

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Томский государственный университет систем управления и радиоэлек-
троники"
ТУСУР**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОМЕХ
В ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

**Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
210302**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Томский государственный университет систем управления и радиоэлек-
троники"
ТУСУР**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

**Утверждаю
Зав. кафедрой СВЧиКР
_____ С.Н. Шарангович
" ____ " _____ 2011**

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОМЕХ
В ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

**Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
210302**

**Разработчики:
доцент каф. СВЧ
В.А. Замотринский
Новая редакция:
проф. каф. СВЧиКР
_____ А.А. Тихомиров**

2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ВВЕДЕНИЕ.....	4
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ.....	4
3.1. Электрофизические параметры линии связи.....	4
3.2. Классификация линий связи.....	5
3.3. Индуцированные помехи в коротких линиях за счет электрической связи.....	7
3.4. Электрические параметры линий связи двухсторонней печатной платы.....	8
4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	10
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	11
7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	11

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является исследование индуцированных помех в соседних проводниках печатной платы, которые возникают за счет электромагнитных связей при прохождении импульсов электрического тока.

2. ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин возникновения внутриаппаратурных помех в радиоэлектронных устройствах являются индуцированные помехи (перекрестные наводки) между рядом расположенными линиями связи. Уровень таких помех зависит от конструкции устройства, которая определяется взаимным расположением линий связи, их конфигурацией, экранированием и т. п. Эти помехи могут приводить к неустойчивой работе всего устройства и, в частности, к самовозбуждению усилителей, ложному срабатыванию аналого-цифровых преобразователей, устройств синхронизации и т.п. При проектировании и конструировании радиоэлектронной аппаратуры с учетом внутриаппаратурной электромагнитной совместимости важным является оценка уровня возникающих индуцированных помех и, при необходимости, уменьшение их уровня до приемлемого значения за счет конструктивных решений [1-3].

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

3.1. Электрофизические параметры линии связи

Одиночная линия связи характеризуется следующими распределенными параметрами: собственные емкость C_0 [Ф/м] и индуктивность L_0 [Гн/м]; сопротивление проводника R_0 [Ом/м] и проводимость изоляции G_0 [См/м], а также электрофизическими параметрами: волновое сопротивление линии Z_0 [Ом]; комплексная постоянная распространения $\gamma = \alpha + i\beta$ [м⁻¹], коэффициент затухания $\alpha = \alpha_R + \alpha_G$ (α_R – потери в проводнике, α_G – потери в диэлектрике), фазовая постоянная β ; фазовая скорость распространения $v_\phi = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$ [м/с]; удельное время задержки распространения сигнала в линии $t_{з.р.л.} = 1/v_\phi = \sqrt{\mu\varepsilon}$ [с/м]; магнитная $\mu = \mu_r\mu_0$ [Гн/м] и диэлектрическая $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$ [Ф/м] проницаемости среды [1].

Для ненагруженной линии связи с учетом значений диэлектрической проницаемости вакуума $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и магнитной проницаемости $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м значение удельного времени задержки распространения равно

$$t_{з.р.л} = 3,33 \sqrt{\mu_r \epsilon_{эф}}, \text{ нс/м}, \quad (2.1)$$

а для нагруженной линии связи дополнительно увеличивается

$$t'_{з.р.л} = t_{з.р.л} \sqrt{1 + C_n / C_0 l}, \quad (2.2)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; $\epsilon_{эф}$ – эффективное значение относительной диэлектрической проницаемости среды (для большинства диэлектриков $\mu_r = 1$, $\epsilon_{эф} = 5 \dots 8$); C_n – емкость нагрузки; l – геометрическая длина линии. Для коротких линий связи, каковыми являются токонесущие проводники печатной платы, обычно пренебрегают потерями в проводнике ($R_0 = 0$, $\alpha_R = 0$) и диэлектрике ($G_0 = 0$, $\alpha_G = 0$), т. е. считают, что электрофизические параметры линии носят чисто реактивный характер. В этом случае волновое сопротивление линии определяется из соотношения $Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0}$.

3.2. Классификации линий связи

При анализе быстродействия радиоэлектронной аппаратуры линии связи подразделяются на электрически "короткие" и "длинные". При этом сопоставляются время задержки $T_3 = l \cdot t_{з.р.л}$ распространения электромагнитной волны вдоль линии связи, имеющей длину l , и время нарастания переднего фронта сигнала $t_{ф}$. В частности для цифровых линий передачи данных таким временем является время переключения микросхемы из состояния логического нуля ("0") в состояние логической "1" – $t^{0,1}$, или из "1" в "0" – $t^{1,0}$.

Большинство массовых соединений электрорадиоэлементов на печатной плате выполняется несогласованными неэкранированными проводниками и относится к "коротким" линиям связи. Для импульсных сигналов электрически короткой считают такую линию, в которой

$$t_{ф} > 4T_3. \quad (2.3)$$

Для сигналов, близких к синусоидальным (квазигармоническим), условием электрически короткой линии является $l \ll \lambda$, где λ – длина волны в линии. В случае электрически длинных линий связи знаки вышеприведенных неравенств меняются на обратные.

На практике, как правило, электрически короткими являются проводники на печатных платах; длинными линиями являются соединения между панелями, блоками, стойками и т. п. На эквивалентных схемах электрически короткие линии замещают сначала схемами с распределенными параметрами, затем – схемами с сосредоточенными индуктивностями и емкостями (рис. 1, б и в).

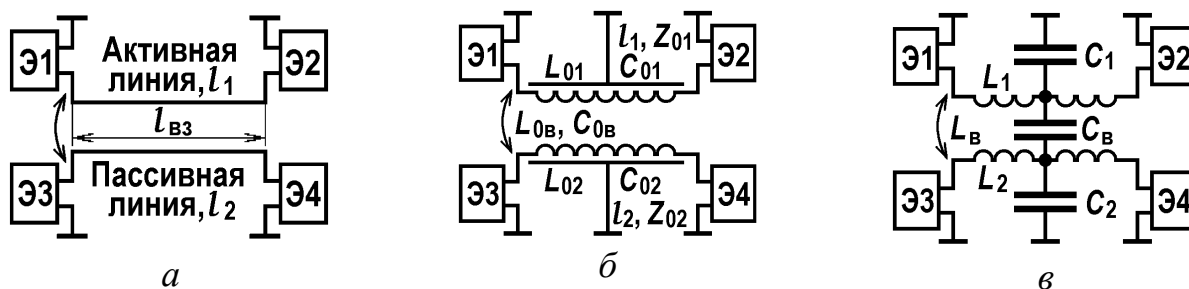


Рис. 1. Схема взаимодействующих линий связи с распределенными параметрами (а), ее эквивалентная схема (б) и эквивалентная схема линии с сосредоточенными параметрами (в). Э1, Э2, Э3, Э4 – активные элементы (микросхемы).

При анализе индуцированных помех одна из линий связи считается активной, а вторая – пассивной, т. е. предполагается, что в первой линии управляющий элемент Э1 инициирует положительный или отрицательный перепад напряжения, который передается на воспринимающий элемент Э2. Протекающий при этом в активной линии ток за счет электромагнитной связи будет наводить в близко расположенной второй линии помеху. В общем случае для определения переходных процессов в двух взаимодействующих линиях связи, необходимо решать дифференциальные уравнения в частных производных (телеграфные уравнения) с учетом соответствующих граничных и начальных условий.

Для упрощения анализа сосредоточенные значения емкостей и индуктивностей на эквивалентной схеме (рис. 1, в) определяются из следующих соотношений: $C_1 = C_{01} \cdot l_1$; $L_1 = L_{01} \cdot l_1$; $C_2 = C_{02} \cdot l_2$; $L_2 = L_{02} \cdot l_2$; $C_B = C_{0B} \cdot l_{B3}$; $L_B = L_{0B} \cdot l_{B3}$. Здесь цифры в индексах определяют принадлежность к активной (1) или пассивной (2) линиям, C_{0B} и L_{0B} – значения взаимных емкости и индуктивности между линиями, l_{B3} – длина участка взаимодействия линий связи ($l_{B3} \leq l_1, l_2$). При оценке электромагнитной связи используют значение коэффициента связи, который для индуктивной и емкостной связи оцениваются соответствующими значениями $k_L = L_B / \sqrt{L_1 L_2}$; $k_C = C_B / \sqrt{C_1 C_2}$. В случае однородных сред $k_L = k_C$.

Омическими потерями в проводниках и диэлектриках в коротких линиях обычно пренебрегают.

В зависимости от соотношения волнового сопротивления линии Z_0 и сопротивления нагрузки Z_H , которым является входное сопротивление активных элементов, могут встретиться три случая:

- 1) $|Z_H| \gg Z_0$, в линии преобладает энергия магнитного поля (индуктивный характер линии);
- 2) $|Z_H| \ll Z_0$, в линии преобладает энергия электрического поля (емкостной характер линии);
- 3) $|Z_H| = Z_0$, энергии электрического и магнитного полей равны, линия со-

гласована с нагрузкой.

На основании предположения о слабой взаимосвязи линий ($k_L, k_C \ll 1$) при анализе схемы рис. 1 можно считать, что переходные процессы в активной линии не зависят от переходных процессов формирования помехи в пассивной линии. При четко выраженном индуктивном характере линии связи, можно пренебречь емкостной наведенной помехой (через $C_{0в}$) и, наоборот, при емкостном характере связи – пренебречь индуктивной наводкой (через $L_{0в}$). В промежуточных случаях анализ схемы существенно усложняется. Для микросхем ТТЛ логики, размещаемых на печатных платах и работающих с небольшими токами, наиболее типичны линии связи емкостного характера.

3.3. Индуцированные помехи в коротких линиях за счет электрической (емкостной) связи

Будем считать, что линия связи, соединяющая элементы Э1 и Э2 на рис. 1, является источником помехи (активная), а линия, соединяющая элементы Э3 и Э4 – рецептором помехи (пассивная). Предполагая, что между активной и пассивной линиями преобладает емкостной характер связи ($L_{в} = 0$), а также пренебрегая собственными реактивностями активной цепи ($L_1 = C_1 = 0$), эквивалентную схему, представленную на рис. 1, в, можно упростить до схемы, представленной на рис. 2. При этом также предполагается, что величина сопротивления R определяется как эквивалентное значение параллельно соединенных входных сопротивлений элементов Э3 и Э4: $R = R_{Э1}R_{Э2}/(R_{Э1} + R_{Э2})$, а величина емкости C , как параллельное соединение C_2 и емкости монтажа $C_{сх}$: $C = C_2 + C_{сх}$.

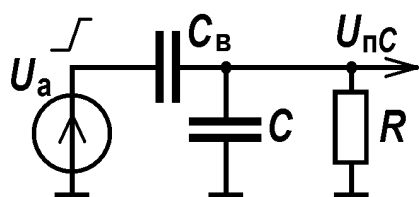
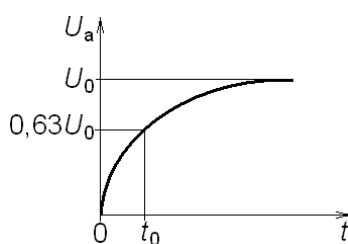
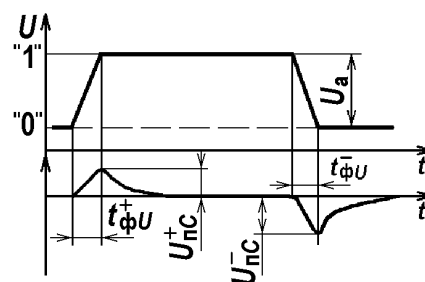


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема при электрической связи.



а)



б)

Рис. 3. а) – описание переднего фронта исходного импульса; б) – перепады напряжения в активной линии и возникающие индуцированные помехи.

Задачей является определение величины напряжения помехи $U_{пс}$, наводимой на входных сопротивлениях элементов Э3 и Э4 (рис. 1), за счет емкостной связи между соседними парами проводников.

Для коротких линий связи дифференциальные уравнения в частных произ-

водных упрощаются до обычных дифференциальных уравнений, описывающих временной характер изменения напряжения. Уравнение, описывающее процесс наведения емкостной помехи, имеет вид

$$C_B \frac{d(U_a - U_{пс})}{dt} = \frac{U_{пс}}{R} + C \frac{dU_{пс}}{dt}. \quad (2.4)$$

Решая задачу определения $U_{пс}$ через U_a операторным методом, получим

$$U_{пс}(p) = U_a(p) \frac{p}{p + 1/\tau_2}, \quad (2.5)$$

где $\tau_2 = R(C_B + C)$ – постоянная времени цепи, изображенной на рис. 2. В предположении закона нарастания переднего фронта импульса в активной линии в форме, изображенной на рис. рис. 3, а) и описываемой выражением

$$U_a(t) = U_0 \left(1 - e^{-t/t_0}\right), \quad (2.6)$$

где t_0 соответствует условию $U_a(t_0) = 0,63U_0$ и связано с длительностью фронта $\tau_{\Phi U}^+$ (или $t^{0,1}$), определяемому как интервал времени, в течение которого $U_a(t)$ изменяется от значений $0,1U_0$ до $0,9U_0$, соотношением

$$\tau_{\Phi U}^+ = 2,2t_0. \quad (2.7)$$

Согласно преобразованию Лапласа выражению $U_a(t)$ соответствует операторное напряжение

$$U_a(p) = \frac{U_0}{t_0 p (p + 1/t_0)}. \quad (2.8)$$

Подставляя $U_a(p)$ в выражение (2.5) для $U_{пс}(p)$ и переходя к оригиналу $U_{пс}(t)$, получим

$$U_{пс}(p) = \frac{U_0 \tau_2}{t_0 - \tau_2} \left(e^{-t/t_0} - e^{t/\tau_2} \right). \quad (2.9)$$

В зависимости от соотношения между t_0 и τ_2 , $U_{пс}(t)$ может иметь различную форму. Определим момент времени t_m , при котором $U_{пс}(t_m)$ – максимально. Решая уравнение $\frac{dU_{пс}(t)}{dt} = 0$, получим

$$t_m = \frac{t_0 \tau_2 \ln(t_0/\tau_2)}{t_0 - \tau_2}. \quad (2.10)$$

Если $t_0 \gg \tau_2$, то

$$t_m \approx \tau_2 \ln(t_0/\tau_2); \quad U_{пс}(t_m) \approx U_0 \frac{\tau_2}{t_0}. \quad (2.11)$$

В общем случае наведенная индуцированная емкостная помеха $U_{пс}$ совпадает по знаку со знаком фронта импульса в активной линии. На рис. 3 б) показаны

эпюры напряжения в активной линии при переключении элемента ТТЛ из логического состояния "0" в "1" и обратно и образующиеся на входах элементов Э3 и Э4 пассивной линии скачки напряжения емкостной помехи положительной $U_{пс}^+$ и отрицательной полярности $U_{пс}^-$. При $t = t_{\phi}$ помеха будет достигать максимального значения.

Так как длительности переднего и заднего фронтов в активной линии обычно разнятся, то амплитуда положительной и отрицательной наводимой помехи будет разной.

3.4. Электрические параметры линий связи двухсторонней печатной платы

Поперечное сечение двухсторонней печатной платы показано на рис. 4.

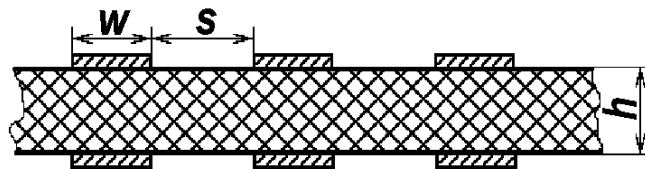


Рис. 4. Двухсторонняя печатная плата.

В данной работе верхние проводники используются как сигнальные, нижние – как земляные. Для такого включения электрические параметры таких линий определяются следующими приближенными соотношениями [2, 3]:

- 1) Погонная емкость линии, при $w/h \leq 1$

$$C_0 = \frac{8,85\epsilon_{\text{эф}}\pi}{\ln(4h/w)}, \quad \text{пФ/м} \quad (2.12)$$

где $\epsilon_{\text{эф}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 5h/w}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость.

- 2) Фазовая скорость распространения сигнала в линии

$$v_{\phi} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}, \quad \text{м/с.} \quad (2.13)$$

- 3) Волновое сопротивление линии

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} = 1/v_{\phi} \cdot C_0, \quad \text{Ом.} \quad (2.14)$$

При известных значениях Z_0 и C_0 из соотношения (2.10) может быть также определена погонная индуктивность L_0 .

4) Погонная взаимная емкость $C_{0в}$ (без учета земляных проводников) определяется по методу комформных отображений [2]

$$C_{0в} = \frac{17,7\epsilon_{\text{эф}}}{K_1(k)}, \quad \text{пФ/м,}$$

где $k = \sqrt{1 - (k')^2}$; $k' = \frac{w}{w + s}$; w – ширина проводника; s – расстояние между ближними краями проводников (см. рис. 4);

$$K_1(k) = \pi / \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right); \quad k^2 \leq 0,5;$$

$$K_1(k) = 1 / \pi \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right); \quad k^2 \leq 0,5.$$

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.



Рис.5. Схема экспериментальной установки: Г – генератор импульсов Г-54; ОС – осциллограф С1-65; Р – разъем; П – переключатель на 5 положений

Объектом исследования является печатная плата на стеклотекстолитовой подложке компланарного типа с параллельными печатными проводниками, расположенными по обе стороны платы, так что попарно образуется шестнадцать линий передач. К одной из них, активной (26-ой по нумерации на плате) подводится от генератора Г-54 исходный импульс с формой, близкой к прямоугольной. С помощью переключателя "П" осциллограф может быть подключен к этой линии (положение переключателя 1), либо к одной из четырех соседних с ней, пассивных линий (положения 2÷5). С помощью набора разъемов "Р" линии могут быть нагружены на сопротивления $R_1 \div R_5$, заменяющие входные и выходные сопротивления активных элементов реальной схемы. Так для ИМС распространенной серии К-155 ТТЛ типа при логическом "0" $R_{\text{вх}} = 100 \text{ Ом}$, $R_{\text{вых}} = 10 \text{ Ом}$, при логической "1" $R_{\text{вх}} = \infty$, $R_{\text{вых}} = 100 \text{ Ом}$. Набор разъемов с смонтированными в них резисторами позволяет реализовать следующие варианты нагрузок (табл. 1).

Таблица 1.

Цвет разъема	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
белый	100	100	10	∞	100
белый	100	100	100	100	100
желтый	100	0	100	∞	10

Примечание. При отключении разъема все $R_i = \infty$.

На генераторе рекомендуется установить длительность импульсов $0,1 \div 0,3$ мкс, частоту повторения $10 \div 100$ кГц, амплитуду исходных импульсов $1 \div 2$ В. длительность переднего и заднего фронтов импульса генератора различны. Это позволяет исследовать влияние длительности фронта исходного импульса на величину наведенного импульса. Принять $w = 1$ мм, $s = 2$ мм, $l = 90$ мм, $h = 1,5$ мм. Для стеклотекстолита $\epsilon_r = 6$.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Изучите описание работы, ответьте на контрольные вопросы, ответьте на контрольные вопросы, получите от преподавателя допуск на выполнение работы.

5.2. Соберите схему рис. 5. (Земляные штекеры – черные). Установите рекомендуемые параметры исходного импульса и измерьте его амплитуду и длительности переднего и заднего фронтов по уровню $0,63 (t_0)$, рассчитайте $\tau_{\Phi U}^+$ по (2.7).

5.3. Убедитесь, что исследуемые линии – электрически короткие по соотношению (2.3), рассчитав T_3 .

5.4. Определите характер линии связи (емкостной, индуктивный или согласованный). Для этого рассчитайте Z_0 и сравните его с сопротивлениями нагрузок Z_1 из табл. 1 для своего варианта.

5.5. Для вторичных (пассивных) линий, указанных преподавателем, рассчитайте взаимные емкости $C_{0в}$ с первичной (активной) линией и амплитуды наведенных импульсов для переднего и заднего фронтов исходного импульса. При расчете емкостей учтите, что паразитная емкость между контактами и подводящими проводами переключателя составляет $5 \div 6$ пФ. Для разомкнутых линий наведенный импульс считайте по схеме емкостного делителя (см. рис.2).

5.6. Зарисуйте формы исходного и наведенного импульсов и измерьте их амплитуду и длительность.

5.7. Сравните теоретические и экспериментальные результаты и сделайте выводы о влиянии расстояния между линиями и величины нагрузки на амплитуду и форму наведенных импульсов.

5.8. Для ИМС серии К-155 (напряжение логических "0" и "1" $U^0 \leq 0,4$ В и $U^1 \geq 2,4$ В) оцените амплитуду исходного импульса в первичной линии, вызывающего ложное срабатывание логических элементов в пассивной линии. Сделайте вывод о помехоустойчивости данной линии к перекрестным наводкам.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какие параметры линии связи влияют на электромагнитную совместимость?

6.2. Какие параметры линии связи относятся к взаимным?

6.3. Какие линии связи называются "длинными", а какие "короткими"?

6.4. Какие помехи называются перекрестными наводками? За счет чего они образуются?

6.5. В каких случаях в коротких линиях связи преобладают емкостные, а в каких индуктивные связи?

6.6. Каким образом амплитуда помехи зависит от длительности исходного импульса?

6.7. Как амплитуда помехи зависит от постоянной цепи пассивной линии?

6.8. Как рассчитать емкостной делитель?

6.9. Нарисуйте эквивалентную схему емкостных связей двух линий передачи.

6.10. Получите формулы для расчета истинных емкостей через измеренные для этой схемы?

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: Учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2004. -298 с.
2. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. -224 с.
3. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. М.: Высшая школа, 1982.
4. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. Томск: "ТМЛ-Пресс", 2007. -256 с.
5. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. В.С. Кармышев, Л.Н. Кечиев. М.: Издательский Дом "Технологии", 2003. -540 с.