}{e^{-\lambda_K \cdot t}} \right| \cdot \beta_i}, \quad (32)$$

$$\varphi_{VK} = \frac{\varphi_{HK}}{\left| \frac{\ln(\bar{\lambda}_{BHC} \cdot t)}{\ln(\bar{\lambda}_K \cdot t)} \right| G_2}, \quad (33)$$

$$\varphi_{WK} = \frac{\varphi_{HK}}{\left| \frac{\ln(\bar{\lambda}_{BHC} \cdot t)}{\ln(\bar{\lambda}_K \cdot t)} \right| G_3}, \quad (34)$$

$$\varphi_{CK} = \frac{\varphi_{HK}}{\left| \frac{\ln(\bar{\lambda}_{BHC} \cdot t)}{\ln(\bar{\lambda}_K \cdot t)} \right| G_4}, \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^r \varphi_{jk} = 1, \quad \varphi_{jk} \geq 0.$$

Решая систему уравнений (32)–(36) по формуле (15), можно определить коэффициенты качества F_K для модулей элементной базы всех поколений.

Если существует необходимость оценивать уровень миниатюризации РЭА одним показателем, то можно ввести обобщенный показатель уровня миниатюризации:

$$\mu = f(K_{пр.м.к}, K_{з.од}, F_K), \quad (37)$$

где $K = 1, 2, \dots, L$.

Для упрощенных оценок его можно выразить так:

$$\mu = K_{з.од} \cdot \sum_{k=1}^L K_{пр.м.к} \cdot F_k, \quad (38)$$

где $K_{пр.м.к}$ и F_k – соответственно коэффициенты применяемости и качества модулей элементной базы K -го поколения;

$K = 1, 2, \dots, L$ – номер поколения модулей, примененных в радиоэлектронном устройстве.

Значение μ лежит в пределах от нуля до единицы.

При отсутствии в устройстве модулей какого-либо поколения соответствующий коэффициент $K_{пр.м.к}$ берется равным нулю.

В принципе возможен и другой вид обобщенного показателя уровня миниатюризации μ , например, в аддитивной форме с учетом значимости отдельных критериев. Миниатюризация электронных блоков, состоящих из маломощных функциональных узлов, имеет большое значение, однако она не может полностью решить пробле-

му комплексной миниатюризации РЭА. Значительную часть многих видов аппаратуры составляют блоки мощных передатчиков, источников питания, мощные СВЧ блоки, механизмы и т.п., которые в настоящее время не поддаются миниатюризации с помощью изделий микроэлектроники.

Уровень миниатюризации этих устройств целесообразно оценивать коэффициентами снижения объема μ_V и снижения массы μ_G , которые определяются по формулам:

$$\mu_V = \frac{V_a - V_M}{V_a}, \quad (39)$$

где V_M — объем устройства, подвергнутого миниатюризации;
 V_a — объем аналога в обычном исполнении;

$$\mu_G = \frac{G_a - G_M}{G_a}, \quad (40)$$

где G_M — масса устройства, подвергнутого миниатюризации;
 G_a — масса аналога в обычном исполнении.

В качестве аналога выбирается ближайший прототип того же функционального назначения в обычном, не миниатюрном исполнении. Значения этих коэффициентов лежат в пределах от нуля до единицы.

В принципе коэффициенты, подобные μ_V и μ_G , можно получить и для других показателей неэлектронных устройств:

$$\mu_c = \frac{C_a - C_M}{C_a}, \quad (41)$$

$$\mu_w = \frac{W_a - W_M}{W_a}, \quad (42)$$

где μ_c — коэффициент снижения стоимости;
 μ_w — коэффициент снижения мощности энергопотребления;
 C_M — стоимость устройства, подвергнутого миниатюризации;
 C_a — стоимость аналога в обычном исполнении;
 W_M — мощность, потребляемая миниатюрным устройством;
 W_a — мощность, потребляемая аналогом.

Тогда обобщенный коэффициент уровня миниатюризации неэлектронных устройств можно записать в аддитивной форме:

$$\mu_{\Sigma} = \sum_{j=1}^r \frac{y_{ja} - y_{jm}}{y_{ja}} \cdot z_j, \quad (43)$$

где y_{jm} — значение j -го показателя устройства, подвергнутого миниатюризации;

y_{ja} — значение j -го показателя аналога;

z_j — значимость j -го показателя (определяется, например, методом экспертной оценки), причем

$$\sum_{j=1}^r z_j = 1, \quad z_j \geq 0; \quad (44)$$

здесь $j = 1, 2, \dots, r$ — номер сравниваемого показателя.

Значение μ_{Σ} лежит в пределах от нуля до единицы.

Оценка уровня миниатюризации СВЧ узлов имеет ряд особенностей. Качество схемотехнической проработки СВЧ части РЭА характеризуется коэффициентом $K'_{пр.м}$ применимости микросхем СВЧ, который выражает соотношение между объемом РЭА, занятым интегральными схемами, и общим объемом СВЧ блока:

$$K'_{пр.м} = \frac{V_{мс}}{V_0}. \quad (45)$$

Коэффициент качества СВЧ узла, выполненного на микросхемах, определяется по формуле, аналогичной (15):

$$F_{мс} = \sum_{j=1}^r \frac{\bar{y}_{j,гис свч}}{\bar{y}_{j,мс}} \cdot y_{j,мс}. \quad (46)$$

За высший уровень при этом принимается количественный показатель качества СВЧ узла, выполненного полностью на ГИС СВЧ. Дальнейший расчет $F_{мс}$ проводится так же, как и для низкочастотной части РЭА (см. приведенную выше методику).

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА УРОВНЯ МИНИАТЮРИЗАЦИИ

Пример I. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4 и 5.

Поколение модулей на транзисторах

Тип элементов	Биполярные транзисторы	Полевые транзисторы	Импульсные диоды	Стабилитроны	Конденсаторы КМ-6	Конденсаторы К53-1А	Резисторы МТЕ-0,125	Потенциометры СП-1А
Количество, шт.	123	30	49	21	101	85	527	10

Таблица 5

Поколение интегральных твердотельных микросхем

Тип микросхем	1ЛИ091	133ЛАЗ	1ЛП331	140УД1	1УТ221
Количество, шт.	10	6	3	3	4

Объем блока $V_y = 12,72 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$; мощность, потребляемая блоком, $W_y = 8,66 \text{ Вт}$.

1. Коэффициент применяемости блока РЭА рассчитывается по формуле (9), для поколения интегральных твердотельных микросхем

$$K_{\text{пр.ми}} = \frac{|\theta_m|}{|\theta_m| + |A|},$$

где $|\theta_m|$ - количество эквивалентных элементов микросхем,

$$|\theta_m| = \sum_{i=1}^m N_i \cdot n_i,$$

здесь N_i - количество эквивалентных элементов в микросхеме i -го типа, находится подсчетом элементов по электрическим принципиальным схемам микросхем, приведенным в [6, 7] или ТУ на микросхемы;

n_i - количество микросхем i -го типа;

$|A|$ - количество дискретных элементов, (из табл. 4);

$$\begin{aligned} N_{1\text{ЛИ}091} &= 19 \text{ шт.}, & N_{133\text{ЛАЗ}} &= 44 \text{ шт.}, & N_{1\text{ЛП}331} &= 14 \text{ шт.}, \\ N_{140\text{УД}1} &= 24 \text{ шт.}, & N_{1\text{УТ}221} &= 14 \text{ шт.}; & & \end{aligned}$$

$$K_{пр.м1} = \frac{19 \cdot 10 + 44 \cdot 6 + 14 \cdot 3 + 24 \cdot 3 + 14 \cdot 4}{(19 \cdot 10 + 44 \cdot 5 + 14 \cdot 3 + 24 \cdot 3 + 14 \cdot 4) + (123 + 30 + 49 + 21 + 101 + 85 + 527 + 10)} = \frac{624}{624 + 946} = 0,4.$$

Для поколения модулей на транзисторах

$$K_{пр.м} = \frac{|\theta_T|}{|\theta_M| + |A|},$$

где $|\theta_T|$ - количество элементов для поколения модулей на транзисторах, для данного блока $|\theta_T| = |A|$ и

$$K_{пр.м} = \frac{946}{624 + 946} = 0,6.$$

2. Коэффициент заполнения блока РЭА рассчитывается по формулам (14), где объем модулей, элементов q -го типа определяется из [3, 6, 7] или ТУ на элементы. Можно также использовать $K_{з.о}$, полученный при тепловом расчете РЭА:

$$K_{з.о} = 0,7.$$

3. Коэффициенты качества поколений ЭРЭу примененных в блоке, рассчитываются по формуле (15). Определим показатели качества по формулам (17) и (16). Для поколения твердотельных интегральных микросхем

$$\bar{y}_{1M} = \frac{\sum_{i=1}^m G_{iM} \cdot \pi_{iM}}{|\theta_M|},$$

где G_{iM} - масса микросхемы i -го типа, - см. [3, 6, 7] или ТУ;

π_{iM} - количество микросхем i -го типа.

В нашем случае

$$G_{\text{ШИЮ91}} = G_{\text{I33ЛАЗ}} = G_{\text{ШАЗЗ1}} = 0,322 \text{ г.}$$

$$G_{\text{I40УД}} = G_{\text{IУТ221}} = 1,52 \text{ г.}$$

Тогда

$$\bar{y}_{1M} = \frac{0,32(10+6+3) + 1,52(3+4)}{624} = \frac{16,58}{624} = 0,027 \text{ г/эл.}$$

Следующий показатель:

$$\bar{y}_{2M} = \frac{\sum_{i=1}^m V_{iM} \cdot \pi_{iM}}{|\theta_M|},$$

где V_{iM} - объем микросхемы i -го типа;

$V_{\text{ЛЛИ09I}} = V_{\text{I33ЛАЗ}} = V_{\text{ЛЛПЗЗI}} = 140,1 \text{ мм}^3$, корпус 40I.14-I по ГОСТ 17467-72;

$V_{\text{I40УДИ}} = V_{\text{IУТ22I}} = 272,05 \text{ мм}^3$, корпус 30I.12-I по ГОСТ 17467-72;

$$\bar{y}_{2M} = \frac{140,1(10+6+3) + 272,05(3+4)}{624} = 7,32 \text{ мм}^3/\text{эл.}$$

Следующий показатель:

$$\bar{y}_{3M} = \frac{\sum_{i=1}^m W_{iM} \cdot n_{iM}}{|\theta_M|},$$

где W_{iM} - мощность, потребляемая микросхемой i -го типа, определяемая по [6, 7] и ТУ либо из расчета принципиальных схем микросхем [9];

$$W_{\text{ЛЛИ09I}} = 150 \text{ мВт}, \quad W_{\text{I33ЛАЗ}} = 50 \text{ мВт}, \quad W_{\text{ЛЛПЗЗI}} = 36 \text{ мВт},$$

$$W_{\text{I40УДИ}} = 192 \text{ мВт}, \quad W_{\text{IУТ22I}} = 37,8 \text{ мВт};$$

$$\bar{y}_{3M} = \frac{2512,5}{624} = 4 \text{ мВт/эл.}$$

Четвертый показатель:

$$\bar{y}'_{4M} = \frac{1}{\bar{y}_{4M}} = \frac{1}{|\ln \lambda_M|} = \frac{1}{10 \cdot \ln 10} = 0,054,$$

где значения интенсивностей отказов берутся из табл. 2.

Последний показатель:

$$\bar{y}_{5M} = \frac{\sum_{i=1}^m C_{iM} \cdot n_{iM}}{|\theta_M|},$$

где C_{iM} - стоимость микросхемы i -го типа, определяемая согласно [8];

$$\bar{y}_{5M} = 7,03 \text{ коп./эл.}$$

Для поколения модулей на транзисторах

$$\bar{y}_{IT} = \frac{\sum_{i=1}^m G_{iT} \cdot n_{iT}}{|\theta_T|},$$

где G_{iT} - масса элемента i -го типа [3, 6, 7], ТУ на элементы,

n_{iT} - количество элементов i -го типа.

Масса: транзистора биполярного или полевого не более	0,5 г,
диода импульсного	" 0,5 г,
стабилитрона	" 1,0 г,
конденсатора КМ-6	" 1,0 г,

конденсатора К53-1А
резистора МТБ-0,125
потенциометра СП5-1

не более 6,0 г,
" 0,2 г,
" 3,0 г;

$$\bar{y}_{1T} = \frac{869}{946} = 0,9 \text{ г/эл.};$$

$$\bar{y}_{2T} = \frac{\sum_{i=1}^K V_{iT} \cdot n_{iT}}{|\Theta_T|},$$

где V_{iT} - объем элемента i -го типа [3, 6, 7], Γ на элементы.

Учитывая, что в блоке РЭА нет модулей на лампах, можно записать

$$\sum_{i=1}^K V_{iT} \cdot n_{iT} = V_y \cdot K_{3.0} - V_M,$$

где V_y - объем блока РЭА;

V_M - объем микросхем ($V_M = \sum_{i=1}^m V_{iM} \cdot n_{iM}$).

Тогда

$$\bar{y}_{2T} = \frac{8,75 \cdot 10^5}{946} = 9,24 \cdot 10^2 \text{ мм}^3/\text{эл.};$$

$$\bar{y}_{3T} = \frac{\sum_{i=1}^K W_{iT}}{|\Theta_T|},$$

где W_{iT} - мощность потребления i -м элементом поколения модулей на транзисторах.

Для данного блока, так как нет модулей на лампах,

$$\sum_{i=1}^K W_{iT} = W_y - W_M,$$

где W_M - мощность, потребляемая микросхемами ($W_M = \sum_{i=1}^m W_{iM} \cdot n_{iM}$);

$$\bar{y}_{3T} = \frac{8,66 - 1,89}{946} = \frac{6,74}{946} = 7,15 \text{ мВт/эл.};$$

$$\bar{y}'_{4T} = \frac{I}{\bar{y}'_{4T}} = \frac{I}{|\ln \lambda_T|} = \frac{I}{|\ln(5 \cdot 10^{-8})|} = 0,081;$$

λ_T определяется по табл. 2;

$$\bar{y}_{5T} = \frac{\sum_{i=1}^K C_{iT} \cdot n_{iT}}{|\Theta_T|},$$

где C_T - стоимость элемента i -го типа [8].

Стоимость: транзистор биполярный и полевой
диод импульсный и стабилитрон

1-3 руб.

10-20 коп.

конденсатор КМ-6
 конденсатор К53-1А
 резистор МТЕ
 потенциометр С5-1А

57 коп.,
 2 руб. 15 коп.
 0,02 коп.,
 1 руб.;

$$\bar{y}_{ST} = \frac{490}{946} = 51,7 \text{ коп./эл.}$$

Для поколения БИС на биполярных транзисторах с числом элементов $10^2 - 10^3$ показатели качества равны:

$$\begin{aligned} \bar{y}_{1БИС} &= 0,005 \text{ г/эл.}, & \bar{y}_{2БИС} &= 0,1 \text{ мм}^3/\text{эл.}, \\ \bar{y}_{3БИС} &= 0,5 \text{ мВт/эл.}, & \bar{y}'_{4БИС} &= 0,034. \\ \bar{y}_{5БИС} &= 6,2 \text{ коп/эл.}, \end{aligned}$$

Определим значимость показателей качества для поколения твердотельных интегральных микросхем:

- кратность резервирования

$$\gamma_M = \left| \frac{\ln(\bar{\lambda}_{БИС} \cdot t)}{\ln(\bar{\lambda}_M \cdot t)} \right|$$

здесь $\bar{\lambda}_{БИС}$ и $\bar{\lambda}_M$ определяются из табл. 2;

$t = 10$ ч - время работы блока;

$$\gamma_M = \left| \frac{\ln(10 \cdot 10^{-8})}{\ln(10 \cdot 10^{-7})} \right| = \frac{7 \ln 10}{6 \ln 10} = 1,16.$$

Для данной конструкции блока РЭА значения коэффициентов β_{iM} равны:

$$\beta_{1M} = 1,08, \quad \beta_{2M} = 1,05, \quad \beta_{3M} = 1,0, \quad \beta_{4M} = 1,01.$$

Из формул (32)-(36) определим значимости показателей качества:

$$\begin{aligned} \varphi_{NM} &= \frac{1}{1 + \frac{1}{\gamma_M} \left(\frac{1}{\beta_{1M}} + \frac{1}{\beta_{2M}} + \frac{1}{\beta_{3M}} + \frac{1}{\beta_{4M}} \right)} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{1}{1,16} \left(\frac{1}{1,08} + \frac{1}{1,05} + \frac{1}{1,0} + \frac{1}{1,01} \right)} = 0,23; \end{aligned}$$

$$\varphi_{VM} = \frac{\varphi_{NM}}{\gamma_M \cdot \beta_{1M}} = \frac{0,23}{1,08 \cdot 1,16} = 0,18;$$

$$\varphi_{VM} = \frac{\varphi_{NM}}{\gamma_M \cdot \beta_{2M}} = \frac{0,23}{1,16 \cdot 1,05} = 0,19;$$

$$\varphi_{WM} = \frac{\varphi_{HM}}{n_M \cdot \beta_{3M}} = \frac{0,23}{1,16 \cdot 1,0} = 0,2;$$

$$\varphi_{CM} = \frac{\varphi_{HM}}{n_M \cdot \beta_{4M}} = \frac{0,23}{1,16 \cdot 1,01} = 0,2.$$

Кратность резервирования для модулей на транзисторах:

$$n_T = \frac{|\ln(\bar{\lambda}_{БИС} \cdot t)|}{|\ln(\bar{\lambda}_T \cdot t)|} = \frac{2 \ln 10}{|\ln(5 \cdot 10^{-5} \cdot 10)|} = 2,12.$$

Для поколения модулей на транзисторах β_{iT} равны:

$$\beta_{1T} = 1,12, \quad \beta_{2T} = 1,1, \quad \beta_{3T} = 1,0, \quad \beta_{4T} = 1,05.$$

Значимости показателей качества:

$$\varphi_{HT} = \frac{1}{14 \cdot \frac{1}{n_T} \left(\frac{1}{\beta_{1T}} + \frac{1}{\beta_{2T}} + \frac{1}{\beta_{3T}} + \frac{1}{\beta_{4T}} \right)} = \frac{1}{2,76} = 0,36,$$

$$\varphi_{BT} = \frac{\varphi_{HT}}{n_T \cdot \beta_{1T}} = \frac{0,36}{2,12 \cdot 1,12} = 0,15,$$

$$\varphi_{VT} = \frac{\varphi_{HT}}{n_T \cdot \beta_{2T}} = \frac{0,36}{2,12 \cdot 1,1} = 0,16,$$

$$\varphi_{WT} = \frac{\varphi_{HT}}{n_T \cdot \beta_{3T}} = \frac{0,36}{2,12 \cdot 1,0} = 0,17,$$

$$\varphi_{CT} = \frac{\varphi_{HT}}{n_T \cdot \beta_{4T}} = \frac{0,36}{2,12 \cdot 1,05} = 0,16.$$

Определим коэффициенты качества по формуле (15) для поколения твердотельных микросхем:

$$F_{KM} = \frac{0,005}{0,027} \cdot 0,18 + \frac{0,1}{7,32} \cdot 0,19 + \frac{0,5}{4} \cdot 0,2 + \frac{0,034}{0,054} \cdot 0,23 + \frac{6,2}{7,03} \cdot 0,2 = 0,4.$$

Для поколения модулей на транзисторах:

$$F_{KT} = \frac{0,005}{0,9} \cdot 0,15 + \frac{0,1}{924} \cdot 0,16 + \frac{0,5}{7,15} \cdot 0,17 + \frac{0,034}{0,081} \cdot 0,36 + \frac{6,2}{51,7} \cdot 0,16 = 0,18.$$

Комплексный коэффициент уровня миниатюризации блока РЭА определяется по формуле (38):

$$\mu = 0,7 (0,4 \cdot 0,4 + 0,6 \cdot 0,18) = 0,188.$$

Результаты расчета сведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета показателей уровня миниатюризации

Уровни РЭА	$K_{прм}$	K_{30}	F_K	μ
Поколение модулей на транзисторах	0,6	-	0,18	-
Поколение твердотельных интегральных микросхем	0,4	-	0,4	-
Блок РЭА	-	0,7	-	0,188

Пример 2. Исходные данные для расчета уровня миниатюризации СВЧ усилителя приведены в табл. 7.

Исходные данные

Таблица 7

Тип элементов	СВЧ транзисторы	Развязывающие элементы	Делитель	Сумматор	Разъемы
Занимаемый полезный объем, мм ³	100	400	250	250	4000
Занимаемый общий объем, мм ³	3600	7200	3600	3600	4000

Общий объем узла 32800 мм³, потребляемая мощность 1,5 Вт, число межсоединений 10.

I. Коэффициент применяемости микросхем

$$K'_{пр.м} = \frac{V_{МСО}}{V_0} = \frac{3600 + 7200 + 3600 + 3600}{32800} = 0,52.$$

2. Коэффициент заполнения объема

$$K_{30} = \frac{V_{\text{мсп}}}{V_0} = \frac{100 + 400 + 250 + 250}{32800} = 0,03.$$

3. Коэффициенты качества:

- для усилителя, выполненного на ГИС СВЧ:

$$\begin{aligned} \gamma_{1\text{ГИС}} &= 3600 \text{ г}, & \gamma_{2\text{ГИС}} &= 7200 \text{ мм}^3, \\ \gamma_{3\text{ГИС}} &= 1 \text{ Вт}, & \lambda_{\text{ГИС}} &= 10^{-8} \text{ 1/ч}. \\ \gamma_{4\text{ГИС}} &= \frac{1}{|\ln \lambda_{\text{ГИС}}|} = 0,072; \end{aligned}$$

- для рассчитываемого усилителя на микросхемах:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 23000 \text{ г}, & \gamma_2 &= 32800 \text{ мм}^3, \\ \gamma_3 &= 1,5 \text{ Вт}, & \lambda_{\text{МС}} &= 10^{-5} \text{ 1/ч}, \\ \gamma_4 &= 0,087. \end{aligned}$$

Кратность резервирования, при времени $t = 100$ ч

$$n = \frac{|\ln(10^{-6} \cdot 100)|}{|\ln(10^{-5} \cdot 100)|} = 1,33.$$

Чтобы определить значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и β_4 , необходима конструкторская проработка. В первом приближении их можно считать равными единице. Тогда

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{нм}} &= 0,25, \\ \varphi_{1\text{м}} = \varphi_{2\text{м}} = \varphi_{3\text{м}} = \varphi_{4\text{м}} &= \frac{\varphi_{\text{нм}}}{n} = \frac{0,25}{1,33} = 0,19. \end{aligned}$$

Определяем коэффициент качества:

$$F_{\text{МС}} = 0,19 \left(\frac{3600}{23000} + \frac{7200}{32800} + \frac{1}{1,5} + 0,75 \right) + 0,25 = 0,56.$$

Комплексный коэффициент уровня миниатюризации

$$M = 0,46 \cdot 0,03 \cdot 0,56 = 0,008.$$

Литература

1. Пестряков В.Б. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Сов.радио, 1969.
2. Верходятницкий П.Д. Эффективность миниатюризации судовой радиоэлектронной аппаратуры. - Л.: Судостроение, 1975.
3. Варламов Р.К. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Сов. радио, 1975.

4. Конструирование микроволновой аппаратуры. Под ред. Б.Ф. Высоцкого. - М.: Сов. радио, 1977.
5. Основы проектирования микроволновой аппаратуры. Под ред. Б.Ф. Высоцкого. - М.: Сов. радио, 1977.
6. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под ред. Н.Н. Горюнова. - М.: Энергия, 1982.
7. Справочник по интегральным микросхемам. Под ред. Б.В. Тарабрина. - М.: Энергия, 1982.
8. Прейскуранты оптовых цен на ЭРЭ.
9. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах. Под ред. С.Я. Шаца. - М.: Сов. радио, 1976.
10. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. - М.: Сов. радио, 1976.

Классификация ЗРЭ в зависимости от габаритных размеров

Наименование ЗРЭ	Форма	Параметры	Габаритные размеры, мм, не более		
			Малогоабаритные ЗРЭ	Миниатурные ЗРЭ	Микроминиатюрные ЗРЭ
I Трансформаторы вакуумные бескорпусные	2 Прямоугольная	3 Длина Ширина Высота	4	5	6
			-	15,0	10,0
			-	10,0	6,0
Трансформаторы вакуумные корпусные	2 Прямоугольная	3 Длина Ширина Высота	4	5	6
			-	15,0	10,0
			-	10,0	6,0
Трансформаторы вакуумные корпусные	2 Квадратная	3 Сторона квадрата Высота	4	5	6
			-	15,0	10,0
			-	5,0	3,5
Трансформаторы вакуумные корпусные	2 Цилиндрическая	3 Диаметр Высота	4	5	6
			-	15,0	10,0
			-	5,0	3,5
Трансформаторы вакуумные корпусные	2 Прямоугольная	3 Длина Ширина Высота	4	5	6
			35,0	20,0	12,5
			25,0	15,0	10,0
Трансформаторы вакуумные корпусные	2 Квадратная	3 Сторона квадрата Высота	4	5	6
			35,0	20,0	12,5
			20,0	12,5	6,0
Трансформаторы вакуумные корпусные	2 Цилиндрическая	3 Диаметр Высота	4	5	6
			35,0	20,0	12,5
			20,0	12,5	6,0

1	2	3	4	5	6
Трансформаторы линейные интегральные (блоки трансформаторов, трансформаторные микросборки)	Прямоугольная	Длина	60,0	25,0	15,0
		Ширина	40,0	20,0	22,5
		Высота	15,0	15,0	5,0
Трансформаторы питания и дроссели фильтров	Квадратная	Сторона квадрата	60,0	25,0	15,0
		Высота	15,0	7,5	5,0
	Прямоугольная	Длина	50,0	30,0	-
		Ширина	90,0	40,0	-
		Высота	100,0	50,0	-
	Цилиндрическая	Диаметр	50,0	30,0	20,0
		Высота	50,0	30,0	20,0
	Плоская	Длина	140,0	120,0	100,0
		Ширина	60,0	32,5	18,0
		Высота	30,0	18,0	7,5
Трансформаторы высоковольтные	Прямоугольная	Длина	-	88,0	42,0
		Ширина	-	35,0	25,0
		Высота	-	10,0	7,0
Трансформаторы высоковольтные	Прямоугольная	Длина	-	45,0	30,0
		Ширина	-	35,0	25,0
		Высота	-	8,0	7,0

I	2	3	4	5	6
Переключатели поворотные	Цилиндрическая	Диаметр	40,0	25,0	15,0
Кнопки	Прямоугольная	Длина	25,0	22,0	18,0
		Ширина	25,0	12,5	10,0
		Высота	60,0	40,0	30,0
Переключатели кнопочные	Цилиндрическая	Диаметр	-	15,0	10,0
		Высота	-	50,0	25,0
		Длина	35,5	30,0	25,0
Переключатели перекидные (тумблеры)	Прямоугольная	Ширина	30,0	25,0	20,0
		Высота	75,0	65,0	55,0
		Длина	30,0	25,0	15,0
Микропереключатели	Прямоугольная	Ширина	25,0	15,0	8,0
		Высота	55,0(35,5)	45,0(25,0)	35,5(15,0)
		Диаметр	-	15,0	10,0
Микропереключатели	Цилиндрическая	Высота	-	45,0(25,0)	35,5(20,0)
		Длина	40,0	25,0	15,0
		Ширина	15,0	12,5	8,0
Микропереключатели	Цилиндрическая	Высота	30,0	20,0	12,5
		Диаметр	-	20,0	12,0
		Высота	-	25,0	15,0

1	2	3	4	5	6
Резисторы переменные пронобочные	Цилиндрическая	Диаметр	25,0	10,0	5,0
		Высота	40,0	7,5	5,0