

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  
«Электромагнитная совместимость»  
для студентов направления  
11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств»  
всех форм обучения

*задания для практических работ*  
*задания для лабораторных работ*  
*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 – <math>r &gt; 2 \pi \lambda</math>  Б – <math>r &lt; 2f / c</math>  В – <math>r &lt; 2\lambda / \pi</math></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  Б – минимальная индуктивность позволяет максимально повысить рабочую частоту  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  Б – минимизировать площадь петель, связанных с ВЧ сигналами  В – заземляющий слой (возвратный слой) не должен быть разделен на части, иметь вырезы или щели  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;  б) отношение входной мощности к выходной;  в) отношение входного напряжения к выходному в дБ;  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);  б) 20 дБ(мкА);  в) 20 дБ(А);  г) 100 дБ(мкВ/м);  д) 100 дБ(мкВт).</p>														
4	<p><b>Выразите следующие соотношения в дБ:</b></p> <p>46 дБ(мкВ/м) : 40 дБ(мкВ/м)           -&gt;  50 дБ(мВ) : 40 дБ(мВ)                   -&gt;  52 дБ(мА) : 40 дБ(мА)                   -&gt;  54 дБ(мкА/м) : 40 дБ(мкА/м)           -&gt;  3 дБ(мкВт) : 0 дБ(мкВт)               -&gt;  7 дБ(мВт) : 3 дБ(мВт)                   -&gt;</p>														
5	<p>Выразите в дБ следующие значения измеренного напряжения, полагая, что они были получены на 50-омном осциллографе.</p>														

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

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

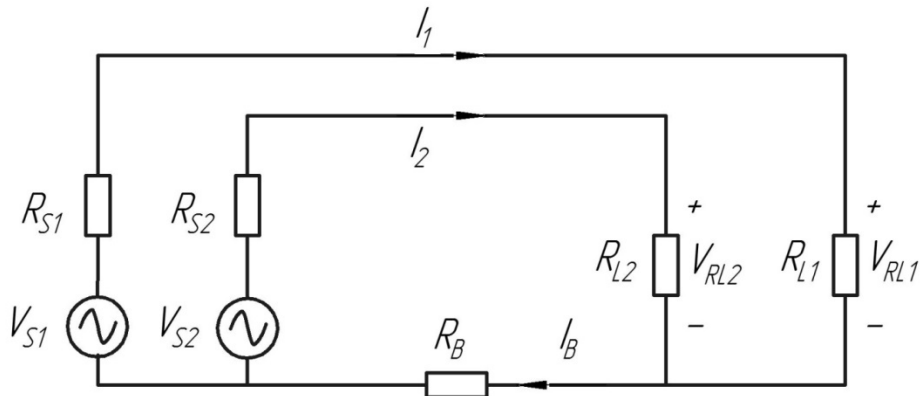
$$10 \text{ мкВ} \Rightarrow \frac{(10 \text{ мкВ})^2}{50} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \Rightarrow 10 \log \left( \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ мВт}}{1 \text{ мВт}} \right) = -87 \text{ дБм};$$

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

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

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

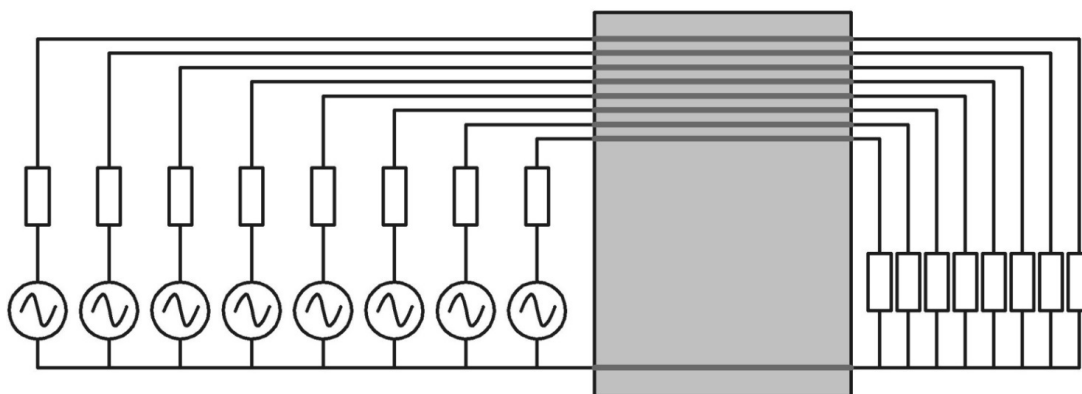
6 *Рассчитать перекрестные помехи между двумя 50-омными цепями.*



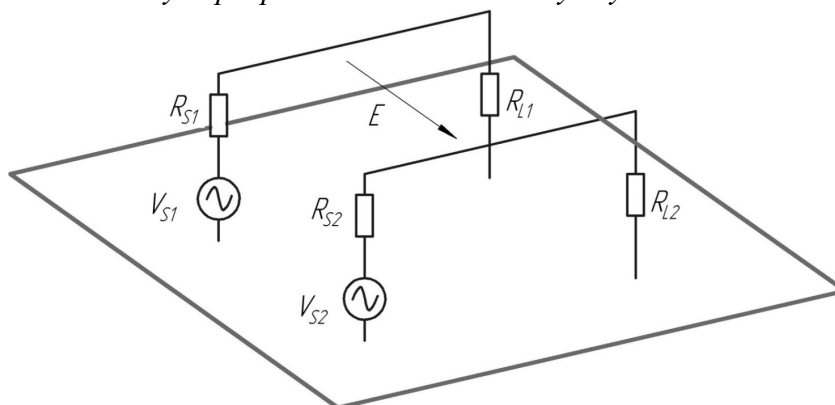
Для схемы, представленной на рисунке, величины  $R_{S1} = R_{L1} = R_{S2} = R_{L2}$  равны 50 Ом. Предположим, что сопротивление возвратного проводника равно 0,1 Ом.

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

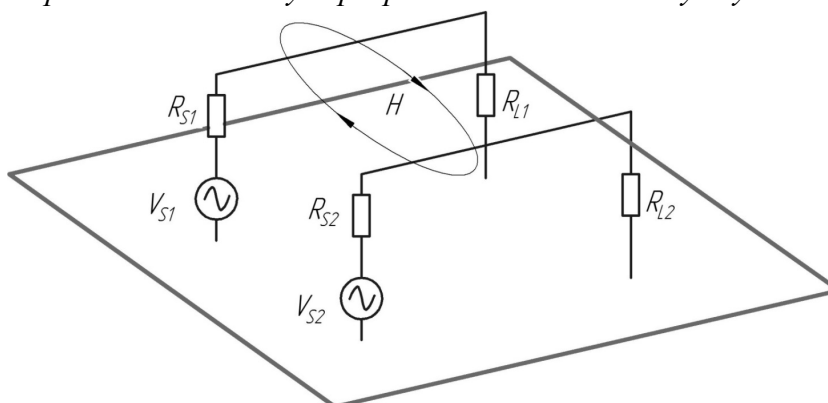


8 Определить величину перекрестных помех между двумя 150-омными цепями.

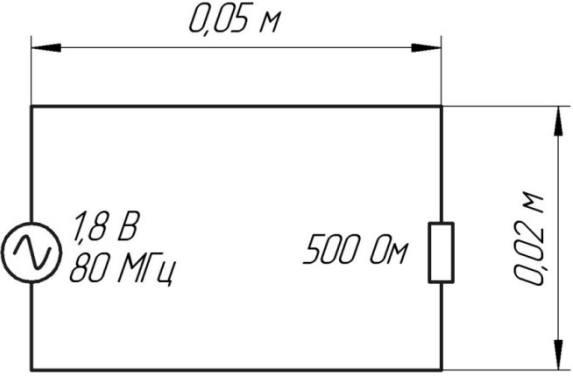
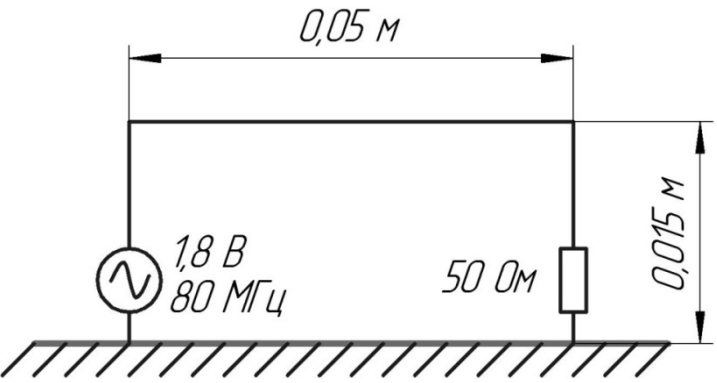
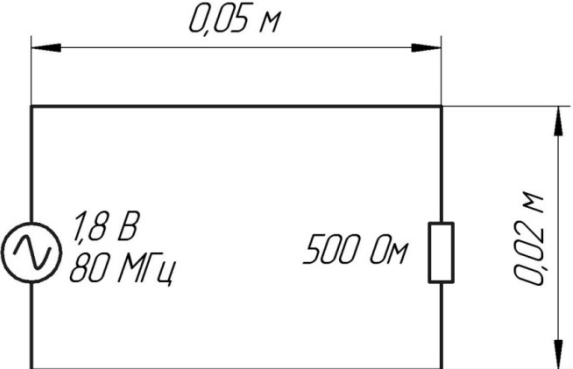


Для структуры, представленной на рисунке, длину сигнальных проводников принять равной 0,16 м, радиус проводников 0,8 мм, расстояние между проводниками 3 мм, высоту над проводящей плоскостью 4 мм. Величины  $R_{S1} = R_{S2} = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_{L1} = R_{L2} = 150 \text{ Ом}$ . Рассчитать уровень перекрестных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

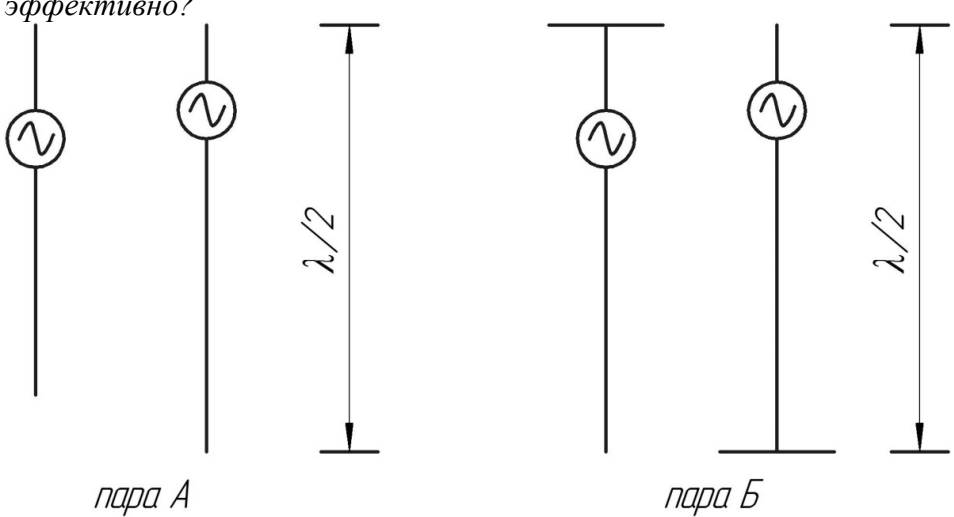
9 Определить величину перекрестных помех между двумя 50-омными цепями.

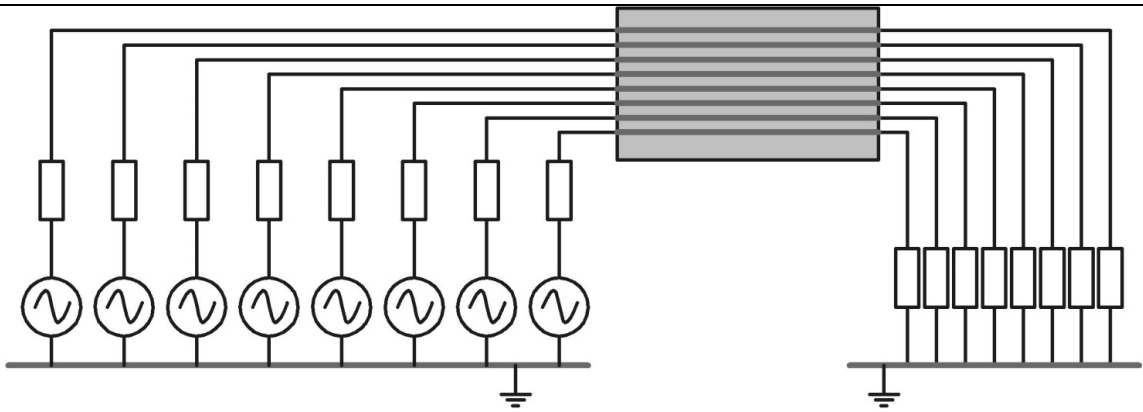


Для структуры, представленной на рисунке, длину сигнальных проводников принять равной 0,16 м, радиус проводников 0,6 мм, расстояние между проводниками 5 мм, высоту над проводящей плоскостью 20 мм. Величины  $R_{S1} = R_{S2} = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_{L1} = R_{L2} = 50 \text{ Ом}$ . Рассчитать уровень перекрестных 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>пара А</p> <p>пара Б</p>
18	<p>Сравнить фактическое максимальное напряжение, наводимое полуволновым диполем в приемнике, имеющим входное сопротивление 500 Ом с расчетным значением по формуле <math>V_{ПР} \approx  E_{ВХ}  I_{АН}</math></p>
19	<p>Сравнить фактическое максимальное напряжение, наводимое электрически коротким диполем в согласованном приемнике с расчетным значением по формуле <math>V_{ПР} \approx  E_{ВХ}  I_{АН}</math></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.

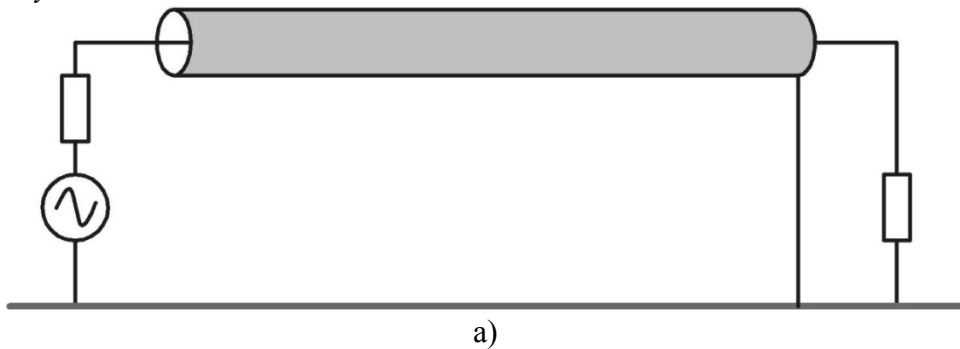
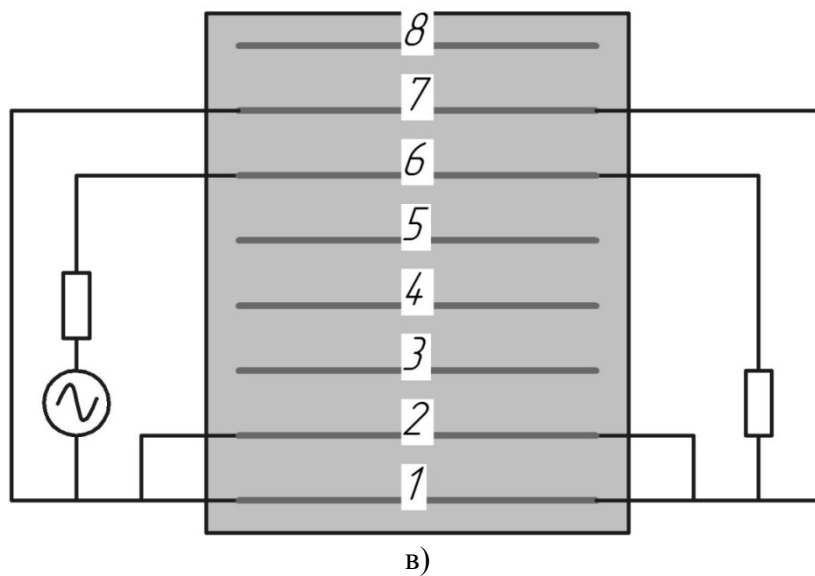
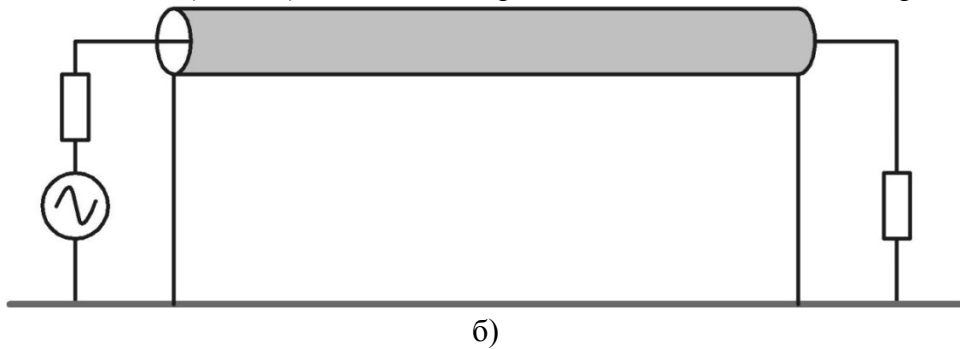
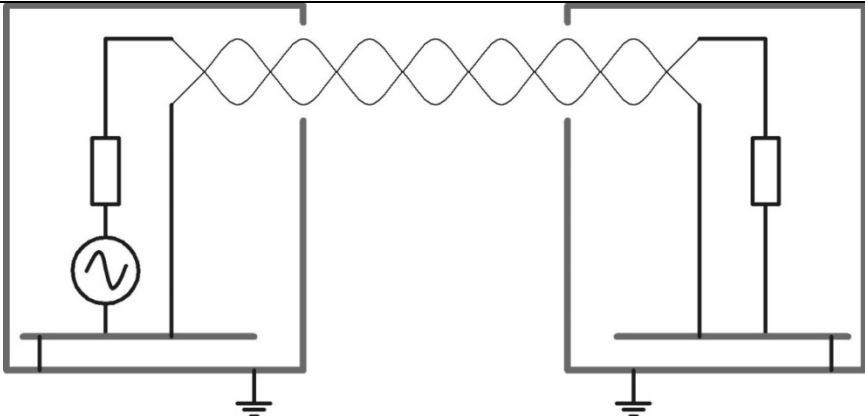
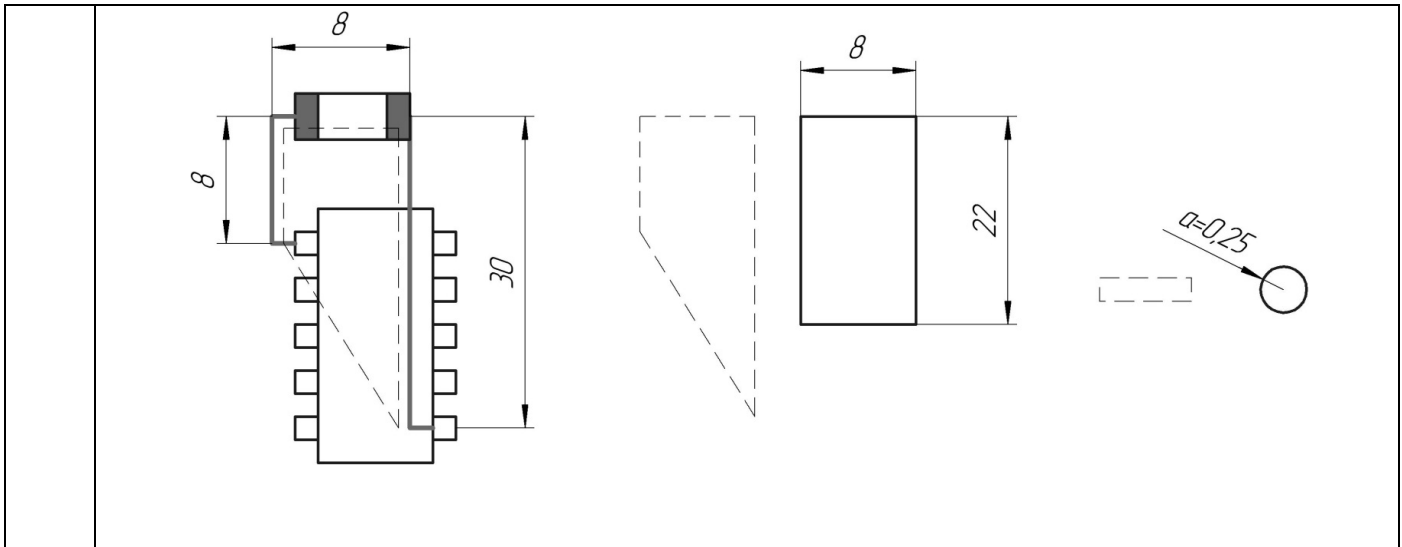


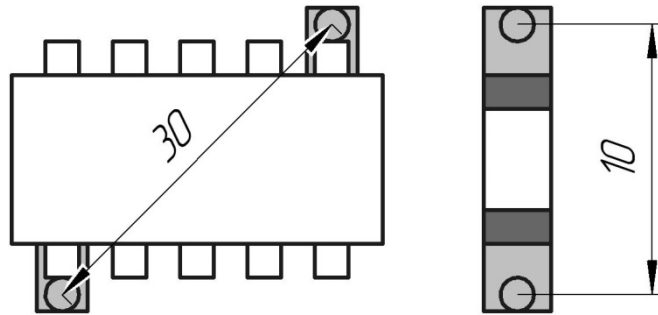
Рис. 5.6 (начало). Различные варианты исполнения линии передачи



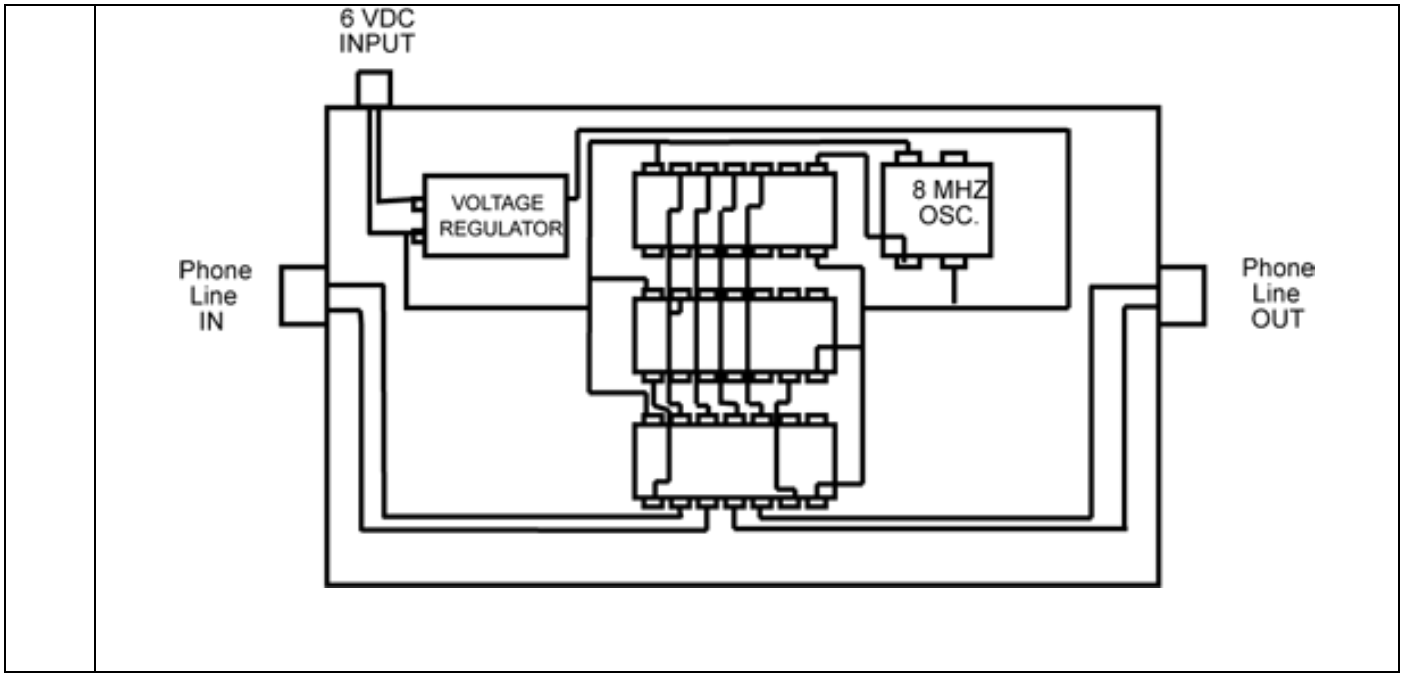
	 <p style="text-align: center;">г)</p>
22	<p>Определить эффективность экранирования листа из медной фольги толщиной 0,05 мм. Удельную электропроводность меди на частоте 100 МГц принять равной <math>5,81 \cdot 10^7</math> См/м, магнитную проницаемость принять равной <math>4\pi \cdot 10^{-7}</math> Гн/м.</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> <ol style="list-style-type: none"> <li>примерно 60 дБ;</li> <li>всегда меньше чем 60 дБ;</li> <li>обычно больше чем 60 дБ;</li> <li>иногда меньше чем 0 дБ.</li> </ol>
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> <ol style="list-style-type: none"> <li>минимизировать длину высокоскоростных печатных проводников;</li> <li>всегда обеспечивать зазор в слоях питания/заземления между аналоговой и цифровой частью платы;</li> <li>никогда не располагать высокоскоростной печатный проводник над зазором в возвратном слое.</li> </ol>
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