

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ПЛЕНОЧНЫХ ПРОВОДНИКАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы автоматизированного проектирования РЭС»
для студентов направления

11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»)
всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.396.6
ББК 38.54

Составители:

д-р техн. наук д-р техн. наук. О.Ю. Макаров
канд. техн. наук И.С. Бобылкин

Моделирование времени задержки сигнала в пленочных проводниках с диэлектрической изоляцией: методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Основы автоматизированного проектирования РЭС» для студентов направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» (профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм обучения / ФБГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. О.Ю. Макаров, И.С. Бобылкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 9 с.

Методические указания предназначены для развития практических навыков в методах расчета задержки сигнала в проводниках с диэлектрической изоляцией на ЭВМ. По лабораторной работе приводятся: краткие теоретические сведения, описание лабораторной программы, задание для самостоятельной работы, лабораторные задания.

Предназначены для лабораторных работ по дисциплине «Основы автоматизированного проектирования РЭС» для студентов 3 курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР-1С_ОАП РЭС.pdf.

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.396.6
ББК 38.54

Рецензент – М. А. Ромащенко, д-р техн. наук, проф.
кафедры конструирования и производства
радиоаппаратуры ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ПЛЕНОЧНЫХ ПРОВОДНИКАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Цель работы: получение и закрепление знаний и практических навыков по моделированию времени задержки сигнала в проводниках с диэлектрической изоляцией на ЭВМ, получение навыков расчета паразитных емкостей и индуктивностей пленочных проводников, а также их сопротивления.

1 ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

1.1. Математические модели распространение сигналов в проводниках с диэлектрической изоляцией

С увеличением степени интеграции элементной базы РЭС все в большей степени приходится считаться с тем, что проводники, соединяющие элементы, имеют резистивные и емкостные паразитные параметры, которые вносят значительные временные задержки в распространение сигналов в них. Таким образом, среди различного рода задержек сигнала, определяющих быстродействие РЭС, с уменьшением размеров элементов значительную роль начинает играть задержка в межсоединениях. В идеальном случае назначение проводника состоит в том, чтобы обеспечить равенство потенциалов в двух или более точках. Однако в структурах со сравнительно малой площадью, например ИС, ГИС, МСБ, печатные платы с высокой плотностью монтажа, это требование выполняется только приближенно, что объясняется наличием у проводников сопротивления, паразитной емкости и паразитной индуктивности. На рис. 1а и рис. 1б показаны две типичные для микроэлектронных устройств (ИС, БИС, многокристальные модули) формы соединительных проводников. На рис. 1а. представлено поперечное сечение проводника микрополосковой линии, изолированного диэлектриком, а на рис. 1б - сечение проводника, образованного диффузионным слоем с изоляцией за счет р-п перехода.

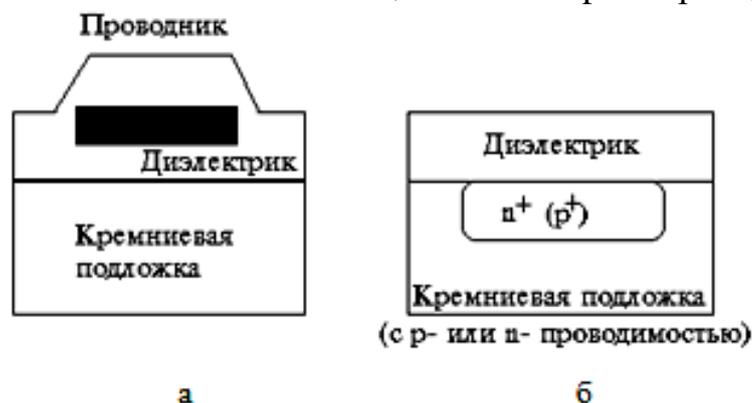


Рис. 1. Сечения соединительных проводников
а - проводник с диэлектрической изоляцией; б - проводник с изоляцией за счет р-п перехода

Для обеих структур, показанных на рис. 1, методика расчета характеристик передачи сигнала аналогична методике, применяемой в случае микрополосковых линий. Вместе с тем здесь место имеет ряд обстоятельств, на которые должно быть обращено внимание. Действительно, межсоединения в ИС имеют не только прямолинейную, но криволинейную геометрию, сопротивление межсоединений зависит от удельного сопротивления материала проводников, причем их активная составляющая играет большую роль по сравнению с индуктивной. При наличии паразитной емкости (рис. 1 б) характеристики оказываются нелинейными; проводники во многих случаях оказываются нагруженными отнюдь не на характеристическое сопротивление, а на несогласованную нагрузку.

Рассмотрим модель линии передачи с распределенными RC-постоянными, являющуюся средством оценки основополагающей характеристики передачи сигнала-времени задержки. Модель линии передачи с распределенными RC-постоянными позволяет представить такого рода проводники эквивалентной схемой с распределенными последовательными сопротивлениями и параллельными емкостями (рис. 2 а). На рис. 2 б показан способ представления схемы (рис. 2 а) в символах, отображающий распределенный характер постоянных. Через R и C на рис. 2 б обозначено паразитное последовательное сопротивление и параллельная емкость.

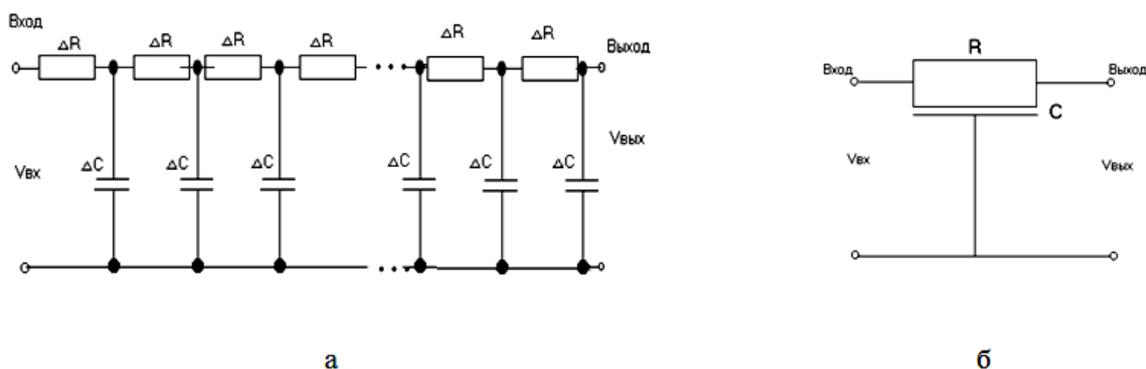


Рис. 2. Модель линии передачи с распределенными RC-постоянными:
а - представление в виде лестничной схемы с дискретными RC-постоянными;
б - представление в виде схемы с распределенными RC-постоянными

Уравнения, характеризующие работу линии с распределенными RC-постоянными, аналогичны уравнениям, описывающим процессы диффузии и теплопроводности.

Обозначив сопротивление и емкость, приходящейся на единицу длины линии, через R_0 и C_0 соответственно, можно записать

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - R_0 C_0 \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где v - напряжение в линиях в точке x в момент времени t .

Решив уравнение, описывающее отклик линии (рисунок 2) на входное воздействие при холостом ходе на выходе (в частной области), получаем зависимость

$$A(j\omega) = \sec(\sqrt{j\omega RC}). \quad (2)$$

Соответствующий отклик на ступенчатое (единичное) воздействие можно представить в следующем виде

$$v_{\text{вых}}(t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-[(2n+1)\pi/2]^n t/RC}. \quad (3)$$

Реально достаточно точное приближение можно получить, ограничившись несколькими первыми членами ряда в выражении (3). Аппроксимировав выражение (2) с использованием произведения конечного числа сомножителей, для отклика на ступенчатое воздействие получим выражение

$$A(j\omega) \approx \frac{1}{\left(1 + j\omega \frac{4RC}{\pi^2}\right) \left(1 + j\omega \frac{4RC}{9\pi^2}\right) \left(1 + j\omega \frac{4RC}{25\pi^2}\right)}. \quad (4)$$

Откуда может быть получено следующее приближенное соотношение

$$v_{\text{вых}}(t) \approx 1,0 - 1,172e^{-(\pi^2 t/4RC)} + 0,195e^{-(9\pi^2 t/4RC)} + 0,023e^{-(25\pi^2 t/4RC)} \quad (5)$$

Для оценки характеристики передачи сигнала собственно в проводнике можно использовать аналитические решения типа (3) или (5) и соответствующие приближенные формулы. Однако при анализе приближенных схем, содержащих и другие элементы желательно использовать приближенное представление линии посредством эквивалентной схемы сосредоточенными постоянными. Дело в том, что в моделирующих схемах программы, которые, как правило, находят применение при проектировании БИС, не редко рассматриваются только элементы сосредоточенными постоянными. Для этого обычно производят переход от линии с распределенными RC-постоянными к лестничной RC-схеме, состоящей из нескольких звеньев. Количество звеньев схемы определяется как компромисс между требованиями к необходимой точности и к простоте и легкости вычисления. Достаточным можно считать такое количество звеньев, при котором погрешность расчета постоянной времени RC каждого звена отличается не более чем на 10 % от времени задержки соответствующего реального участка линии.

1.2. Расчет паразитных параметров проводников

Для материалов, применяемых при изготовлении проводников и имеющих высокую температуру плавления, рассмотренная выше RC-модель линии во многих случаях оказывается вполне достаточной. Однако металлы с низкой температурой плавления нередко имеют низкое удельное сопротивление, и на время задержки в проводнике начинает оказывать влияние индуктивность в линии. Это влиянием можно не учитывать, если полное сопротивление LC-линии, определяемое как $(L/C)^{1/2}$, значительно меньше активной составляющей R, а время задержки в RC-линии значительно меньше постоянной времени RC. В этом случае наличие L не приводит к слишком большим отклонениям времени задержки от среднего значения. Это означает, что влияние индуктивности линии будет меняться, напри-

мер, в зависимости от значения порогового напряжения подключенного к ней транзистора.

Сопротивление проводника, показанного на рис. 1-а, может быть рассчитано непосредственно, исходя из его геометрических параметров (рис. 3) и величины удельного сопротивления материала, из которого он изготовлен, по следующей формуле

$$R = \frac{\rho l}{tW}, \quad (6)$$

где ρ - удельное сопротивление материала.

Значения удельного сопротивления, определяется условиями изготовления проводника, и, поскольку длина проводника практически имеет очень слабую корреляцию с его шириной W , его сопротивление в данном случае можно приблизительно рассчитать по следующей формуле

$$R = \frac{\sigma l}{W}, \quad (7)$$

где σ - поверхностное сопротивление, соответствующее величине ρ/t в формуле (6).

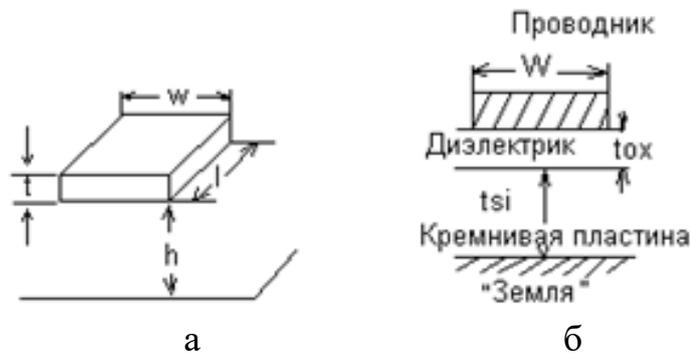


Рис. 3. Основные размеры соединительных проводников:
а - проводник с диэлектрической изоляцией; б - проводник с изоляцией за счет р-n- перехода

Наиболее простой метод расчета паразитной емкости проводника с учетом его геометрических параметров (рис. 3) предусматривает использование модели конденсатора с плоско-параллельными пластинами. В этом случае емкость можно рассчитать по следующей формуле:

$$C_{pp} = \varepsilon_0 \varepsilon_r (tW / h). \quad (8)$$

Среди экспериментально-аналитических методов расчетов паразитных емкостей и индуктивностей также известны методы, разработанные для случая микрополосковых линий. Для проводника с сечением, показанным на рис. 2-б паразитная емкость и индуктивность могут быть рассчитаны по следующим приближенным формулам:

$$C_{pp} = \varepsilon_0 \varepsilon_r l \left[\frac{W}{t_{ox}} + 2,42 - 0,44 \frac{t_{ox}}{W} + \left(1 - \frac{t_{ox}}{W} \right) \right], \quad W \gg t_{ox}. \quad (9)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right), \quad h = t_{ox} + t_{sj}. \quad (10)$$

2 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с программой расчета задержки сигнала в проводниках с диэлектрической изоляцией

Работа с программой осуществляется в следующем порядке.

После запуска программы "Project1" появляется форма, на которой можно выделить 4 панели:

- "Результаты", в которой выводятся значения емкости и сопротивления проводника.

- Поле данных, где вводятся значения параметров проводника.

- Наглядное изображение рассчитываемой системы.

- Поле графика.

Затем пользователю необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Ввести значения параметров системы: длина, ширина, расстояние до противоположного проводника, толщина, удельное сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, параметры выбрать из таблицы в соответствии с вариантом.

№ варианта	Длина проводника, м*10 ⁻³	Ширина проводника, м*10 ⁻³	Толщина проводника, м*10 ⁻³	Расстояние между проводниками, м*10 ⁻³	Удельное сопротивление, мкОм*см	Диэл. проницаемость диэлектрика
1	2	0.3	0.05	1	2.26	0.5
2	2	0.15	0.05	5	2.04	0.5
3	5	0.7	0.05	1	5.0	0.5
4	4	0.7	0.05	4	5.5	0.5
5	4	0.3	0.05	3	21.6	0.5
6	2	0.3	0.04	1	3.26	0.5
7	4	0.75	0.05	4	5.5	0.5
8	7	0.6	0.05	1	5.0	0.5
9	3	0.4	0.05	1	7.0	0.5
10	5	0.7	0.03	1	4.0	0.5

2. Рассчитать емкость и сопротивление проводника с помощью нажатия кнопки "Расчет" в главном меню и "Расчет сигнала". На панели "Результаты" появятся значения емкости и сопротивления.

3. Для вывода на экран графика выбрать в главном меню "Файл" пункт "Рисовать график". После этого на поле графика появится изображение единичного воздействия.

Для вывода на поле графика уровней 0,1 и 0,9 необходимо нажать кнопку "Показать уровни 0,1 и 0,9" на панели "Результаты". Под графиком сигнала появятся значения моментов времени при сигналом заданных уровней, а также время задержки dt.

При необходимости можно получить промежуточные значения сигнала в любой момент времени с помощью перемещения курсора мыши по полю графика. При этом в верхней части поля графика появятся значения отклика на единичное воздействие (V) и момент времени, соответствующему этому значению (t).

Внимание! Для масштабирования полученного графика сигнала необходимо ввести соответствующее значение в поле "Время расчета". Чем больше вводимое значение, тем в большем интервале времени считается значение сигнала. Если значения функции слишком малы, значение в поле "Время расчета" должно быть уменьшено.

2.2. Получить графики единичного воздействия от времени $V(t)$. Варианты заданий даны в таблице. Добиться того, чтобы на графике были четко видны уровни 0,1 и 0,9.

2.3. Изменяя значения одного из геометрических параметров проводника (длина, ширина, толщина), найти графическую зависимость времени нарастания фронта сигнала dt от них. Построить получившиеся графики. Аналогично найти зависимость dt от расстояния между близлежащими проводниками.

2.4. Найти зависимость времени dt от характеристик используемых материалов: удельного сопротивления проводящего материала и относительной диэлектрической проницаемостью диэлектрика.

3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- краткие теоретические сведения;
- формулировку каждого задания;
- исходные данные;
- расчетные формулы и таблицы результатов испытаний, а так же графики полученных зависимостей;
- выводы.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Структура проводника с диэлектрической изоляцией.
2. Структура проводника с изоляцией за счет р-п-перехода.
3. Метод расчета паразитного сопротивления проводника.
4. Метод расчета паразитной емкости проводника.
5. Вид уравнения задержки сигнала в линии с распределенными РС-постоянными.
6. Параметры эквивалентных схем проводников.
7. Объясните полученные в ходе выполнения лабораторной работы зависимости времени нарастания единичного сигнала от геометрических параметров проводника.
8. Объясните полученные зависимости времени нарастания сигнала на выходе от параметров материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование СБИС: Пер. с япон. / М. Ватанабэ, К. Асада, К. Кани, Т. Ацуки. - М.: Мир, 1988.-304 с
2. Компьютеры на СБИС: в 2-х кн. Кн. 2: Пер. с япон. Т. Мотоока, Х. Хорикоси, М. Сикаути и др. - М.: Мир, 1988.
3. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем.-М.: Высш. шк., 1989. –312 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1 ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ.....	3
1.1. Математические модели распространение сигналов в проводниках с диэлектрической изоляцией	3
1.2. Расчет паразитных параметров проводников	5
2 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ	7
3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	8
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	8
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ
СИГНАЛА В ПЛЕНОЧНЫХ ПРОВОДНИКАХ
С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы автоматизированного проектирования РЭС»
для студентов направления
11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»)
всех форм обучения

Составители:
Макаров Олег Юрьевич
Бобылкин Игорь Сергеевич

Компьютерный набор И.С.Бобылкина

Подписано к изданию _____.
Уч.-изд. л. _____.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14