

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 лабораторной работы по дисциплинам  
«Основы автоматизированного проектирования РЭС» и  
«Основы автоматизированного проектирования приборов и  
систем» для студентов направлений 11.03.03 «Конструирова-  
ния и технология электронных средств» и 12.03.01  
«Приборостроение» всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.396.6  
ББК 38.54

**Составители:**

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

Моделирование времени задержки сигнала в пленочных проводниках с диэлектрической изоляцией: к выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Основы автоматизированного проектирования РЭС» и «Основы автоматизированного проектирования приборов и систем» для студентов направлений 11.03.03 «Конструирования и технология электронных средств» и 12.03.01 «Приборостроение» всех форм обучения / ФБГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. О.Ю. Макаров, И.С. Бобылкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 13 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 для студентов 3 и 4 курсов.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР-ЗС\_ОАП РЭС.pdf.

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр.: 3 назв.

**УДК 621.396.6**  
**ББК 38.54**

**Рецензент** - Э.И. Воробьев, канд. техн. наук, доц.  
кафедры систем автоматизированного  
проектирования и информационных систем

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

## 1. Общие указания по выполнению лабораторной работы

Целью лабораторной работы является 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.

Перед выполнением лабораторной работы студент должен самостоятельно выполнить домашнее задание в соответствии с данными методическими указаниями.

При проведении лабораторных занятий в дисплейном классе студенты должны предварительно изучить инструкцию по технике безопасности по эксплуатации ЭВМ.

## 2. Домашнее задание и методические указания по его выполнению

### 2.1. 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 высо-

кой плотностью монтажа, это требование выполняется только приближенно, что объясняется наличием у проводников сопротивления, паразитной емкости и паразитной индуктивности. На рис. 1 а и рис. 1 б показаны две типичные для микроэлектронных устройств (ИС, БИС, многокристальные модули) формы соединительных проводников. На рис. 1 а. представлено поперечное сечение проводника микрополосковой линии, изолированного диэлектриком, а на рис. 1 б - сечение проводника, образованного диффузионным слоем с изоляцией за счет р-n перехода.

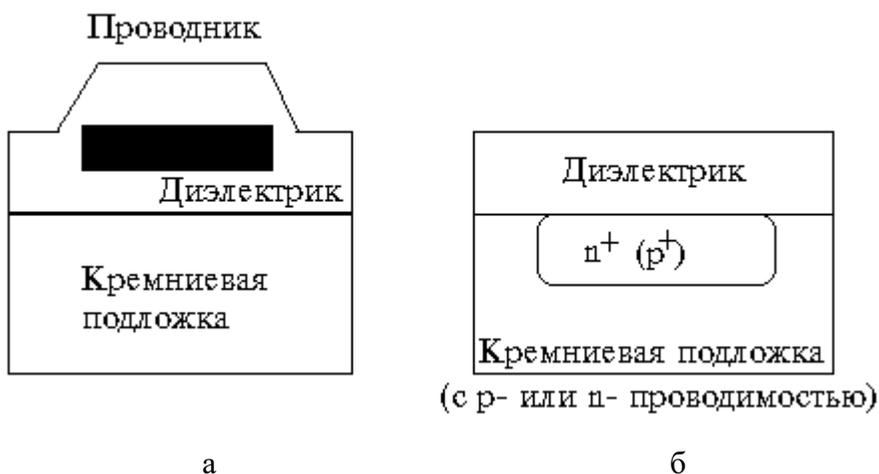


Рис. 1. Сечения соединительных проводников: а - проводник с диэлектрической изоляцией; б - проводник с изоляцией за счет р-n перехода

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 со-

противления 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.

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

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

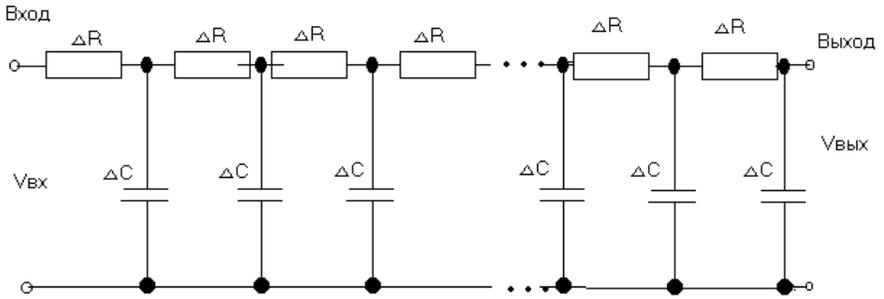
где  $v$  - напряжение в линиях в точке  $x$  в момент времени  $t$ .

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

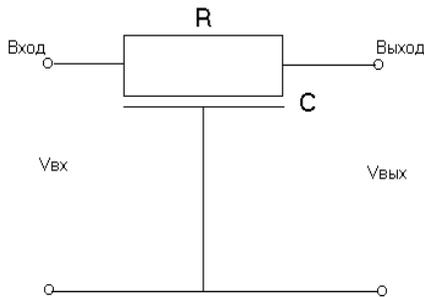
$$A(j\omega) = \sec(\sqrt{j\omega RC}). \quad (2)$$

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

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



а



б

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

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

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

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.

## 2.2. 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, например, 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  $\rho$  - 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  $\sigma$  - поверхностное сопротивление, соответствующее величине  $\rho/t$  в формуле (6).



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

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

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right), h = t_{0x} + t_{sj}. \quad (10)$$

### 3. Лабораторное задание

3.1. 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.

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.

3.2. 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.

Номер варианта	Длина проводника, $m \cdot 10^{-3}$	Ширина проводника, $m \cdot 10^{-3}$	Толщина проводника, $m \cdot 10^{-3}$	Расстояние между проводниками, $m \cdot 10^{-3}$	Удельное сопротивление, $мкОм \cdot см$	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

3.3. 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.

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

#### 4. 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

- . Структура проводника с диэлектрической изоляцией.
- Структура проводника с изоляцией за счет р-n-перехода.
- Метод расчета паразитного сопротивления проводника.
- Метод расчета паразитной емкости проводника.
- Вид уравнения задержки сигнала в линии с распределенными RC-постоянными.
- Параметры эквивалентных схем проводников.
- Объясните полученные в ходе выполнения лабораторной работы зависимости времени нарастания единичного сигнала от геометрических параметров проводника.

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.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ПЛЕНОЧНЫХ ПРОВОДНИКАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплинам  
«Основы автоматизированного проектирования РЭС» и  
«Основы автоматизированного проектирования приборов и  
систем» для студентов направлений 11.03.03 «Конструирова-  
ния и технология электронных средств» и 12.03.01  
«Приборостроение» 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