

УДК
621.396
К-192

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(Технический университет)

Ю.В. КАНДЫРИН

**МНОВОВАРИАНТНОЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ
РЕЗИСТИВНОЙ СБОРКИ**

Методическое пособие

к типовому расчету

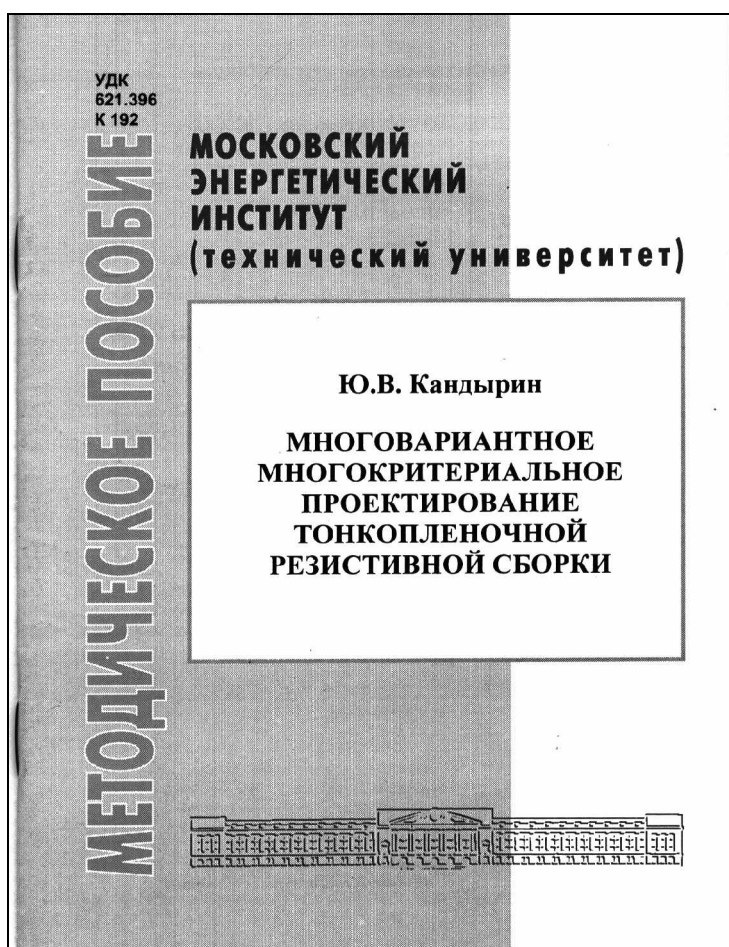
по курсу

“Конструирование и технология производства РЭС”

для студентов, обучающихся по направлению «Радиотехника»

по разделу

«Автоматизированный многокритериальный выбор вариантов в САПР РЭС»



УДК
621.396
К-192

Утверждено учебным управлением МЭИ
Рецензент: канд. техн. наук, профессор А.К. Нарышкин
Подготовлено на кафедре радиоприемных устройств

Кандырин Ю.В.

Многовариантное многокритериальное проектирование тонкопленочной резистивной сборки. Методическое пособие. –М.: Издательство МЭИ, 2005. 16 с.

Приводятся методические указания к выполнению типового расчета по многовариантному многокритериальному проектированию тонкопленочной резистивной сборки с помощью автоматизированной программной системы «Микросборка-R», которая представляет собой интерактивную программную систему, реализующую процедуры формирования технического задания, выбора материалов резисторов и технологий, многовариантного расчета топологии резисторов, сравнительной оценки полученных вариантов сформированных групп тонкопленочных резисторов по принятым критериям. В процессе типового расчета студенты также выполняют комплект чертежей в соответствии с ЕСКД.

Предназначено для студентов ИРЭ (РТФ), обучающихся по направлению «Радиотехника» и выполняющих типовой расчет по дисциплине «Конструирование и технология производства РЭС».

Учебное издание

Кандырин Юрий Владимирович

**МНОГОВАРИАНТНОЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ СБОРКИ**

Методическое пособие
к типовому расчету
по курсу

«Конструирование и технология производства РЭС»
для студентов, обучающихся по направлению «Радиотехника»

Редактор издательства Е.Н. Касьянова

ЛР № 020528 от 05.06.97

Темплан МЭИ 2004(І), метод.

Подписано в печать 19.01.05

Гарнитура Таймс

Физ. печ. лист. 1,0

Тираж 100 экз.

Формат 60×84/16

Печать офсетная

Изд. № 147

Заказ

Издательство МЭИ, 111020, Москва, Красноказарменная ул. 14

Отпечатано в типографии ЦНИИ «Электроника»,
117415, Москва, просп. Вернадского д. 39

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Осуществить многовариантное многокритериальное проектирование тонкопленочной резистивной сборки, предназначенной для работы в заданных условиях для выбранного фрагмента принципиальной схемы РЭС.

В процессе работы над типовым расчётом студент получает навыки:

- § формирования технического задания на разработку резистивной тонкопленочной ИМС;
- § рационального выбора материалов для проектируемой группы резисторов;
- § выбора технологии получения масок резисторов с учетом погрешностей изготовления;
- § применения методики расчета группы резисторов, напыляемых в едином технологическом цикле с использованием общего материала испарителя;
- § сравнительного анализа сформированных вариантов резистивных сборок;
- § многокритериального выбора рационального варианта группы резисторов из сформированного множества альтернативных проектов, полученных с помощью программы «Микросборка-R»;
- § выбора подложки ИМС с учетом принятого стандарта и общей топологии;
- § эвристического размещения элементов на подложке и формирования топологии рисунка межсоединений;
- § оформления электрической принципиальной схемы, сборочных и детализировочных чертежей по ЕСКД.

В пояснительной записке должны быть приведены также сведения о принятых в проекте технологиях изготовления масок и особенностях технологий напыления резистивных материалов и проводников, методах подгонки номиналов резисторов, методах защиты ИМС от агрессивных внешних воздействий.

Важной целью выполнения типового расчёта является получение навыков самостоятельной работы с литературой, справочниками, ЕСКД и автоматизированной системой проектирования тонкопленочных резисторов «Микросборка -R».

2. СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ТИПОВОГО РАСЧЁТА

2.1. Формирование технического задания

Выполнение типового расчёта начинается с получения у преподавателя индивидуального задания в виде принципиальной схемы РЭС и описания её назначения. Исходя из назначения схемы и условий её работы, студентом, прежде всего, формируется развернутое техническое задание (ТЗ) на её разработку, включающее:

- вербальное описание назначения РЭС, предполагаемых условий работы, особенностей её производства (индивидуальное, серийное, массовое и т.д.), эксплуатации и утилизации;
- формализованную часть ТЗ, состоящую из: *условий, ограничений* и принятых во внимание *показателей качества* для РЭС в целом. Эта часть ТЗ необходима при формировании критериев сравнения вариантов при выборе предпочтительного варианта тонкопленочной сборки резисторов из множества альтернатив, формируемых в процессе проектирования.

Пояснительная записка в части ТЗ кроме перечисленного должна содержать:

- полную принципиальную схему электронного устройства, (выполненную **в виде рисунка или ксерокопии**), на которой маркером выделены резисторы, группируемые в микросборку, а также требуемые межсоединения.
- чертеж принципиальной электрической схемы, проектируемой пассивной резистивной сборки, выполненный по ЕСКД на миллиметровой бумаге в карандаше (формат А4).

2.2. Выделение фрагмента группы резисторов, объединяемых в тонкопленочную интегральную ИМС

В заданной принципиальной схеме электронного устройства необходимо выделить фрагмент(ы), состоящие из 8 –12 резисторов, формируемой пассивной тонкопленочной резистивной сборки. Для этого на чертеже принципиальной схемы резисторы, включаемые в микросборку, должны быть отмечены цветным маркером, а в записке перенумерованы, начиная с первого номера. Например, $R_1 = R_{17}$, $R_2 = R_{21}$ и т. д. Это необходимо для правильной работы программной системы «Микросборка-R».

Резисторы, включаемые в микросборку, должны удовлетворять следующим условиям.

- Û Максимальное значение сопротивления резистора из фрагмента не должно превышать 100 кОм. Минимальное значение сопротивления резистора в микросборке должно быть менее 100 Ом. (Эти требования диктуются возможностями формирования резисторов из предлагаемого набора материалов.)
- Û Отношение номинальных значений максимального и минимального сопротивлений резисторов в формируемом фрагменте должно быть не более $R_{\max} / R_{\min} \leq 20$. Это требование назначается исходя из возможности выполнить напыление группы резисторов за один технологический цикл без смены материала испарителя и масок.
- Û Технологические ошибки αR_i сопротивлений тонкопленочных резисторов составляют обычно более 20 %. Если по условиям работы схемы требуется получить меньшую погрешность, например $\alpha R_k \leq 10\%$, то необходимо предусмотреть в технологической цепочке дополнительную опе-

рацию подгонки. В этом случае ТЗ на расчет может содержать заведомо большие ошибки (например, 20 % или 30 %), наверняка достижимые при создании ИМС, а в пояснительной записке в этом случае необходимо указать, что эти конкретные резисторы подгоняются, и привести описание технологии подгонки.

- Û Мощность, рассеиваемая каждым отдельным резистором по ТЗ, не должна превышать 30 мВт (требование диктуется возможностями тонкопленочных резисторов рассеивать тепловую энергию при естественном охлаждении).
- Û Другие требования ТЗ задаются при его формировании, исходя из подсказок, предлагаемых программой "*Микросборка-R*", и на основании условий эксплуатации заданного электронного устройства (температура окружающей среды, степень старения материала и т.д.).

2.3. Порядок и содержание расчета группы тонкопленочных резисторов с помощью программы "*Микросборка -R*"

После выделения фрагмента резистивной сборки, пере нумерации резисторов (п. 2.2.) запускают программу "*Микросборка-R*" и вводят в неё техническое задание для автоматизированного проектирования группы резисторов, которое формируется с учетом общего ТЗ на разработку РЭС (п. 2.1) и требований к резисторам формируемым по тонкопленочной технологии (п.2.2).

На первом этапе проектирования необходимо сформировать исходное множество альтернативных вариантов групп, разрабатываемой резистивной сборки, каждый вариант, в котором отличается геометрической формой и размерами, входящих в нее резисторов, а значит и результирующей площадью, занимаемой ими на подложке. Кроме того, так как разные материалы и технологии позволяют достичь разной степени точности изготовления резисторов, сформированные варианты микросборок будут отличаться и величиной достижимой погрешности сопротивлений резисторов. Следует отметить, что все варианты, формируемой резистивной сборки являются допустимыми по ТЗ, но имеют разные значения принятых показателей качества.

Каждый вариант группы резисторов формируется назначением материала и технологии в программе "*Микросборка-R*", исходя из меню и подсказок, предъявляемых программой на соответствующих этапах. После ввода их в программу, производится автоматический расчёт топологии с выдачей протокола и графического отображения по каждому из резисторов в группе. В программе предусмотрен как последовательный ввод данных по материалам и технологиям с разовым расчетом группы, так и полностью автоматический расчет всех осуществимых вариантов групп резисторов.

Число таких альтернативных проектных резистивныхборок может составлять от 8 до 100 и зависит от конкретных условий задачи.

Первичное усечение полученных допустимых вариантов структур проводится с помощью подпрограммы многокритериального выбора по

критериальным требованиям, с нарастающей силой: вначале по критерию Парето, а затем по лексикографическому критерию. Показателями качества являются общая суммарная площадь $S_{\Sigma Ri}$, занимаемая группой резисторов на подложке и условная результирующая относительная погрешность для группы резисторов $\alpha R_{\Sigma Ri}$. Приоритеты показателей качества в лексикографическом критерии задаются исходя из ТЗ на разработку (п. 2.1).

Окончательный выбор варианта микросборки осуществляется эвристически на основании анализа технического задания, условий эксплуатации, типа производства электронного устройства в целом (п. 2.1).

Далее, для выбранного варианта рассчитанной группы тонкопленочных резисторов требуется подобрать приемлемую по геометрическим размерам подложку, исходя из ряда типоразмеров подложек [1]. Так как на подложке кроме резисторов располагаются ещё межсоединения и контактные площадки, а также должно резервироваться свободное пространство между элементами, то площадь подложки $S_{\text{подл}}$ выбирается исходя из следующего соотношения: $S_{\text{подл}} \geq 2S_{\Sigma Ri}$ с округлением полученного значения $S_{\text{подл}}$ до ближайшего сверху значения из ряда.

На поле выбранной подложки методом аппликаций проводится размещение и трассировка спроектированных резисторов в соответствии с принципиальной схемой сборки (для удобства выполнения рекомендуемый масштаб 10:1). Выводы желательно осуществить с одной или с двух противоположных сторон подложки.

В результате выполнения типового расчета необходимо представить комплект чертежей в соответствии с ЕСКД, включающий:

- чертеж принципиальной электрической схемы микросборки,
- сборочный чертеж микросборки,
- детализированный чертеж маски резисторов,
- детализированный чертеж маски проводников и контактных площадок.

2.4. Содержание и объем пояснительной записки к типовому расчету

- Пояснительная записка (объемом 25–30 стр.) должна содержать:
- титульный лист пояснительной записки;
- техническое задание на проектирование;
- расчет одного варианта группы резисторов для тонкопленочной микросборки [1];
- распечатку протокола сформированных вариантов проекта;
- распечатку графического отображения на экране распределения альтернатив в пространстве двух показателей качества: суммарной площади, занимаемой резисторами на подложке и суммарной результирующей погрешности группы резисторов;
- описание процедуры многокритериального формализованного и эвристического выбора варианта проекта;
- распечатку выбранного варианта проекта микросборки;

- описание технологии производства, разработанной микросборки;
- выводы по проделанной работе и анализ соответствия техническому заданию на проектирование;
- библиографический список.

3. РАБОТА С КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММОЙ "МИКРОСБОРКА -R"

3.1. Загрузить программу проектирования резистивных тонкопленочных сборок "Микросборка -R" вводом исполнительного файла *rribm.exe*. После появления заставки войти в меню диалога главного расчетного блока программы. Оно состоит из следующих рабочих подпрограмм (см. «Возможности системы» (рис.1)).

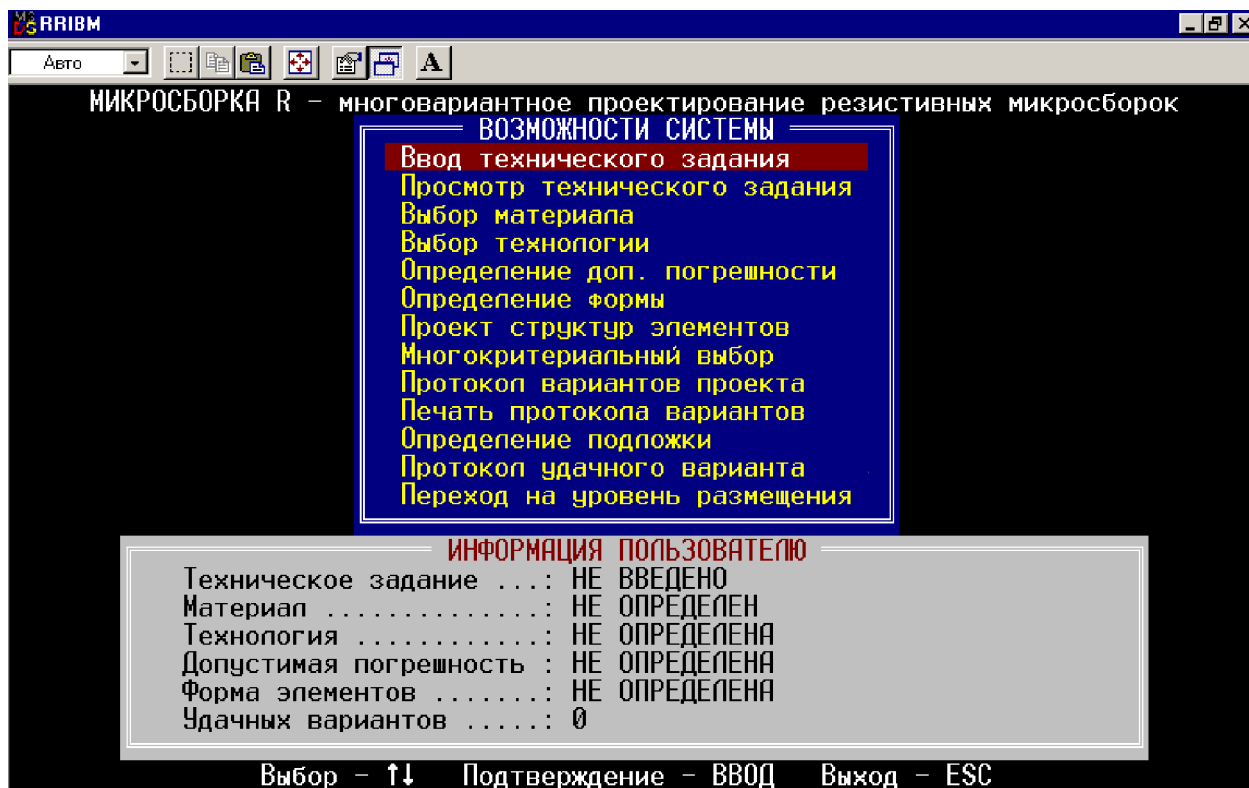


Рис. 1. Главное меню программы "Микросборка -R"

3.2. Ввести техническое задание подведением курсора к соответствующей строке меню и нажатия клавиши "Enter". При этом осуществляется первичный ввод ТЗ (для этого необходимо задать имя вашего личного рабочего файла, состоящего из номера группы и инициалов, например, *er1-01-dkt*, где *dkt*- первые буквы фамилии, имени, отчества). При повторных загрузках ПЭВМ (на последующих занятиях) достаточно выбрать из меню строку "Чтение старого проекта" в подпрограмме «Ввод технического задания», затем ввести ранее созданный файл, выбрав его из меню файлов, и продолжить с ним дальнейшую работу.

Формирование ТЗ включает:

- ввод максимально допустимой температуры перегрева (до 100 °С);
- ввод погрешностей воспроизведения материала (1–3%);

- ввод погрешности на старение материала (1–3%);
- ввод номинальных значений резисторов в кОм ;
- ввод допусков на сопротивления резисторов в % ;
- ввод мощностей резисторов в мВт.

3.3. При необходимости введенное техническое задание может быть проверено и скорректировано, если войти в строку меню "**Просмотр технического задания**".

3.4. Расчет группы резисторов начинается с выбора материала. Для этого необходимо войти в соответствующую строку главного меню. Продвигая курсор по предлагаемым в таблице материалам, необходимо отслеживать информацию о выполнимости проекта (в правом нижнем углу экранного поля). В случае невыполнимости проекта выбирается следующий по строке материал. При выполнимости проекта необходимо ввести выбранный материал в программу для дальнейшего расчета и перейти к следующей строке главного меню «**Выбор технологии**».

3.5. Выбор технологии осуществляется из меню «**Выбор технологии**». При этом необходимо учитывать потенциально достижимую точность выполнения рисунка резисторов и экономические характеристики метода.

(По согласованию с преподавателем пункты 3.4 и 3.5 меню могут быть выполнены в автоматическом режиме).

3.6. Далее, последовательно входя в подпрограммы «**Определение допустимой погрешности**», «**Определение формы резисторов**» и «**Проект структур элементов**», осуществляют расчет геометрии резисторов в полуавтоматическом режиме, нажимая клавишу «**Enter**» по мере выполнения промежуточных расчетных операций. В результате выполнения этого этапа проектирования появляется сообщение о выполнимости или невыполнимости проекта с введенными исходными данными. Удачный (допустимый) проект автоматически запоминается программой. Если проект невыполним или число удачных вариантов менее 5 необходимо вернуться в главное меню программы (рис.1) в разделы «**Выбор материала**» и «**Выбор технологии**» и с новыми исходными данными повторить расчет. Каждый удачный последующий вариант также запоминается и информация о числе удачных вариантов высвечивается в самой нижней строке экранного поля главного меню.

3.7. По окончании накопления множества допустимых вариантов рассчитанных резистивных сборок проводится их сравнение и выбор наиболее рационального проекта. Для выполнения этого этапа необходимо войти в строку «**Многокритериальный выбор**» главного меню программы «**Микро-сборка -R**».

3.8. Многокритериальный выбор рационального варианта проекта осуществляется по двум показателям качества: *суммарной площади* $S_{\Sigma Ri}$, занимаемой резисторами на подложке, и результирующей *суммарной погрешно-*

сти резисторов $\alpha R_{\Sigma Ri}$. На последнем этапе выбора может также учитываться и показатель стоимости производства $C_{пр}$. После входа в подпрограмму **«Многокритериальный выбор»** (МКВ) на экране появится главное меню этой подпрограммы, содержащее пункты: **«Ввод информации»**, **«Процедура выбора»**, **«Графическое отображение»**, **«Выход»**.

3.9. Для выбора режима работы подпрограммы **«Многокритериальный выбор»** необходимо подвести световой указатель к нужному пункту и нажать клавишу **«Enter»**. Световой указатель перемещается при помощи клавиш передвижения курсора. При выборе пункта меню **«Ввод информации»** на экране появится таблица с автоматически введенными данными о ранее полученных проектных вариантах групп резисторов, которую можно просмотреть, а при необходимости, отредактировать.

Для возврата в главное меню подпрограммы **«Многокритериальный выбор»** необходимо нажать клавишу F10.

3.10. Процедуры выбора рационального варианта осуществляются интерактивно. В этом режиме система высвечивает на экране меню, в состав которого входят: **«Выбор допустимых решений»**, **«Выбор по лексикографии»**, **«Последовательный выбор с уступками»**, **«Выбор по Парето»**. Выбор нужного пункта меню осуществляется путем подведения светового указателя к соответствующей строке и нажатия клавиши **«Enter»**.

3.11. При запуске процедуры **«Выбор допустимых решений»** на экране появляется таблица со списком характеристик и набором символов соответствующих отношений ($<$, $=$, $>$, \geq , \leq ,...). Чтобы задать новые ограничения, исправить или уничтожить уже имеющиеся для конкретной характеристики необходимо ввести её номер и тип ограничения в ответ на запрос системы. Система высвечивает на экране общий вид полученного отношения, а также список допустимых вариантов, выбранных с учетом нового ограничения. Уничтожение ограничения производится путем выбора в меню отношений пункта **«уничтожение»**. Для оперативного выхода из режима задания типа ограничения необходимо использовать клавишу **«Esc»**.

3.12. **«Выбор по критерию Парето»** и **«Выбор по лексикографии»** осуществляется также выделением соответствующей строки в меню подпрограммы с помощью курсора и клавиши **«Enter»**. При запуске процедур выбора решений по лексикографии и по Парето система переходит к режиму задания номеров характеристик для показателей качества, участвующих в выборе. При этом на экране отображается список характеристик, которые не были ранее отнесены к ограничениям и условиям. В правой части экрана появляется запрос системы на ввод номеров характеристик, соответствующих принятым показателям качества. В процедуре выбора по Парето номера характеристик можно указывать в произвольном порядке, однако их количество в программе ограничивается двумя. В процедуре выбора по лексикографии номера показателей качества необходимо задавать в порядке убывания приоритетов, соответствующих номерам характеристик. Выбор проектных вариантов по

критериальным требованиям осуществляется только по характеристикам, имеющим численные значения, а не символьные и не интервальные.

Успешный ввод номеров показателей качества, по которым будет производиться выбор решений, переводит систему в режим задания направления оптимизации [минимизации (min) или максимизации (max)] характеристик, которое подтверждается, в свою очередь, нажатием клавиши «*Enter*». После осуществления расчетов по заданному алгоритму, соответствующему процедуре выбора (по Парето или лексикографии), на экране высвечиваются полученные решения. Нажатие любой клавиши возвращает систему в меню процедур выбора (рис. 3).

3.13. «*Графическое отображение альтернатив*» в пространстве выбранных показателей качества даёт возможность получить условное графическое отображение рассматриваемых вариантов в пространстве двух выбранных показателей качества. При выборе этого пункта меню на экране появляется перечень характеристик проектных вариантов. В ответ на первый запрос системы необходимо ввести номер первой характеристики, которая будет отображаться по оси ординат. Аналогично вводится номер второй характеристики по оси абсцисс. Далее система отобразит спроектированные варианты в двумерном пространстве принятых ПК с идентифицирующими их номерами. Если процедуры выбора уже проведены (п п. 3.11, 3.12), то варианты, оптимальные по Парето и по лексикографии выводятся на экран мерцающими символами различного цвета (рис. 2).

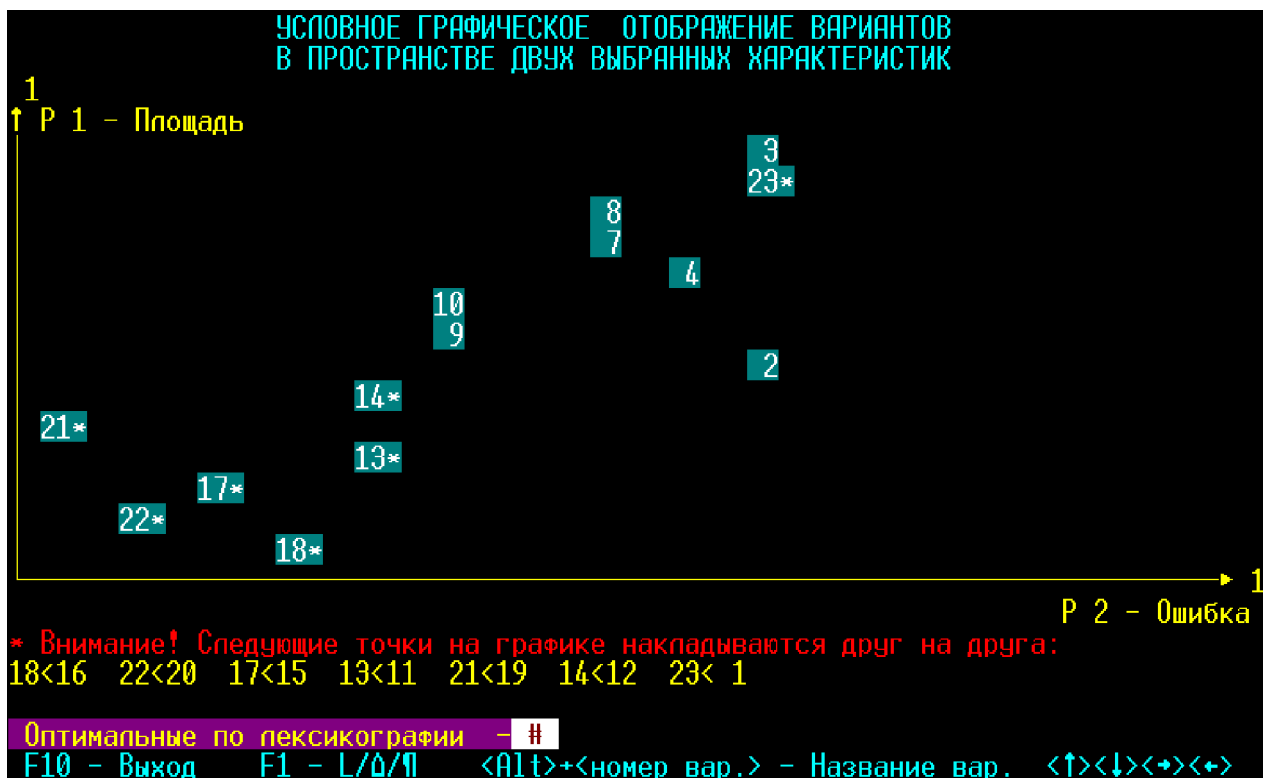


Рис. 2. Условное графическое распределение проектных вариантов в пространстве двух показателей качества

Если несколько вариантов имеют одинаковые значения обеих характеристик, точки на графике накладываются. При этом остается видимым вари-

ант с большим номером. Такие варианты помечаются знаком * и под графиком выводится список вариантов, закрытых вариантами с большим номером.

Нажатие клавиши [F10] в любой момент работы возвращает пользователя из подсистемы графического отображения в главное меню подпрограммы «**Многокритериальный выбор**».

Выйти из подпрограммы «**Многокритериальный выбор**» в главное меню основной программы “**Микросборка -R**” можно с помощью виртуальной клавиши «**Выход**» (п. 3.8).

3.14. После окончательного выбора номера варианта резистивной сборки необходимо распечатать «**Протокол вариантов проекта**», который является документом, позволяющим наглядно представить выполненную работу. Вход в эту подпрограмму осуществляется подведением курсора к соответствующему пункту главного меню программы “**Микросборка -R**” (рис. 1) и нажатием клавиши «**Enter**».

3.15. Печать «**Протокола удачного варианта**» осуществляется также входом в соответствующий пункт главного меню. Распечатка включает полный протокол по всем необходимым характеристикам резисторов удачного проектного варианта резистивной сборки, в том числе, и по графическому представлению каждого из резисторов рассчитанной группы с полным отчетом об их геометрических размерах (рис. 3).

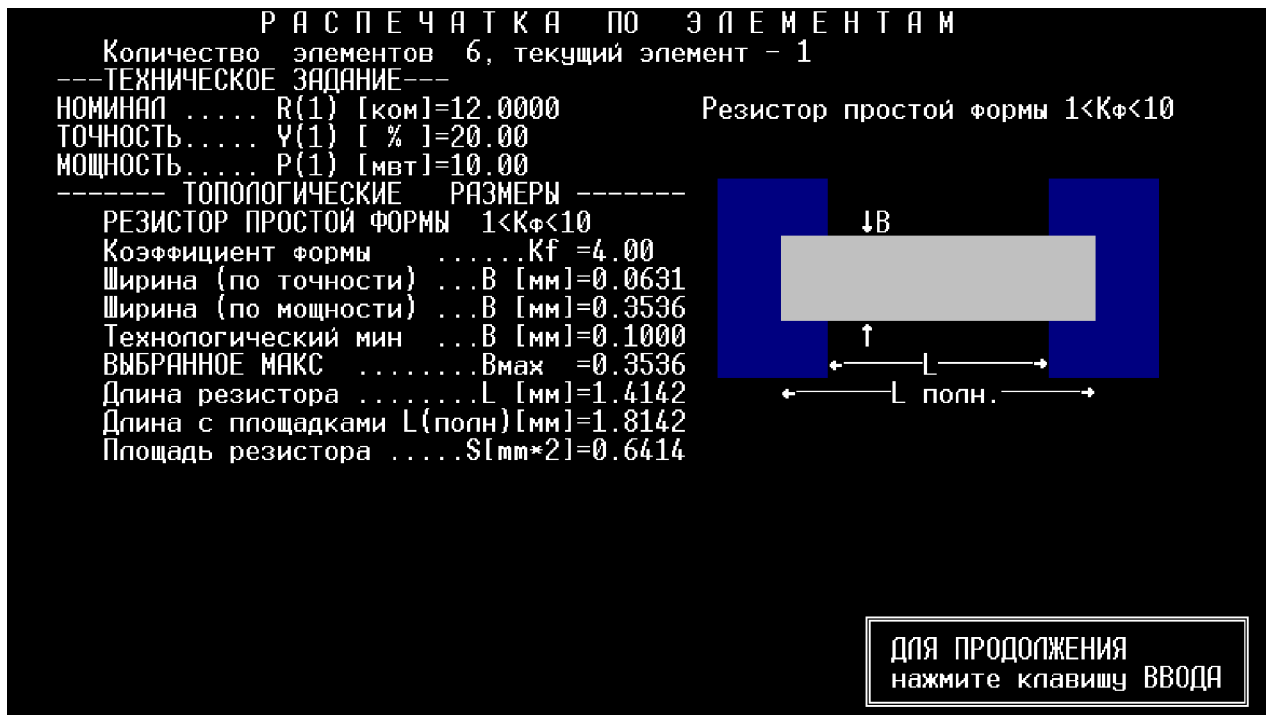


Рис. 3. Фрагмент «**Протокола удачного варианта**»

3.16. Полное содержание пояснительной записки к типовому расчету и её объём указаны в п. 2.4.

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ГРУППЫ РЕЗИСТОРОВ*

Конструктивный расчет тонкопленочных резисторов заключается в определении формы, геометрических размеров и минимальной площади, занимаемой резисторами на подложке. Одновременно с этим необходимо, чтобы резисторы обеспечивали рассеивание заданной мощности при удовлетворении требуемой точности γ_R в условиях существующих технологических возможностей.

Исходные данные для расчета: номинал резистора R_i [Ом]; допуск на номинал γ_{Ri} [%]; мощность рассеяния P_i [Вт]; рабочий диапазон температур; технологические ограничения.

Порядок расчета.

1. Определяют оптимальное сопротивление квадрата резистивной пленки ρ_s *opt* с точки зрения минимума суммарной площади под резисторами сборки

$$\rho_s \text{ opt} = \sqrt{\frac{\sum_1^n R_i}{\sum_1^n 1/R_i}}, \quad (\text{П.1})$$

2. Выбирают материал резистивной пленки с удельным сопротивлением, ближайшим по значению к рассчитанному по (П.1). При этом необходимо, чтобы ТКС материала был минимальным, а удельная мощность рассеяния P_0 - максимальной.

3. Производят проверку правильности выбранного материала с точки зрения точности изготовления резисторов. Полная относительная погрешность изготовления пленочного резистора $\gamma_R = \Delta R / R$ состоит из суммы погрешностей

$$\gamma_R^2 = \gamma_{K\phi}^2 + \gamma_{\rho_s}^2 + \gamma_{Rt}^2 + \gamma_{Rct}^2 + \gamma_{Rk}^2,$$

где $\gamma_{K\phi}$ - погрешность коэффициента формы, γ_{ρ_s} - погрешность воспроизведения резистивной пленки, γ_{Rt} - температурная погрешность, γ_{Rct} - погрешность, обусловленная старением пленки, γ_{Rk} - погрешность переходных сопротивлений контактов.

Погрешность коэффициента формы $\gamma_{K\phi}$ зависит от погрешности геометрических размеров - длины l и ширины b резистора ($K_\phi = l/b$)

$$\gamma_{K\phi}^2 = \gamma_l^2 + \gamma_b^2.$$

Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления γ_{ρ_s} зависит от условий напыления и материала резистивной пленки. Обычно она не превышает 5%.

Температурная погрешность γ_{Rt} зависит от ТКС материала α_R пленки

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R (T_{\max} - 20^\circ \text{C}), \quad (\text{П.2})$$

где α_R - температурный коэффициент сопротивления материала пленки.

Погрешность γ_{Rct} , обусловленная старением пленки, вызвана медленным изменением структуры пленки во времени и ее окислением. Обычно она не превышает 3%.

Погрешность переходных сопротивлений контактов зависит от технологических условий напыления пленок, удельного сопротивления резистивной пленки и геометрических размеров контактного перехода. Обычно она равна $1 \div 2\%$.

Допустимая погрешность коэффициента формы из (П.1) составит

$$\gamma_{K\phi\text{доп}}^2 = \gamma_R^2 - \gamma_{\rho_s}^2 - \gamma_{Rt}^2 - \gamma_{Rct}^2 - \gamma_{Rk}^2. \quad (\text{П.3})$$

* В качестве методики расчета группы тонкопленочных резисторов приведем ниже материал изложенный в [1] с некоторыми изменениями, касающимися точностных расчетов.

Если значение $\gamma_{\text{Кфдоп}}$ отрицательно, то это означает, что изготовление резистора с заданной точностью из выбранного материала невозможно. В этом случае необходимо выбрать другой материал, с меньшим ТКС либо использовать подгонку резисторов в группе.

4. Определяют конструкцию резисторов по значению коэффициента формы $K_{\text{ф}}$

$$K_{\text{ф}i} = R_i / \rho_s \text{opt} . \quad (\text{П.4})$$

При $1 \leq K_{\text{ф}i} \leq 10$ рекомендуется использовать резистор прямоугольной формы, при $K_{\text{ф}i} > 10$ – резистор сложной формы (составной, меандр или типа “змейка”), при $K_{\text{ф}i} < 1$ – резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины. Конструировать такой резистор с $K_{\text{ф}i} < 1$ не рекомендуется, т.к. он будет иметь большие контактные площадки, и занимать значительную площадь на подложке.

Дальнейший расчет проводят в зависимости от формы резисторов.

5. Расчет прямоугольных полосковых резисторов (рис. П.1,а) начинается с определения

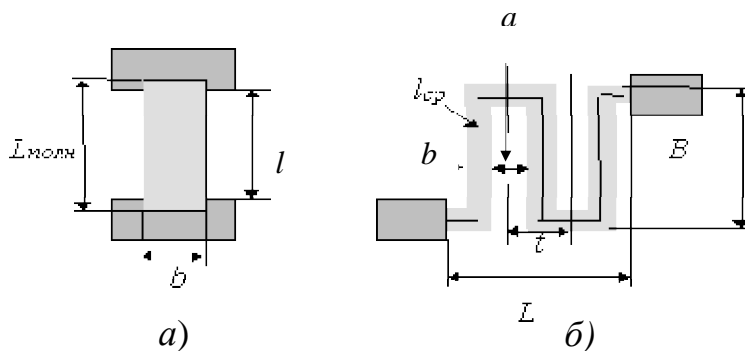


Рис. П.1. Формы используемых резисторов

ширины, а затем длины резистора. Расчетное значение ширины резистора должно быть больше наибольшего значения одной из трех величин

$$b_{\text{расч}} > \max (b_{\text{техн}} ; b_{\text{точн}} ; b_P), \quad (\text{П.5})$$

где $b_{\text{техн}}$ – минимальная ширина резистора, определяемая возможностями технологического процесса; $b_{\text{точн}}$ – ширина резистора, определяемая точностью изготовления

$$b_{\text{точн}} \geq \sqrt{ [\Delta b^2 + (\Delta l / K_{\text{ф}i})^2] / \gamma_{\text{Кф}i} }, \quad (\text{П.6})$$

(Δb , Δl – погрешности изготовления ширины и длины резистора, зависящие от метода изготовления маски, см. табл. 3.15 в [1]); b_P – минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная мощность P (см. стр.120 [1]).

$$b_P = \sqrt{ P / (P_0 \times K_{\text{ф}i}) }. \quad (\text{П.7})$$

За ширину b резистора принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ – большее значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. Для тонкопленочной технологии шаг координатной сетки обычно составляет 1 или 0,5 мм. Например, если шаг координатной сетки 1мм, масштаб 20 : 1, то округление производят до величины, кратной 0,05 мм.

Далее находят расчетную длину резистора

$$l_{\text{расч}} = b K_{\text{ф}i} . \quad (\text{П.8})$$

За длину l резистора принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. При этом следует оценивать получающуюся погрешность и при необходимости выбирать большее значение ширины b резистора, при котором округление длины $l_{\text{расч}}$ дает приемлемую погрешность.

Определяют полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок:

$$l_{\text{полн}} = l + 2e, \quad (\text{П.9})$$

где e - размер перекрытия резистора и контактных площадок.

Площадь, занимаемая резистором на подложке

$$S = l_{\text{полн}} b. \quad (\text{П.10})$$

б. Для прямоугольных резисторов, имеющих $K_{\text{ф}i} < 1$, сначала определяют длину, а затем ширину резистора. Расчетное значение длины резистора $l_{\text{расч}}$ выбирают из условия

$$l_{\text{расч}} \geq \max (l_{\text{техн}} ; l_{\text{точн}} ; l_P), \quad (\text{П.11})$$

где $l_{\text{техн}}$ - минимальная длина резистора, определяемая возможностями технологического процесса (табл. 3.15 [1]); $l_{\text{точн}}$ - минимальная длина резистора, при которой обеспечивается заданная точность

$$(l_{\text{точн}}) \geq \sqrt{[(\Delta l)^2 + (\Delta b / K_{\text{ф}i})^2] / \gamma_{\text{Кф}i}}, \quad (\text{П.12})$$

l_P - минимальная длина резистора, при которой рассеивается заданная мощность P

$$l_P = \sqrt{P K_{\text{ф}i} / P_0} \quad (\text{П.13})$$

За длину l резистора принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии. Расчетную ширину резистора определяют по формуле

$$b_{\text{расч}} = l / K_{\text{ф}i}. \quad (\text{П.14})$$

За ширину b резистора принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки. При этом следует оценивать получающуюся погрешность и при необходимости корректировать значение длины l резистора в большую сторону, при котором округление ширины $b_{\text{расч}}$ дает приемлемую погрешность. Полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок и площадь резистора определяют соответственно по формулам (П.9) и (П.10).

Для проверки находят действительную удельную мощность и погрешность резистора. Очевидно, резистор спроектирован удовлетворительно, если:

а) удельная мощность рассеяния P_0' не превышает допустимого значения P_0

$$P_0' = P / S \leq P_0; \quad (\text{П.15})$$

б) погрешность коэффициента формы $\gamma_{\text{Кф}i}$ не превышает допустимого значения $\gamma_{\text{Кф}i \text{ доп}}$

$$\gamma_{\text{Кф}i} = \sqrt{(\Delta l / l_{\text{полн}})^2 + (\Delta b / b)^2} \leq \gamma_{\text{Кф}i \text{ доп}}; \quad (\text{П.16})$$

в) суммарная погрешность γ_R не превышает допуска γ_R

$$\gamma_R = \sqrt{\gamma_{\text{р}c}^2 + \gamma_{\text{Кф}}^2 + \gamma_{\text{R}i}^2 + \gamma_{\text{R}к}^2 + \gamma_{\text{R}ст}^2} \leq \gamma_R. \quad (\text{П.17})$$

7. *Конструктивный расчет резисторов сложной формы.* Резисторы типа “меандр” (рис. П.1, б) рассчитывают из условия минимальной площади, занимаемой резистором. Расчет меандра проводят после определения ширины b резистора в следующей последовательности.

Определяют длину средней линии меандра

$$l_{\text{ср}} = b K_{\text{ф}}. \quad (\text{П.18})$$

Задают расстояние между резистивными полосками с учетом технологических ограничений (табл. 3.15 в [1]). При масочном методе $a_{\min} = 300$ мкм, при фотолитографии $a_{\min} = 100$ мкм. Обычно задают ($a = b$). Шаг t одного звена меандра

$$t = a + b. \quad (\text{П.19})$$

Определяют оптимальное число звеньев меандра $n_{\text{опт}}$ из условия, чтобы площадь, занимаемая резистором типа “меандр”, была минимальной. Это будет в случае, когда меандр вписывается в квадрат ($L = B$). Если отношение средней линии меандра к ширине резистивной полоски $L_{\text{ср}} / b > 10$, то оптимальное число звеньев меандра $n_{\text{опт}}$ может быть вычислено по приближенной формуле

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{(l_{\text{ср}} / t) (B / L)}. \quad (\text{П.20})$$

При $L = B$ и $a = b$ (меандр квадратной формы)

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{K_{\text{фи}} / 2}. \quad (\text{П.21})$$

Значение $n_{\text{опт}}$ округляется до ближайшего целого значения.

$$\text{Длина меандра} \quad L = n (a + b). \quad (\text{П.22})$$

$$\text{Ширина меандра} \quad B = (L_{\text{ср}} - an) / n. \quad (\text{П.23})$$

Расстояние a выбирают из конструктивно-технологических соображений. Например, при напылении резисторов через маску размер a_{\min} определяется минимально возможным расстоянием между соседними щелями в маске. Для обеспечения требуемой жесткости маски оно должно удовлетворять условию

$$(B_{\text{max}} / a) \leq 10 \quad (\text{П.24})$$

Если это условие не выполняется, то необходимо изменить расстояние a и вновь вычислить $n_{\text{опт}}$, L , B . Для фотолитографического метода указанное условие не критично.

Приведенные расчетные соотношения не учитывают, что в резисторах типа “меандр” плотность тока в изгибах неравномерна. Это приводит к сокращению электрической длины пленочного резистора и уменьшению его сопротивления. Для приближенной оценки сопротивления меандра можно воспользоваться формулой

$$R \approx \rho_s (l_{\text{ср}} / b) = \rho_s K_{\text{ф}}.$$

Для уточненного расчета с учетом изгибов конструкцию резистора типа “меандр” можно представить в виде последовательности соединения прямолинейных участков и изгибов. При этом его сопротивление можно определить как сумму сопротивлений прямолинейных участков и изгибов $R = R_{\text{и}} m + \rho_s l_{\text{п}} n / b$, (П.25) где $R_{\text{и}}$ – сопротивление изгибов; m – число изгибов; $l_{\text{п}}$ – длина прямолинейных участков; n – число звеньев меандра.

Для изгиба под прямым углом (рис П.2, а) $R_{13} = 2,55\rho_s$, для П-образного изгиба (рис П.2, б) $R_{\text{и}} = 4\rho_s$.

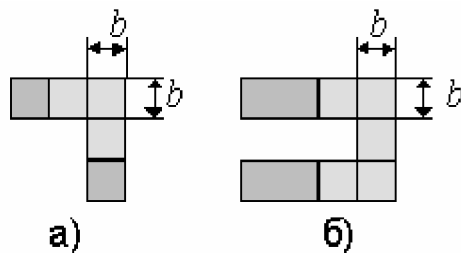


Рис. П.2. Конструкция изгибов пленочных резисторов типа «меандр»;
а) изгиб под прямым углом; б) П-образный изгиб

Отсюда длина прямоугольного участка одного звена меандра составит

$$l_n = (R - mR_n) b / \rho_s n \quad (\text{П.26})$$

После этого корректируют размеры L и B с целью обеспечения заданного номинала резистора.

Квадратная (или близкая ней) форма резистора “меандр” часто оказывается неудобной при компоновке пленочных элементов на подложке микросхемы, например, из-за отличной от квадрата формы площади, отводимой под резистор. Тогда, зная габаритную площадь меандра $S = LB$ и, задавая один из размеров меандра (например, B'), определяем второй размер L' и число звеньев меандра n

$$L' = S / B', \quad n' = L' / t.$$

В [1, с. 124 – 126] можно найти пример расчета одного варианта группы тонкопленочных резисторов, но следует обратить внимание на то, что расчет ошибок в приведенной там методике и примере выполнен методом наихудшего случая, а не вероятностным методом моментов, принятым в данном Приложении.

Типоразмеры стандартных подложек тонкопленочных ИМС, используемых для производства резистивных сборок, приведены в табл. 1. Толщина подложек составляет $0,35 \div 0,6$ мм. Размеры подложек имеют только минусовые допуски.

Таблица 1

Типоразмеры подложек гибридных интегральных микросборок (ГИМС), размеры мм

№	Длина	Шир.	№	Длина	Шир.	№	Длина	Шир.	№	Длина	Шир.
1	120	96	6	24	20	11	6	5	16	10	8
2	96	60	7	20	16	12	4	2,5	17	60	24
3	60	48	8	16	12	13	60	16	18	48	15
4	48	30	9	16	10	14	60	32	19	45	20
5	30	24	10	12	10	15	15	8	-	-	-

Библиографический список

1. Конструирование и технология микросхем. Учебное пособие для вузов / Под ред. Л.А. Коледова. – М.: Высшая школа, 1984. 231 с.
2. **Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И.** Микроэлектроника. –М.: Высшая школа, 1987. 416 с.
3. **Парфенов О.Д.** Технология микросхем. –М.: Высшая школа, 1977. 256 с.
4. **Кандырин Ю.В., Покровский Ф.Н., Сорокин С.А.** Элементы конструкций РЭА и ЭВА. Учебное пособие / Под ред. Ю.В. Кандырина. –М.: Издательство МЭИ, 1993. 304 с.
5. **Кандырин Ю.В.** Технология интегральных микросхем. Учебное пособие. –М.: Издательство МЭИ, 1981. 87 с.
6. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник / Под ред. Э.Т. Романычевой. – М.: Радио и связь, 1989. 261 с.