

6
A66

ХАРЬКОВСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Р. И. КИРВАЙТИС

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
ЗАДЕРЖКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

05.290 - Теоретические основы радиотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ХАРЬКОВ - 1971

ХАРЬКОВСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

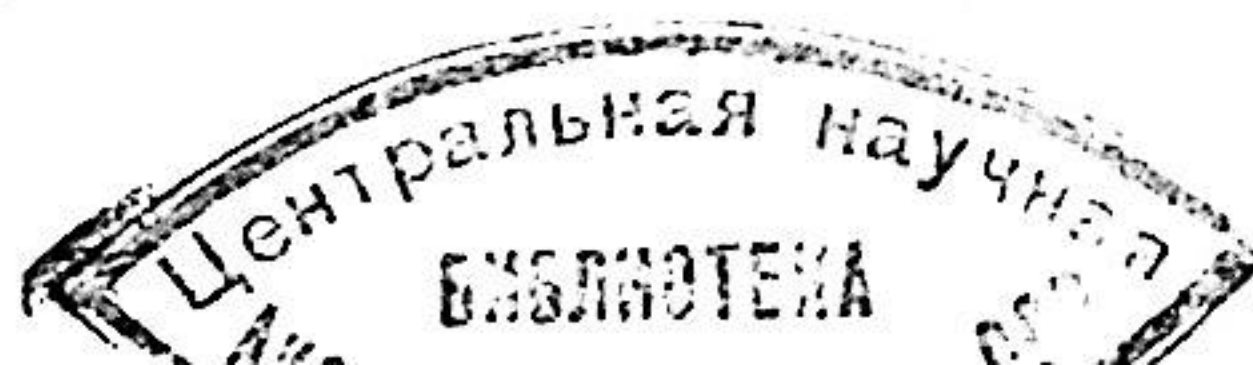
Р. И. КИГБАЙТИС

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ
ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

05.290 – Теоретические основы
радиотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Х а р ь к о в
1 9 7 1



466
Работа выполнена на кафедре технологии радиоаппаратуры
Вильнюсского Инженерно-строительного института.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
З.А.ВАЙНОРИС.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент В.Н.МАНЖОС,
кандидат физико-математических наук, доцент Б.М.БУЛГАКОВ.

Ведущее предприятие – Радиотехнический институт, г.Москва

Автореферат разослан "10/10" 1971 г.

Защита диссертации состоится 6 ноября 1972 г. на засе-
дании Ученого Совета Харьковского Института радиоэлектроники
по адресу: Харьков, ГСП-218, проспект Ленина № 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

доцент Е.Г.ПРОШКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ
ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Ответственный за выпуск С.С.Штарас

Отпечатано на ротационной ВИСИ.
Заказ №288. Тираж 200 экз. ЛВ 11692

В современной радиоаппаратуре для задержки электрических
сигналов широко применяются различные линии задержки (ЛЗ).Сре-
ди них значительное место занимают спиральные линии задержки.
Разработку и производство спиральных линий задержки главным
образом стимулировало развитие радиолокационной и электронно-
вычислительной техники. Наряду с этим спиральные линии задерж-
ки широко применяются в импульсной и измерительной технике,
электронной автоматике, аппаратуре связи и телевидения.

Нейболее простая спиральная линия образуется сворачива-
нием проводника по винтовой линии. Добавляя к спирали сплошной
или анизотропно проводящий экран, изменяя конфигурацию ее по-
перечного сечения, применяя однородный или слоистый диэлектри-
ки, получают различные конструктивные варианты спиральных ли-
ний задержки с различными электрическими характеристиками.
Часть таких линий в большей или меньшей степени рассмотрена в
литературе, а часть еще подлежит исследованию. В реферируемой
работе проводится расчет основных электрических характеристик
спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения с
продольно проводящими и сплошными экранами в слоистом диэлек-
трике с различными значениями диэлектрических и магнитных про-
ницаемостей, анализируются свойства таких линий и приводятся
результаты их экспериментального исследования.

Диссертация состоит из введений, шести глав, заключения,
списка литературы и трех приложений.

I

В первой обзорной главе обсуждаются характеристики и па-
раметры линий задержки, рассматриваются области применения
спиральных ЛЗ и указываются требования, предъявляемые к харак-
теристикам линий. Проводится классификация конструкций опи-
ральных линий задержки. Рассматриваются методы расчета опи-
ральных замедляющих систем и способы измерения параметров опи-
ральных линий. На основе проведенного обзора литературы форму-

лируется задача работы.

Из обзора литературы следует, что спиральные линии задержки широко применяются во многих областях техники. В зависимости от области применения на первый план выдвигаются различные требования к характеристикам и параметрам линий. Так, например, требуются недиспергирующие линии с фиксированным, а также с дискретно или плавно регулируемым временем задержки и линии с определенной зависимостью времени задержки от частоты.

Из приведенных в литературе данных о конструкциях линий задержки следует, что в качестве малодиспергирующих ЛЗ наиболее широко применяются линии с внутренним продольно проводящим или внешним сплошным экраном. Однако такие линии обладают дисперсией времени задержки, которая может быть только в некоторой степени уменьшена выбором конструктивных размеров линии. Для уменьшения дисперсии в ряде конструкций применяют коррекцию, однако в большинстве случаев сосредоточенную, которой свойственны недостатки линий с сосредоточенными постоянными. В большинстве источников описаны конструкции линий задержки круглого поперечного сечения и очень редко встречается описание ЛЗ прямоугольного поперечного сечения, хотя эти линии более технологичны, когда в качестве диэлектрика применяется радиокерамика или ферриты.

Из обзора методов расчета спиральных замедляющих систем следует, что при расчете спиральных линий задержки круглого поперечного сечения, работающих в полосе частот до нескольких сот мегагерц, можно пользоваться моделью спирально проводящего цилиндра. Для анализа линий задержки прямоугольного поперечного сечения в работе Я.Д.Ширмана и З.А.Вайнориса предложена модель анизотропно проводящих плоскостей. В этой работе получен коэффициент замедления линии задержки с внутренним продольно проводящим экраном в однородном диэлектрике. Волновое сопротивление и затухание линий не рассчитано. Также не рассчитано замедление, волновое сопротивление и затухание спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения более сложных конструкций, в том числе при наличии сплошного и продольно проводящего экранов и нескольких слоев диэлектрика с различными значениями диэлектрических и магнитных проницаемостей. Расчет затухания спиральных линий задержки круглого поперечного сечения проведен с уче-

том только потерь в металле.

В работах, посвященных анализу спиральных линий задержки, редко приводятся экспериментальные частотные зависимости времени задержки и затухания и совсем не пригодятся частотные зависимости волнового сопротивления. Это свидетельствует о том, что методика измерения основных электрических характеристик спиральных линий задержки в недостаточной степени разработана.

В соответствии с вышеизложенным в реферируемой работе ставились следующие задачи.

1. Провести расчет частотных зависимостей коэффициента замедления и проанализировать свойства различных конструкций спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения при наличии сплошного и продольно проводящего экранов и нескольких слоев диэлектрика с различными значениями диэлектрических и магнитных проницаемостей.

2. Рассчитать частотные зависимости погонных параметров и волнового сопротивления таких линий.

3. Разработать методику и провести расчет с учетом потерь в металле и диэлектрике частотных зависимостей коэффициента затухания спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения в слоистом диэлектрике при наличии сплошного и продольно проводящего экранов.

4. Разработать методику измерения основных частотных характеристик спиральных линий задержки.

5. Провести экспериментальное исследование спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения с продольно проводящими и сплошными экранами в слоистом диэлектрике.

6. Определить конструкции спиральных линий задержки, перспективные для отдельных областей применения, и вывести инженерные формулы для их расчета.

II

Во второй главе проводится расчет частотных зависимостей коэффициента замедления, волнового сопротивления, коэффициента затухания и анализ свойств спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения с продольно проводящими экранами в однородном диэлектрике.

При расчете частотных зависимостей коэффициента замедления линий прямоугольного поперечного сечения с высотой спирали значительно большей ее ширины использована модель анизотропно проводящих плоскостей. Дисперсионное уравнение модели получено, решая систему уравнений, описывающих граничные условия электромагнитного поля на анизотропно проводящих плоскостях, моделирующих спираль и продольно проводящие экраны. Таким путем для одноэкранных линий с внутренними и внешними продольно проводящими экранами, а также двухэкранный линии с продольно проводящими экранами получены следующие выражения коэффициента замедления:

$$\beta = \text{ctg} \gamma \sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \text{ctg} \gamma kb}{1 + \text{ctg} \gamma ka}} \quad (1)$$

$$\beta = \text{ctg} \gamma \sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{\text{th} \gamma ka + \text{ctg} \gamma kd}{1 + \text{ctg} \gamma ka}} \quad (2)$$

$$\beta = \text{ctg} \gamma \sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{\text{ctg} \gamma kb + \text{ctg} \gamma kd}{1 + \text{ctg} \gamma ka}} \quad (3)$$

где γ – угол намотки спирали, $2a$ – ширина спирали, b и d – расстояния от спирали до внутреннего и внешнего экранов соответственно, $k = \omega/v_{\phi}$, v_{ϕ} – скорость замедленной волны вдоль оси спирали.

Расчет волнового сопротивления этих линий проводился, применяя к модели анизотропно проводящих плоскостей методику определения погонных параметров спиральных линий круглого поперечного сечения, описанную в работах В.П.Сазонова. При этом использовались определения погонных параметров, принятые для статических полей и стационарных токов. Этими определениями можно пользоваться, когда в системе распространяется волна, близкая к поперечной, что всегда выполняется в случае спиральных линий задержки. При определении погонных параметров линии из модели бесконечных плоскостей вырезалась полоска, ширина которой равняется высоте спирали h . Полученные выражения волнового сопротивления одноэкранных линий с внутренними и внешними продольно проводящими экранами и двухэкранный линии имеют следующий вид:

$$\rho = \frac{\text{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon} \frac{1}{(1 + \text{ctg} \gamma ka)(1 + \text{ctg} \gamma kb)}} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\text{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon} \frac{1}{(1 + \text{ctg} \gamma ka)(\text{th} \gamma ka + \text{ctg} \gamma kd)}} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\text{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon} \frac{1}{(1 + \text{ctg} \gamma ka)(\text{ctg} \gamma kb + \text{ctg} \gamma kd)}} \quad (6)$$

Принятая модель анизотропно проводящих плоскостей используется и при расчете коэффициента затухания. Составляя систему уравнений из граничных условий электромагнитного поля на анизотропно проводящих плоскостях, потери в металле учитываются приближенными граничными условиями М.А.Леонтовича, а потери в диэлектрике – введением комплексной диэлектрической проницаемости. При условии, что возмущение электромагнитного поля за счет потерь в линии небольшое, волновое число k представляется в виде суммы действительного k_0 и комплексной поправки Δk . Дисперсионное уравнение раскладывается по степеням Δk в окрестности точки k_0 , ограничиваясь при этом членами первого порядка малости. В результате получено выражение для комплексной поправки к волновому числу, а выделяя из нее действительную и мнимую части, – выражения обусловленной потерями поправки к фазовой постоянной и коэффициента затухания.

Из анализа полученных выражений следует, что спиральные линии с продольно проводящими экранами обладают дисперсией времени задержки. Только линия с внутренним продольно проводящим экраном, расположенным посередине спирали, имеет постоянное в полосе частот время задержки. Однако коэффициент замедления такой линии небольшой – он равняется геометрическому замедлению спирали.

Электрические характеристики спиральной линии с внешним продольно проводящим экраном практически совпадают с характеристиками линий с внутренним экраном. Коэффициент замедления двухэкранный линии в области низких частот в $\sqrt{2}$ раза превышает коэффициент замедления одноэкранных линий. В области высоких частот замедление одноэкранных и двухэкранный линий одинаково. Следовательно, двухэкранный линии с продольно проводящими экра-

нами является в большей степени диспергирующей, чем одноэкранные линии.

Волновое сопротивление спиральных линий задержки с продольно проводящими экранами уменьшается с повышением частоты. Это обусловлено тем, что с увеличением частоты уменьшается погонная индуктивность линии и увеличивается ее погонная емкость. Ход частотной зависимости волнового сопротивления одноэкранной линии почти не зависит от положения экрана. Волновое сопротивление двухэкранной линии с приближением экрана к спирали в большей степени зависит от частоты.

Затухание в линиях, в которых применяются диэлектрики с $\lg \delta \leq 10^{-3}$, в полосе частот до 50-100 МГц практически определяется только потерями в металле. Это означает, что в линиях рассматриваемой конструкции нет необходимости применять диэлектрики с $\lg \delta < 10^{-3}$. Однако при больших значениях $\lg \delta$ потери в диэлектрике существенно возрастают и могут превышать потери в металле. В этом случае при расчете затухания их необходимо учитывать. При одинаковом времени задержки в полосе частот до 10-20 МГц затухание линий с различными диэлектрическими проницаемостями диэлектрика отличается незначительно. В области более высоких частот затухание больше в линиях с большим ϵ_r диэлектрика. При постоянной длине линии затухание возрастает с увеличением ϵ_r диэлектрика главным образом за счет увеличения потерь в металле. Из анализа частотных зависимостей затухания при различных конструктивных размерах линии следует, что затухание уменьшается с увеличением ширины спирали. Если при этом не изменяется отношение a/b , время задержки линии не меняется. Затухание возрастает с приближением продольно проводящего экрана к спирали, однако при этом увеличивается и время задержки линии в области низких частот.

Расчет обусловленной потерями поправки к фазовой постоянной показал, что частотные зависимости коэффициента замедления, рассчитанные без учета потерь в линии, отличаются не более чем на 1% от этих зависимостей, полученных с учетом потерь. Большее расхождение наблюдается только в области самых низких частот.

Используя полученные частотные характеристики ЛЗ с продольно проводящими экранами, при помощи ЭЦВМ рассчитана форма

импульсного сигнала на выходе этих линий.

III

В третьей главе проводится расчет и рассматриваются свойства спиральной линии задержки с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экранами в однородном диэлектрике.

При расчете коэффициента замедления и волнового сопротивления этой линии сплошной экран моделируется идеально проводящей по всем направлениям плоскостью, а продольно проводящий экран и спираль, как и прежде, анизотропно проводящими плоскостями. Полученные в результате расчета выражения коэффициента замедления и волнового сопротивления имеют следующий вид:

$$\beta = \operatorname{ctg} \gamma \sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{\operatorname{cth} kb + \operatorname{cth} kd}{\operatorname{cth} ka + \operatorname{cth} kd}}, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \frac{1}{(\operatorname{cth} ka + \operatorname{cth} kd)(\operatorname{cth} kb + \operatorname{cth} kd)}}. \quad (8)$$

При расчете коэффициента затухания и обусловленной потерями поправки к фазовой постоянной использовалась та же модель линии, как и при расчете коэффициента замедления.

Из анализа полученных выражений следует, что используя дополнительный внешний сплошной экран, можно произвести коррекцию частотной зависимости коэффициента замедления линии с внутренним продольно проводящим экраном. В определенной полосе частот, начиная от самых низких, коэффициент замедления линии с комбинированным экраном практически не меняется с частотой. При этом замедление линии в 2-3 раза превышает геометрическое замедление спирали. Коэффициент замедления больше при большей ширине спирали, меньшем расстоянии от спирали до продольно проводящего экрана и большем расстоянии от спирали до сплошного экрана. Однако с увеличением расстояния от спирали до внешнего экрана коэффициент замедления в большей степени зависит от частоты.

Преимуществом линии задержки с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экраном является то, что ее волновое сопротивление практически постоянно в полосе частот, в которой коэффициент замедления мало меняется.

Из анализа частотных зависимостей коэффициента затухания

этой линии следует, что сплошной экран, удаленный от спирали на расстоянии больше 1-2 мм, практически не увеличивает потерь в линии. Потери в линии существенно возрастают, когда расстояние между спиралью и сплошным экраном меньше 0,5-0,2 мм. Потери за счет внешнего сплошного экрана увеличиваются с увеличением ϵ_r диэлектрика.

При выборе конструктивных размеров линии с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экранами необходимо учитывать как частотную зависимость затухания, так и частотную зависимость коэффициента замедления. В каждом конкретном случае максимальное расстояние до внешнего сплошного экрана ограничивается допустимым отклонением коэффициента замедления на высоких частотах от постоянного значения.

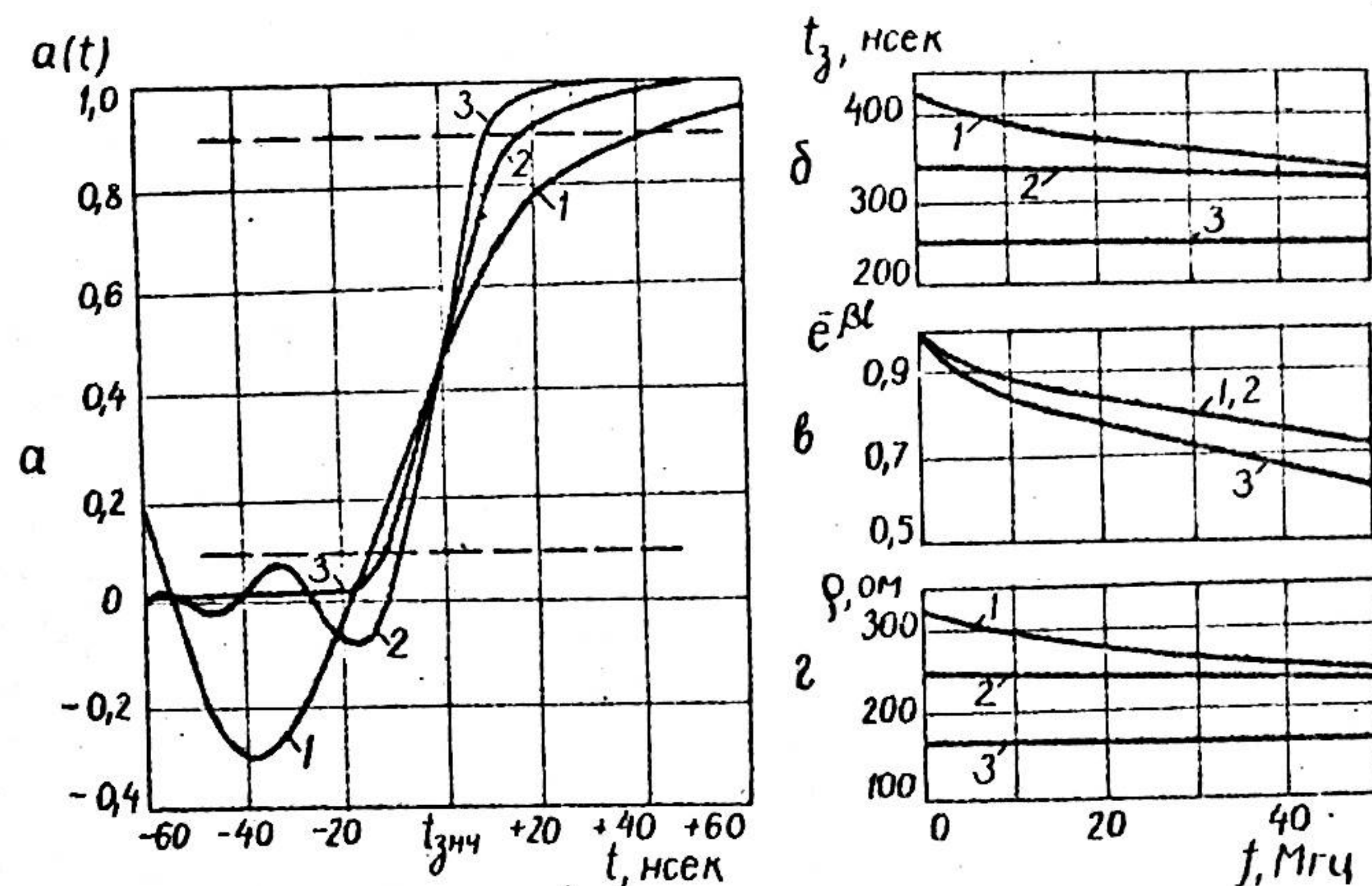


Рис. 1. Передний фронт импульса на выходе линии /а/, частотные зависимости ее времени задержки /б/, волнового сопротивления /г/ и ЛЧХ согласованной линии /в/ /а = 1 мм, b = 0, 1 мм, lg Y = 0, 006, l = 0, 23 м, $\epsilon_r = 1$, $\tau_{фвх} = 9$ нсек/:
1 - внешний экран отсутствует, 2 - d = 2 мм, 3 - d = 0, 5 мм.

На рис. 1 показана рассчитанная на ЭЦВМ форма переднего фронта импульса на выходе линии без внешнего сплошного экрана (кривая 1) и при трех различных расстояниях до экрана (кривые

2, 3, 4). На том же рисунке показаны частотные характеристики этих линий, которые вводились в ЭЦВМ при расчете формы импульса.

IV

В четвертой главе проводится расчет и анализ свойств спиральной линии задержки с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экранами, когда между спиралью и экранами, а также между продольно проводящими экранами имеется произвольное число слоев диэлектрика с различными значениями диэлектрических и магнитных проницаемостей. Модель такой линии показана на рис. 2.

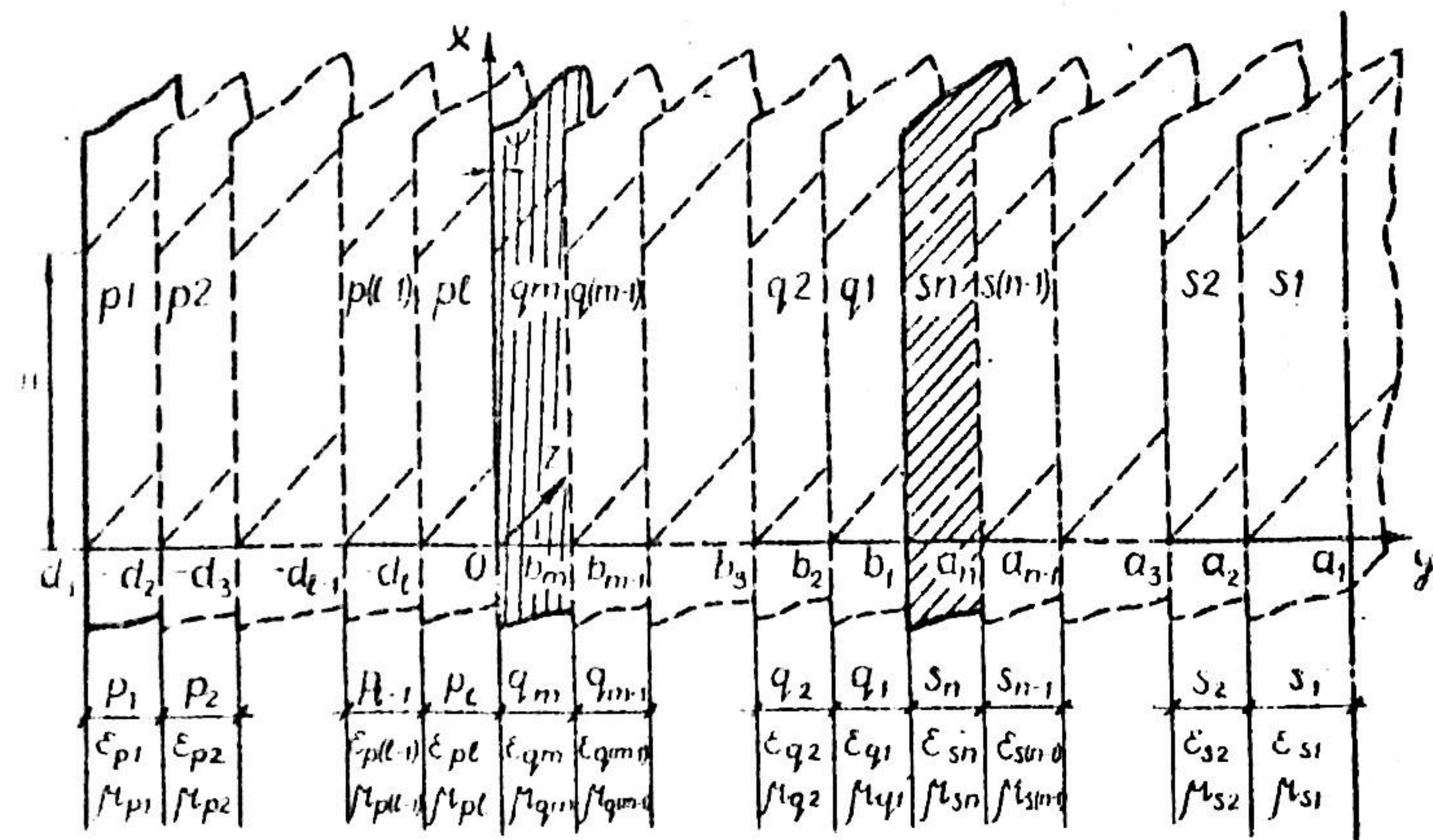


Рис. 2. Модель спиральной линии задержки.

Принятая модель позволяет провести анализ большого количества различных линий, отличающихся числом и толщиной слоев диэлектрика, а также значениями ϵ_r и μ_r . Модель позволяет учесть зазоры между проводником спирали и диэлектриком, между диэлектриком и экранами, а также между слоями диэлектрика. Устремляя в данной модели расстояние до внешнего металлического экрана в бесконечность, получим модель линии с внутренним продольно проводящим экраном в слоистом диэлектрике.

Полученные в результате анализа модели выражения для расчета частотных зависимостей коэффициента замедления и волнового сопротивления имеют следующий вид:

$$\beta = \text{ctg} \gamma \sqrt{\frac{G}{D}}, \quad \rho = \frac{\text{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{1}{GD}}, \quad (9)$$

$$(10)$$

где

$$G = \epsilon_{qmr} \frac{1 + e^{-2kq_m} Q_{qm}}{1 - e^{-2kq_m} Q_{qm}} + \epsilon_{plr} \frac{1 + e^{-2kp_l} Q_{pl}}{1 - e^{-2kp_l} Q_{pl}},$$

$$D = \frac{1}{\mu_{qmr}} \frac{1 + e^{-2kq_m} P_{qm}}{1 - e^{-2kq_m} P_{qm}} + \frac{1}{\mu_{plr}} \frac{1 + e^{-2kp_l} P_{pl}}{1 - e^{-2kp_l} P_{pl}},$$

$$Q_{vi} = \frac{\epsilon_{v(i-1)} - \epsilon_{vi} + (\epsilon_{v(i-1)} + \epsilon_{vi}) e^{-2kv_{i-1}} Q_{v(i-1)}}{\epsilon_{v(i-1)} + \epsilon_{vi} + (\epsilon_{v(i-1)} - \epsilon_{vi}) e^{-2kv_{i-1}} Q_{v(i-1)}},$$

$$P_{vi} = \frac{\mu_{vi} - \mu_{v(i-1)} + (\mu_{vi} + \mu_{v(i-1)}) e^{-2kv_{i-1}} P_{v(i-1)}}{\mu_{vi} + \mu_{v(i-1)} + (\mu_{vi} - \mu_{v(i-1)}) e^{-2kv_{i-1}} P_{v(i-1)}};$$

когда $v = q, \quad i = 2, 3, 4, \dots, m-1, m;$

$v = p, \quad i = 2, 3, 4, \dots, l-1, l;$

$v = s, \quad i = 2, 3, 4, \dots, n-1, n.$

$$Q_{q1} = Q_{p1} = P_{p1} = P_{s1} = 1,$$

$$P_{q1} = \frac{\mu_{q1} - \mu_{sn} + (\mu_{q1} + \mu_{sn}) e^{-2ks_n} P_{sn}}{\mu_{q1} + \mu_{sn} + (\mu_{q1} - \mu_{sn}) e^{-2ks_n} P_{sn}}.$$

В области низких частот, когда $ka_i \ll 1$ и $kd_i \ll 1$, формулы (9) и (10) приводятся к следующему виду:

$$\beta_{нч} = \text{ctg} \gamma \sqrt{\frac{G_0}{D_0}}, \quad \rho_{нч} = \frac{\text{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{1}{G_0 D_0}},$$

где

$$G_0 = \frac{1}{q_1/\epsilon_{q1r} + q_2/\epsilon_{q2r} + \dots + q_m/\epsilon_{qmr}} + \frac{1}{p_1/\epsilon_{p1r} + p_2/\epsilon_{p2r} + \dots + p_l/\epsilon_{plr}},$$

$$D_0 = \frac{1}{\mu_{s1r} s_1 + \mu_{s2r} s_2 + \dots + \mu_{snr} s_n + \mu_{q1r} q_1 + \dots + \mu_{qmr} q_m} + \frac{1}{\mu_{p1r} p_1 + \mu_{p2r} p_2 + \dots + \mu_{plr} p_l}.$$

В области высоких частот, когда $kb_m \gg 1$ и $kd_l \gg 1$,

$$\beta_{вч} = \text{ctg} \gamma \sqrt{\frac{\epsilon_{qmr} + \epsilon_{plr}}{\frac{1}{\mu_{qmr}} + \frac{1}{\mu_{plr}}}}, \quad \rho_{вч} = \frac{\text{ctg} \gamma}{2kh} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{1}{(\epsilon_{qmr} + \epsilon_{plr}) \left(\frac{1}{\mu_{qmr}} + \frac{1}{\mu_{plr}} \right)}}.$$

Из анализа полученных выражений следует, что замедление спиральных линий задержки в слоистом диэлектрике не зависит от величины диэлектрической проницаемости диэлектрика между продольно проводящими экранами. В области низких частот замедление линии с внутренним продольно проводящим экраном не зависит от параметров расположенного поверх спирали диэлектрика. В области высоких частот замедление линий в слоистом диэлектрике определяется только параметрами самых близких к спирали слоев диэлектрика.

Расчет частотных зависимостей коэффициента замедления и волнового сопротивления по формулам (9) и (10) проводился на ЭЦВМ. Составленная по этим выражениям программа позволила рассчитать большое количество различных конструктивных вариантов линий. Анализ полученных частотных зависимостей коэффициента замедления показал, что линии, содержащие внутренний продольно проводящий экран, со спиралью, намотанной на диэлектрические пластины с $\epsilon_r > 1$ или $\mu_r > 1$, являются диспергирующими даже в том случае, когда продольно проводящий экран расположен посередине спирали. Дисперсия таких линий увеличивается с увеличением ϵ_r и μ_r диэлектрических пластинок. Дисперсию можно уменьшить, обжимая линию пластинами с таким же значением ϵ_r и μ_r , или полностью устранить, помещая линию во внешний сплошной экран.

Как уже отмечалось, коэффициент замедления линии с внутренним продольно проводящим экраном со спиралью, намотанной на пластины с $\epsilon_r > 1$ или $\mu_r > 1$, уменьшается с увеличением частоты.

Коэффициент замедления линии, обжатой пластинами с ϵ_r или μ_r , большим ϵ_r и μ_r пластинок, на которые намотана спираль, увеличивается с повышением частоты. Варьируя толщиной пластинок и значениями их диэлектрических и магнитных проницаемостей, можно получить большой перепад коэффициента замедления в необходимой полосе частот. Сказанное иллюстрируется кривыми на рис. 3.

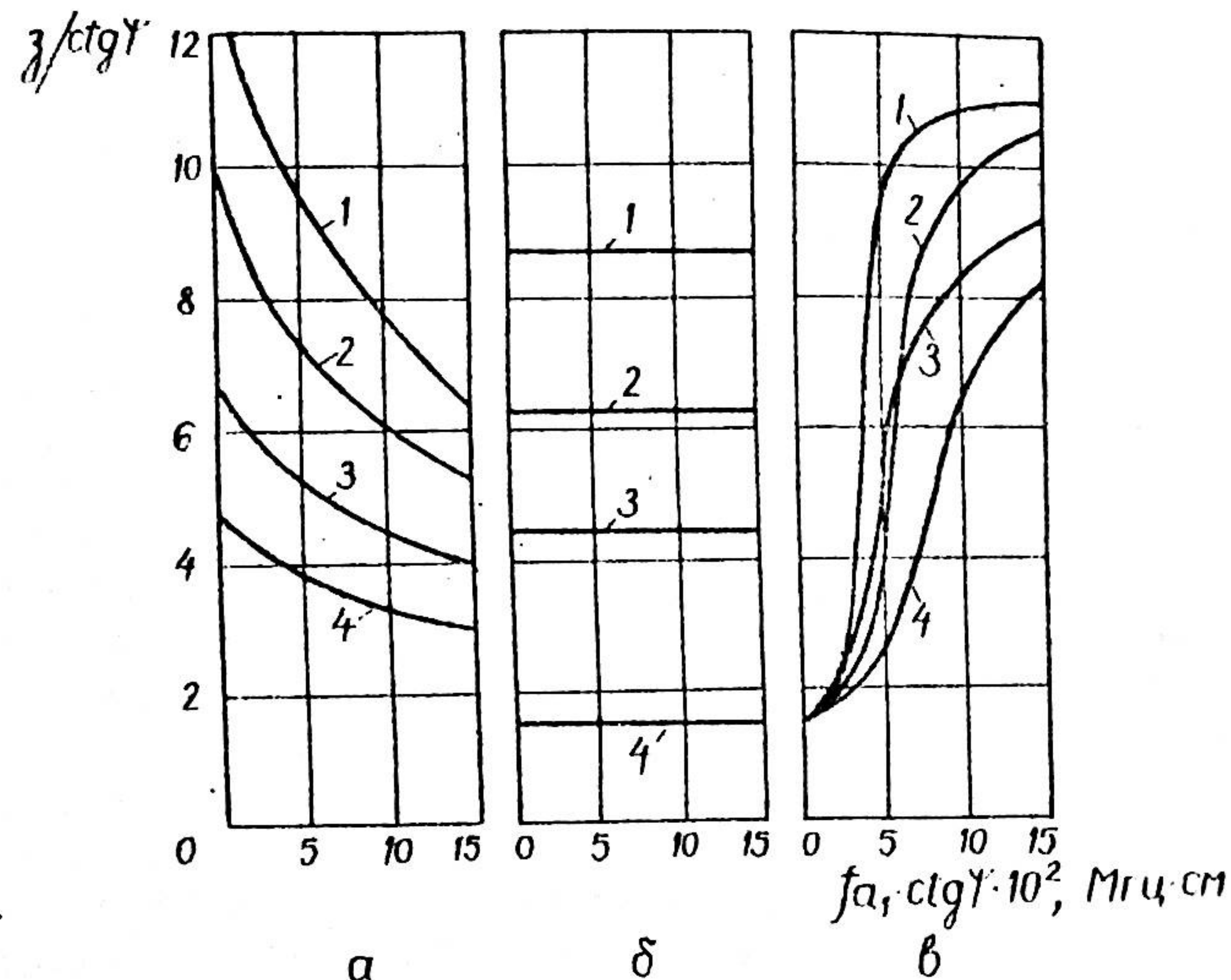


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента замедления линий с внутренними продольно проводящими экранами: а - с намотанной на диэлектрические пластины спиралью, б - обжатой диэлектрическими пластинами в сплошном экране, в - обжатой диэлектрическими пластинами

а - $\epsilon_r = 1$: 1, 2 - $\epsilon_{gr} = 20$, 3, 4 - $\epsilon_{gr} = 2,25$; 1, 4 - $a_1/b_1 = 10$, 2 - $a_1/b_1 = 5$, 3 - $a_1/b_1 = 20$; б - $a_1/b_1 = 1$, $a_1/d_1 = 1$: 1 - $\epsilon_{gr} = \epsilon_{qr} = 80$, 2 - $\epsilon_{gr} = \epsilon_{qr} = 40$, 3 - $\epsilon_{gr} = \epsilon_{qr} = 20$, 4 - $\epsilon_{gr} = \epsilon_{qr} = 2,25$; в - $a_1/b_1 = 1$, $\epsilon_{gr} = 1$, $\epsilon_{qr} = 2,25$: 1, 2 - $\epsilon_{pr} = 250$, 3, 4 - $\epsilon_{pr} = 150$; 1, 3 - $a_1/\rho_2 = 1$, 2, 4 - $a_1/\rho_2 = 2$.

Анализ частотных зависимостей коэффициента замедления также показал, что существенное влияние на характеристики линий оказывает даже незначительный воздушный зазор между спиралью и диэлектриком с большим ϵ_r или μ_r .

Расчет затухания проводился для линии с внутренними продольно проводящим и внешним сплошным экраном, когда между спиралью и внешним сплошным экраном имеются два слоя диэлектрика с различными значениями диэлектрических проницаемостей и тангенсов угла диэлектрических потерь, а между спиралью и продольно проводящим экраном - один слой диэлектрика. Анализ полученных частотных зависимостей коэффициента затухания показал, что затухание спиральных линий задержки в слоистом диэлектрике можно определить области, границы которой получаем в результате анализа линий в однородном диэлектрике. Если диэлектрическая проницаемость диэлектрика возле внешнего сплошного экрана меньше диэлектрической проницаемости диэлектрика у спирали, сплошной экран в меньшей степени, чем в случае однородного диэлектрика, влияет на затухание в линии.

у

В пятой главе описана методика снятия частотных характеристик спиральных линий задержки, в том числе частотных зависимостей времени задержки, волнового сопротивления и затухания.

Для получения частотных зависимостей времени задержки в широкой полосе частот при помощи стандартной лабораторной радиоизмерительной аппаратуры рекомендуется использовать метод ж-точек. Измерение является особенно наглядным, если в качестве генератора высокочастотного напряжения применяется измеритель частотных характеристик. Показано, что погрешность измерения по этому методу не превышает 1% ниже 10-15 Мгц и 0,2-0,5 % на более высоких частотах.

Описан разработанный макет измерителя группового времени задержки, действующий по методу Найквиста, согласно которому групповое время определяется как время задержки огибающей модулированного колебания. Измеритель предназначен для снятия частотных характеристик группового времени задержки по точкам в полосе частот от 0,1 до 40 Мгц в интервале времен до 100 мксен. В измерителе применяется амплитудная модуляция высокочастотного сигнала гармоническим сигналом частотой 10 кгц. Для увеличения точности измерения времени задержки при измерении фазы частоты модулирующего сигнала умножается в 10 раз. Погрешность измерения

ния времени задержки при затухании в исследуемой ЛЗ меньше 10 дБ составила $0,002\% \pm 6$ нсек.

Частотные зависимости волнового сопротивления и затухания спиральных линий задержки от самых низких частот до 50 - 100 МГц предлагается определять по измеренным экстремальным значениям входного сопротивления линии в режимах короткого замыкания и холостого хода. Приведена блок-схема измерения, в которой используется стандартная лабораторная радиоизмерительная аппаратура. Определена случайная относительная погрешность измерения.

VI

В шестой главе приводятся результаты экспериментального исследования спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения.

При экспериментальном исследовании макетов спиральных линий задержки ставилась задача определить, насколько полученные для моделей линий расчетные частотные зависимости времени задержки, волнового сопротивления и затухания соответствуют характеристикам реальных линий, и рассмотреть конструктивные особенности спиральных ЛЗ прямоугольного поперечного сечения с целью выявить перспективные в определенных применениях конструкции. Экспериментально исследовались ЛЗ двух типов: линии в диэлектрике с небольшим ϵ_r и линии, в которых используются радиокаерамики с $\epsilon_r = 20, 80$ и 150.

Экспериментальные частотные зависимости времени задержки спиральных линий с небольшим ϵ_r диэлектриков хорошо совпали с расчетными характеристиками как для макетов линий с внутренними продольно проводящими экранами, так и для этих макетов во внешних сплошных экранах. При исследовании спиральных ЛЗ с применением радиокаерамик сравнивали экспериментальные и расчетные частотные характеристики времени задержки линий, содержащих внутренние продольно проводящие экраны, с намотанной на керамические пластины спиралью, обжатой керамическими пластинами линий, а также этих линий во внешнем сплошном экране. Экспериментальные данные хорошо совпали с результатами расчета времени задержки, если при расчете учитывался зазор между проводником спирали и керамическими пластинами. Путем экспериментального исследования показано, что характеристики линий с прорезью во

внешнем сплошном экране отличаются от характеристик линий в сплошном экране только на частотах ниже 5-7 МГц. Поэтому линии с прорезью во внешнем экране могут применяться для плавнорегулируемой задержки радиоимпульсов без искажения их формы.

Из сравнения экспериментальных и расчетных частотных зависимостей волнового сопротивления спиральных ЛЗ следует, что использованная методика расчета позволяет не только определить характер изменения волнового сопротивления в полосе частот, но и с небольшой погрешностью установить его абсолютное значение. Экспериментальные данные подтвердили сделанный при анализе расчетных кривых вывод, что волновое сопротивление линии во внешнем сплошном экране в наименьшей степени меняется с частотой.

Исследуя затухание спиральных ЛЗ показано, что при одинаковом времени задержки потери в линии со спиралью, намотанной тонким неизолированным проводом с шагом, меньше чем в линии, в которой спираль намотана толстым изолированным проводом виток к витку. Экспериментальное исследование линий с внешним сплошным экраном показало, что при расстоянии от спирали до экрана 2 мм сплошной экран практически не увеличивает потерь в линии. Ход экспериментальных частотных характеристик затухания линий со спиралью, намотанной на керамические пластины, и линий, обжатых керамическими пластинами, хорошо согласуется с результатами проведенных в четвертой главе расчетов.

Экспериментальное исследование и проведенный расчет различных конструкций спиральных линий прямоугольного поперечного сечения показали, что для задержки видеоимпульсов следует применять линию с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экранами. Для задержки радиоимпульсов кроме этих линий могут применяться линии с прорезью во внешнем сплошном экране и обжатые керамическими пластинами линии с внутренним продольно проводящим экраном.

С учетом этих рекомендаций, используя результаты расчетов и экспериментального исследования, в ведущем предприятии были разработаны и внедряются в производство конструкции трех линий для задержки радиоимпульсов, в том числе обжатой керамическими пластинами линии с внутренним продольно проводящим экраном, линии со спиралью, намотанной на керамические пластины, содержащей внутренний продольно проводящий экран и внешний сплошной экран

с прорезью, а также обжатой керамическими пластинами линии с внутренним продольно проводящим экраном и внешним сплошным экраном с прорезью. В первых двух конструкциях время задержки изменяется плавно, третья линия является многоотводной ЛЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами рефериремой работы можно считать следующее.

1. Пользуясь моделью анизотропно и изотропно проводящих плоскостей, проведен анализ спиральной линии задержки прямоугольного поперечного сечения с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экранами, когда между спиралью и экранами имеется произвольное число слоев диэлектрика с различными значениями диэлектрических и магнитных проницаемостей. Формула для расчета коэффициента замедления такой линии приведена к удобному для расчета на ЭЦВМ виду. При помощи этой формулы можно анализировать большое количество различных конструктивных вариантов линий, в том числе линий, параметры диэлектрика которых меняются вдоль оси, перпендикулярной плоскости симметрии спирали.

2. Методика расчета волнового сопротивления спиральных замедляющих систем круглого поперечного сечения применена при определении волнового сопротивления спиральных линий задержки прямоугольного поперечного сечения. Получены формулы для расчета частотных зависимостей погонных параметров и волнового сопротивления спиральной линии задержки с произвольным количеством слоев диэлектрика при наличии внутреннего продольно проводящего и внешнего сплошного экранов.

3. Разработана методика расчета затухания спиральных линий задержки с учетом потерь в металле и в диэлектрике. При этом учтены потери как в спиральном проводнике, так и в продольно проводящем и сплошном экранах. Получены формулы для расчета частотной зависимости затухания и обусловленной потерями фазовой поправки спиральной линии задержки с внутренним продольно проводящим и внешним сплошным экранами в слоистом диэлектрике с различными значениями диэлектрических проницаемостей и тангенсов угла диэлектрических потерь.

4. Проведено экспериментальное исследование спиральных

линий задержки прямоугольного поперечного сечения при наличии внутреннего продольно проводящего и внешнего сплошного экранов, когда в качестве диэлектрика применяются материалы с небольшим значением диэлектрической проницаемости, а также радиокерамики с ϵ_r в пределах 20-150. Результаты экспериментального исследования показали, что модель, принятая при расчете частотных зависимостей коэффициента замедления, волнового сопротивления и затухания, хорошо отражает свойства реальных линий. Хорошее соответствие экспериментальных и расчетных характеристик показывает, что пользуясь полученными формулами можно решать вопросы оптимизации конструкций этих линий.

5. Путем анализа полученных формул и данных экспериментального исследования показано, что для задержки видеоимпульсов целесообразно применять линии с внутренними продольно проводящими и внешними сплошными экранами. Для задержки радиоимпульсов могут также использоваться линии с прорезью во внешнем экране и обжатые диэлектрическими пластинами линии с внутренними продольно проводящими экранами.

6. Получены инженерные формулы для расчета времени задержки и волнового сопротивления на самых низких и высоких частотах 18-ти конструктивных вариантов ЛЗ, учитывающих особенности линий с применением керамики и ферритов: различные значения ϵ_r и μ_r отдельных слоев диэлектрика, возможные зазоры между спиралью и диэлектриком, а также между диэлектриком и экранами.

7. Разработана методика измерения основных характеристик спиральных линий задержки, в том числе частотных зависимостей времени задержки, волнового сопротивления и затухания.

х х
х

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Два метода измерения времени задержки. "Радиоэлектроника", Доклады научно-технической конференции, Вильнюс, 1966, (совместно с З.А.Вайнорис и К.Ю.Мацейка).

2. Свойства плоской спиральной линии задержки со слоистым диэлектриком. "Радиоэлектроника", Труды научно-технической конференции, Каунас, 1968, т.4 (совместно с З.А.Вайнорис и Р.А.Петраускас).

3. Свойства плоской двухэкранной спиральной линии задержки

ки. Там же (совместно с З.А.Вайнорис и Р.А.Петраускас).

4. Сложные спиральные линии задержки прямоугольного поперечного сечения. "Радиоэлектроника", Труды научно-технической конференции, Каунас, 1969, т.5 (совместно с З.А.Вайнорис и Р.А.Петраускас).

5. Экспериментальное исследование двухэкранной спиральной линии задержки. Там же.

6. Измеритель группового времени задержки. Там же (совместно с Ю.С.Сруогис и Г.П.Шижкус).

7. Создание видеочастотной линии задержки. Отчет о НИР, научный руководитель З.А.Вайнорис. Вильнюсский филиал Каунасского политехнического института, Вильнюс, 1969.

8. Спиральные системы в качестве линий задержки микроволнового диапазона. Тезисы докладов XIX Украинской Республиканской научно-технической конференции, Киев, 1969 (совместно с З.А.Вайнорис и Р.А.Петраускас).

9. Расчет потерь в спиральных линиях задержки. "Радиоэлектроника", Труды научно-технической конференции, Каунас, 1970, т.6 (совместно с З.А.Вайнорис и Р.А.Петраускас).

10. Некоторые особенности конструирования спиральных линий задержки на керамическом основании. Там же (совместно с З.А.Вайнорис, Р.А.Петраускас и А.А.Якучионис).

11. Измерение частотных зависимостей волнового сопротивления спиральных линий задержки. Там же (совместно с З.А.Вайнорис, Р.А.Петраускас и В.А.Снечкус).

12. Исследование возможностей создания многоотводных и регулируемых электрических линий задержки. Отчет №1 о НИР, научный руководитель З.А.Вайнорис. Вильнюс, ВИСИ, 1970.

Кроме того содержание диссертации доложено на

1. XVI, XVII, XVIII, XIX, XX и XXI Республиканских научно-технических конференциях в г. Каунасе в 1966 - 1971 г.г.

2. II и III Литовских Республиканских научно-технических конференциях по радиоизмерениям в г. Каунасе в 1968 и 1969 г.г.

3. XIX Украинской Республиканской научно-технической конференции в г. Киеве в 1969 г.

4. IУ Всесоюзной научно-технической конференции по радиоизмерениям в г. Каунасе в 1971 г.