

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

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

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для всех видов работы по дисциплине
«Моделирование и анализ электромагнитной совместимости РЭС»
для студентов направления
11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств»
всех форм обучения

задания для практических работ
задания для лабораторных работ
задания для курсового проектирования
задания для самостоятельных работ

Воронеж 2021

Моделирование и анализ электромагнитной совместимости РЭС

Указания к практическим работам

Во 2-ом семестре выполняются задания из первой таблицы (тестовые задания). В 3-ьем семестре выполняются задания из второй таблице (задачи).

По результатам выполнения заданий составляется отчет по практической работе. Кроме правильного ответа, необходимо привести его обоснование или показать ход решения задачи

Практические задания для 2-го семестра

1.	Какие уровни обеспечения ЭМС являются верными? А – межсистемный Б – внутрисистемный В – внутриаппаратурный Г – внутрикомпонентный Д – электромагнитный
2.	Какие три характерных элемента рассматривают при решении задачи обеспечения ЭМС? А – источник Б – путь влияния В – приемник Г – заземление Д – электростатический разряд
3.	Какие четыре группы основных механизмов паразитных наводок принято выделять? А – кондуктивная связь Б – индуктивная связь В – емкостная связь Г – связь через излучение Д – связь через инфракрасное излучение
4.	Каким образом представляются сигналы во временной области? А – напряжение или ток выражается как функция от времени Б – амплитуда и фаза выражаются как функцией от частоты В – мощность излучения выражается как функция от расстояния
5.	Какой измерительный прибор позволяет наблюдать сигналы во временной области? А – осциллограф Б – анализатор спектра В – частотомер
6.	Каким образом представляются сигналы в частотной области? А – напряжение или ток выражается как функция от времени Б – амплитуда и фаза выражаются как функцией от частоты В – мощность излучения выражается как функция от расстояния
7.	Какой измерительный прибор позволяет наблюдать сигналы в частотной области? А – осциллограф Б – анализатор спектра В – частотомер
8.	Как можно преобразовать сигнал из временной области в частотную и наоборот? А – такое преобразование невозможно Б – одновременным использованием осциллографа и анализатором спектра В – преобразованием Фурье
9.	Какие параметры радиотехнических устройств можно характеризовать дБ? А – мощность Б – напряжение

	<p>В – ток Г – надежность Д – фаза</p>
10.	<p>Чему равно в дБ отношение двух одинаковых значений? А – 0 дБ Б – +1дБ В – -1дБ</p>
11.	<p>Можно ли выразить в дБ отношение двух фаз? А – да Б – нет В – только если они обе с одинаковым знаком</p>
12.	<p>Каким образом можно уменьшить влияние связи через общее сопротивление? А – уменьшая сопротивление общего возвратного пути Б – увеличивая сопротивление общего возвратного пути В – влияние данной связи постоянное и не зависит от конструктивных решений</p>
13.	<p>Как рабочая частота влияет на уровень перекрестных помех из-за связи через общее сопротивление? А – с увеличением частоты уровень перекрестных помех увеличивается Б – с увеличением частоты уровень перекрестных помех уменьшается В – уровень перекрестных помех увеличиваются на частотах вызывающих скин-эффект в возвратном проводнике</p>
14.	<p>Как на эквивалентной схеме обозначается паразитная емкостная связь между двумя проводниками? А – резистором Б – конденсатором В – взаимной индуктивностью</p>
15.	<p>Как рабочая частота влияет на уровень перекрестных помех из-за паразитной емкостной связи? А – с увеличением частоты уровень перекрестных помех увеличивается Б – с увеличением частоты уровень перекрестных помех уменьшается В – изменений частоты не влияет на уровень перекрестных помех</p>
16.	<p>Как на эквивалентной схеме обозначается паразитная индуктивная связь между двумя проводниками? А – резистором Б – конденсатором В – взаимной индуктивностью</p>
17.	<p>Как рабочая частота влияет на уровень перекрестных помех из-за паразитной индуктивной связи? А – с увеличением частоты уровень перекрестных помех увеличивается Б – с увеличением частоты уровень перекрестных помех уменьшается В – изменений частоты не влияет на уровень перекрестных помех</p>
18.	<p>Поле какого вида преимущественно создает элементарный проводник с током в ближнем поле? А – электромагнитное Б – электрическое В – магнитное</p>
19.	<p>Поле какого вида преимущественно создает небольшой виток с током в ближнем поле? А – электромагнитное Б – электрическое В – магнитное</p>
20.	<p>Чем опасно наличие в корпусе щелей и стыков с размерами кратными длинам рабочих частот? А – возможен резонанс и появление щелевой антенны</p>

	<p>Б – возможно попадание влаги и пыли внутрь корпуса В – уменьшается прочность конструкции</p>
21.	<p>Каким правилом объясняется возникновение в цепи возвратного пути тока? А – электроны имеют отрицательный заряд Б – токи текут по замкнутому контуру В – ток протекает по пути с наименьшим импедансом</p>
22.	<p>Каким основным принципом необходимо руководствоваться при определении возвратных путей тока? А – электроны имеют отрицательный заряд Б – токи текут по замкнутому контуру В – ток протекает по пути с наименьшим импедансом</p>
23.	<p>Что вносит основной вклад в импеданс возвратного пути НЧ тока? А – импеданс в основном определяется сопротивлением проводника Б – импеданс в основном определяется индуктивностью проводника В – импеданс в основном определяется емкостью проводника</p>
24.	<p>Что вносит основной вклад в импеданс возвратного пути ВЧ тока? А – импеданс в основном определяется сопротивлением проводника Б – импеданс в основном определяется индуктивностью проводника В – импеданс в основном определяется емкостью проводника</p>
25.	<p>Чем определяются потери на отражение при электромагнитном экранировании? А – волновым сопротивлением экранирующего материала Б – отношением толщины стенки экрана к глубине скин-слоя материала стенки В – отношением веса экрана к его внутреннему объему</p>
26.	<p>Чем определяются потери на поглощение при электромагнитном экранировании? ? А – волновым сопротивлением экранирующего материала Б – отношением толщины стенки экрана к глубине скин-слоя материала стенки В – отношением веса экрана к его внутреннему объему</p>
27.	<p>Каким выражением определяется зона r ближнем поля А – $r > 2 \pi \lambda$ Б – $r < 2f / c$ В – $r < 2\lambda / \pi$</p>
28.	<p>Какие материалы необходимо применять для экранирования от электрических полей? А – материалы с хорошей электропроводностью Б – материалы с высокой магнитной проницаемостью В – изоляционные материалы с высоким сопротивлением</p>
29.	<p>Какие материалы необходимо применять для экранирования от магнитных полей? А – материалы с хорошей электропроводностью Б – материалы с высокой магнитной проницаемостью В – изоляционные материалы с высоким сопротивлением</p>
30.	<p>Какое функциональное решение несет применение в конструкции заградительных волноводов? А – позволяет максимально передать энергию от передатчика к антенне Б – позволяет улучшить вентиляцию корпуса и облегчить тепловой режим В – позволяет значительно ослабить прохождение нежелательных помех через отверстия корпуса</p>
31.	<p>Какое условие необходимо для создания паразитной излучающей антенны? А – как минимум одна часть конструкции, образующей потенциальную паразитную антенну, должна находиться за пределами корпуса Б – между элементами конструкции, образующими потенциальную паразитную антенну, должно присутствовать ВЧ напряжение В – геометрические размеры конструкции, образующей потенциальную паразитную антенну, должны быть точно равны длине излучаемой волны</p>

32.	<p>Почему в качестве развязывающих конденсаторов в цепях питания цифровых устройств необходимо применять элементы с минимальным значением эквивалентной последовательной индуктивности?</p> <p>А – минимальная индуктивность оказывает меньшее влияние на способность отдать пиковый ток</p> <p>Б – минимальная индуктивность позволяет максимально повысить рабочую частоту</p> <p>В – минимальная индуктивность способствует меньшему нагреву цифровых ИМС</p>
33.	<p>Какие базовые рекомендации по ЭМС-проектированию желательно использовать на начальных этапах разработки?</p> <p>А – использовать максимальное количество экранирующих структур</p> <p>Б – минимизировать площадь петель, связанных с ВЧ сигналами</p> <p>В – заземляющий слой (возвратный слой) не должен быть разделен на части, иметь вырезы или щели</p> <p>Г – не располагать высокоскоростные (высокочастотные) цепи между разъемами</p>

Практические задания для 3-го семестра

1	<p>Сигнал, распространяясь на 1 км по коаксиальному кабелю, теряет половину напряжения. Выразите:</p> <p>а) отношение входного напряжения к выходному;</p> <p>б) отношение входной мощности к выходной;</p> <p>в) отношение входного напряжения к выходному в дБ;</p> <p>г) отношение входной мощности к выходной в дБ.</p>														
2	<p>Переведите в дБ отношения следующих величин:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">200 мкВ/м : 100 мкВ/м</td> <td style="width: 50px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">300 мВ : 100 мВ</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">400 мА : 100 мА</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">500 мкА/м : 100 мкА/м</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2 мкВт : 1 мкВт</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3 мВт : 1 мВт</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5 мВт : 1 мВт</td> <td></td> </tr> </table>	200 мкВ/м : 100 мкВ/м		300 мВ : 100 мВ		400 мА : 100 мА		500 мкА/м : 100 мкА/м		2 мкВт : 1 мкВт		3 мВт : 1 мВт		5 мВт : 1 мВт	
200 мкВ/м : 100 мкВ/м															
300 мВ : 100 мВ															
400 мА : 100 мА															
500 мкА/м : 100 мкА/м															
2 мкВт : 1 мкВт															
3 мВт : 1 мВт															
5 мВт : 1 мВт															
3	<p>Выразите следующие значения через их нормальные величины:</p> <p>а) 6 дБ(мкВ);</p> <p>б) 20 дБ(мкА);</p> <p>в) 20 дБ(А);</p> <p>г) 100 дБ(мкВ/м);</p> <p>д) 100 дБ(мкВт).</p>														
4	<p>Выразите следующие соотношения в дБ:</p> <p>46 дБ(мкВ/м) : 40 дБ(мкВ/м) -></p> <p>50 дБ(мВ) : 40 дБ(мВ) -></p> <p>52 дБ(мА) : 40 дБ(мА) -></p> <p>54 дБ(мкА/м) : 40 дБ(мкА/м) -></p> <p>3 дБ(мкВт) : 0 дБ(мкВт) -></p> <p>7 дБ(мВт) : 3 дБ(мВт) -></p>														
5	<p>Выразите в дБ следующие значения измеренного напряжения, полагая, что они были получены на 50-омном осциллографе.</p>														

$$1 \text{ мкВ} \Rightarrow \frac{(1 \text{ мкВ})^2}{50} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left(\frac{2 \cdot 10^{-11} \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = -107 \text{ дБм};$$

$$2 \text{ мкВ} \Rightarrow \frac{(2 \text{ мкВ})^2}{50} = 8 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left(\frac{8 \cdot 10^{-11} \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = -101 \text{ дБм};$$

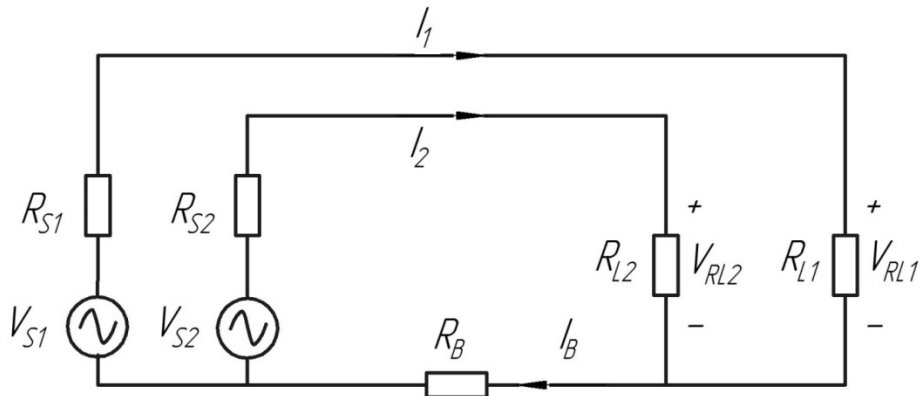
$$10 \text{ мкВ} \Rightarrow \frac{(10 \text{ мкВ})^2}{50} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left(\frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = -87 \text{ дБм};$$

$$1 \text{ В} \Rightarrow \frac{(1 \text{ В})^2}{50} = 0,02 \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left(\frac{20 \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = 13 \text{ дБм};$$

$$2 \text{ В} \Rightarrow \frac{(2 \text{ В})^2}{50} = 0,08 \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left(\frac{80 \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = 19 \text{ дБм};$$

$$10 \text{ В} \Rightarrow \frac{(10 \text{ В})^2}{50} = 2 \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left(\frac{2000 \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = 33 \text{ дБм}.$$

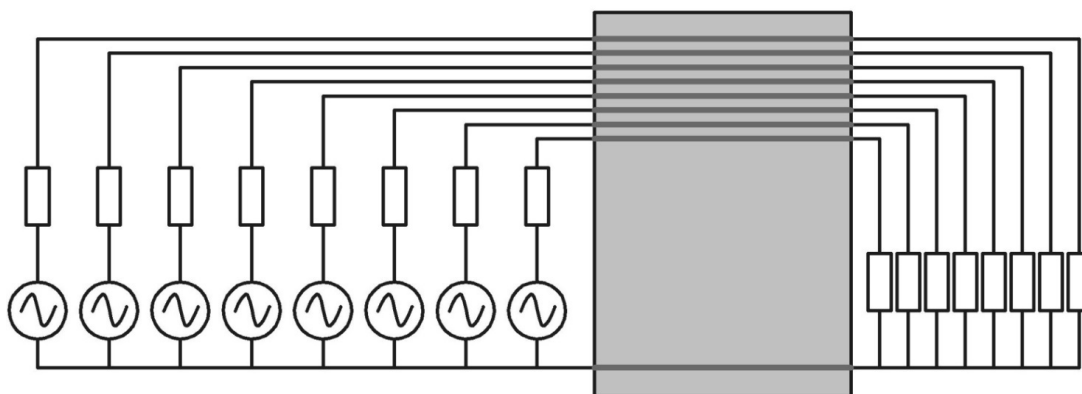
6 *Рассчитать перекрестные помехи между двумя 50-омными цепями.*



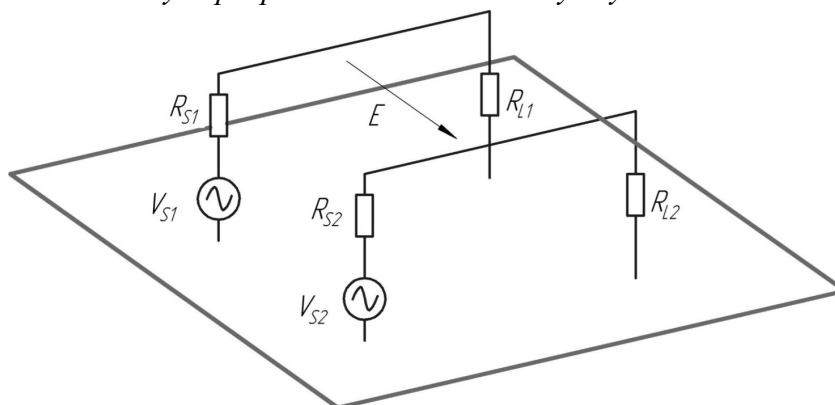
Для схемы, представленной на рисунке, величины $R_{S1} = R_{L1} = R_{S2} = R_{L2}$ равны 50 Ом. Предположим, что сопротивление возвратного проводника равно 0,1 Ом.

7 *Ленточный кабель длиной 0,2 м, состоящий из 9 проводников и представленный на рисунке, используется в 8-битной шине данных с общим возвратным проводником. Удельное сопротивление каждого проводника на частоте 2,0 МГц составляет 1,1 Ом/м. Каждая линия данных подключена к источнику с внутренним сопротивлением 10 Ом и нагружена на 50-омный резистор. Рассчитайте перекрестные помехи между любыми двумя линиями данных на частоте 2,0 МГц, возникающие из-за связи через общее сопротивление.*

9-ти жильный ленточный кабель

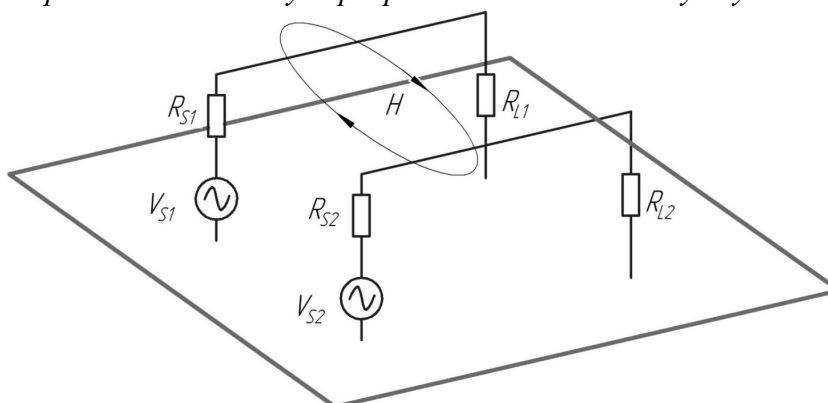


8 Определить величину перекрестных помех между двумя 150-омными цепями.

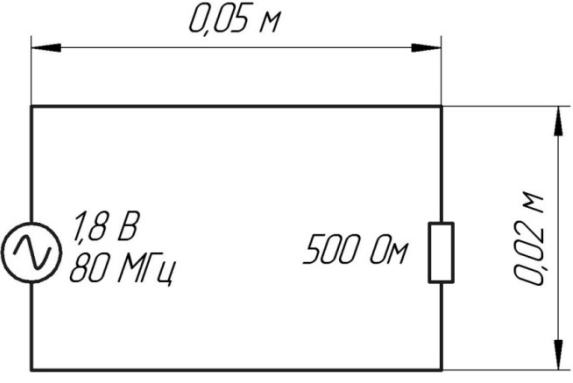
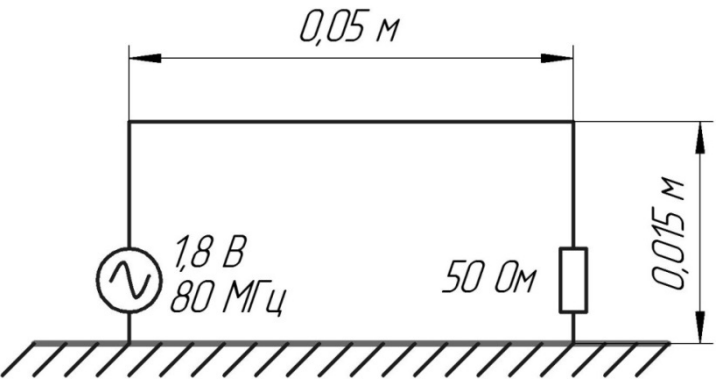
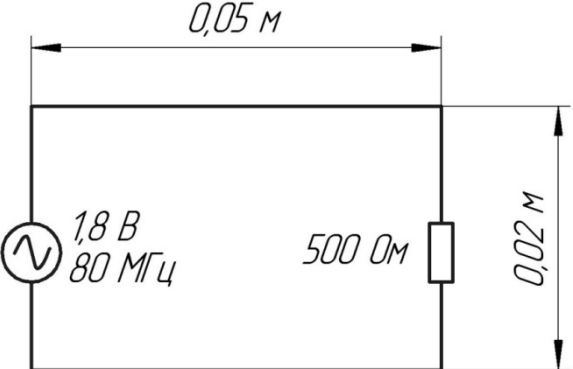


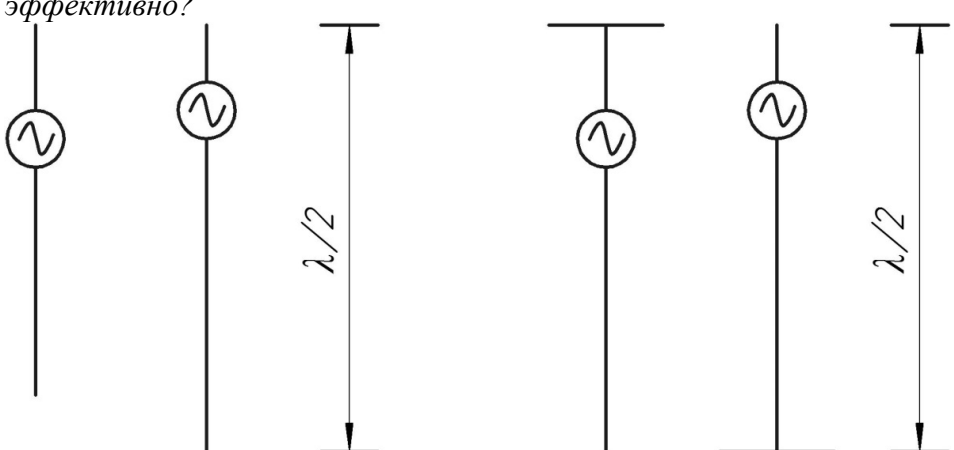
Для структуры, представленной на рисунке, длину сигнальных проводников принять равной 0,16 м, радиус проводников 0,8 мм, расстояние между проводниками 3 мм, высоту над проводящей плоскостью 4 мм. Величины $R_{S1} = R_{S2} = 10 \text{ Ом}$, $R_{L1} = R_{L2} = 150 \text{ Ом}$. Рассчитать уровень перекрестных помех из-за паразитной емкостной связи между этими цепями на частоте 50 МГц.

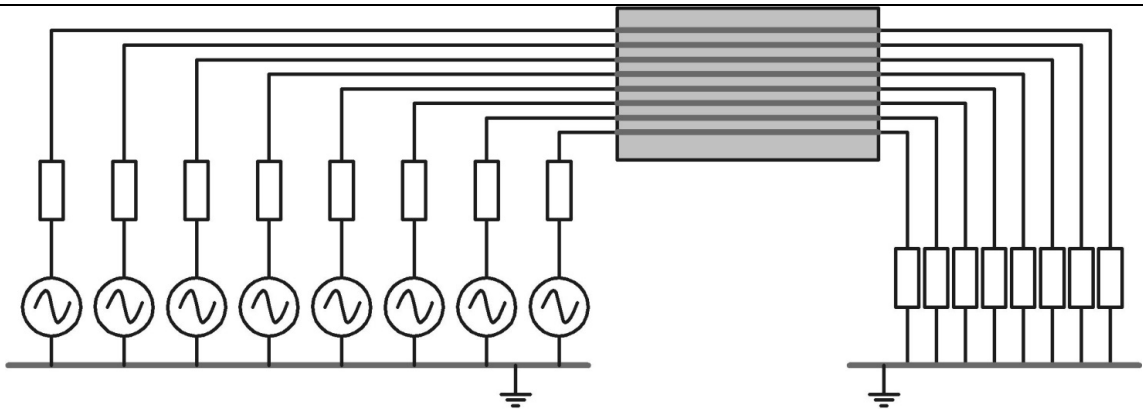
9 Определить величину перекрестных помех между двумя 50-омными цепями.



Для структуры, представленной на рисунке, длину сигнальных проводников принять равной 0,16 м, радиус проводников 0,6 мм, расстояние между проводниками 5 мм, высоту над проводящей плоскостью 20 мм. Величины $R_{S1} = R_{S2} = 10 \text{ Ом}$, $R_{L1} = R_{L2} = 50 \text{ Ом}$. Рассчитать уровень перекрестных помех из-за паразитной индуктивной связи между этими цепями на частоте 10 МГц.

10	<p>Если напряженность излучаемого электрического поля в вакууме на расстоянии 3 м от малого источника составляет 40 дБмкВ/м, то чему она будет равна на расстоянии 10 м от того же источника?</p> <p>а) 40 дБмкВ/м; б) 30 дБмкВ/м; в) 20 дБмкВ/м.</p>
11	<p>Вычислить максимальную напряженность излучаемого электромагнитного поля от цепи, представленной на рисунке. Радиус проводников принять равным 0,5 мм. Определить, удовлетворяет ли уровень помехоэмиссии от этой цепи требованиям нормативов FCC класс В?</p> 
12	<p>Вычислить максимальную напряженность излучаемого электромагнитного поля от цепи, представленной на рисунке. Размеры заземляющего слоя принять равными 0,1×0,1 м, радиус проводника принять равным 0,5 мм. Определить, удовлетворяет ли уровень помехоэмиссии от этой цепи требованиям нормативов FCC класс В?</p> 
13	<p>Рассчитать эффективность излучения электрически малой 500-омной цепи с размерами 0,05×0,03 м, представленной ранее на рисунке.</p> 

14	<p>Рассчитать излучаемую мощность полуволнового резонансного диполя без потерь, возбуждаемого источником напряжением 1 В. Определить максимальную напряженность излучаемого поля на расстоянии 3 м от антенны.</p>
15	<p>Рассчитать эффективность излучения полуволнового симметричного вибратора с центральным возбуждением, сделанного из медного провода радиусом 0,5 мм на частоте 100 МГц.</p>
16	<p>Определить чему приблизительно равна частота излучения проводника длиной 0,25 м, присоединенного к крупному металлическому объекту и образующего четвертьволновую несимметричную антенну?</p>
17	<p>Определить, какая из антенн в каждой паре, представленных на рис. 4.13, излучает более эффективно?</p>  <p style="text-align: center;">пара А пара Б</p>
18	<p>Сравнить фактическое максимальное напряжение, наводимое полуволновым диполем в приемнике, имеющим входное сопротивление 500 Ом с расчетным значением по формуле $V_{\text{ПР}} \approx E_{\text{ВХ}} I_{\text{АН}}$</p>
19	<p>Сравнить фактическое максимальное напряжение, наводимое электрически коротким диполем в согласованном приемнике с расчетным значением по формуле $V_{\text{ПР}} \approx E_{\text{ВХ}} I_{\text{АН}}$</p>
20	<p>В процессе разработки системы инженеру-проектировщику потребовалось соединить два блока при помощи 8-битного канала связи. Для этого был выбран 8-жильный кабель соединяющий блоки в соответствии с рисунком. Однако в ходе предварительных испытаний были обнаружены серьезные проблемы в части электромагнитной восприимчивости. Что, с точки зрения теории ЭМС, было сделано неверно и какие способы исправления можно предложить?</p>



21

Для всех вариантов линий передач, представленных на рис. 5.6, определите основной возвратный путь тока.

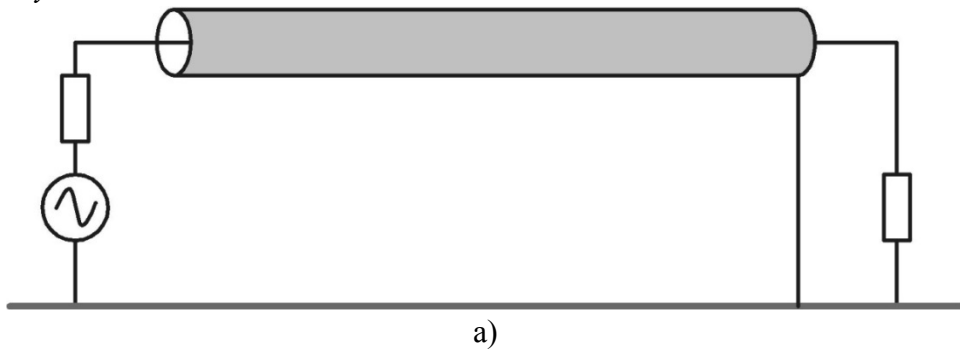
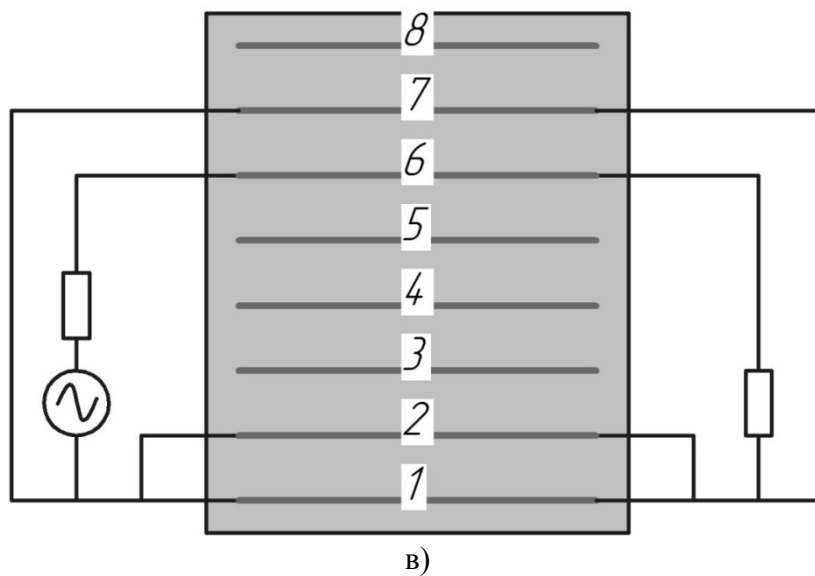
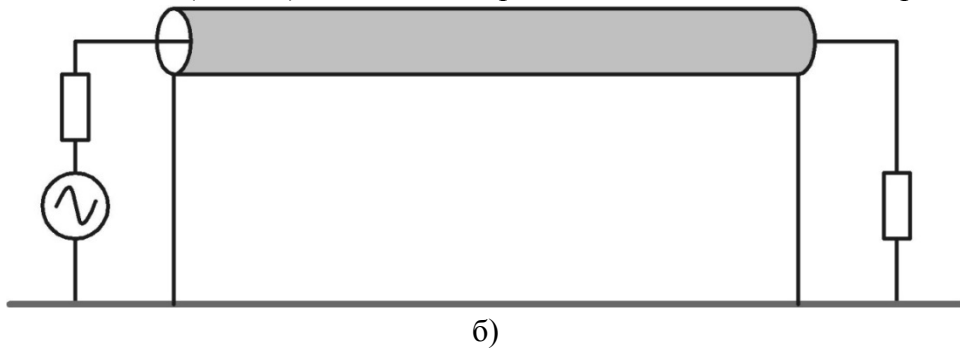
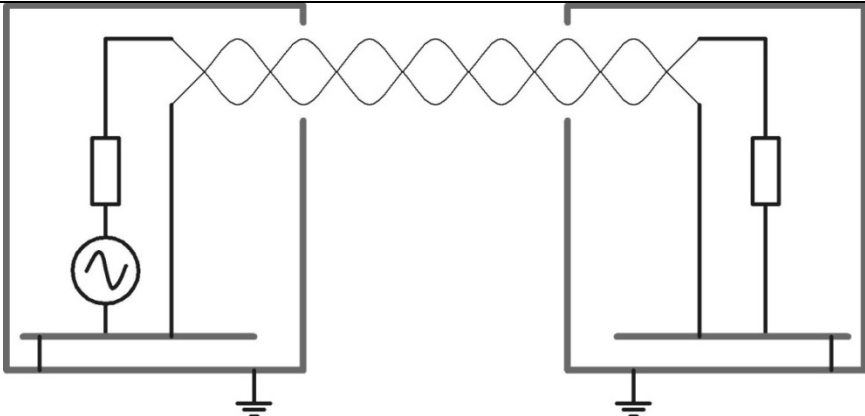
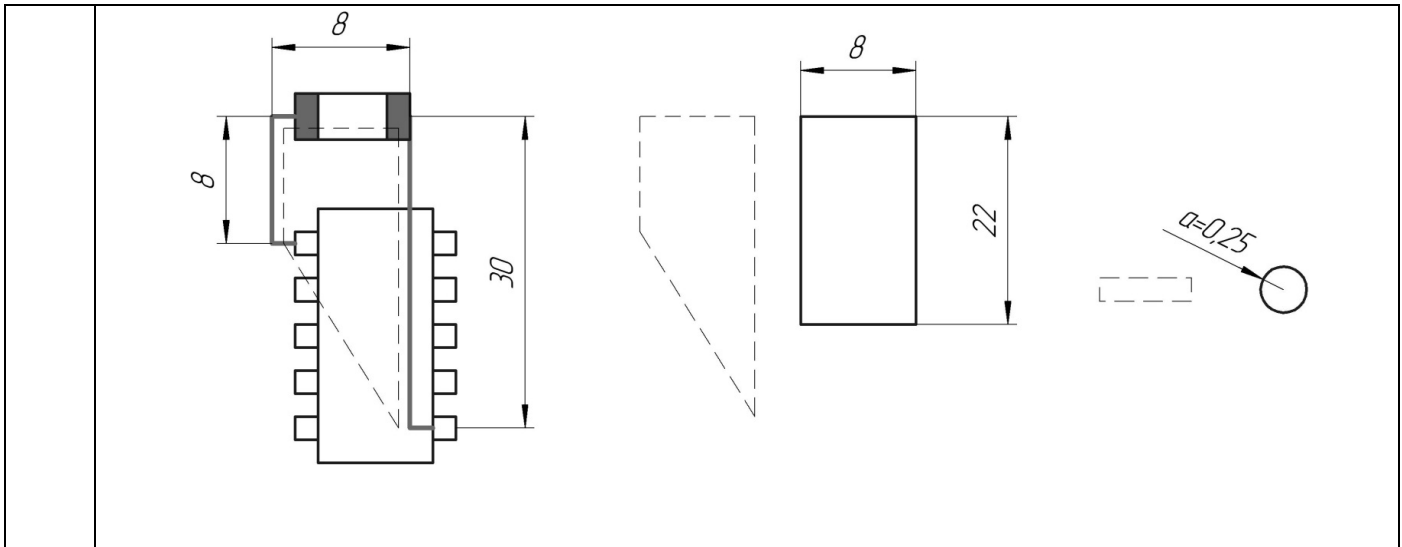


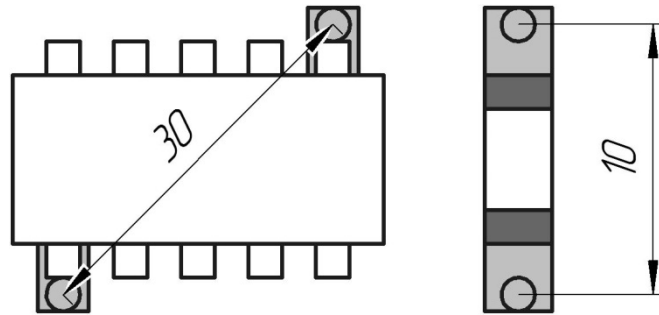
Рис. 5.6 (начало). Различные варианты исполнения линии передачи



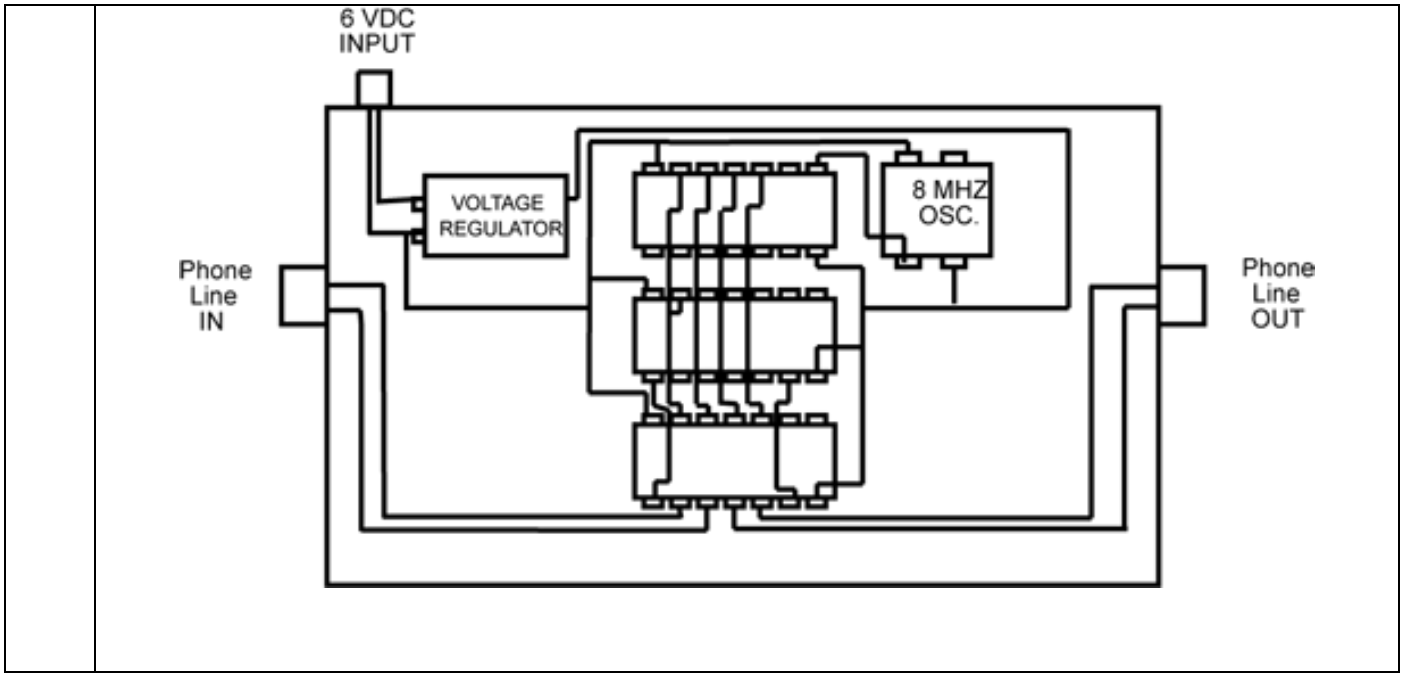
	 <p style="text-align: center;">г)</p>
22	<p>Определить эффективность экранирования листа из медной фольги толщиной 0,05 мм. Удельную электропроводность меди на частоте 100 МГц принять равной $5,81 \cdot 10^7$ См/м, магнитную проницаемость принять равной $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.</p>
23	<p>На расстоянии 0,1 м от работающего трансформатора расположена экранирующая структура, сделанная из медного листа толщиной 10 мм. Оцените эффективность экранирования такого экрана на частоте 1,5 кГц.</p>
24	<p>Итоговая эффективность экранирования корпуса, сделанного из материала ослабляющего плоскую волну на 60 дБ, будет:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) примерно 60 дБ; б) всегда меньше чем 60 дБ; в) обычно больше чем 60 дБ; г) иногда меньше чем 0 дБ.
25	<p>Разработчик проектирует высокоскоростную МПП, и ему необходимо проложить печатный проводник для ВЧ сигнала от цифрового компонента к аналоговому усилителю. Какая из трех представленных ниже рекомендаций позволит минимизировать вероятность проблем в части ЭМС в данном случае?</p> <ul style="list-style-type: none"> а) минимизировать длину высокоскоростных печатных проводников; б) всегда обеспечивать зазор в слоях питания/заземления между аналоговой и цифровой частью платы; в) никогда не располагать высокоскоростной печатный проводник над зазором в возвратном слое.
26	<p>Для ПП с системой питания в виде печатных проводников определить индуктивность соединения развязывающего конденсатора, подключенного к ИМС в соответствии с рисунком. Ширину печатных проводников принять равной 1 мм.</p>



27 Для ПП с системой питания в виде слоев питания/заземления определить индуктивность соединения развязывающего конденсатора, подключенного к ИМС в соответствии с рисунком. DIP корпус ИМС и конденсатор располагаются на высоте 3 мм от ближайшего питающего слоя. Ширину печатных проводников принять равной 1 мм, диаметр переходных отверстий принять равным 1 мм. Собственным импедансом слоев питания/заземления пренебречь.



28 Был разработан опытный образец телефонного автоответчика, трассировка ПП которого представлена на рисунке. Однако при подключении автоответчика к телефонной линии создаваемое им излучение привело к появлению помех на телевизоре. Следуя базовым рекомендациям, приведенным выше, необходимо переработать ПП автоответчика для ослабления излучаемых ЭМП. Для уменьшения себестоимости проект должен быть выполнен только на ОПП.



Моделирование и анализ электромагнитной совместимости РЭС

Указания к лабораторным работам (всего 4 лаб. работы)

На странице <https://cecas.clemson.edu/cvel/emc/index.html> раздел **EMC Tools**

Каждая лаб. работа содержит обычную структуру – название, цель, краткие теоретические сведения, практическое выполнение, вывод. *Особое внимание обратить на правильный перевод технических терминов!*

Лаб. работа 1 – Анализ индуктивности и сопротивления проводников различного вида

Работаем с разделами - *Inductance Calculator* и *Resistance Calculator*

- необходимо провести анализ индуктивности для всех представленных десяти форм проводников

- необходимо провести анализ сопротивления для всех представленных четырех форм проводников

Размеры структур, кол-во витков, расстояния, физические параметры и прочие необходимые данные берем из своей практической деятельности. При необходимости уметь пояснить, почему было выбрано именно такое значение.

В отчет вставить рисунки проводников, пояснения, формулы, расчеты, выводы

Лаб. работа 2 – Анализ эффективности электромагнитных экранов различных вариантов исполнения

Работаем с разделом - *Shielding Effectiveness Plotter/Calculator*

- необходимо провести анализ эффективности экранирования для различных материалов исполнения экрана (в базе 9 материалов) при одинаковой толщине стенки

Размеры структур, кол-во витков, расстояния, физические параметры и прочие необходимые данные берем из своей практической деятельности. При необходимости уметь пояснить, почему было выбрано именно такое значение.

В отчет вставить графики, пояснения, формулы, расчеты, выводы

Лаб. работа 3 – Анализ параметров линий передач различного вида

Работаем с разделом - *Transmission Line Parameter Calculator*

- необходимо провести анализ удельных величин сопротивления, индуктивности и емкости, а также полный импеданс для линии передачи в четырех различных вариантах исполнения.

Размеры структур, кол-во витков, расстояния, физические параметры и прочие необходимые данные берем из своей практической деятельности. При необходимости уметь пояснить, почему было выбрано именно такое значение.

В отчет вставить рисунки линий передач, пояснения, формулы, расчеты, выводы

Лаб. работа 4 – Анализ импеданса печатных проводников различного вида

Работаем с разделом - *PCB Trace Impedance Calculator*

- необходимо провести анализ удельных величин сопротивления, индуктивности и емкости, а также полный импеданс для четырех наиболее распространенных вариантов исполнения печатных проводников

Размеры структур, кол-во витков, расстояния, физические параметры и прочие необходимые данные берем из своей практической деятельности. При необходимости уметь пояснить, почему было выбрано именно такое значение.

В отчет вставить рисунки печатных проводников, пояснения, формулы, расчеты, выводы

Моделирование и анализ электромагнитной совместимости РЭС

Указания к курсовому проекту

Тема курсового проекта формулируется как «Проведение моделирования и анализа параметров ЭМС РЭС», по вариантам.

Каждый студент по указанию преподавателя получает для рассмотрения и изучения одну из программ (**лично под роспись в бланке**).

На странице <https://cecas.clemson.edu/cvel/modeling/EMAG/free-codes.html> приведен список бесплатного ПО для проведения моделирования различных электромагнитных процессов с ссылками на сайты разработчиков.

Курсовой проект, кроме традиционных

- *Титульный лист*
- *Бланк задания*
- *Введение*
- *Заключение*
- *Список литературы,*

содержит три основных раздела:

- Современное состояние в области моделирования и анализа параметров обеспечения электромагнитной совместимости
- Описание программного комплекса ... (название выданного варианта)
- Практические примеры выполненного моделирования

Общий объем курсового проекта составляет 30-40 страниц. Оформление по стандартам ВГТУ