

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ КАТУШЕК
ИНДУКТИВНОСТИ В ГИС
НА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторной работе 8
для студентов

КУЙБЫШЕВ 1988

В методических указаниях рассматриваются конструкции пленочных катушек индуктивности и проводится их сравнительный анализ. Приводится методика расчета основных параметров пленочных катушек индуктивности, а также взаимной индуктивной связи между ними. Описаны основные способы уменьшения взаимной связи между катушками индуктивности в гибридных интегральных микросхемах. Описывается схема экспериментального исследования взаимной связи между плоскими катушками индуктивности и предлагается проведение сравнительного анализа теоретических и экспериментальных данных.

Рекомендуется для студентов специальности 0705.

Составители: В. Д. Дмитриев, М. А. Леднев,
Т. С. Калугина

Рецензент И. С. Кариков

Цель работы — изучение конструкции и методики расчета пленочных катушек индуктивности и исследование возможности уменьшения взаимной индуктивной связи между ними в гибридных интегральных микросхемах (ГИС).

З а д а н и я:

1. Изучить конструкции и рассчитать пленочные катушки индуктивности ГИС.
2. Изучить характер влияния металлических пленок и пластин на параметры пленочных катушек индуктивности.
3. Изучить возможности уменьшения взаимной связи между пленочными катушками индуктивности в ГИС.
4. Ознакомиться с порядком и методикой выполнения работы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Избирательные устройства на LC -элементах в ГИС применяют в диапазоне частот $10 \dots 10^3$ МГц. Основной задачей при построении таких устройств является оценка коэффициентов индуктивных связей, неизбежно возникающих при близком расположении пленочных катушек индуктивности на подложке ГИС. Рассмотрим возможность уменьшения или сведения к нулю индуктивных и емкостных связей между пленочными катушками, расположенными на одной стороне подложки ГИС.

Пленочные спиральные катушки индуктивности

В качестве индуктивного элемента, пригодного для применения в ГИС, используется индуктивность в виде плоской спирали, расположенной на изоляционной подложке. По конфигурации спираль плоской катушки может быть прямоугольной, треугольной, многоугольной и круглой (рис. 1).

Величина индуктивности спиральной (круглой) катушки (рис. 1,а) достаточно точно определяется по формуле

$$L = 4 \cdot 10^{-3} \pi N^2 a \left[\ln \frac{ba}{c} - 0,5 \right] + \frac{1}{24} \left(\frac{c}{a} \right)^2 \left[\ln \frac{ba}{c} + 3,583 \right], \quad (1)$$

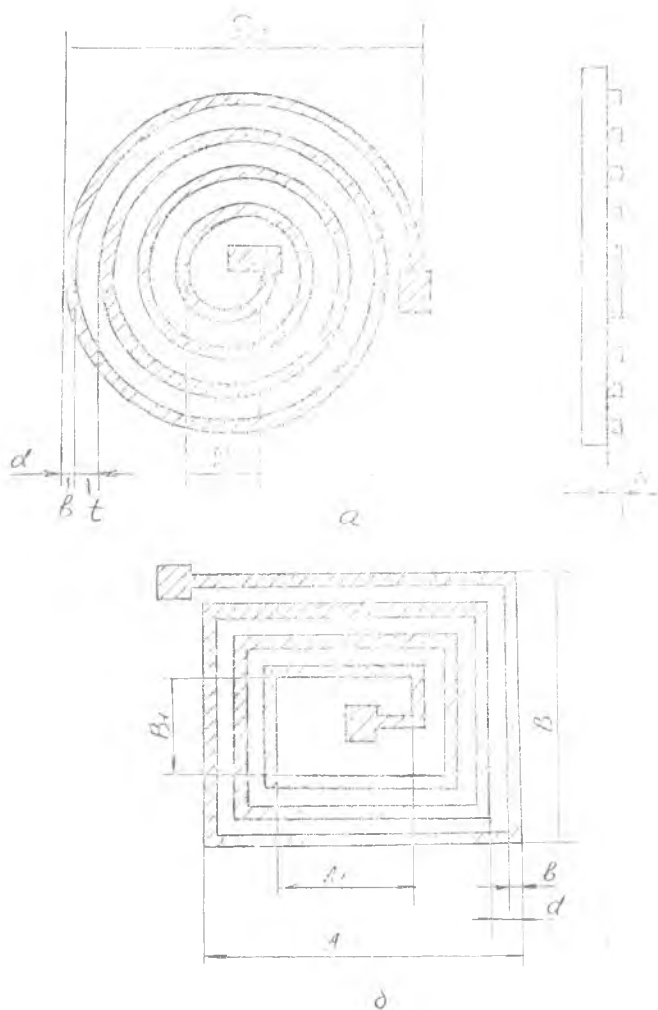


Рис. 1. Конструкции плоских катушек индуктивности:
 а — спиральной; б — прямоугольной

где L — индуктивность катушки, мкГ;

N — число витков;

$a = 0,25 (D_1 + D_2)$;

$c = 0,5 (D_2 - D_1)$;

D_1 и D_2 — диаметры внутреннего и наружного витков, см.

В практике расчета конструкции пленочных катушек индуктив-

ности необходимо решать обратную задачу: по известным электрическим параметрам катушки получить ее геометрические размеры. Однако при определении геометрических размеров получаем неоднозначные решения. Поэтому для расчета конструкции пленочных катушек индуктивности пользуются эмпирическими формулами, коэффициенты которых получены на основе формулы (1). По эмпирическим формулам можно по известному значению номинала катушки индуктивности L , внешнему D_2 или внутреннему D_1 диаметрам определить шаг спиральной катушки d :

$$d = k_2 \frac{D_2 \sqrt{D_2}}{\sqrt{L}} , \quad (2)$$

$$d = k_1 \frac{D_1 \sqrt{D_1}}{\sqrt{L}} , \quad (3)$$

где L — индуктивность, мкГ;

$d = b + t$ — шаг спирали, мм;

b — ширина витка, мм;

t — зазор между соседними витками, мм;

D_1 и D_2 — внутренний и наружный диаметры витков спирали, мм.

Коэффициенты k_1 и k_2 — величины, зависящие от отношения D_2/D_1 , приведены на графике рис. 2.

Максимальная добротность катушки индуктивности соответствует значению $\alpha = 3 \dots 5$.

Итак, если известен наружный или внутренний диаметр катушки индуктивности, то задавшись значением α от 3 до 5, определяем коэффициенты k_1 или k_2 . Соответственно по формулам (2) или (3) определяем шаг спирали катушки. Число витков катушки индуктивности определяется по формуле

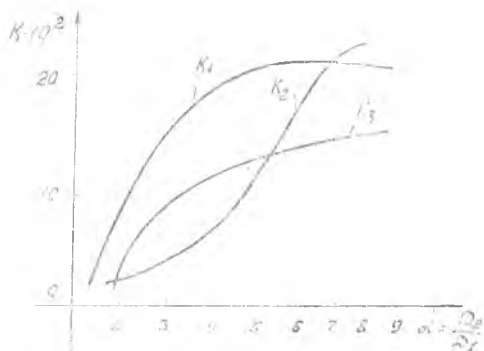


Рис. 2. Зависимость коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 от α

$$N = \frac{k_2 D_2}{2d} + 0,5. \quad (4)$$

Ширина витка b должна быть меньше, чем шаг d , на величину зазора t . Для максимальной добротности ширину витка необходимо брать больше:

$$b_{\text{макс}} = d - t_{\text{мин}} , \quad (5)$$

где $t_{\text{мин}}$ — минимально возможный зазор между соседними витками, который можно изготовить по данной технологии (при изготовлении методом фотолитографии $t_{\text{мин}} = 0,05$ мм, $b_{\text{мин}} = 0,05$ мм).

Толщина витка (спирали) катушки индуктивности Δ (см. рис. 1), из условия получения высокой добротности, не должна быть меньше 2—3 скин-слоев:

$$\Delta \geq (2...3) y, \quad (6)$$

где $y = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{f}}$ — глубина скин-слоев, мкм.

f — частота, МГц.

Коэффициент ψ_2 зависит от проводимости материала проводника катушки (табл. 1).

Таблица 1
Значения коэффициентов

Материал	ψ_1	ψ_2
Серебро	2,8044	56,7836
Медь	2,7231	58,4715
Золото	2,2344	69,1022
Алюминий	2,1263	74,8884

Добротность пленочной спиральной катушки индуктивности зависит от потерь в проводнике спирали и от потерь в диэлектрике (подложке). Общие потери индуктивности составляют $\text{tg } \delta_L = \text{tg } \delta_{\text{диэл}} + \text{tg } \delta_{\text{пр}}$. Сопротивление потерь в проводнике будет тем больше, чем меньше ширина витка b . Если добротность катушки индуктивности задана, то минимальная ширина витка определяется по формуле

$$b_{\text{мин}} = \frac{Q}{1 - Q \text{tg } \delta_{\text{диэл}}} \frac{L_0 \alpha (\alpha + \alpha_0) (1 - \alpha_0 \text{tg } \alpha_0)}{\psi_1 \epsilon_0 V^2 l}, \quad (7)$$

где F_1 — коэффициент, зависящий от отношения Δ/y (рис. 3); $\text{tg } \delta_{\text{диэл}}$ — потери в подложке (для ситалла марки СТ-50-1), $\text{tg } \delta_{\text{диэл}} = (20-50) \cdot 10^{-4}$ при $f = (10^6-10^{10})$ Гц и $T = 20^\circ\text{C}$.

Если при расчете ширина витка по выражению (7) окажется больше ширины витка по выражению (5), то добротность катушки индуктивности будет меньше заданной. Для получения необходимой добротности нужно увеличить внешний диаметр D_2 .

Для расчета плоской катушки индуктивности прямоугольной формы (см. рис. 1, б) необходимо определить ее круглый эквивалент, имеющий внешний виток с площадью, равновеликой площади катушки прямоугольной формы:

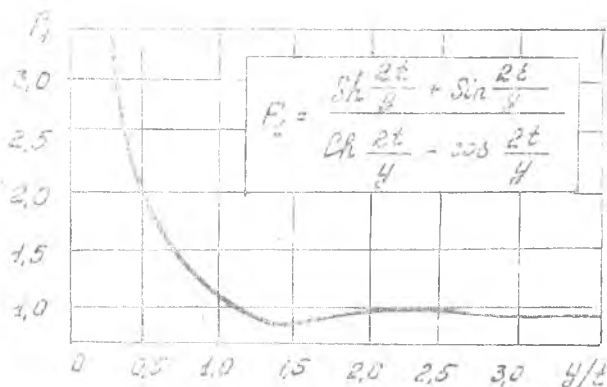


Рис. 3. Зависимость F_1 от y/l

$$D_2' = \frac{2}{\sqrt{n}} \sqrt{AB}. \quad (8)$$

Выбирается коэффициент $\alpha = 3..5$, и по формуле (2) определяется шаг спирали, где вместо D_2 принимают D_2' . Число витков катушки индуктивности прямоугольной спирали определяется так:

$$N = \frac{1}{2} \frac{A_1}{d} + 0,5, \quad (9)$$

где $A_1 = A/\alpha$. Ширина витка определяется так же, как и для спиральной катушки. Добротность катушки индуктивности на 15—20% меньше, чем круглой катушки индуктивности.

Влияние элементов конструкции ГИС и проводящих поверхностей на параметры пленочной катушки индуктивности

В гибридных интегральных микросхемах в непосредственной близости от плоских катушек индуктивности находятся другие элементы, которые могут пересекаться ее магнитосиловыми линиями. Следовательно, на проводящих поверхностях элементов будут протекать наведенные токи, которые вызывают изменение таких параметров катушки, как индуктивность L и добротность Q . Индуктивность

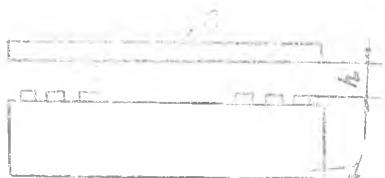


Рис. 4. Расположение проводящей поверхности элемента (крышки или основания корпуса) в непосредственной близости от плоской катушки индуктивности: 1 — подложка с катушкой; 2 — проводящая поверхность элемента

уменьшается вследствие размагничивающего действия наведенных токов, а добротность уменьшается из-за дополнительных потерь, вызванных наведенными токами. На рис. 4 показаны изменения индуктивности и добротности плоских спиральных катушек от расположенной на расстоянии h проводящей поверхности, где L_0 и Q_0 — значения индуктивности и добротности при $h \rightarrow \infty$. Из графиков рис. 5 видно, что поверхности различной проводимости σ по-разному влияют на параметры катушки.

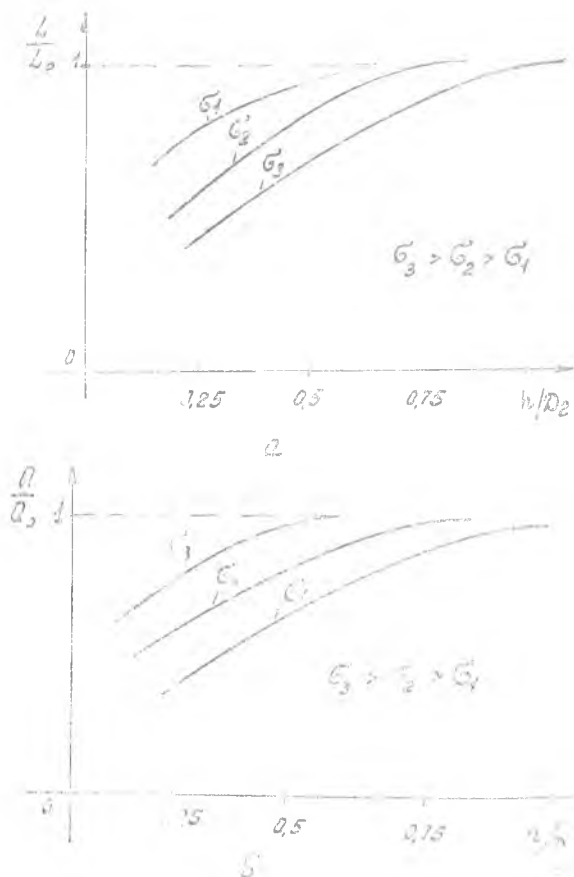


Рис. 5. Зависимость индуктивности и добротности от расстояния h до проводящей поверхности: а — индуктивность; б — добротность

Уменьшение магнитной и емкостной связи между колебательными контурами на плоских катушках индуктивности

При конструировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) катушки индуктивности используются в качестве частотно-селектирующих устройств (фильтров), линий задержки различного рода сигналов и в цепях коррекции. В РЭА на дискретных элементах индуктивности, как правило, экранируются от других элементов и индуктивностей. Применение экранов для уменьшения связи между катушками индуктивности, используемыми в гибридных интегральных микросхемах, приводит к значительному увеличению габаритов и веса интегральной микросхемы. Такой путь решения нецелесообразен в ГИС.

Существует один путь построения системы плоских катушек индуктивности с минимальной связью между катушками без применения экранов. Рассмотрим две одинаковые плоские катушки индуктивности, расположенные так, как показано на рис. 6. Плоские катушки индуктивности расположены параллельно на расстоянии h между их плоскостями и расстоянии a между их центрами. Сравнивая два положения катушек с $a = 0$ и $a = D_1$, можно заметить, что если через L_1 пропускать ток, то его магнитные силовые линии пересекают контур катушки L_2 снизу вверх при $a = 0$ и сверху вниз при $a = D_2$. Следовательно, есть такое значение $0 < a < D_2$, когда количество магнитных силовых линий, пересекающих катушку индуктивности L_2 снизу вверх, равно числу линий, пересекающих L_2 сверху вниз. Значит магнитный поток, пересекающий контур катушки L_2 , равен нулю. Иными словами, при определенном значении a коэффициент взаимной индукции между катушками индуктивности L_1 и L_2 равен нулю. Зависимость коэффициента взаимной индукции M_{12} от значения a между плоскими катушками индуктивности L_1 и L_2 приведена на рис. 7.

При малых значениях h/D_2 коэффициент взаимной индукции M_{12} резко уменьшается при смещении катушек в плоскости их витков, при некотором отношении a/D_2 принимает нулевое значение, после

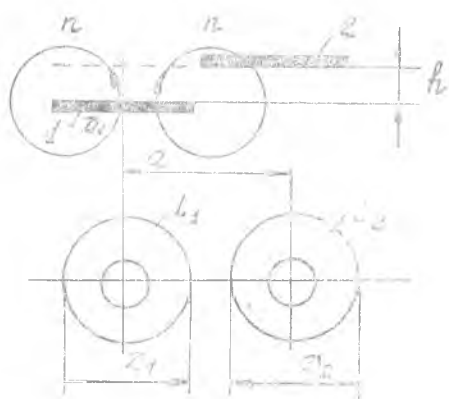


Рис. 6. Взаимное расположение двух (1, 2) плоских спиральных катушек индуктивности

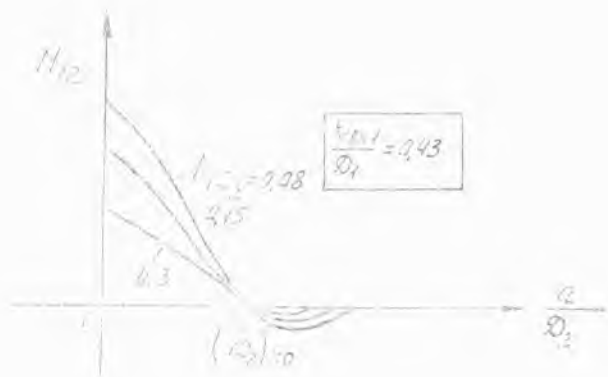


Рис. 7. Зависимость коэффициента взаимной индукции M_{12} между катушками от соотношения a/D_2

чего снова увеличивается, но с обратным знаком и, наконец, стремится к нулю при большом удалении катушек друг от друга. С увеличением расстояния h это проявляется меньше.

Эффект нулевой связи между катушками находит широкое применение при конструировании избирательных устройств на пленочных LC -элементах, позволяя прежде всего исключить экраны и обусловленные ими потери добротности и индуктивности. Очевидно, при относительно малых значениях a и h можно найти такое взаимное расположение двух катушек, при котором ток I_2 станет равным нулю. Теоретически условие $M_{12} = 0$ можно выполнить

не только для двух, но и для трех одинаковых катушек, расположенных в одной плоскости. При этом межосевые расстояния должны быть равны $a_{кр}$ (рис. 8). Однако одинаковое расстояние h можно получить лишь между двумя катушками, например, между L_1 и L_2 или L_2 и L_3 . Для третьей пары (L_1 и L_3) расстояние h окажется иным.

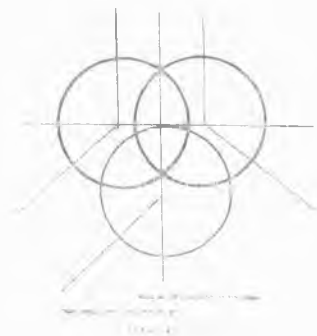


Рис. 8. Взаимное расположение трех катушек индуктивности

Примером использования трех плоских катушек индуктивности является балансный трансформатор для суммирования мощностей двух источников (рис. 9), в котором одна общая L_2 и две коммутируемые L_1 и L_3 катушки индуктивности.

Катушки индуктивности L_1 и L_3 связаны с общей L_2 и развязаны между собой. В реальных условиях,

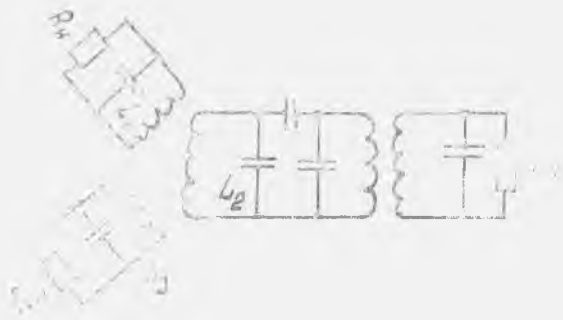


Рис. 9. Схема балансного модулятора

кроме индуктивной, возникает и емкостная связь между катушками, следовательно, катушки со значением $a_{кр}$ нельзя считать экранированными. Однако емкостную связь можно скомпенсировать индуктивной с другим знаком, несколько меняя значение a относительно $a_{кр}$ и тем самым приближаясь к условию $M_{12} = 0$.

При практическом конструировании LC -фильтров параметры катушек и коэффициенты связи между ними известны из электрического расчета. Для определения взаимного расположения катушек необходимо знать зависимости, аналогичные приведенным на рис. 7. Их получают экспериментально, перемещая подложки с изготовленными на них катушками с заданными параметрами, — это позволяет учесть также влияние емкостных связей. При компоновке следует иметь в виду, что практически индуктивной связью между катушками можно пренебречь при любом взаимном расположении, если расстояние между ними в 2 раза превышает внешний диаметр катушек.

Итак, для создания LC -фильтров (например, фильтров сосредоточенной селекции (ФСС)) в гибридном интегральном исполнении можно располагать плоские катушки индуктивности без экранов и в непосредственной близости друг от друга, что обеспечивает удобство компоновки ГИС в целом.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

А. Лабораторный макет представляет собой два взаимно подвижных столика, на которых с помощью кронштейнов закреплены две катушки индуктивности согласно рис. 6. Взаимное перемещение катушек выполняется с помощью микровинтов по осям X (a) и Y (b). Максимальное перемещение составляет 25 мм с ценой деления 0,01 мм. Схема измерения взаимной индуктивной связи между плоскими катушками показана на рис. 10.

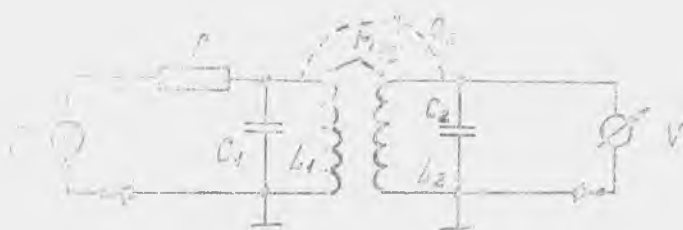


Рис. 10. Схема измерения взаимной связи между плоскими катушками ГИС: G — генератор высокой частоты; $R = 30 \dots 62$ кОм; M_{12} — взаимная индуктивная связь; $C_{\text{п}}$ — паразитная емкостная связь между катушками; V — вольтметр высокочастотного напряжения

Примечание. Экспериментальные исследования проводятся на плоских катушках с параметрами в K раз большими расчетных.

Б. Для исследования влияния металлической пластины (например, основания или крышки металлостеклянного корпуса) одну из катушек индуктивности закрывают плоским экраном, а величину индуктивности второй (подвижной) катушки индуктивности измеряют мостом для измерения индуктивности.

Примечание. При этом генератор высокочастотного напряжения G , вольтметр и конденсатор C_2 отключают, а катушку индуктивности L_2 подключают к измерительному мосту.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Рассчитать конструктивные размеры двух плечочных катушек индуктивности (варианты указаны в табл. 2).

Таблица 2

Варианты	$D_{\text{ш}}$	$D_{\text{пл}}$ мм	N	L_1 мГц	L_2 мкГ	Q	b мм	λ мм	Материал катушки и метод изготовл.
1		3		15	3,0	60			
2		2		20	2,0	70			
3		3		15	1,0	80			
4		3		30	0,8	80			
5		3		30	0,9	70			
6		"		20	1,5	60			
7		3		20	1,2	60			
8		3		10	4,0	70			

Обозначения: D_n — диаметр наружный, $D_{вн}$ — диаметр внутренний, N — число витков, L — величина индуктивности, Q — добротность, Δ — толщина витка, b — ширина витка.

2. Определить расстояние между осями соседних спиральных катушек индуктивности по допустимому коэффициенту взаимной индуктивности M_{12} .

Примечание. Расчеты по пп. 1 и 2 выполнять на ЭВМ «Электроника ДЗ-28» на основе прилагаемых программ.

3. Снять зависимость $L_2 = F(h)$ и $Q_2 = F(h)$. Определить реальные значения величины индуктивности и добротности для случая герметизации в металlostеклянный корпус (учесть толщину подложки, а также расстояние от поверхности подложки до крышки и основания корпуса).

4. Снять зависимость $U_{вых} = F(d/D_{н1})$ для плоских катушек индуктивности различного диаметра при $h \rightarrow 0$ ($\approx 0,01$ мм); для катушек L_1 и L_2 ($L_1 = L_2$); для катушек L_1 и L_3 ($L_1 \neq L_3$).

Определить параметры взаимного расположения катушек индуктивности при $M_{12} = 0$ и $M_{13} = 0$.

5. Составить таблицу экспериментальных данных и построить графики.

6. Сравнить теоретические и экспериментальные данные.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.

2. Конструкции пленочных катушек индуктивности и таблица с расчетными данными.

3. Схема исследования взаимной связи между плоскими катушками индуктивности.

4. Теоретические и экспериментальные данные (таблицы и графики).

5. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сравните пленочные катушки индуктивности различной конструкции.

2. Объясните влияние близко расположенной проводящей поверхности на параметры пленочной катушки индуктивности.

3. Объясните графики, построенные по экспериментальным данным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Ермольев Ю. П. и др. Конструкции и технология микросхем. — М.: Сов. радио, 1980. — 256 с.

Пьянков Б. Л. Конструирование микросхем частного применения. — Казань: КАИ, 1979. — 48 с.

Устройства, элементы и методы комплексной микроминиатюризации РЭА. — Казань: КАИ, 1979. — с. 59—61.

Составители: Василий Дмитриевич Дмитриев,
Михаил Алексеевич Леднев,
Татьяна Серафимовна Калугина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ В ГИС НА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Редактор Е. Д. Антипова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 4.02.88 г. Подписано в печать 16.03.88 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
Печать высокая. Гарнитура литературная.
Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6. Т. 300 экз. Заказ 291. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.