

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор

ОКБ «Электроавтоматика»

В.Д.Суслов

Обеспечение электромагнитной совместимости бортовой
авиационной аппаратуры

Руководство

ВИДК.460009.008

ОГК А.Н. Романов
НТК Н.А. Нежаев НИТО А.А. Абдурахманов

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Содержание

Стр.

1	Введение	4
2	Помехоустойчивость цифровых модулей и систем на их основе. Общие сведения .	5
3	Излучения от жгутов и кабелей	8
4	Помехи в сигнальных линиях связи	10
4.1	Перекрестные помехи	10
4.2	Электромагнитные наводки	10
4.3	Паразитные колебания в несогласованных линиях	11
5	Восприимчивость логических схем и элементов к радиоизлучениям	12
6	Защита логических схем и элементов от перегрузок	13
7	Типы шин заземления в печатных платах	14
8	Особенности конструирования многослойных печатных плат	15
8.1	Общие требования	15
8.2	Трассировка дифференциальных пар	16
8.3	Заземление в многослойных печатных платах	18
8.4	Паразитные параметры МПП	19
8.5	Диэлектрические потери	19б
8.6	Электрические соединители	20
8.7	Шероховатость поверхности материалов МПП.	20а
9	Электростатический разряд	21
10	Защита от вторичных разрядов	22
11	Снижение импульсных токов помех от работы логических элементов	23
12	Снижение напряжения помех от индуктивных нагрузок	24
13	Критерии выбора компонентов для развязки по электропитанию	25
14	Снижение уровня помех от работы импульсных источников электропитания	27
15	Требования к электропитанию быстродействующих схем	29
16	Помехоустойчивость аналоговых схем	30
17	Кабели, электрические соединители и их экранирование	32
18	Элементы индикации, смотровые окна и вентиляционные отверстия	34
19	Полное экранирование	35
19.1	Критерии выбора материала для полного экранирования	35
19.2	Неоднородность электромагнитного экрана	36
19.3	Эффективность экранирования	38

Перв. примен. -----
Справ. №

Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. № 2-144

Подп. и дата 26.05.09

Инв. № подл. 2-158

--	--	--

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008					
	Разраб.	Воробьев			Обеспечение электромагнитной совместимости бортовой авиационной аппаратуры Руководство			Лит.	Лист	Листов
	Пров.	Гужова							2	80
	НИЛ-21	Петухов								
	Н.контр.	Панфилова								

20	Принцип соответствия	39
21	Объемный резонанс	40
22	Радиолокационные станции как источники ЭМП	41
23	Электромагнитный импульс как источник ЭМП	42
24	Линии электропередач как источник ЭМП	43
25	Асимметрия фронтов импульсов переключения	44
26	Неиспользуемые входные цепи логических интегральных схем	45
27	Интермодуляционные составляющие ЭМП	46
28	Неиспользуемое пространство памяти программ	47
29	Излучения и помехи в волоконно-оптических линиях	47a
30	Нормативные ссылки	48
31	Перечень принятых сокращений	49
32	Перечень принятых терминов и определений	50
33	Список используемой технической литературы	50a
	Приложение А Распределение возвратных токов в МПП	51
	Приложение Б Влияние разрыва в полигоне на распределение возвратных токов в МПП	52
	Приложение В Трассировка цепей электропитания больших ИС на МПП	53
	Приложение Г Паразитная связь через изолированные металлические крышки ИС ..	54
	Приложение Д Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов	55
	Приложение Е Петля, образованная прямым и возвратным током	56
	Приложение Ж Компоновка эсементов схемы зависимости от быстродействия ЭРИ ..	57
	Приложение И Изменение собственной индуктивности и емкости электрических проводов	58
	Приложение К Децибелы	59
	Приложение Л Примеры, иллюстрирующие работу экрана	60
	Приложение М Заземление электрических проводов	62
	Приложение Н Электромонтаж конденсаторов	63
	Приложение П Требования стандартов по восприимчивости авионики ЛА к ЭМП	64
	Приложение Р Варианты согласования электрических линий связи	65
	Приложение С Взаимодействие возвратных токов дифференциальной пары проводников ...	66
	Приложение Т Разделение шин заземления цифровых и аналоговых схем	67
	Приложение У Шероховатость поверхности МПП	68

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и датаΣ
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

3

1 Введение

Настоящее руководство предназначено для разработчиков электронной и оптико-электронной аппаратуры самолетов и вертолетов. Руководство дает общие и некоторые частные представления о проблемах помехоустойчивости, ЭМС и помехоэмиссии составных частей и готовых изделий, позволяет определить критерии, влияющие на электромагнитную обстановку изделия, его помехоустойчивость и выбрать правильные пути, направленные на снижение помехоэмиссии, обеспечения хорошей ЭМС на этапе проектирования новых изделий, их составных частей, и модернизации старых образцов.

Руководство снабжено графическими приложениями для наглядной иллюстрации и понимания правильных и ошибочных путей решения поставленной задачи.

Конкретные рекомендации по разработке конструкций бортового РЭО с учетом присущей ему специфики в части ЭМС должны быть изложены в ТЗ на конструирование.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				4

2 Помехоустойчивость цифровых модулей и систем на их основе. Общие сведения

В цепях электропитания цифровых модулей возникают импульсные токи, обусловленные сквозными токами выходных каскадов логических элементов, а также токами перезарядки емкостей.

На высоких тактовых частотах и в схемах с быстродействующими цифровыми ИС особое значение приобретает волновое сопротивление $Z_{всс}$, $Z_{гнд}$ и шины "заземления".

Помехоустойчивость модуля или системы снижают перекрестные помехи в близлежащих шинах, передающих импульсные сигналы, из-за наличия паразитной индуктивной и емкостной связи. В отдельных случаях поверхностный бифилярный монтаж может оказаться предпочтительнее. Примером может служить трассировка силовых цепей от транзисторных ключей преобразователя в импульсных источниках электропитания.

Так как импульсные сигналы являются широкополосным источником гармонических частот, дать определение длины волны для них затруднительно. Из-за несогласованности волновых сопротивлений возникают паразитные колебания. Амплитуда этих колебаний ("звона") зависит от рассогласования Z источника и Z приемника и длины линии.

Коэффициент затухания передаваемого сигнала на каждом участке единичной длины электрической линии связи неизменен, а амплитуда сигнала уменьшается экспоненциально по мере удаления от источника сигнала. Для цифровых высокоскоростных устройств принято считать, что целостность сигнала обеспечивается, если длина электрической линии связи на порядок меньше длительности фронта передаваемого импульса, что невыполнимо в реальной конструкции. Рекомендуется согласование волновых сопротивлений Z источника и Z приемника активной последовательной или, если возможно, параллельной нагрузкой из резисторов с обоих концов электрической линии связи. Некоторые тонкости в различии способа согласования электрической линии связи иллюстрирует графическое Приложение Р настоящего Руководства. Для обеспечения целостности высокоскоростного информационного потока

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				5

вопрос согласования волнового сопротивления электрической линии связи из разряда рекомендуемых становится жизненно важной необходимостью.

Часть энергии от контуров, образованные шинами электропитания, излучается от печатной платы, в которой данные контура могут рассматриваться как рамочная антенна.

Контур, от площади которого зависит напряженность электрического поля, создаваемого протекающим током, должен быть известен на этапе топологического проектирования.

Очень важно знать полное сопротивление шин заземления. До соединения с эквипотенциальной поверхностью – плоскостью заземления все провода, подключаемые к этой точке или поверхности необходимо рассматривать, как цепь с распределенными L , C , R – параметрами, определяющими волновое сопротивление $Z_v = \sqrt{L/C}$.

С повышением частоты волновое сопротивление Z_v возрастает из-за увеличения индуктивного сопротивления шины до первой точки параллельного резонанса. Частота первой точки параллельного резонанса равна $F_p = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L/C})$.

Длина шины заземления должна быть меньше $0,05 \cdot \lambda$, где λ – минимальная длина волны рабочего диапазона изделия.

Для частоты 12000 МГц длина шины заземления не должна превышать 1,25 мм;

Для частоты 1215 МГц длина шины заземления не должна превышать 12,3 мм;

Для частоты 1000 МГц длина шины заземления не должна превышать 15 мм.

Таким образом, при испытаниях изделий на соответствие требованиям ОСТ В1 02696-90 длина шины заземления не должна превышать 15 мм, при испытаниях изделий на соответствие требованиям ЕНЛГС п. 8.1.4.1 или КТ-160D длина шины заземления не должна превышать 12,3 мм, а при испытаниях на восприимчивость аппаратуры к внешним ЭМП по ОСТ В1 02763-95 или КТ-160D длина шины заземления не должна превышать 1,25 мм, что невыполнимо в реальной конструкции.

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						6

Полное сопротивление на частотах свыше нескольких килогерц – преимущественно индуктивное. Снизить значение индуктивности проводника можно:

- минимизировав его длину;
- увеличив его ширину;
- расположив трассу с прямым и возвратным током на печатной плате параллельно и на минимальном расстоянии.

Индуктивность трассы печатной платы в первую очередь зависит от его длины и во вторую очередь является функцией его ширины. Поскольку индуктивность проводника связана логарифмической зависимостью с его диаметром, то удвоение диаметра проводника не снизит даже на 48% значение его индуктивности для диапазонов ОНЧ и НЧ. Для УКВ и СВЧ-диапазона этот показатель окажется значительно меньше: удвоение диаметра проводника не снизит даже на 25% значение его индуктивности.

В случае, когда источник радиопомех и потенциальный рецептор помехи находятся на достаточном удалении, паразитная емкостная и индуктивная связь пренебрежимо малы. В этом случае возможна электромагнитная связь через электромагнитное поле радиоизлучений. В пределах отдельного устройства РЭО такая связь возможна только на очень коротких волнах, при этом металлический кожух аппаратуры рассматривается как отрезок прямоугольного волновода. Наибольшую опасность представляет радиоизлучение с длиной волны $\lambda_{кр}=2A$, где A – размер большей стороны поперечного сечения прямоугольного волновода. Все остальные типы волн с длиной менее $\lambda_{кр}$ распространяются практически свободно с затуханием менее 1%. Любую конструкцию – помещение, блок, пульт и т.п. можно рассматривать как волновод с вполне определенной резонансной частотой и передаточной характеристикой.

Из вышесказанного следует, что когда источник радиопомех и потенциальный рецептор помехи находятся в пределах одного замкнутого металлического кожуха между ними возможна паразитная связь по полю, если они работают на частотах с длиной волны меньше или равной $\lambda_{кр}$.

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

					ВИДК.460009.008	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		7

Кроме того, в пределах одного электронного модуля возможно распространение ЭМП из-за наличия паразитной емкостной связи между близко расположенными ИС с металлическими корпусами или крышками. Очень многие разработчики радиоэлектронной аппаратуры за рубежом отдадут предпочтение микросхемам в керамическом или пластмассовом корпусе без металлических крышек из-за наличия паразитной емкостной связи между ИС. Этот фактор особенно актуален для быстродействующих цифровых и аналоговых схем.

Положения настоящего Руководства освещают наиболее важные аспекты ЭМС, дают общие и некоторые частные представления о проблемах помехоустойчивости, ЭМС и помехоэмиссии составных частей аппаратуры, позволяют принять правильные решения задач по обеспечению ЭМС бортовой авиационной аппаратуры, систем и комплексов.

Основные тенденции изменения требований к помехоустойчивости аппаратуры ЛА в стандартах США и Великобритании кратко отражены в Приложении П настоящего Руководства.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				7а

3 Излучения от жгутов и кабелей

Принято считать, что излучения электромагнитных помех от кабелей и жгутов в области УКВ-диапазона является доминирующим. Это связано большей частью с тем обстоятельством, что большинство жгутов и кабелей малогабаритных устройств имеют резонанс в области 30-150 МГц. Так, например, кабель интерфейса RS-232 на скорости обмена 19,2 кБод будет нести паразитные синфазные токи помех от цепи заземления, которая в свою очередь насыщена токами от цепей синхронизации контроллера и его гармониками на частотах в сотни мегагерц. Эти шумы возвращаются через связанную цепь заземления, образуя контур достаточно большой площади.

Меры снижения уровня излучаемых ЭМП от жгутов и кабелей:

- экранировка цепей с импульсными токами и наиболее важных аналоговых цепей с низким динамическим диапазоном;
- взаимная компенсация магнитных потоков, создаваемых этими цепями, за счет применения бифилярного монтажа;
- осуществление качественного заземления экранирующего слоя жгутов и снижение индуктивности при осуществлении металлизации экранирующего слоя жгутов и кабелей;
- снижение полного сопротивления шин заземления;
- снижение площади контура излучения ЭМП путем уменьшения длины жгутов и кабелей до необходимого и достаточного размера;
- размещение жгутов и кабелей как можно ближе к заземленным элементам конструкции: шасси, корпус блока и т.п. При удалении жгутов и кабелей от заземленных элементов конструкции более чем на 35мм их значение индуктивности близко к значению индуктивности таких линий в свободном пространстве;
- применение материалов с частотно-зависимыми свойствами на основе высокочастотных ферритов для экранирования силовых цепей, цепей с импульсными токами и наиболее важных аналоговых цепей с низким динамическим диапазоном.

На сегодняшний день существует широкий ассортимент материалов с частотно-зависимыми свойствами различных форм выпуска:

Инв.№ подл. 2-158	Подп. и дата 26.05.09	Взам. инв. № 2-144	Инв. № дубл.	Подп. и дата						Лист 8
					ВИДК.460009.008					
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

эластичные ленты, прокладки, термоусадочные трубки и т.п., выпускаемые зарубежными производителями и предлагаемые на российском рынке. Эти материалы ослабляют на 44-60 дБ электромагнитные поля в частотном диапазоне от 10 до 12000 МГц. Данные о наличии подобных материалов российского производства отсутствуют, однако работы по разработке технологии изготовления и освоению выпуска ведутся.

Необходимо помнить, что:

- применение электрических проводов с экранирующей оболочкой (оплеткой), не металлизированной с корпусом аппаратуры никакого экранирующего эффекта не дает;
- наличие у электрических проводов экранирующей оболочки увеличивает емкость такого участка цепи относительно корпуса;
- для достижения хорошего экранирующего эффекта необходимо особенно тщательная металлизация экранирующей оболочки электрических проводов с корпусом аппаратуры и исключение непреднамеренных точек заземления экранирующей оболочки в жгутах объемного монтажа.

Инв.№ покл. 2-158	Подп. и дата 26.05.09	Взам. инв. № 2-144	Инв. № дубл.	Подп. и дата						Лист 9
					ВИДК.460009.008					

4 Помехи в сигнальных линиях связи

При работе цифровых устройств, узлов и систем на их основе в линиях связи возникают импульсные помехи, способные нарушить нормальное функционирование схемы, узла или отдельных элементов. К числу таких помех относятся: перекрестные помехи, паразитные колебания из-за несогласованности волновых сопротивлений линий связи и электромагнитные наводки.

4.1 Перекрестные помехи

Как уже отмечалось, помехоустойчивость модуля или системы снижают перекрестные помехи в близлежащих шинах, передающих импульсные сигналы, из-за наличия паразитной индуктивной и емкостной связи.

Если считать фронт помехи линейным, изменяющимся по закону:

$a = (U_1 - U_0) / t_{\phi} = U / t_{\phi}$, то напряжение помехи на входе соседней ИС будет определяться соотношением:

$U_{вх2}(t) = a [1 - \exp(-t/RC)] * RC$, иными словами напряжение помехи пропорционально крутизне фронта.

Методы борьбы с перекрестными помехами:

- запрещение параллельной трассировки сигнальных линий;
- увеличение длительности фронтов передаваемых сигналов;
- размещение между параллельными сигнальными шинами линий связи заземленных проводников;
- применение коаксиальных электрических кабелей, витых пар электрических проводов и других мер, направленных на взаимную компенсацию магнитных потоков, уменьшение площади контура и снижение значений паразитных параметров линий связи.

4.2 Электромагнитные наводки

Электромагнитные наводки являются следствием воздействия внешних электромагнитных полей.

Методы борьбы с этим видом помех преимущественно конструктивные - экранирование аппаратуры и линий связи.

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008				
									10

4.3 Паразитные колебания в несогласованных линиях

Явление паразитных колебаний в линиях связи и причины, их возникновения неоднократно упоминались ранее. Амплитуда этих колебаний зависит от степени рассогласования волновых сопротивлений Z источника, Z приемника и длины линии. Понятие электрически длинная или короткая линия связи довольно условно.

Принято считать, что граничная длина линии связи определяет условие: время прохождения сигнала по линии должно быть на порядок меньше длительности передаваемого фронта.

Согласование линий может осуществляться у источника сигнала, у нагрузки электрической линии связи, или одновременно – у трансивера и ресивера сигнала.

Методы передачи целостного сигнала заключаются в согласовании волновых сопротивлений Z источника и Z приемника активной последовательной или, если возможно, параллельной нагрузкой из резисторов.

Основной недостаток параллельного согласования волновых сопротивлений – потребление значительных токов от источника сигнала.

Основным недостатком последовательного согласования волновых сопротивлений является снижение амплитуды передаваемых сигналов, поэтому для цифровой логики с относительно большими входными токами (ТТЛ, ТТЛШ) необходимо проконтролировать такую возможность.

Тонкости различия между основными вариантами согласования приведены в графическом Приложении Р к настоящему Руководству.

Для разработчика качественных схем высокоскоростного обмена и передачи информации согласование волновых сопротивлений электрической линии связи является обязательным.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				11

5 Восприимчивость логических схем и элементов к радиоизлучениям

По данным зарубежной печати максимум восприимчивости логических схем и элементов к ЭМП приходится на радиочастотный диапазон от 25 до 300 МГц. Этот фактор усугубляется наличием резонансных явлений в шинах связи. Основной отклик логических схем на уровне компонентов на радиочастотные внешние воздействия проявляется в виде джиттера (нестабильности фронта). Напряжение помех, синфазное с входным уровнем схемы формирует на нелинейных, активных элементах импульс, который способен (при условии, что параметр импульса помехи близок к параметрам импульса переключения) вызвать срабатывание логической схемы или логического элемента.

Не следует полагать, что только внешнее электромагнитное поле от стороннего источника способно вызвать отклик на уровне компонентов ЭРИ. Зачастую компоненты МПП, такие, как близко расположенные резисторы, электрические линии связи схемы и входы чувствительных электронных устройств и т.п., способны вызвать описываемый эффект.

Борьба с этим видом помех особенно актуальна в цепях синхронизации и передачи данных.

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						12

6 Защита логических схем и элементов от перегрузок

ЭМП может служить причиной перегрузки входных цепей цифровых логических схем и аналоговых цепей. Основной целью защиты входных цепей логических схем является ограничение тока во входной цепи и направление его от чувствительных элементов и устройств к структуре заземления. Классическим примером могут служить:

- диодные ограничители, ограничители на основе двуханодных стабилитронов или варисторов;
- ограничение входного тока резистивной, последовательной нагрузкой для КМОП – микросхем;
- R-C цепи в шинах Vcc для предотвращения эффекта “защелкивания” КМОП – микросхем;
- R-C фильтр на шине начальной установки RESET для предотвращения “неполного” перезапуска с непредсказуемыми результатами;
- защита входа синхронизации и входа тактовых импульсов;
- ограничительные резисторы на шинах запроса на прерывание.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				13

7 Типы шин заземления в печатных платах

Рекомендуется шины GND выполнять в виде сетки или отводить под него целый слой. Несмотря на то, что в МПП со сплошными полигонами GND пути возвратных токов между двумя отдаленными точками стремятся распределиться по большей площади полигона МПП, наибольшая часть (максимальная плотность) возвратных токов протекает по наикратчайшему пути между этими отдаленными точками схемы. Если шина GND выполнена в виде отдельного целого слоя, не рекомендуется делать какие - либо разрывы (щели), пересекающие большей своей стороной направление возвратных токов.

Объединение полигонов GND аналоговой и цифровой схем необходимо выполнять только в одной, ближайшей к источнику электропитания точке. Возможно, таким местом может служить коммутационная кросс-плата.

В случае, если шина GND выполнена в виде отдельного целого слоя, для осуществления связи с ней через разъемное соединение рекомендуется использовать максимально возможное число наиболее удаленных друг от друга контактов электрического соединителя МПП (например A1, B1, C1 и A45, B45, C45). С точки зрения помехоустойчивости и уровня излучаемых электромагнитных помех не рекомендуется гребенчатая структура таких шин.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<p style="text-align: center;">ВИДК.460009.008</p>	Лист
2-158	26.05.09	2-144				14
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

8 Особенности конструирования многослойных печатных плат

Ввиду многообразия требований к МПП и конструктивно – технологических путей реализации, рассматриваться будут лишь те из них, которые позволяют снизить уровень помехоэмиссии, обеспечить помехоустойчивость электрических линий связи и схемы в целом.

8.1 Общие требования

Особую значимость имеют размещение шин +Vcc и GND. Для увеличения межслойной емкости и обеспечения эффективной высокочастотной развязки необходимо, чтобы эти два слоя были смежными. Полигоны электропитания располагайте во внутренних слоях МПП. Слои электропитания делайте максимально сплошными, уменьшая площадь неметаллизированных участков.

Все высокочастотные цепи располагайте во внутренних слоях, смежных со слоями GND. Расстояние между сигнальным слоем и слоем питания не должно превышать 0,25 мм. Располагайте высокочастотные сигналы как можно дальше от областей ввода-вывода и цепей передачи данных.

Для разводки высокоскоростных сигналов (порядка 1 ГГц и более) использовать соответствующий материал МПП для СВЧ применений (например, Ro4003 производства Rogers или 25N производства Arlon и т.п.). Материал FR- или СФ- различных модификаций для этих целей непригоден.

Все пространство МПП, на котором не располагаются компоненты схемы и линии связи, должно быть залито полигоном GND.

Изменение направления трассы проводника высокоскоростных сигналов в топологии МПП выполнять в виде дуги.

При топологическом проектировании печатных плат обратить внимание на то, чтобы трассы с импульсным током не проходили параллельно трассам информационных цифровых и (или) аналоговых каналов обмена.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист
15

Заземление интерфейсов необходимо обеспечить в одной области, а подключение экранных оплеток электрических проводов и развязывающих конденсаторов производить к отдельному, специально выделенному для этого слою заземления. Как отмечалось выше, такое соединение должно иметь низкое значение полного сопротивления.

Не располагать быстродействующие схемы с высокой частотой обмена между электрическими соединителями. На частотах ниже 300 МГц длина волны более 1 м, при этом электрические связи на МПП, можно рассматривать как антенны с низкой эффективностью из-за относительно малой длины проводников. Однако, жгуты, кабели и другие электрические связи, подключенные к МПП, могут быть достаточно эффективными антеннами. При этом увеличивается площадь контура, суммарная длина электрической линии и напряженность поля ЭМП, создаваемых работой такого электронного устройства.

Разделять шины электропитания цифровых и аналоговых схем.

Запрещается разводить сигнальную трассу через разрыв в полигоне возвратного тока.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Лист 15а
2-158	26.05.09	2-144			
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

ВИДК.460009.008

Полигон возвратных токов цифровой логики должен быть цельным, занимая область под всеми дискретными компонентами цифровых ИС, трассами и разъемами.

При компоновке МПП, конденсаторы, предназначенные для развязки цепей по электропитанию, располагать на расстоянии не более 2 мм от соответствующих выводов ИС. Подключение второго вывода этих конденсаторов к полигону GND производить наикратчайшим путем через металлизированные отверстия в МПП.

Зазор между проводниками (кроме дифференциальных пар) должен быть минимум в три раза больше ширины проводников.

Проводники ввода-вывода МПП необходимо делать как можно более короткими и предусматривать фильтрацию выходных сигналов.

8.2 Трассировка дифференциальных пар

Для повышения помехоустойчивости системы, снижения помехоэмиссии и передачи информационных потоков на большие расстояния часто применяется парафазное управление и(или) информационный обмен с использованием дифференциальных пар проводников. В этом случае при топологическом проектировании налагается ряд специфических требований к дизайну МПП. К таким требованиям относятся:

- дифференциальные пары должны быть согласованы по длине. Для частот обмена до 100 МГц проводники должны быть подобраны по длине с точностью 0,635 мм (0,025 дюйма). Для частот обмена 0,8 ГГц и более высоких частот проводники МПП должны быть согласованы по длине с точностью 0,254 мм (0,010 дюйма);

- расстояние между проводниками дифференциальной пары должно быть не более 0,508 мм (0,020 дюйма);

обе трассы дифференциального сигнала должны располагаться параллельно в одном полигоне, при этом расстояние между ними должно быть в 3 или более раз больше ширины проводников линий связи дифференциальной пары;

- трассы тактового сигнала и группового сигнала данных должны быть подобраны с точностью до 2,54 мм (0,1 дюйма), при этом под

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ВИДК.460009.008	Лист 16
2-158	26.05.09	2-144				
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

групповым сигналом понимается совокупность дифференциальных пар, информационный обмен по которым синхронизирован одним тактовым сигналом и передающие схожую информацию;

- максимальное использование одного слоя и минимальное количество переходов на другие слои;

- симметрия дифференциальной пары должна выдерживаться на всем протяжении от драйвера до ресивера для обеспечения одинаковой фазовой задержки передаваемого сигнала.

- пространство между двумя линиями связи дифференциальной пары должно оставаться свободным на всем протяжении, при этом пространство, отделяющее эту пару проводников от других трасс должно быть заполнено сплошным слоем металлизации, соединенным с полигонами GND;

- волновое сопротивление дифференциальной пары должно составлять 100 Ом;

Приемлемо, если волновое сопротивление дифференциальной пары находится в диапазоне 100 Ом $\pm 10\%$, тогда уровень вторичных отражений, следующих за фронтом передаваемого сигнала не превышает 5% от значения амплитуды данного сигнала.

Следует отметить, что дифференциальная линия связи для обеспечения высокого качества дифференциального сигнала тоже должна быть согласована. При этом чаще всего используются два варианта – согласование линии – только по дифференциальному сигналу и согласование линии по дифференциальному и синфазному сигналам. Разница между этими способами ощутима лишь при наличии синфазного сигнала, который может вызвать синфазный резонанс.

Схема согласования линии по дифференциальному и синфазному сигналам, состоящая как правило из четырех резисторов, применяется чаще всего для окончного согласования сети синхронизации, а также при большой длине дифференциальной линии связи.

Все эти требования можно объединить понятием оптимизация дифференциальных пар проводников МПП. Если дифференциальная пара проводников МПП не оптимизирована на нее будет оказывать воздействие

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
-------------	-------	--------------	----------	--------------	-------	--------------	--	--------------	--

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						17

ЭМП. Оптимизированная дифференциальная пара проводников обладает очень высокой помехоустойчивостью и сравнительно низким уровнем радиоизлучений..

По данным Федеральной Комиссии связи США радиоизлучения микрополосковой дифференциальной пары с расстоянием между электрическими трассами 0,5 мм в условиях измерения, соответствующие классу В, на частоте 1 ГГц теоретически должно быть ниже на 40 дБ, чем при передаче того же сигнала при несимметричной схеме информационного обмена.

8.3 Заземление в многослойных печатных платах

Высококачественная многоуровневая система невозможна без хорошего заземления, которое прорабатывается дизайнером МПП с первого шага разработки. Разводка шин и полигонов заземления в МПП – очень важный и ответственный момент конструирования, непосредственно влияющий на ЭМС разрабатываемого электронного модуля, и, как следствие, конечного изделия. Существует ряд аспектов, придерживаться которых должен дизайнер МПП при топологическом проектировании. К числу таких аспектов относятся:

- разделение шин и полигонов на аналоговую и цифровую части – один из важнейших, простых и наиболее эффективных способов снижения уровня ЭМП в электронных схемах многослойных печатных плат. Это требование не означает электрической изоляции аналоговой от цифровой земли. Их электрическое объединение должно осуществляться в каком-то, желательно одном, низкоимпедансном узле, как можно ближе к источнику электропитания;

- запрещается перекрытие аналоговых и цифровых полигонов. Шины и полигоны аналогового электропитания должны быть смежными с шинами и полигонами аналоговой земли. Требования к трассировке и размещению шин цифрового электропитания аналогичны – шины и полигоны электропитания цифровых ИС должны быть смежными с шинами и полигонами цифровой земли. В местах перекрытия аналогового и цифрового полигона, распределенная емкость между перекрывающимися

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

					ВИДК.460009.008	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		18

участками создает емкостную связь по переменному току, и наводки, распространяющиеся по шинам и полигонам от работы цифровых компонентов, попадут в цепи аналоговой схемы;

- размещение аналоговой части схемы вблизи от электрических соединителей МПП в мировой практике является хорошо зарекомендовавшей себя концепцией;

Существует лишь единственное отступление для ИС аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей в корпусах с отдельными выводами для аналоговой и цифровой земли. В этом случае объединение аналоговых и цифровых шин GND должно выполняться над областью полигона аналоговой земли. В электрической схеме эти выводы всегда должны подключаться к шине аналоговой земли. При конструировании МПП, содержащей ЦАП или АЦП, необходимо обеспечить хорошую развязку цифрового электропитания преобразователя на аналоговую землю.

8.4 Паразитные параметры МПП

При перекрытии полигонов и (или) шин МПП, находящихся на разных слоях, возникает емкостная связь, возрастающая с ростом частоты передаваемого сигнала. Полигоны или проводники, расположенные в смежных слоях в этом случае образуют пленочный конденсатор, емкость которого можно определить по следующей формуле:

$$C = 0,0085 \times \epsilon_r \times A / d \text{ (пФ)},$$

где C - межслойная емкость;

ϵ_r - диэлектрическая постоянная;

A - площадь перекрытия, мм²;

d - расстояние между слоями, мм.

Типовое значение ϵ_r для МПП на основе широко распространенного материала FR-4 составляет 4,5.

При близком параллельном расположении проводников в слое МПП, между ними образуется емкостная и индуктивная связь. Этот фактор

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						19

приобретает особое значение для входов ОУ, большая емкостная связь между которыми может привести к самовозбуждению схемы.

Переходные отверстия, формируемые для осуществления межслойного электрического соединения, вносят паразитную индуктивность, значение которой можно приближенно рассчитать по приведенной ниже формуле:

$$L \approx h/5 \times (1 + \ln(4h/d)) \text{ (нГн)},$$

где L – индуктивность переходного отверстия;

d – диаметр отверстия после металлизации (мм);

h – длина канала переходного отверстия (мм).

Индуктивность отверстия с емкостью электрической схемы образует резонансный контур, резонансная частота которого, как правило, лежит в диапазоне СВЧ из-за очень малого значения индуктивности отверстия. Однако, при большом числе переходов на пути распространения сигнала, резонансная частота паразитного контура снижается и этот фактор должен быть учтен дизайнером МПП. Другим негативным фактором при большом количестве переходных отверстий в полигоне слоя GND является образование петлевых участков – неконтролируемых контуров.

При повороте проводника в слое МПП на угол 90°, сигнал, передаваемый по нему, частично отражается. Этот эффект происходит, главным образом, из-за изменения ширины проводника МПП в месте его поворота на пути прохождения тока. Линия передачи изменяет свои характеристики поскольку в вершине прямого угла ширина трассы увеличивается в 1,414 раза, что приводит к рассогласованию, особенно распределенной емкости и собственной индуктивности трассы. Возможность большинства современных САД-пакетов сглаживать углы проведенных трасс или проводить трассы в виде дуги является необходимостью для достижения качественного дизайна МПП и хороших электрических характеристик последних.

Инв.№ подл. 2-158	Подп. и дата 26.05.09	Взам. инв. № 2-144	Инв. № дубл.	Подп. и дата						Лист 19а
					ВИДК.460009.008					
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

8.5 Диэлектрические потери

В любой конструкции линии передачи электрических сигналов применяется диэлектрик с теми или иными техническими характеристиками. На высоких частотах и при передаче высокоскоростных сигналов диэлектрические потери приводят к ослаблению передаваемых сигналов и оказывают существенное влияние на целостность информационного потока.

Этот фактор определяет широкую номенклатуру зарубежных материалов для изготовления МПП, кабелей, СВЧ-устройств.

Диэлектрические потери характеризуются слабой зависимостью волнового сопротивления электрической линии связи от частоты, в то время, как коэффициент затухания передаваемого информационного потока в дБ прямо пропорционален частоте.

На вполне определенной для данного диэлектрика частоте ω_0 потери в диэлектрике становятся равными потерям, обусловленным поверхностным эффектом, а на частотах выше ω_0 - значительно превосходят их.

Частота ω_0 называется пороговой частотой области диэлектрических потерь. Для большинства наиболее широко распространенных диэлектриков частота ω_0 составляет около 800 МГц.

При топологическом конструировании МПП для высокоскоростного обмена и передачи информационных потоков необходимо применять материалы МПП и связующие межслойные диэлектрики (препрег) с низким показателем тангенса угла диэлектрических потерь - $\text{tg}(\theta)$. Чем меньше значение $\text{tg}(\theta)$, тем меньше уровень диэлектрических потерь в электрической линии связи и тем шире полоса пропускания этой линии. Кроме того, снижение диэлектрической проницаемости материала ϵ_r даже, если $\text{tg}(\theta)$ остается неизменным тоже имеет положительные стороны - возрастает скорость распространения сигнала, что приводит тоже к снижению уровня диэлектрических потерь.

Конструктор МПП должен учитывать не только технологичность, стойкость к климатическим ВВФ, механическую прочность и доступность материала у поставщика, но и специфику МПП, соответствие выбранного

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008				

материала МПП требованиям разработчика к целостности передаваемых сигналов, постоянству импеданса для отдельно обозначенных разработчиком схем электрических линий связи, минимизацию диэлектрических потерь. Материалы типа СФ- или FR- обладают значительными диэлектрическими потерями и для конструирования МПП с высокоскоростными сигналами не пригодны.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ВИДК.460009.008 Лист 19в
2-158	26.05.09	2-144			
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

8.6 Электрические соединители

Электрические соединители давно стали неременным атрибутом многофункциональных систем с хорошей ремонтпригодностью. Качество электрических связей через контакты электрического соединителя более актуально для аналоговых схем и высокоскоростной передачи информационных потоков, чем для обычной цифровой логики. Особую значимость качество таких электрических связей приобретает в схемах ЦАП и АЦП. Предположим, что электропитание схемы АЦП осуществляется через контакты электрического соединителя, при этом для подключения к общей шине обеспечивается контактное сопротивление $0,02 \text{ Ом}$. Сопротивление остальных участков этих цепей для наглядности примера примем равными нулю. Предположим, что ток, потребляемый схемой АЦП, составляет $0,8 \text{ А}$. Если аналоговая часть схемы содержит двенадцатиразрядный АЦП с диапазоном входного напряжения 10 В , то младший значащий разряд АЦП будет иметь значение $2,44 \text{ мВ}$, а падение напряжения на сопротивлении контактов электрического соединителя составит 16 мВ . В случае, если только 30% от падения напряжения на сопротивлении контактов электрического соединителя ($5,33 \text{ мВ}$) будут воздействовать на аналоговый сигнал, это приведет к маскированию двух младших разрядов АЦП напряжением ЭМП, что повлечет потерю точности обработки аналогового сигнала и ухудшит качественные характеристики схемы, модуля и конечного устройства, в состав которого входит АЦП. Решение дизайнера МПП – отвести возможно большее количество контактов электрического соединителя в МПП, содержащих ЦАП и (или) АЦП, для подключения к общему проводу и уменьшения контактного сопротивления цепи.

При топологическом проектировании МПП для высокоскоростного обмена и передачи информации конструктор должен предусмотреть не только достаточные зазоры вокруг сквозных отверстий контактов электрического соединителя в МПП, но и множество металлизированных дорожек вокруг них, соединенных со слоем GND. В идеале – каждый слой МПП должен содержать эти заземленные дорожки. Отсутствие таких конструктивных мер приводит к довольно большим значениям

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				20

перекрестных помех между выводами электрического соединителя, которые могут достигать значения более 2 В.

8.7 Шероховатость поверхности материалов МПП.

Этот показатель имеет чрезвычайно важное значение для МПП в целом, высокочастотных устройств и передачи высокоскоростных сигналов электрическими трассами МПП.

Как известно, для передачи высокоскоростных сигналов особое значение приобретает шероховатость поверхности электрической линии связи в связи с усилением на высоких частотах поверхностного эффекта, когда максимум плотности тока передаваемого сигнала следует вдоль поверхности проводника и толщина такого слоя на частоте всего 30 МГц может измеряться единицами, а на значительно более высоких частотах – десятками и сотыми долями мкм. В этом случае наблюдается повышение сопротивления высокочастотному току, следующему вдоль рельефа, образованного шероховатостью основного материала и подложки, которое может достигать значений 50–100% относительно исходного сопротивления этого проводника постоянному току или сигналу НЧ.

Так, например, шероховатость поверхности материала FR-4, используемого для производства плат печатного монтажа, составляет от 6 до 18 мкм. Для минимального из указанных значений (6 мкм) среднеквадратическая шероховатость поверхности составит 0,17 мкм, что соответствует пороговой частоте передаваемых сигналов до 1 ГГц включительно. Для максимального из указанных значений шероховатости поверхности материала FR-4 (18 мкм) пороговая частота передаваемых сигналов составит лишь 200 МГц.

На пороговой частоте увеличение сопротивления проводника высокочастотным сигналам составляет 60% относительно исходного сопротивления постоянному току или сигналу НЧ.

Разработчикам схем высокоскоростного обмена и передачи информации совместно с конструктором МПП необходимо обратить особое внимание на вышеуказанный фактор влияния шероховатости поверхности

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						20а

металлизированного слоя МПП на целостность передаваемых потоков информации. Возможно введение в технологический цикл изготовления МПП дополнительного техпроцесса оксидирования, направленного на снижение шероховатости поверхности электрических линий связи и полигонов GND многослойных печатных плат.

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008					Лист
										206

9 Электростатический разряд

Интенсивное развитие микроэлектроники в последние два десятилетия в направлении увеличения плотности размещения в ИС полупроводниковых элементов, снижения логических уровней информационных сигналов, уменьшения значений входных токов, напряжений электропитания, сужения зон металлизации на кристаллах и уменьшения оксидных слоев ИС привело к повышению порога чувствительности ИС нового поколения к ЭСР.

До 50% всех отказов ИС в процессе эксплуатации обусловлено в первую очередь следствием воздействия на аппаратуру, узлы или компоненты ЭСР.

ЭСР являются источником кондуктивных и излучаемых ЭМП. Излучаемые ЭМП представляют собой импульсные магнитные, электромагнитные и электрические поля. Кондуктивные ЭМП в свою очередь подразделяют на прямые и косвенные (вторичные). Прямые кондуктивные ЭМП представляют собой импульсный перенос потенциала электростатического электричества на проводящие участки электронных узлов или компонентов РЭО.

Из-за многообразия потенциальных точек проникновения ЭСР, пути токов ЭСР к общей шине заземления будут разнообразны. Ток ЭСР протекает по пути, обладающему низкой индуктивностью. Из-за малой длительности фронтов ЭСР, которые измеряются долями наносекунды, распределенные емкости представляют очень малое полное сопротивление в то время, как очень короткий проводник с индуктивностью в единицы наногенри будет обладать для ЭСР высоким полным сопротивлением. Ввиду этого наличие или отсутствие шин заземления, которые имеют высокое значение индуктивности, не вносит существенного влияния на реакцию системы или логической схемы на ЭСР.

При отсутствии каких - либо мер защиты печатных плат, рекомендуется формирование в слоях МПП отдельных "охранных" шин по всему периметру МПП. Эти шины, расположенные во всех слоях должны быть электрически объединены, не иметь каких - либо связей с другими цепями и отдельно соединяться с общей шиной заземления (корпусом) только в одной точке.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

21

10 Защита от вторичных разрядов

Из-за конечного значения сопротивления и индуктивности различных внутренних и внешних связей с общей шиной заземления (корпусом изделия) может возникнуть переходное напряжение между корпусом и схемой, узлом, элементом. Это обстоятельство осложняется тем, что корпус изделия, как правило, имеет внешние связи с общей шиной заземления в иной точке и через пути, отличные от заземления внутренней схемы. Это напряжение возникает как следствие первичного разряда, к числу которых можно отнести разряд молнии, электростатический разряд, и может происходить в непредсказуемых точках конструкции корпуса изделия.

Акцент на данном виде электрических разрядов обусловлен тем обстоятельством, что он может оказаться более разрушительным, и иметь больший уровень, чем первичный электрический разряд. Максимум значения этого напряжения на трассах печатной платы происходит в пределах резонансной структуры.

Снижение риска от такого внешнего воздействующего фактора возможно путем объединения корпуса ("чистой" шины заземления) с шиной GND модуля в одной (и только одной!) точке, в качестве которой обычно выступает шина заземления интерфейсов.

Кроме того, это предотвратит протекание высокочастотных токов ЭМП через слой GND и насыщение его токами и гармониками ЭМП.

Запрещаются какие - либо другие соединения к заземлению интерфейса.

Если по каким - либо причинам необходима изоляция по постоянному току между этими шинами заземления, то рекомендуется применение керамических или полиэфировых конденсаторов (22 - 330) нФ.

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
-------------	-------	--------------	----------	--------------	-------	--------------	--	--------------	--

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						22

11 Снижение импульсных токов помех от работы

логических элементов

Для снижения радиопомех, распространяющихся по шинам электропитания, применяют С, R-С и L-С звенья для фильтрации импульсных помех. Эти меры могут быть эффективны только при следующих условиях:

- шина GND имеет низкое значение индуктивности и полного сопротивления;

- элементы развязки устанавливаются в непосредственной близости от соответствующих выводов микросхемы;

- для микросхем, создающих наибольший уровень радиопомех по цепям электропитания (приемопередатчики, процессоры, контроллеры, ОЗУ и т.п.), рекомендуется в непосредственной близости от соответствующих выводов микросхемы устанавливать L-С звенья. При этом рекомендуется выделить отдельные шины +Vcc и GND для этих микросхем. Объединение с общей шиной +Vcc осуществлять на коммутационной плате; то же самое относится к трассам шины GND.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
ВИДК.460009.008										

12 Снижение напряжения помех от индуктивных нагрузок

Наиболее яркими примерами генерации напряжения переходного процесса от индуктивных нагрузок являются: работа электромеханических реле, трансформаторов, электромоторов, при достаточно большой длине кабеля или жгута, которые обладают довольно большой распределенной индуктивностью, чтобы рассматриваться как преимущественно индуктивная нагрузка.

В момент прерывания тока, протекающего через индуктивную нагрузку, по закону самоиндукции происходит генерации напряжения переходного процесса, которое может быть существенным и вносить большой вклад в виде ЭМП, распространяющихся по цепям электропитания и излучения от контура электрических линий связи с индуктивной нагрузкой.

Для демпфирования переходного процесса применяют R-C цепи или варисторы, подключаемые параллельно индуктивной нагрузке. Наиболее распространенными способами демпфирования переходного процесса стало использование диодов или стабилитронов.

Важно, чтобы компоненты ограничителей переходных процессов устанавливались в непосредственной близости от индуктивной нагрузки и имели кратчайшую электрическую связь с ней. В противном случае промежуточный печатный и (или) объемный монтаж будет служить излучающей ЭМП петлей.

Инд. № подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инд. № дубл.		Подп. и дата	
--------------	-------	--------------	----------	--------------	-------	--------------	--	--------------	--

						ВИДК.460009.008	Лист
							24
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

13 Критерии выбора компонентов для развязки по электропитанию

При выборе электронных компонентов для цепей развязки высокочастотных импульсных схем необходимо руководствоваться следующими факторами:

- для конденсаторов первостепенное значение имеет собственная индуктивность и индуктивность выводов, при этом значение емкости является второстепенным критерием;

- предпочтения следует отдавать конденсаторам в виде чипа, многослойным керамическим или пленочным полиэстровым конденсаторам;

- необходимо помнить, что верхняя граничная частота эффективной работы конденсатора ограничивается не только собственной индуктивностью и индуктивностью выводов, но и индуктивностью подходящего к нему проводника.

Для логических схем средней степени интеграции рекомендуются следующие параметры конденсаторов развязки по цепям электропитания:

- один танталовый конденсатор 22 мкФ на модуль для входа шин электропитания;

- один бескорпусной керамический конденсатор 1 мкФ на каждые 10 корпусов малой и средней степени интеграции;

- один бескорпусной керамический конденсатор 1 мкФ на каждые два-три корпуса большой степени интеграции;

- один керамический или полиэстровый конденсатор 22 нФ на каждый корпус малой и средней степени интеграции;

- один керамический или полиэстровый конденсатор 22 нФ на каждую шину электропитания для корпуса большой степени интеграции.

Минимальное значение емкости для двух последних пунктов можно рассчитать:

$$C = 1,15 * (\Delta I * \tau / \Delta V) \quad (\Phi),$$

где ΔI - динамический ток переключения (не путать со статическим выходным током лог.0 или лог.1);

τ - средняя длительность переключения логических уровней;

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист
25

ΔV – допустимая просадка напряжения питания на конденсаторе (как правило, приемлемым значением считают 0,2–0,25 В).

Дроссель, если он применен разработчиком схемы, лучше выполнить на небольшом кольце из феррита, чем применить серийно выпускаемый дроссель серии ДМ.

Настоятельно не рекомендуется необоснованное применение быстродействующей логики или отдельных микросхем с высоким быстродействием! Радость разработчика от созерцания на экране осциллографа крутых фронтов может обернуться большими проблемами помехоэмиссии, которые невозможно будет устранить в готовом изделии.

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				26

14 Снижение уровня помех от работы импульсных источников электропитания

По уровню помехоэмиссии импульсные источники электропитания являются одним из наиболее слабых звеньев в составе блока. Результаты лабораторных измерений уровня помехоэмиссии модуля МН-24 от 03.08.01г. наглядно показали, что модуль, при автономной работе без ФРП на активную нагрузку, создает ЭМП в цепях первичного электропитания, превышающий нормируемые значения в диапазоне частот от 100 кГц до 21,95 МГц включительно.

Ниже приведен ряд специфических мероприятий, позволяющий снизить уровень помехоэмиссии импульсных источников электропитания:

- уменьшение емкостной связи между коллектором мощных ключевых каскадов преобразователя и корпусом (рамкой) модулей напряжений МН, на которых они закреплены, за счет увеличения толщины изолирующих прокладок. Для сохранения тепловых режимов прокладки можно выполнить в виде многослойной структуры, состоящей из чередующихся тонких слоев диэлектрика с хорошей теплопроводностью и металла. Рекомендуется исключить емкостную связь между коллектором мощных ключевых каскадов преобразователя и корпусом (рамкой) модулей, снабдив их необходимым радиатором и разместив на расстоянии не менее 20 мм от информационных шин, шин электропитания и корпуса изделия;
- уменьшение площади контура силовых цепей и цепей с импульсным током;
- введение электростатического экрана между первичной и вторичной обмотками сетевого трансформатора для уменьшения паразитной емкостной связи между обмотками в импульсных источниках электропитания. По данным зарубежной печати такая мера позволяет снизить уровень радиопомех, распространяющихся через паразитную емкостную связь обмоток, на 40 дБ по сравнению с аналогичными трансформаторами без электростатического экрана;
- поузловое экранирование элементов силового контура;
- зашунтировать выпрямительные диоды преобразователя керамическими конденсаторами емкостью (620-1000) пф или установить

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				27

керамические конденсаторы того же номинала между корпусом и выпрямительными диодами;

- применение разделительных трансформаторов, обладающих низким значением емкостной связи между первичной и вторичной обмотками. Исследования немецких и американских специалистов в области ЭМС свидетельствуют об ослаблении симметричных помех на 80 дБ и несимметричных - на 146 дБ при значении емкостной связи между обмотками примерно 0,005 пФ. Для серийно выпускаемых трансформаторов значение емкостной связи между первичной и вторичной обмотками составляет 300-500 пф;

- применение в преобразователе выпрямительных диодов с малым временем обратного восстановления;

- применение в преобразователе выпрямительных диодов, у которых: $U_{обр.мах} \gg U_{мах.б/с}$ и $I_{пр.ср} \gg I_n$,

где $U_{обр.мах}$ - максимальное обратное напряжение;

$U_{мах.б/с}$ - максимальное напряжение борсети;

$I_{пр.ср}$ - средний прямой ток;

I_n - максимальный ток нагрузки.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что вышеуказанные мероприятия не являются исчерпывающими, и, для достижения позитивного результата, требуется учитывать положения других глав настоящего Руководства.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						28

15 Требования к электропитанию быстродействующих схем

Для достижения положительных результатов в обеспечении ЭМС с использованием высокоскоростных схем и быстродействующей логики необходимо соблюдение ряда специфических требований.

К числу таких требований относятся:

- применение малошумящих источников электропитания с низкими пульсациями. Линейные источники стабилизированного напряжения с термокомпенсацией предпочтительны для питания высокоскоростных схем. Импульсные стабилизированные источники в большинстве своем отвечают этим критериям, включая требования к пульсациям. Пульсации импульсных источников обычно описываются единицами среднеквадратического отклонения, а выбросы, создаваемые их работой, как правило, дают трудно фильтруемые, неконтролируемые броски напряжения амплитудой несколько сотен милливольт. Высокочастотные компоненты этих выбросов чрезвычайно трудно отфильтровать и не допустить в общий провод питания.

В тех случаях, когда для электропитания высокоскоростных схем и схем с быстродействующей логикой невозможно отказаться от импульсных источников электропитания, они должны быть тщательно экранированы и удалены насколько это возможно от остальных частей схемы, а их вторичные выходные напряжения подлежат в обязательном порядке хорошей фильтрации.

Инв.№ по подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв.№ по подл.	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	

16 Помехоустойчивость аналоговых схем

Следует отметить, что аналоговые схемы в целом менее чувствительны к переходным процессам, чем цифровые, но они могут быть существенно восприимчивы к демодулированным радиочастотным излучениям. Это проявляется в первую очередь, как нелинейное смещение нулевого уровня постоянного тока.

При воздействии на вход аналоговой схемы радиочастотного сигнала, лежащего вне полосы пропускания, отклик цепи может быть либо - линейный, либо - нелинейный.

В первом случае уровень радиочастотного сигнала меньше порога, при котором преобразования остаются линейными и выходной сигнал не имеет каких - либо искажений.

Во втором случае уровень радиочастотного сигнала выше порога, при котором преобразования остаются линейными и выходной сигнал будет содержать дополнительно демодулированную (огибающую) как правило со значительными искажениями. В этом случае уже невозможно отделить полезный сигнал от сигнала помех. При всех равных условиях цепь, обладающая большим динамическим диапазоном, будет более устойчива.

Кроме того, емкостная нагрузка аналоговых схем вызывает сдвиг фазы выходного сигнала, что снижает фазовые границы устойчивости цепи обратной связи и, при определенных условиях, приводит к потере устойчивости и генерации. Емкостной характер нагрузки, который не учтен разработчиком - паразитные параметры МПП и подключенного жгута или кабеля. Этот жгут можно рассматривать как преимущественно емкостную нагрузку при длине трассы, превышающей четверть длины волны, которая распространяется в нем.

Пути повышения помехоустойчивости аналоговых цепей:

- минимизация полосы пропускания до необходимого и достаточного уровня;
- увеличение динамического диапазона входного уровня полезного сигнала;
- обеспечение хороших границ стабильной работы аналоговой цепи;

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						30

- использование симметричных схем передачи сигналов для обеспечения эффективного подавления синфазной составляющей;

- возможно, гальваническая развязка особенно чувствительной части схемы;

- включение последовательно с входами операционных усилителей и компараторов резисторов с низким значением сопротивления. Совместно с входной емкостью это ослабит индуцированные напряжения помех, наведенные во входном тракте.

Если аналоговая схема близка к потере устойчивости, но фактически стабильна на данной фиксированной частоте, то это свидетельствует о наличии пика в ее АЧХ. Если внешний радиочастотный сигнал помехи совпадает с этим пиком, то ОУ реагирует на такое воздействие, возможно, вплоть до насыщения и, как следствие, подавление полезного сигнала.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				31

17 Кабели, электрические соединители и их экранирование

Первостепенным требованием к заделке экранирующего слоя кабеля является обеспечение минимально возможного полного сопротивления при непосредственном электрическом подсоединении экрана к общей шине заземления или корпусу изделия.

Наилучший эффект достигается, когда экранирующий слой кабеля или жгута охватывается жесткой металлической скобой, выполненной из материала с высокой электропроводностью (медь, латунь), которая охватывает жгут на 360° и припаивается к шине заземления и экранирующему слою кабеля.

Из-за конечного значения сопротивления различных точек заземления и параметров линий электрической связи с ними, заземление экранирующего слоя кабеля или жгута необходимо производить только с одной стороны. Это предотвратит протекание по экрану жгута токов, обусловленных разностью потенциалов различных точек заземления.

Исключение составляют жгуты и кабели большой (несколько метров) длины. Для таких длинных электрических линий рекомендуется гибридное заземление – с одной стороны такой линии заземление осуществляется непосредственно на общую шину заземления изделия, с другой стороны линии – соединение экранирующего слоя линии с общей шиной заземления осуществляется через керамический конденсатор малой емкости (0,22-0,47) нФ.

При длине линии электрической связи, соизмеримой с 0,25 минимальной длины волны рабочего диапазона возникает ток в экранирующем слое кабеля или жгута, обусловленный внешним электромагнитным воздействием радиочастотных помех.

В силу того, что в соответствии с требованиями ОСТ В1 02763-95 аппаратура и оборудование должны быть работоспособны в условиях воздействия электромагнитных полей частотой от 30 до 12000 МГц, практически весь внутриблочный электромонтаж, а также внешние жгуты и кабели будут длиннее 0,25 минимальной длины волны рабочего диапазона. Ток, протекающий в экранирующем слое электрической

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				32

линии, имеет режим стоячих волн, которых нет во внешних соединениях. Величина этого тока определяется волновым сопротивлением электрической линии, сформированной собственно кабелем, и возвратным током по шине заземления.

Для повышения эффективности экранирования жгутов, кабелей и других электрических цепей рекомендуется применение материалов с частотно-зависимыми свойствами на основе высокочастотных ферритов и токопроводящей ткани. Так, например, термоусаживающая экранирующая трубка типа SST импортного производства обеспечивает экранирование электрических цепей не хуже 60 дБ в частотном диапазоне от 500 кГц до 10 ГГц.

Кроме того, лишние, неиспользуемые электрические провода в жгуте, могут связать источник и приемник наводок. Все неиспользуемые электрические провода жгута должны быть металлизированы с корпусом аппаратуры.

В общем виде под эффективностью экранирования понимают отношение токов, напряжений, напряженностей электромагнитных полей в экранируемом пространстве или на конце фильтруемого электрического проводника при отсутствии и наличии экрана:

$$\mathcal{E} = I/I' = U/U' = E/E' = H/H'$$

В радиотехнике эффективность экранирования дают в децибелах:

$$A = 20 \lg \mathcal{E} \text{ [дБ]}$$

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						33

18 Элементы индикации, смотровые окна и вентиляционные отверстия

В силу того, что смотровые окна и панели индикаторов занимают значительную площадь, их следует рассматривать как наиболее слабое место в корпусе изделия с точки зрения помехоэмиссии. В зарубежных образцах, как правило, смотровые окна и панели индикаторов закрывают электропроводящим материалом или покрытием, которые должны иметь надежную электрическую связь с окружающим его металлическим экраном.

В качестве такого экранирующего материала часто применяют тонкую черненую проволочную сетку или покрытие стекла в вакууме тонкой пленкой золота. Такие меры ухудшают на 20 - 40% оптические свойства чистого стекла из-за дифракционных явлений сетки или влияния металлизированного покрытия стекла. Все электропроводящие металлические покрытия стекла в вакууме имеют, как правило, плохую эффективность поскольку имеют поверхностное электрическое сопротивление несколько Ом/м² и вносимое ослабление электромагнитных полей будет полностью определяться потерями на отражение. Применение металлической сетки более эффективно по сравнению с полной металлизацией стекла с точки зрения снижения уровня помехоэмиссии.

Вентиляционные отверстия должны быть закрыты металлической сеткой из материала с высокой электропроводностью (латунь, медь). Если вентиляционные отверстия имеют одинаковую геометрическую форму и расположены на расстоянии, соизмеримом с 0,5 минимальной длины волны рабочего диапазона, то уменьшение степени экранирования по отношению к одиночному отверстию такого же размера примерно пропорционально корню квадратному от числа отверстий. Иными словами - применение металлической сетки с большим числом малых отверстий всегда эффективнее малого числа перфорированных отверстий большого диаметра.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

34

19 Полное экранирование

Полное экранирование и фильтрация цепей – меры взаимодополняющие. Полное экранирование обеспечивает защиту от непосредственного воздействия электромагнитного поля на внутренние трассы и электрические линии связи, а также снижение напряженности поля ЭМП, создаваемого работой узла, сборочной единицы и изделия в целом до необходимого уровня.

Несмотря на то, что теоретически можно ослабить влияние ЭМП более чем на 200 дБ в диапазоне частот от десятков герц до оптического диапазона, практически эти значения будут гораздо меньше расчетных. Любой экран имеет отверстия, щели, неоднородность проводимости на стыке сопрягаемых деталей.

19.1 Критерии выбора материала для полного экранирования

Экранирование электромагнитных полей СЧ, ВЧ и более высоких частот осуществляется за счет индуцирования в материале экрана вихревых токов. Для эффективного отвода индуцированных вихревых токов корпус такого экрана заземляют конструктивным элементом с низким значением собственной индуктивности.

Специфика условий эксплуатации бортового авиационного оборудования налагает ряд требований к обеспечению ЭМС изделий и систем в условиях воздействия внешних электромагнитных полей от 30 МГц до 12 ГГц, а для сертифицируемого оборудования – до 18 ГГц включительно. Ввиду этого обстоятельства для экранирования электромагнитных полей необходимо использовать материал с высокой электропроводностью, такой, как медь, алюминий, латунь.

Большая часть индуцированных в материале экрана вихревых токов в соответствии с поверхностным эффектом (скин-эффектом), действует до определенной глубины экрана. Показатель проницаемости δ характеризует глубину, на которой напряженность электрического поля падает в e раз по сравнению с напряженностью электрического поля на поверхности экрана. Для изготовления экранов следует выбирать материал с высоким значением электропроводности, толщиной $d > 3 \cdot \delta$ (мм),

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист
35

при этом значение показателя проницаемости δ рассчитывается для нижней граничной частоты рабочего диапазона (рекомендуемое значение 10 кГц).

С ростом частоты электромагнитных полей численное значение показателя проницаемости δ уменьшается и в диапазоне СВЧ будет составлять несколько десятков микрометров. В этом диапазоне особую значимость приобретает электропроводность поверхностного слоя материала экрана. Эффективность экранирования экрана в диапазоне СВЧ может быть повышена за счет повышения электропроводности поверхностного слоя материала путем нанесения на поверхность экрана гальванического покрытия с соответствующим показателем электропроводности. Как правило, и мировая практика это подтверждает, в таких случаях применяется гальваническое покрытие материала экрана серебром.

19.2 Неоднородность электромагнитного экрана

Как уже отмечалось, теоретически можно ослабить влияние электромагнитных полей более чем на 200 дБ в диапазоне частот от десятков герц до оптического диапазона, однако практически результаты будут гораздо меньше расчетных. Любой экран имеет отверстия, щели, неоднородность проводимости на стыке сопрягаемых деталей. Все стыки сопрягаемых конструктивных элементов можно подразделить на физически неоднородные и однородные. К первым относятся соединения, выполненные точечной сваркой, заклепками, винтами и т.п., иными словами, во всех случаях, когда соединение теряет непрерывность и образуются щели, выступы, изгибы, и прочие неоднородности, свободно проницаемые для электромагнитных волн.

Основываясь на критерии граничной частоты волновода, затухание в таких щелях можно рассчитать по следующему уравнению:

$$A = 0,00018 * L * F \sqrt{(F_c/F)^2 - 1} \quad [\text{дБ}],$$

где L - глубина щели, мм

F_c - граничная частота, МГц

F - частота, для которой производится расчет, МГц

Инв.№ подл. 2-158	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				36

$F_c = 150000/h$ - для прямоугольной щели и
 $F_c = 175500/h$ - для щели круглого сечения;
 где h - наибольший поперечный размер щели, мм.

Отверстия для подстроечных элементов и элементов регулировки, таких как потенциометр, также нарушают однородность экрана. Отверстия, с установленными в них осями образуют коаксиальный волновод для ЭМП. Как правило, выступающая ось может оказаться антенной. В этом случае рекомендуется применение потенциометров с осями из диэлектрика, либо специальные уплотнительные кольца.

Поскольку отверстия под кнопки, светодиоды, индикаторные лампы нарушают однородность экрана, они требуют специальных мер для их защиты. Для защиты от паразитных радиозлучений через такие отверстия кнопку, блок кнопок или индикаторную лампу и т.п. монтируют в небольшой экран. Монтаж такого экрана производится с внутренней стороны панели аппаратуры. Этот экран должен быть металлизирован с панелью, на которую производится его установка.

Для достижения высоких результатов электромагнитного уплотнения сопрягаемых конструктивных элементов все чаще применяют электромагнитные прокладки. Повышение эффективности экранирования таким способом базируется на том, что любые поверхности не могут быть идеальными и обладают шероховатостью поверхности. Существует два вида прокладок: обеспечивающие электрический контакт с очень малым электрическим сопротивлением по всей длине сопрягаемых деталей и прокладки, поглощающие радиоизлучения в определенном диапазоне частот. Необходимо, чтобы на стыках сопрягаемых деталей изгибы, выступы, отверстия, щели, неоднородность проводимости были сведены к минимуму, а металлизация составных частей экрана осуществлялась конструктивными элементами из материала с высокой электропроводностью и низким значением собственной индуктивности.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				37

19.3 Эффективность экранирования

Эффективность экранирования электрических полей почти полностью определяется наличием короткого замыкания между собственно экраном и корпусом аппаратуры. Качество металлизации экрана с корпусом изделия при этом играет практически определяющую роль. Для получения высокоэффективного экрана и хорошего экранирования внешних и внутренних электромагнитных излучений металлизация составных частей экрана должна осуществляться конструктивными элементами из материала с высокой электропроводностью и низким значением собственной индуктивности. Это положение справедливо для всех корпусов пультов, индикаторов, блоков и другой аппаратуры. Корпус аппаратуры выполняет не только функции несущей конструкции, но и функции экрана электромагнитных полей, защищая внутренние элементы, МПП и электромонтажные соединения от вредного воздействия внешних электромагнитных полей и обеспечивая экранирование собственных радиоизлучений в окружающее пространство.

В общем виде под эффективностью экранирования понимают отношение токов, напряжений, напряженностей электромагнитных полей в экранируемом пространстве или на конце фильтруемого электрического проводника при отсутствии и наличии экрана:

$$\mathcal{E} = I/I' = U/U' = E/E' = H/H'$$

В радиотехнике эффективность экранирования дают в децибелах:

$$A = 20 \lg \mathcal{E} \text{ [дБ]}$$

Полное экранирование является в первую очередь конструктивным решением и здесь в полном объеме не рассматривается.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				38

20 Принцип соответствия

Ввиду того, что пути и механизмы паразитных связей применительно к помехоустойчивости и помехоэмиссии одинаковы, представляя собой в основном резонансные явления, усиливающие эти связи на определенных частотах, можно утверждать, что:

- частоты, на которых помехоэмиссия превышала нормируемый уровень, будут те же, на которых имеют или могут иметь место проблемы с помехоустойчивостью;

- соответственно, изменив параметры механизма паразитных связей, снизив помехоэмиссию в определенном диапазоне частот, будет увеличена помехоустойчивость в том же диапазоне частот.

Однако из-за различий в фактических характеристиках функционирования источника и рецептора ЭМП, а также того, насколько они линейны и какова связь между ними, придавать стопроцентную достоверность этому принципу не стоит.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				39

21 Объемный резонанс

В любом корпусе изделия и отдельно экранированного узла возникают резонансы. Резонансная частота определяется геометрическими размерами этого объема. Стоячие волны формируются между противоположными сторонами этих экранированных объемов. Напряженность электрического поля максимальна в середине такого объема, а магнитного поля – на сторонах.

Эти явления напрямую отражаются на максимумах помехоэмиссии в определенных частях экранированного объема, поскольку ухудшают эффективность экранирования на резонансных частотах. Кроме того по стенкам корпуса на резонансных частотах протекает максимальный ток ЭМП.

Применение электромагнитных поглотителей и специальных красок с ферритовым наполнителем снижает уровень объемного резонанса. Заполнение объема модулями, жгутами и другими компонентами сдвигает резонансную частоту этого экранированного объема и снижает амплитуду резонансов, но не исключает явление объемного резонанса полностью.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				40

22 Радиолокационные станции как источники ЭМП

Радиолокационные станции являются мощным источником ЭМП. Как правило РЛС излучают короткие импульсы от нескольких киловатт до сотен киловатт, занимая при этом часть спектра от 250 МГц до 40 ГГц.

Когда самолет или вертолет пролетает луч радара в структуре летательного аппарата (ЛА), которая служит как эквипотенциальная поверхность (плоскость заземления), протекают индуцированные токи. Значение этого фактора очень велико, поскольку эта плоскость заземления бортового оборудования ЛА несет те же токи, что и внутренние кабельные соединения. В этом случае возможна паразитная связь в антенном режиме. В режиме антенны токи в кабеле и плоскости заземления протекают в одном направлении. Эти токи не являются следствием внутренних шумов, ЭМП, создаваемых работой бортового оборудования. Они имеют место только в случае облучения электромагнитным полем всей системы, включая плоскость заземления.

Таким образом, токи в антенном режиме являются только проблемой восприимчивости системы к внешним воздействиям электромагнитных полей.

Существует широкий ряд конструкционных радиопоглощающих материалов и экранирующих радиопоглощающих покрытий отечественной разработки. Конструкционные радиопоглощающие материалы представляют собой композитные структуры и могут нести силовые нагрузки, не снижая свою эффективность в широком диапазоне частот. Экранирующие радиопоглощающие покрытия применяются для устранения отражений от конструкции внутренних отсеков, которые защищены радиопрозрачными конструктивными элементами.

Методы борьбы – качественное экранирование критичных цепей и узлов, применение электромагнитных уплотнителей щелей и других неоднородностей между сопрягаемыми деталями, конструкционных радиопоглощающих материалов и экранирующих радиопоглощающих покрытий, качественная лгаллизация экранирующего слоя электрических проводов и элементов конструкции аппаратуры.

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

					ВИДК.460009.008	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		41

23 Электромагнитный импульс как источник ЭМП

Электромагнитный импульс является довольно мощным источником ЭМП. Воздействие ЭМИ на бортовое оборудование аналогично воздействию ЭМП, создаваемых РЛС в структуре ЛА, бортового РЭО и кабельных линиях связи (см. раздел 22).

Особое внимание Международного радиосоюза (URSI), Международной электротехнической комиссии (МЭК) и военных специалистов уделяется этому вопросу в связи с развитием электронных средств генерации преднамеренных ЭМИ высокой мощности. Так, например, современные средства преднамеренной электронной генерации ЭМИ на варикаторах способны развивать мощность до 40 ГВт в сантиметровом и дециметровом диапазонах, на основе релятивистских генераторов – до 80 ГВт, а на основе разряда газа высокого давления возможна генерация миллиона импульсов с частотой повторения в несколько килогерц при напряжении более 5 МВ и мощностью несколько сотен гигаватт в наносекундном диапазоне.

В отличие от РЛС, ЭМИ, обладая значительно меньшей длительностью, способен создать гораздо более высокий уровень напряженности поля ЭМП, достигающий (в зависимости от мощности и расстояния до эпицентра ЭМИ) нескольких десятков кВ/м.

В условиях электромагнитных полей высокой интенсивности, вызванных ЭМИ, между конструктивными элементами ЛА и бортового РЭО с плохой металлизацией могут происходить электрические разряды, в структуре ЛА, бортового оборудования и кабельных линиях связи протекают индуцированные токи, значение которых в первую очередь пропорционально площади контура цепи.

Таким образом, реакция элемента, узла, системы на воздействие ЭМИ является только проблемой восприимчивости системы к внешним воздействиям электромагнитных полей.

Методы борьбы аналогичны методам раздела 22 " Радиолокационные станции как источники ЭМП " настоящего Руководства. Особую значимость приобретает снижение площади контура, подключенного к приемной цепи и качество металлизации конструктивных элементов.

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

						ВИДК.460009.008	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			42

24 Линии электропередач как источник ЭМП

Высоковольтное оборудование линий электропередач, равно как высоковольтные устройства и отдельные узлы бортового РЭО являются серьезным источником ЭМП.

ЭМП от ЛЭП обладают большой длительностью импульса помехи и меньшей частотой заполнения, чем системы зажигания. Длительность импульса ЭМП от ЛЭП измеряется преимущественно миллисекундами. Наряду с этим в спектре ЭМП регистрируются отдельные импульсы длительностью 2-10 нс. Такие короткие импульсы обусловлены в первую очередь коронарными разрядами на ЛЭП. Уровень ЭМП существенно возрастает в условиях повышенной влажности воздуха, тумане или дожде. Кроме того, ЛЭП является источником электромагнитных полей высокой интенсивности.

Таким образом, проблема данного вида ЭМП в первую очередь касается восприимчивости бортового оборудования вертолетов и наземного оборудования, размещаемого в непосредственной близости от ЛЭП.

Методы защиты бортового оборудования от воздействия этого вида ЭМП преимущественно конструктивные - качественное экранирование критичных цепей и узлов, применение электромагнитных поглотителей и специальных красок с ферритовым наполнителем, хорошая металлизация экранирующего слоя электрических проводов и элементов конструкции аппаратуры.

Инв.№ по подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

ВИДК.460009.008

Лист

43

25 Асимметрия фронтов импульсов переключения

Асимметрия длительности фронта и спада импульса приводит к генерации как четных, так и нечетных гармоник. Необходимо отметить, что из-за различия между цепями высокого и низкого уровня для генератора и нагрузок, подавляющее большинство логических схем обладает асимметрией длительности фронта и спада, что объясняет отчасти преимущественное присутствие в высокочастотной части спектра четных гармонических составляющих. Результаты испытаний изделий на соответствие требованиям ОСТ В1 02696-90 наглядно подтверждают это.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				44

26 Неиспользуемые входные цепи логических интегральных схем

Напряжение ЭМП, индуцированное на неиспользуемых входах логических ИС способно привести к сбоям, а для КПОП интегральных схем – к выходу из строя логического элемента или схемы.

Вопрос о неиспользуемых входных цепях логических интегральных схем решается разработчиком с учетом особенностей конкретного типа схемотехнологии применяемых ИС.

Для ЭСЛ неиспользуемые входы ИС можно оставить неподключенными ввиду того, что схемотехника этого вида ИС содержит активную нагрузку по входу, связанную с источником электропитания, что обеспечивает хорошую устойчивость по неиспользуемым входам ИС.

Для КМОП и ТТЛ(Ш) интегральных схем неиспользуемые входы разомкнутыми не оставляют, причем для схемотехнологии КМОП эта рекомендация переходит в разряд обязательных требований. Из-за высокого значения входного сопротивления на разомкнутых входах таких ИС легко наводятся ЭМП, которые вносят сбой в работу логического элемента или схемы.

В ряде случаев подключение неиспользуемых входов к заземлению возможно, но не желательно, поскольку приводит к увеличению нагрузки на источник сигнала и, как следствие, снижает его быстродействие. Кроме того, повышенное импульсное энергопотребление способствует неоправданному увеличению рассеиваемой мощности и увеличению помехоэмиссии от шин электропитания, к которым эти ИС подключены.

Потенциал (напряжение смещения) на неиспользуемых входах должен быть таким, чтобы обеспечить при этом наименьшую мощность рассеяния ИС.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

					ВИДК.460009.008	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		45

27 Интермодуляционные составляющие ЭМП

В бортовой радиоэлектронной аппаратуре этот вопрос очень актуален из-за многообразия тактовых частот, частот обмена и гармонических составляющих этих импульсных сигналов. Близкое размещение трасс с этими сигналами, наличие паразитных связей этих электрических линий в ограниченном объеме конструкции способствует расширению спектра ЭМП за счет явления интермодуляции.

Практические измерения и анализ результатов испытаний изделий свидетельствует о наличии интермодуляционных составляющих, которые становятся наиболее опасными в пределах резонансных структур элементов конструкции, печатного и объемного монтажа.

Методы снижения интермодуляционных составляющих базируются на рекомендациях, приведенных выше, которые направлены в первую очередь на снижение паразитных параметров конструктивных элементов, снижение помехоэмиссии МПП, модулей, кабелей и жгутов, снижение крутизны фронтов передаваемых импульсных сигналов там и в тех случаях, где это возможно, тщательная экранировка критичных цепей и качественная металлизация конструктивных элементов, электрических соединителей, экранирующего слоя кабелей и жгутов.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				46

28 Неиспользуемое пространство памяти программ

Под воздействием ЭМП возможен сбой счетчика команд и обращение микропроцессора к неиспользуемому данной программой пространству памяти. В этом случае, любые, находящиеся там данные, микропроцессор интерпретирует как команды программы.

Хорошим решением в таком случае является запись во все неиспользуемые ячейки памяти команды JMP RESET, по достижении которой микропроцессор перезагрузится, или кода «несуществующей (запрещенной)» команды, которая вызовет сигнал прерывания по «несуществующему» коду операции.

Эти рекомендации должны указываться в «Руководстве по применению и программированию» изделия.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				47

29 Излучения и помехи в волоконно-оптических линиях

По показателям помехоустойчивости и уровню радиоизлучений волоконно-оптические кабели вне конкуренции. В этих линиях энергию сигнала передают не электроны а фотоны. Волоконно-оптические кабели и системы на их основе имеют отличные показатели по молниестойкости, помехоустойчивости к радиоизлучениям от различных источников помех в широком диапазоне частот, не подвержены негативному влиянию электростатических разрядов и других источников электромагнитных сигналов. Они допускают неограниченную плотность трассировки в одном жгуте без применения дополнительных мер защиты от ЭМП.

Однако и у таких качественных с точки зрения ЭМС каналов связи есть слабые места и присущие им недостатки, сказывающиеся на их работе. В подавляющем большинстве случаев причиной шумов и помех волоконно-оптических систем являются:

- собственно схема самого приемника и шумовые характеристики входного тракта приемника;
- перекрестные помехи, возникающие внутри приемника;
- помехи в МПП, подробно описанные в настоящем Руководстве;
- непосредственная перекрестная связь между соседним оптическим передатчиком и приемником. Этот вид помех возникает только при непосредственной близости друг от друга приемника и передатчика.

Наихудший случай с точки зрения ЭМС представляет обрыв оптического волокна, отключение электропитания или неисправность источника сигнала на дальнем конце волоконно-оптической линии, что приводит к увеличению коэффициента усиления приемника до предела системой АРУ. В такой ситуации, когда чувствительность приемника максимальна, он начинает воспринимать перекрестные помехи от ближайшего передатчика, принимая ЭМП от него за полезный сигнал.

Кроме того, оптический передатчик, как правило, достаточно мощный источник ЭМП, монтируемый рядом с отверстием в экранирующем корпусе.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист
47а

30 Нормативные ссылки

В настоящем Руководстве использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 14777-76 Радиопомехи промышленные. Термины и определения

ГОСТ 30372-95/ГОСТ Р 50397-92 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения

ГОСТ В 25232-82 Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная

ГОСТ Р 51317.4.2-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний

ОСТ В1 02696-90 Оборудование бортовое. Общие требования на допустимые уровни создаваемых электромагнитных помех и методы их измерений

ОСТ В1 02763-95 Оборудование бортовое авиационное. Общие требования восприимчивости к электромагнитным помехам и методы контроля

ЕНЛГС Единые нормы летной годности самолетов П.8.1.4.1. Технические требования к характеристикам элементов функциональных систем самолета, определяющим электромагнитную совместимость (подраздел 1)

КТ-160D Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Квалификационный базис требований к аппаратуре гражданской авиации и методы испытаний.

ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения

ГОСТ В 20.39.308-76 раздел 5

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

48

31 Перечень принятых сокращений

В тексте настоящего Руководства применены следующие сокращения:

ЭМП – электромагнитная помеха.

ФРП – фильтр радиопомех.

ОНЧ – очень низкие частоты – радиочастоты от 3 до 30 кГц.

НЧ – низкие частоты – радиочастоты от 30 до 300 кГц.

СЧ – средние частоты – радиочастоты от 300 до 3000 кГц.

УКВ – ультракороткие волны – диапазон радиочастот от 30 до 300 МГц.

СВЧ – сверхвысокие частоты – радиочастоты от 3 до 30 ГГц.

ТЗ – техническое задание.

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика.

ЭМИ – электромагнитный импульс.

МПП – многослойная печатная плата.

ИС – интегральная схема.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство.

ОУ – операционный усилитель.

ЛЭП – линии электропередач.

ЛА – летательный аппарат.

АРУ – автоматическая регулировка усиления

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

49

32 Перечень принятых терминов и определений

В настоящем Руководстве применены термины и определения, установленные в ГОСТ 14777-76, ГОСТ 24375-80, ГОСТ 30372-95/ГОСТ Р 50397-92, ГОСТ Р 51317.4.2-99, ОСТ В1 02696-90, ОСТ В1 02763-95, ЕНЛГС П.8.1.4.1, а также следующие:

ЭМС – электромагнитная совместимость – способность электронного, оптико-электронного или другого бортового оборудования самолетов и вертолетов функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке, не создавая своей работой электромагнитных помех, превышающих нормируемый уровень.

ЭСР – электростатический разряд – импульсный перенос электростатического заряда между объектами, физическими телами, узлами или конструктивными элементами с различными электростатическими потенциалами.

РЭО – электронное и (или) оптико-электронное оборудование самолетов и вертолетов.

Помехоустойчивость – устойчивость к воздействию электромагнитной помехи – способность бортового РЭО сохранять заданное качество функционирования в условиях воздействия внешних электромагнитных помех с регламентируемыми значениями параметров.

Помехоземиссия – электромагнитные помехи, создаваемые работой бортового электронного или оптико-электронного оборудования самолетов и вертолетов, распространяющиеся в шинах электропитания и в виде электромагнитного излучения.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

50

33 Список используемой технической литературы

В настоящем Руководстве использованы также технические материалы по вопросам ЭМС из следующих источников:

MIL-STD-461E – военный стандарт США “Требования по контролю характеристик электромагнитного взаимодействия подсистем и оборудования”

MIL-STD-462D – военный стандарт США “Измерение характеристик электромагнитного взаимодействия подсистем и оборудования”

Д.Н.Шапиро “Основы теории электромагнитного экранирования” // Л: Энергия, 1975 г.

Под ред. М.Сокольника “Справочник по радиолокации”, Нью-Йорк, 1970, пер.с англ. в 4-х томах под ред. К.Н.Трофимова и П.И.Дудника // М: Советское радио, 1977 г.

Г.Отт “Методы подавления шумов и помех в электронных системах”, пер.с англ. Б.Н.Бронина, под ред. к.т.н. М.В.Гальперина // М: МИР, 1979 г.

Составитель Д.Р.Ж. Уайт “Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи”, Джермантаун, 1971-1973 г. Вып.1, Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи., пер.с англ. А.И.Сапгира // М: Советское радио, 1977 г.

Составитель Д.Р.Ж. Уайт “Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи”, Джермантаун, 1971-1973 г. Вып.2, Внутрисистемные помехи.и методы их уменьшения, пер.с англ. А.И.Сапгира // М: Советское радио, 1978 г.

Составитель Д.Р.Ж. Уайт “Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи”, Джермантаун, 1971-1973 г. Вып.3, Измерение электромагнитных помех и измерительная аппаратура, пер.с англ. А.И.Сапгира // М: Советское радио, 1979 г.

М.Л.Волин “Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре”, 2-е изд. // М: Радио и связь, 1981 г.

П.П.Гелль, Н.К.Иванов-Есипович “Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры” // Л: Энергоатомиздат, 1984 г.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
ВИДК.460009.008										50а

Под общей ред. В.Краузе "Конструирование приборов" в 2-х кн., пер.с нем. В.Н.Пальянова, под ред. О.Ф.Тищенко // М: Машиностроение, 1987 г.

Л.Н.Кечиев, А.Д.Князев., Б.В.Петров "Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости" // М: Радио и связь, 1989 г.

Дж.Барнс пер.с англ. "Электронное конструирование:методы борьбы с помехами" // М: МИР, 1990 г.

А.Шваб "Электромагнитная совместимость", пер. с нем. В.Д.Мазина и С.А. Спектора под ред. И.П.Кужекина // М: Энергоатомиздат, 1995 г.

Е.Угрюмов "Цифровая схемотехника" // СПб: БХВ-Санкт-Петербург, 2001 г.

В.А.Яцкевич, Ю.Н.Викулов "Экраны для защиты от электромагнитных волн СВЧ-диапазона" // сб.науч.докл.IV Межд.симп.по ЭМС и электромагнитной экологии, СПб: 2001 г.

Н.С.Вернигоров и др. "Экспериментальные исследования воздействия импульсного СВЧ-излучения на материалы" // Информост, №6, 2002 г.

Т.Уильямс "ЭМС для разработчиков продукции" // пер.с англ. М: ИД Технологии, 2003 г.

Т.Уильямс "ЭМС для систем и установок" // пер.с англ. М: ИД Технологии, 2004 г.

Т.Р.Газизов "Преднамеренные электромагнитные помехи и авионика" // Успехи современной радиоэлектроники, №2, 2004 г.

"Электромагнитная совместимость в радиоэлектронных системах" обзор, // М: ООО Авиакосмические технологии, 2005 г.

Джонсон, Говард В.,Грэхем, Мартин "Высокоскоростная передача цифровых данных:высший курс черной магии", пер.с англ. // М: ИД Вильямс, 2005 г.

Джонсон, Говард В.,Грэхем, Мартин "Конструирование высокоскоростных цифровых устройств:начальный курс черной магии", пер.с англ. // М: ИД Вильямс, 2006 г.

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						506

“Авиационные системы в XXI веке” сб. докладов научно-тех. конф.,
М: 2006 г.

Л.Н.Кечиев “Экранирование электронных средств и экранирующие системы” // М: ИД Технологии, 2007 г.

В.Б.Авдеев “Паразитная восприимчивость печатных плат электронной аппаратуры к воздействию мощных электромагнитных излучений” // Антенны-2007-№4

Н.Ф.Стасев, Е.Г.Тихонов, А.Е.Чикин “Разработка входных цепей малогабаритных вторичных источников питания с учетом факторов ЭМС” // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. научных тр.-Новосибирск: Наука 2007 г.

В.В.Быков, В.В.Наркевич, В.В.Омельянчук “Возникновение, измерение и подавление импульсных помех на выходе статического преобразователя” // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. научных тр.-Новосибирск: Наука 2007 г.

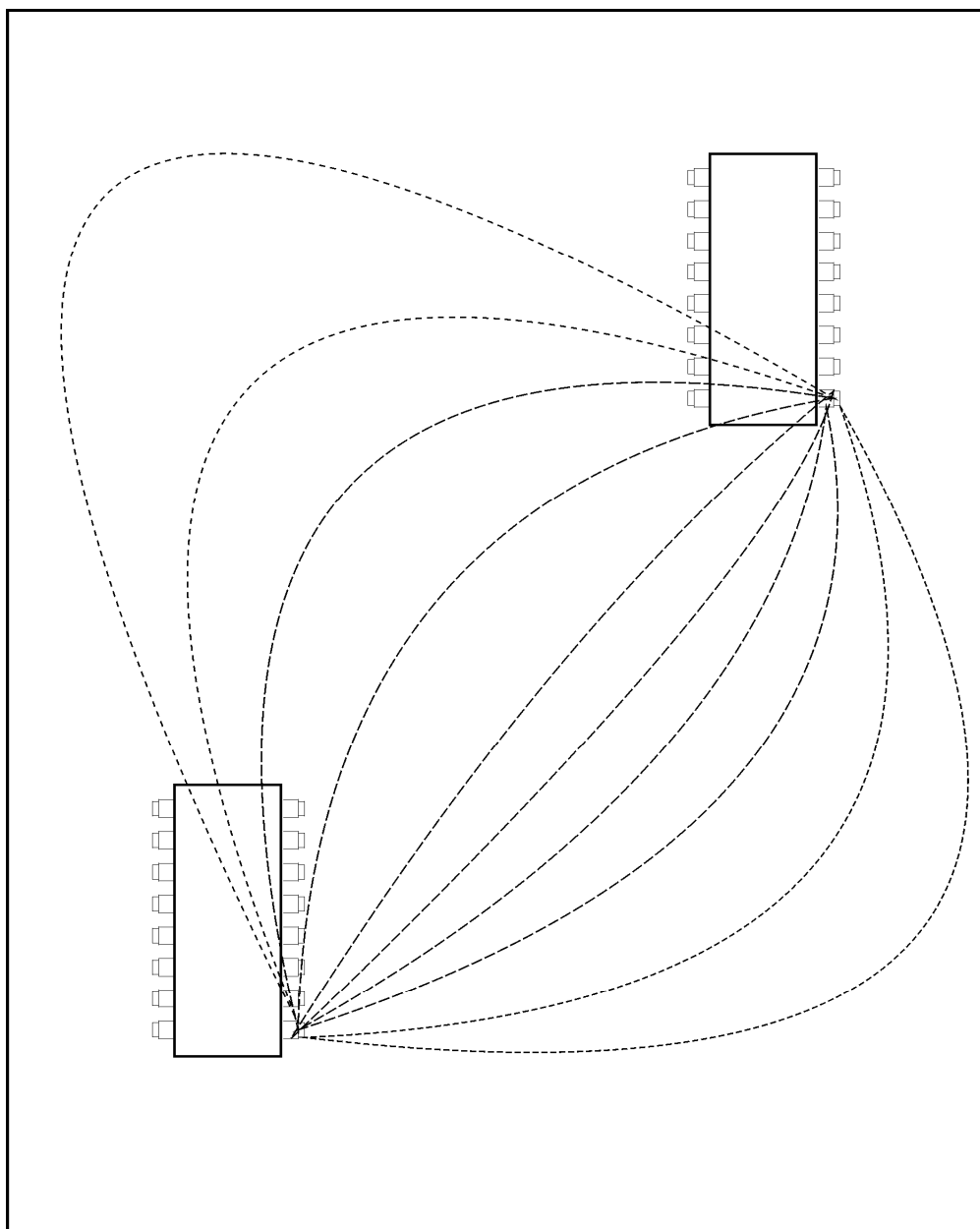
При подготовке настоящего Руководства использованы также материалы журналов CHIP NEWS, Технологии ЭМС, Современная электроника, Силовая электроника, Электронные компоненты, Успехи современной радиоэлектроники, Антенны, Воздушно-космическая оборона, СТА и др., а также статьи технических специалистов и другие материалы предприятий ПСБ технолоджи, Резонит, Александер Электрик, Электрон-Сервис-Технология, ГИРИКОНД, Авангард и др.

Кроме того, при разработке настоящего Руководства использовались материалы конференций и форумов по ЭМС, проходящих периодически в Российской Федерации.

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ВИДК.460009.008				Лист
				50в

Приложение А
(справочное)

Распределение возвратных токов в МПП



Несмотря на то, что в МПП со сплошными полигонами GND пути возвратных токов между двумя отдаленными точками стремятся распределиться по большей площади полигона МПП, наибольшая часть возвратных токов протекает по наикратчайшему пути между этими отдаленными точками схемы.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

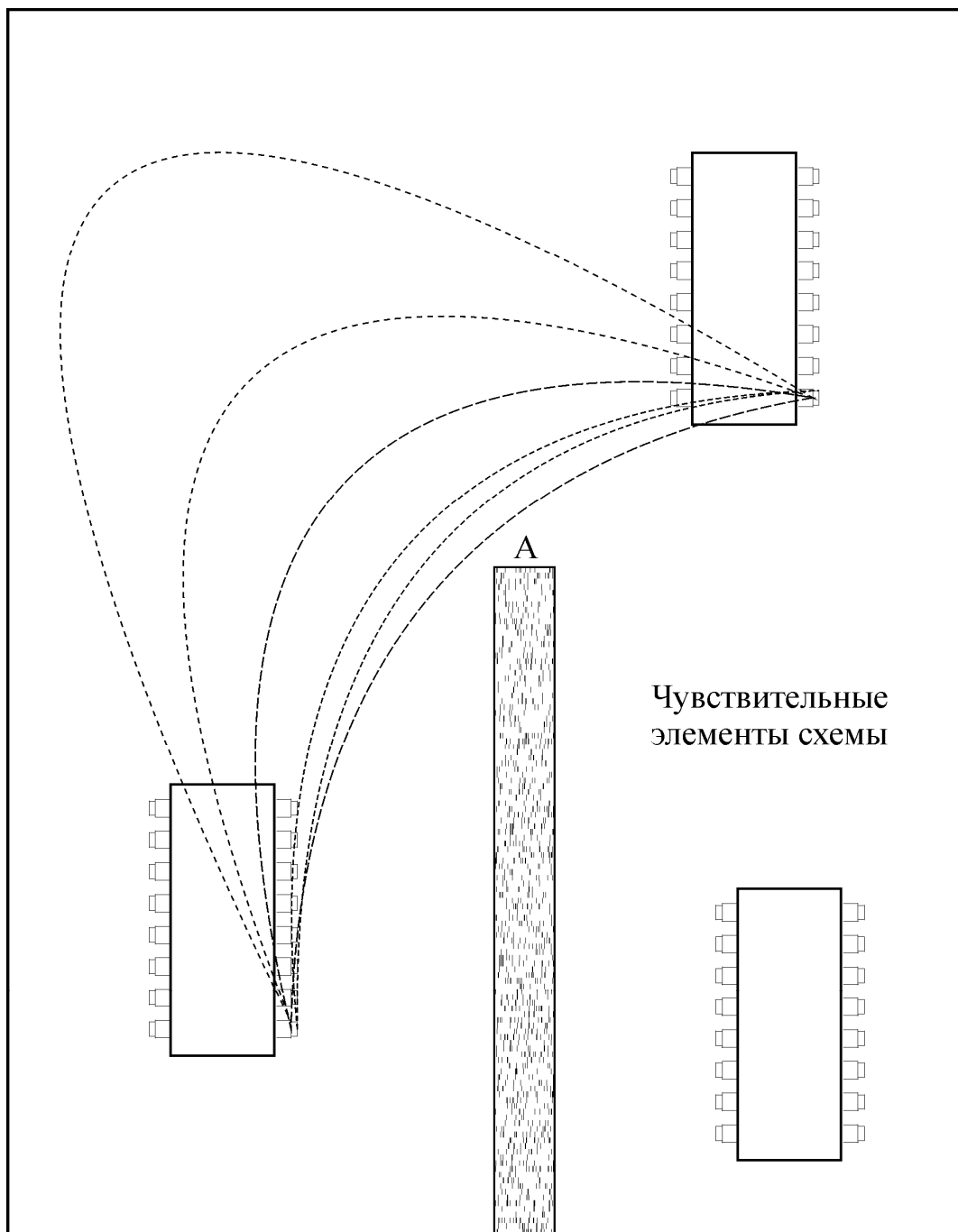
Лист

51

Приложение Б

(справочное)

Влияние разрыва в полигоне на распределение возвратных токов в МПП



Правильно расположенный вырез в полигоне способен защитить чувствительные элементы схемы от воздействия низкочастотных возвратных токов. Однако при этом возрастает плотность тока особенно вблизи выреза со стороны точки А.

Инв.№ подл.	2-158	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

ВИДК.460009.008

Лист

52

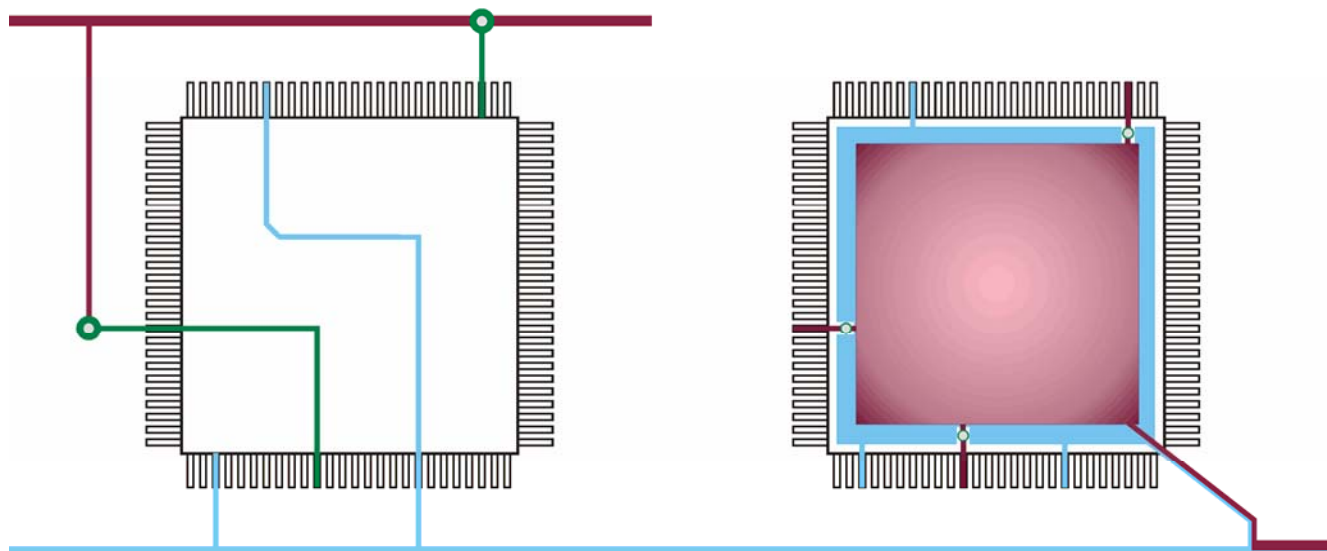
Приложение В

(справочное)

Трассировка цепей электропитания больших ИС на МПП

Неправильно

Правильно



- Vcc с обратной стороны
- Vcc со стороны монтажа
- Vgnd со стороны монтажа
- Переходное отверстие

Примеры, иллюстрирующие неправильную и правильную концепцию подхода конструктора при топологическом проектировании МПП, в части трассировки цепей электропитания больших ИС.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата

ВИДК.460009.008

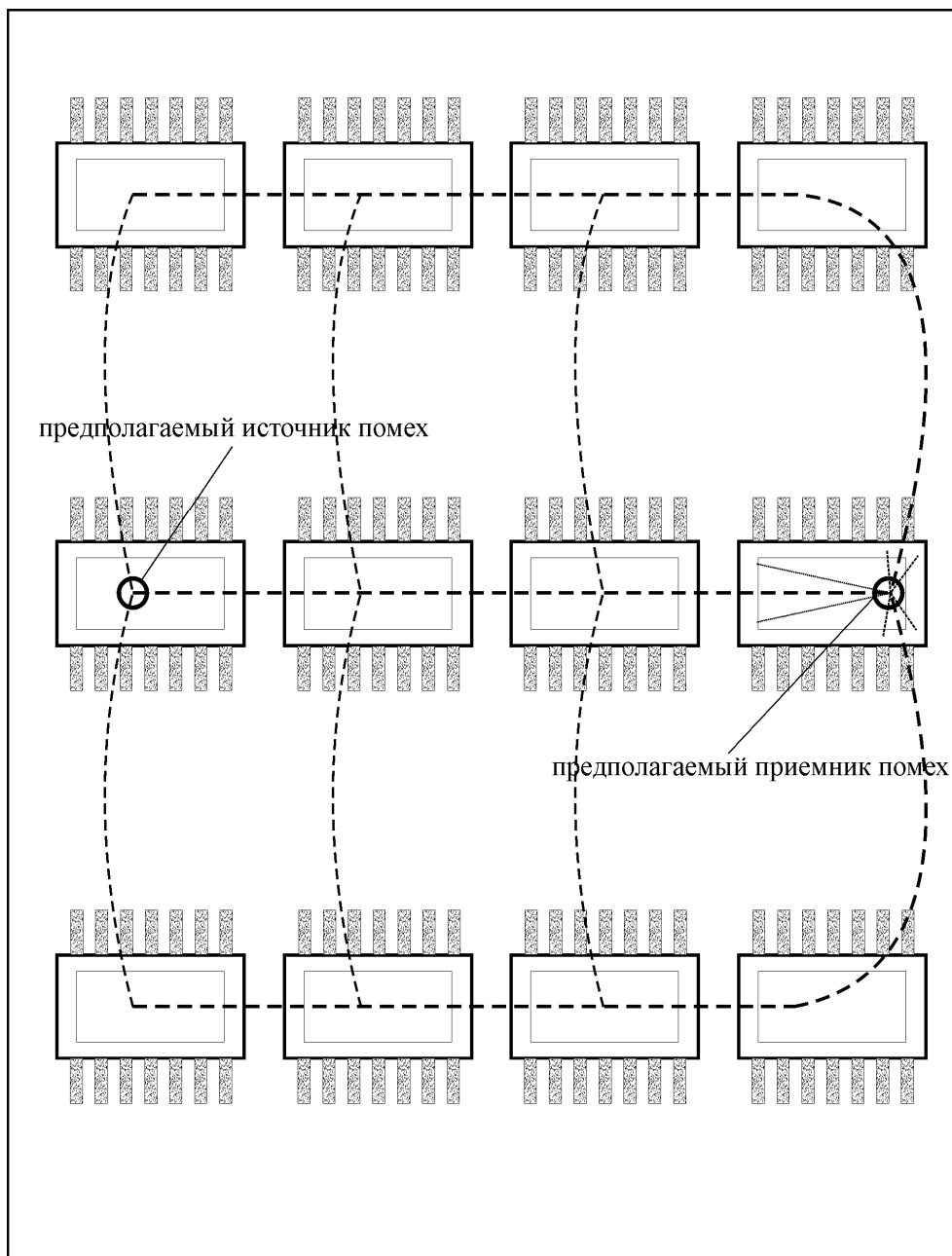
Лист

53

Приложение Г

(справочное)

Паразитная связь через изолированные металлические крышки микросхем



Очень многие разработчики радиоэлектронной аппаратуры за рубежом отдают предпочтение микросхемам в керамическом или пластмассовом корпусе без металлических крышек из-за наличия паразитной емкостной связи, показанной на рисунке. Этот фактор особенно актуален для быстродействующих цифровых и аналоговых схем.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

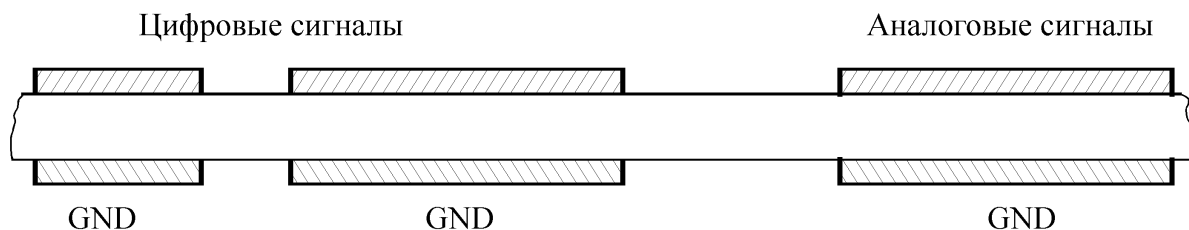
Лист

54

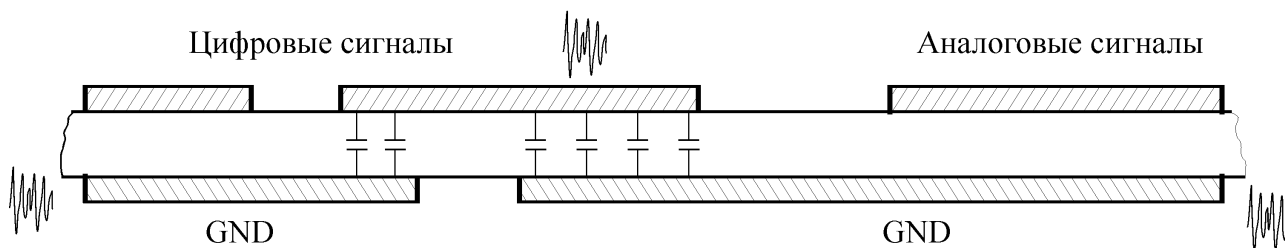
Приложение Д

(справочное)

Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов



ПРАВИЛЬНО



НЕПРАВИЛЬНО

Конденсаторы на рисунке символизируют не физическое наличие компонентов, а паразитную емкостную связь полигонов.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
2-158	26.05.09					
Взам. инв. №	Инв. № дубл.					
2-144						
Копировал						

ВИДК.460009.008

Лист

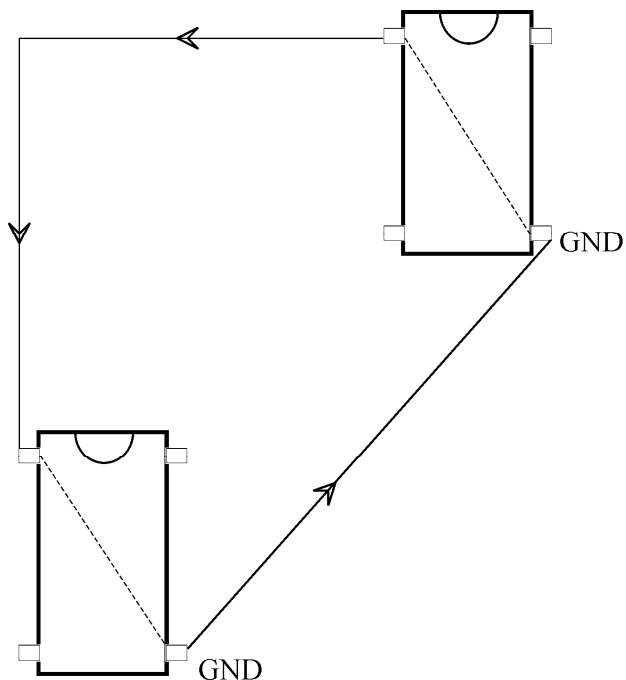
55

Формат А4

Приложение Е

(справочное)

Петля, образованная прямым и возвратным током
Сигнальные токи всегда возвращаются к своему источнику, т.е. путь
тока представляет собой петлю



Токи высокой частоты протекают по наикратчайшему пути с минимальной индуктивностью. От площади петли, образованной прямым и возвратным током, зависит напряженность электромагнитного поля радиопомех, излучаемого в окружающее пространство.

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.		Подп. и дата	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

ВИДК.460009.008

Лист

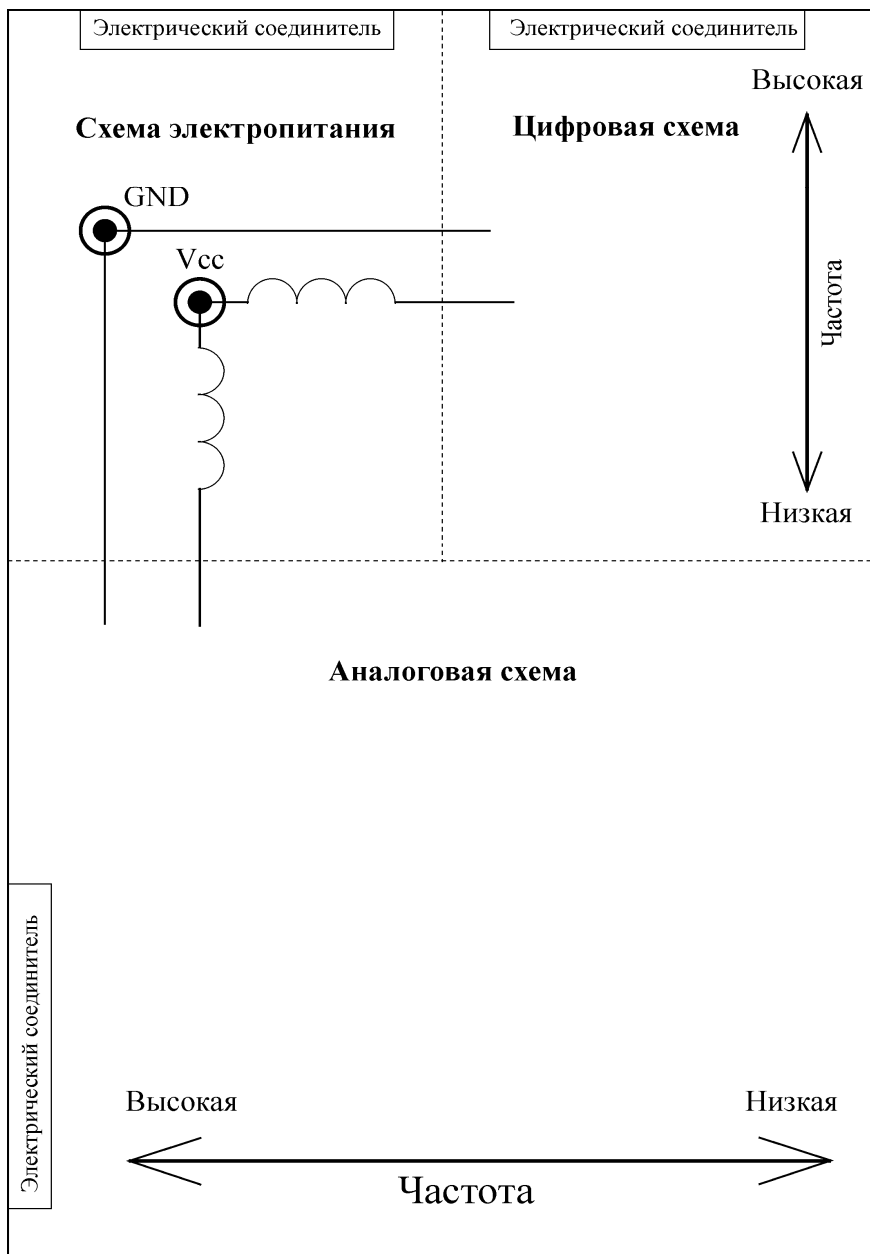
56

Приложение Ж

(справочное)

Компоновка элементов схемы зависимости от быстродействия ЭРИ

Пример правильного размещения компонентов в зависимости от



быстродействия ЭРИ и функционального назначения частей схемы

Наличие на рисунке трех электрических соединителей условно, служит для более наглядной иллюстрации правильного размещения компонентов по отношению к электрическому соединителю в зависимости от быстродействия ЭРИ.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

57

Приложение И
(справочное)

Изменение собственной индуктивности и емкости электрических проводов
Зависимость собственной индуктивности и емкости электрических проводов от расстояния до металлических заземленных конструктивных элементов шасси, корпуса и т.п. изделия

Диаметр провода, мм	Индуктивность на 100 мм длины, нГн, при различных расстояниях между проводом и металлическим корпусом, мм			Емкость на 100 мм длины, пФ, при различных расстояниях между проводом и металлическим корпусом, мм		
	1	10	100	1	10	100
0,1	74	116	142	1,5	0,9	0,7
0,5	41	84	110	2,7	1,4	0,8
1,0	28	70	96	4,0	1,6	0,9
2,0	14	56	80	8,0	1,8	1,0

Приведенные значения ориентировочны; каждая конкретная марка провода будет обладать своими физическими свойствами. При использовании данных таблицы необходимо помнить, что индуктивность провода связана нелинейной зависимостью с его длиной. Значения индуктивности приводятся без учета поправочного коэффициента частотной зависимости.

Таблица иллюстрирует общую тенденцию зависимости собственной индуктивности и емкости электрических проводов от расстояния до металлических заземленных конструктивных элементов.

Инд. № подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ВИДК.460009.008	Лист
						58

Приложение К
(справочное)

Децибелы

Децибел (дБ) – безразмерная величина, которая представляет логарифм отношения двух значений. Если берется отношение двух специальных величин, то это определяется суффиксом, а именно: дБмкВ при отношении относительно 1 мкВ, дБм – относительно 1 мВт.

Суффикс	Относится к	Суффикс	Относится к
дБВ	1 вольт	дБА	1 ампер
дБмВ	1 милливольт	дБмкА	1 микроампер
дБмкВ	1 микровольт	дБмкА/м	1 микроампер на метр
дБВ/м	1 вольт на метр	дБВт	1 ватт
дБмкВ/м	1 микровольт на метр	дБм	1 милливатт
		дБмкВт	1 микроватт

Отношение напряжений или токов через постоянное сопротивление дается в виде:

$$дБ = 20 \cdot \log(V1/V2) \text{ или } 20 \cdot \log(I1/I2)$$

Преобразование между напряжением в дБмкВ и мощностью в дБм на полном сопротивлении Z=50 Ом, задается в виде:

$$V(дБмкВ) = 90 + 10 \cdot \log(Z) + P(дБм)$$

дБмкВ	мкВ	дБм	дБмкВ	мкВ	дБм
-20	0,1	-127	30	31,623	-77
-10	0,3162	-117	40	100,0	-67
0	1,0	-107	50	316,23	-57
5	1,7783	-102	60	1000	-47
7	2,2389	-100	70	3162,3	-37
10	3,162	-97	80	10000	-27
15	5,623	-92	90	31623	-17
20	10,0	-87	100	100,0 мВ	-7
			120	1,0 В	+13

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ВИДК.460009.008

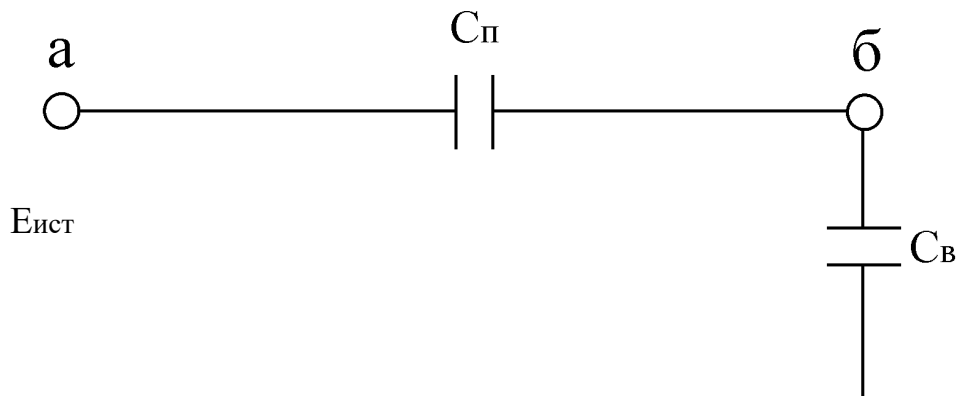
Лист
59

Приложение Л

(справочное)

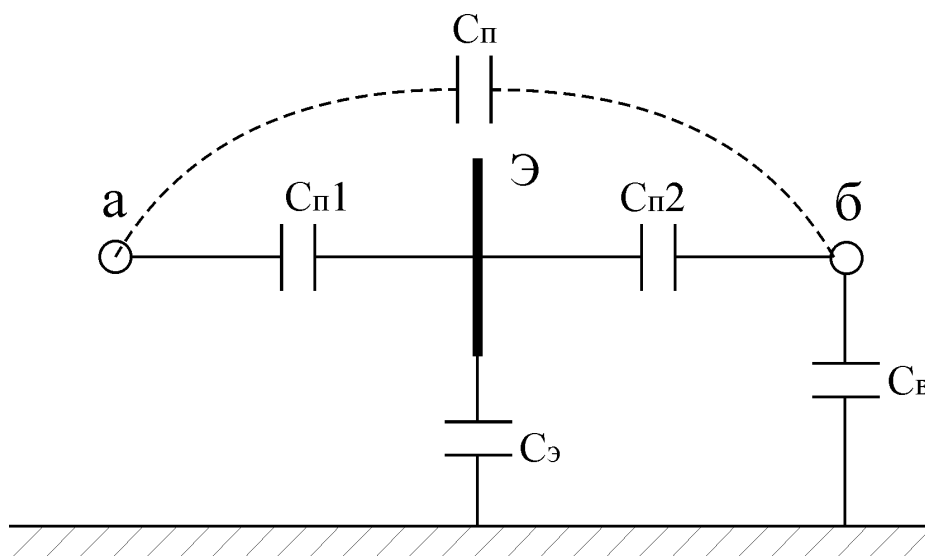
Примеры, иллюстрирующие работу экрана

Система или устройство без экрана между точками а и б



Между точками а и б существует емкостная паразитная связь $C_{п}$.

Система или устройство с токопроводящим экраном между точками а и б



Паразитная связь $C_{п}$ при установке экрана между точками а и б разбита на составляющие $C_{п1}$ и $C_{п2}$. Если емкость $C_{э}$ между экраном и корпусом очень мала, то напряжение в точке б равно напряжению в точке а, иначе говоря экран неэффективен. Конструктор должен стремиться к тому, чтобы значение $C_{э} \rightarrow \infty$, то есть короткому замыканию на корпус.

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Подп. и датаΣ	
Инв. № дубл.		Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.	

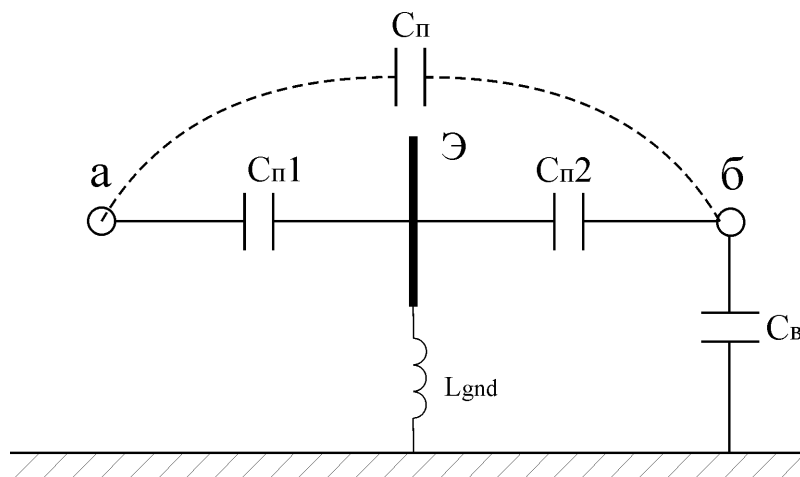
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

ВИДК.460009.008

Лист

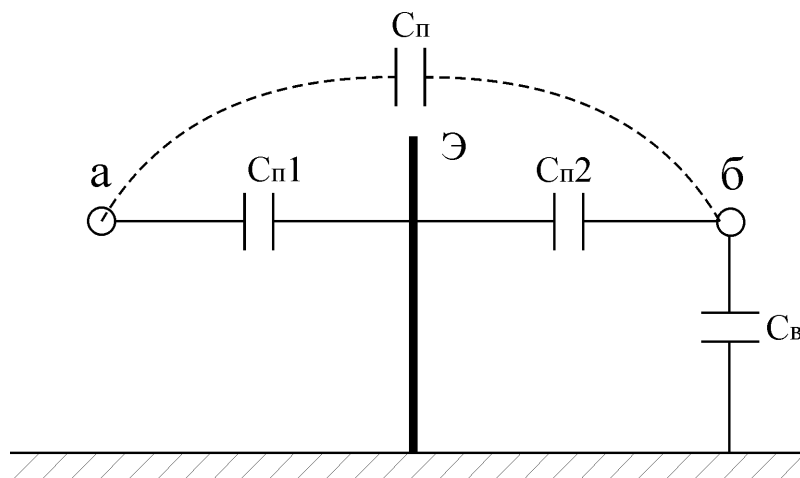
60

Сиситема или устойство с токопроводящим экраном между точками а и б



Действие L_{gnd} – шины металлизации экрана с корпусом во многом сходно с действием описаной выше емкостной связью $C_э$. Индуктивное сопротивление L_{gnd} , возрастающее с ростом частоты, эквивалентно адекватному уменьшению емкостной связи экрана с корпусом $C_э$.

Сиситема или устойство с токопроводящим экраном между точками а и б



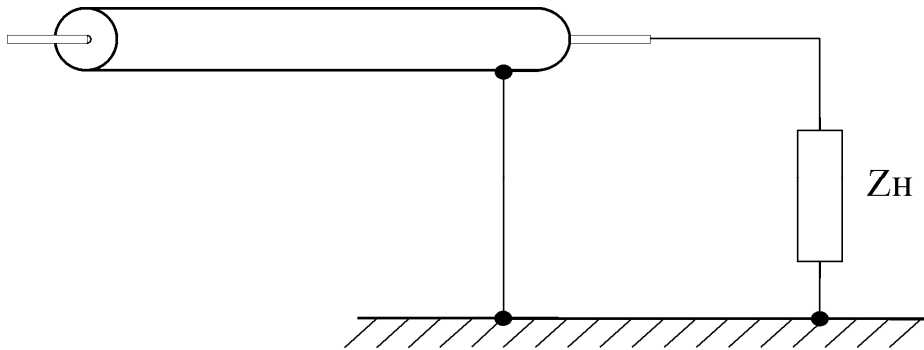
Схема, к которой должен стремиться конструктор при проектировании экранирующих элементов, в том числе корпусов блоков, пультов, индикаторов и других изделий, а также экранировке отдельных элементов, узлов и электрических цепей. Электрическая связь каждого конструктивного элемента экрана между собой и с корпусом аппаратуры должна выполняться элементами с низкими значениями индуктивности и высокой электропроводностью.

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

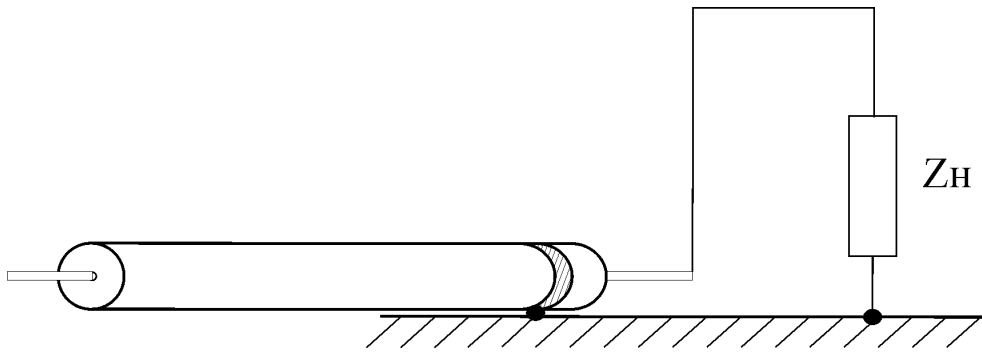
ВИДК.460009.008

Приложение М
(справочное)
Заземление электрических проводов



НЕПРАВИЛЬНО

Заземление экранирующего слоя (оплетки) электрических проводов при помощи электрического провода резко снижает эффективность экранирования. Электрический провод, используемый для заземления оплетки электрических проводов или жгутов обладает значительной собственной индуктивностью.



ПРАВИЛЬНО

Заземление экранирующего слоя (оплетки) электрических проводов должно осуществляться конструктивным элементом с низким значением собственной индуктивности и высокой электропроводностью. Этот элемент должен охватывать экранирующий слой (оплетку) электрических проводов на 360° и непосредственно металлизироваться с полсклстью заземления.

Инв.№ подл.	2-158	Подп. и дата	26.05.09	Взам. инв. №	2-144	Инв. № дубл.	Подп. и дата
-------------	-------	--------------	----------	--------------	-------	--------------	--------------

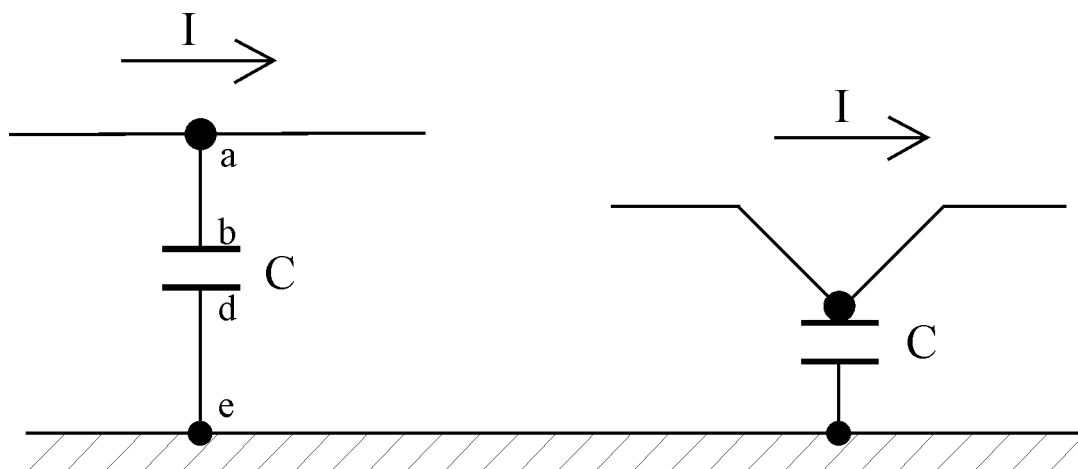
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ВИДК.460009.008

Приложение Н

(справочное)

Электромонтаж конденсаторов



Неправильно

Правильно

Неправильно выполненный электромонтаж может резко ухудшить расчетную степень фильтрации электрической цепи. Необходимо стремиться к уменьшению длины электромонтажных соединений на участках $a - b$ и $d - e$ для снижения индуктивности этих участков электрической цепи.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

63

Приложение П

(справочное)

Требования стандартов по восприимчивости авионики ЛА к ЭМП

Год	Гражданские	Военные	
		Великобритания	США
1967	3,7 мВ/м, 1 ГГц	0,82 В/м, 1 ГГц	-
1968	-	-	1 В/м, 10 ГГц
1971	-	-	5 В/м, 10 ГГц 20 В/м, 40 ГГц
1980	0,1 В/м, 1 ГГц	5 В/м, 10 ГГц, 20 В/м, 18 ГГц модулированным сигналом до 200 В/м включительно	-
1984	1 В/м, 1,215 ГГц	-	-
1986	-	-	20 В/м, 40 ГГц до 200 В/м включительно
1989	200 В/м, 18 ГГц	-	-
1992	6,8 кВ/м, 18 ГГц	-	-
2000	7,2 кВ/м, 18 ГГц	-	-

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

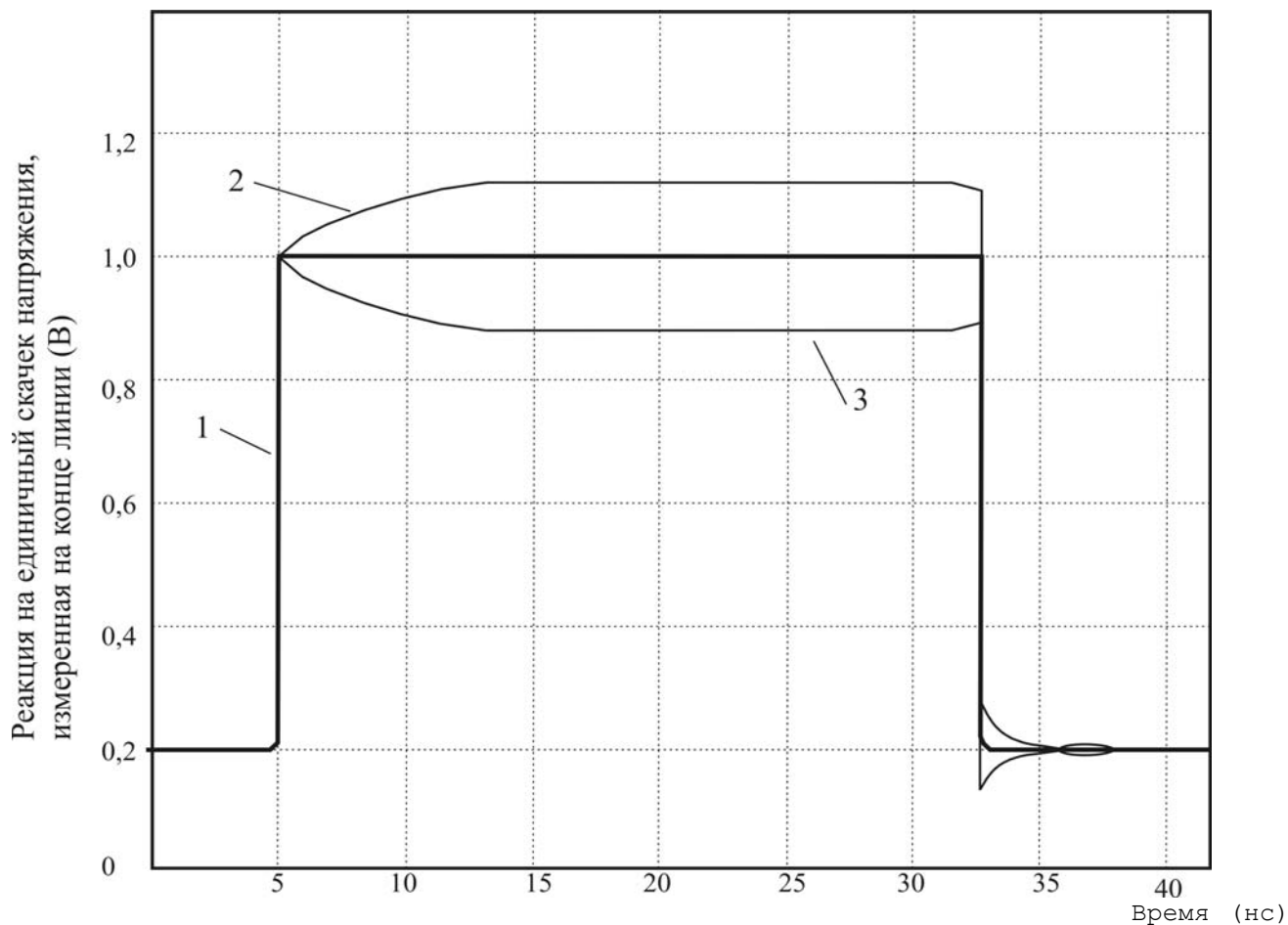
64

Приложение Р

(справочное)

Варианты согласования электрических линий связи

Различия между основными вариантами согласования электрических
линий связи



- 1- электрическая линия согласована на обоих концах;
- 2- электрическая линия согласована на стороне источника сигнала;
- 3- электрическая линия согласована на стороне нагрузки.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

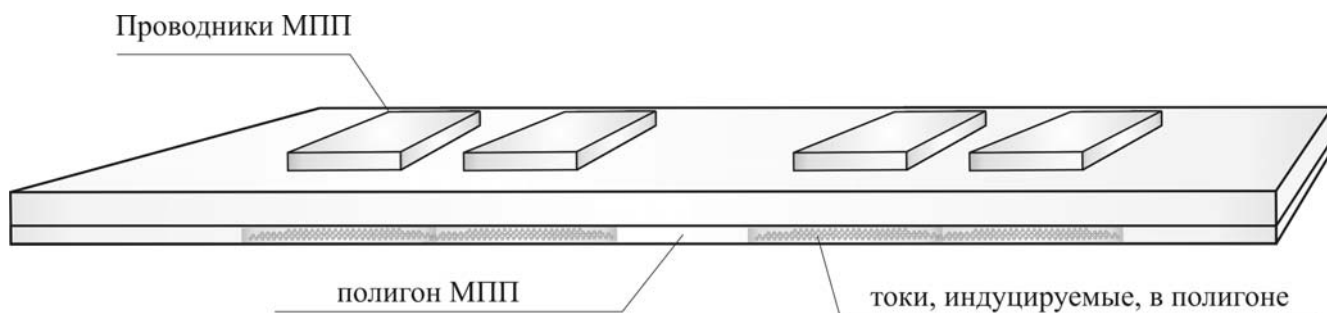
Лист

65

Приложение С

(справочное)

Взаимодействие возвратных токов дифференциальной пары проводников МПП



При расстоянии между проводниками дифференциальной пары МПП равном или меньшем, чем ширина этих проводников, возникает частичное перекрытие и взаимодействие возвратных токов, индуцированных в ближайшем полигоне.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист

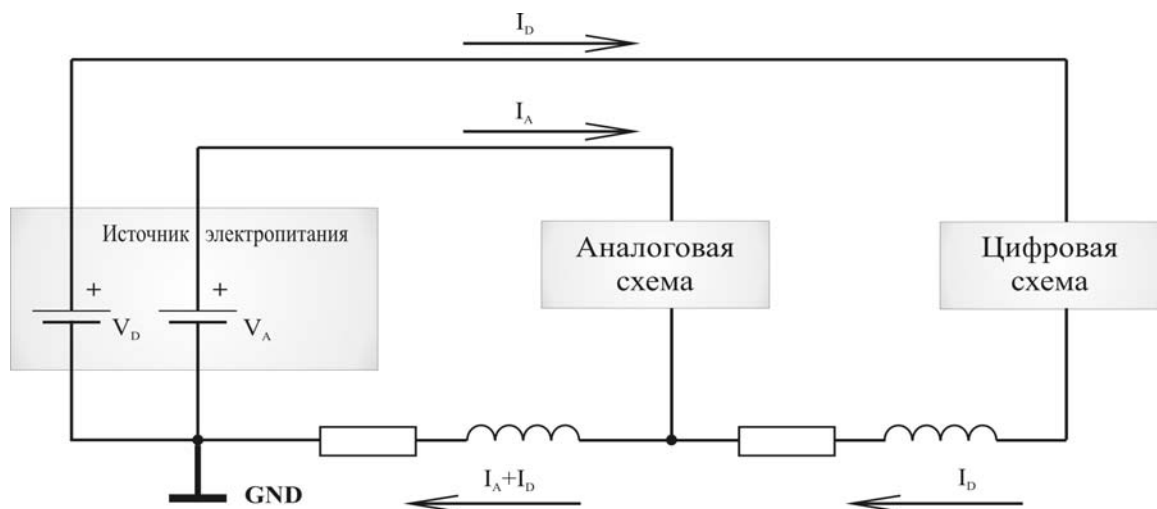
66

Приложение Т

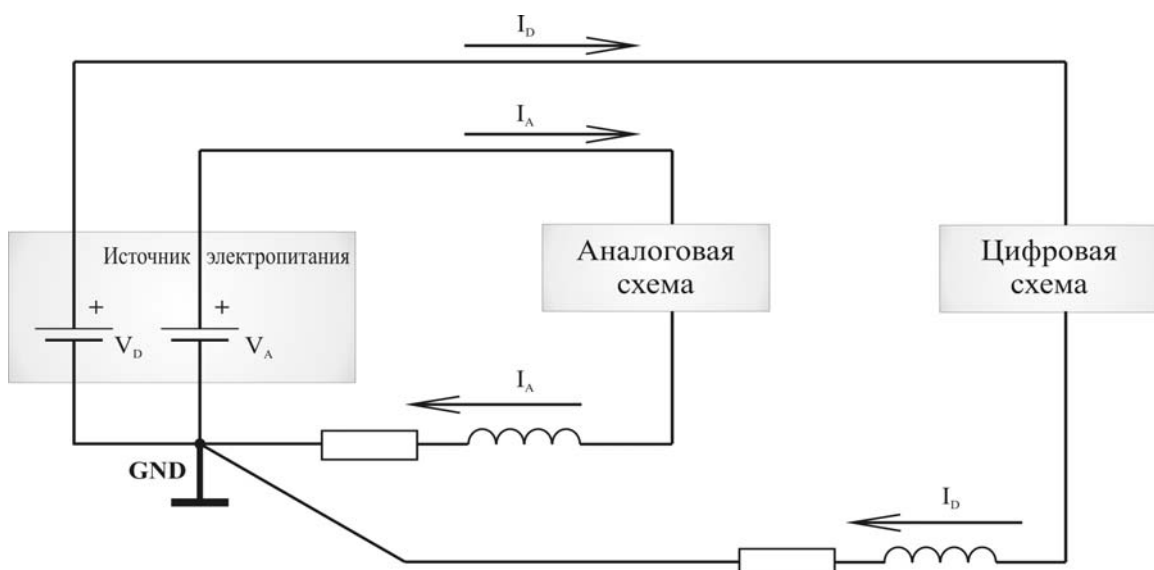
(справочное)

Разделение шин заземления цифровых и аналоговых схем

НЕПРАВИЛЬНО



ПРАВИЛЬНО



Наличие в схеме резисторов и индуктивностей условно символизирует активное сопротивление и собственную индуктивность электрических линий связи.

Инв.№ подл.	2-158
Подп. и дата	26.05.09
Взам. инв. №	2-144
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

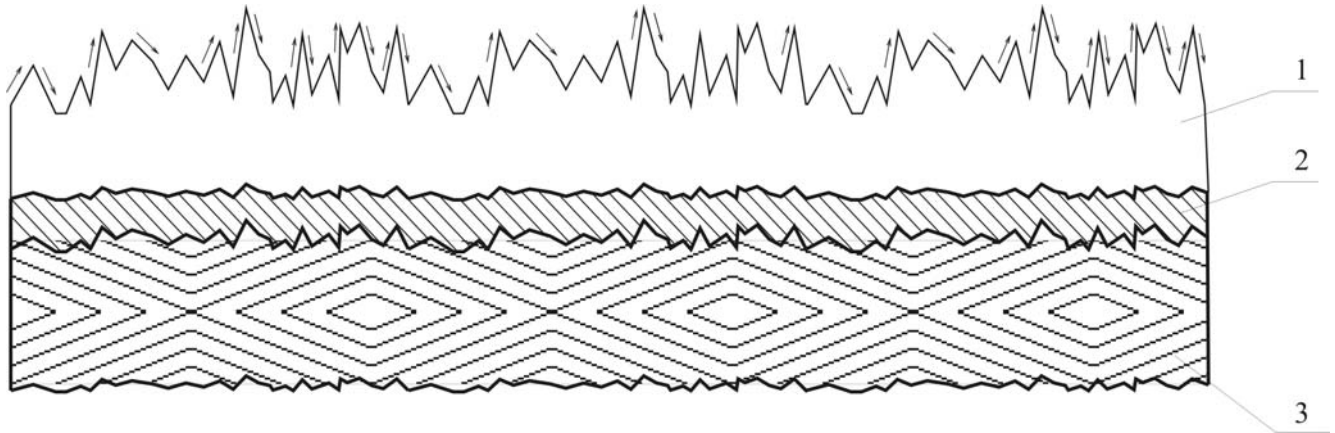
ВИДК.460009.008

Лист

67

Приложение У
(справочное)

Шероховатость поверхности МПП



- 1 - слой металлизации (полигон) МПП;
2 - связующий диэлектрик; 3 - основание (материал) МПП.

При передаче высокоскоростных потоков информации на высоких частотах из-за усиления поверхностного эффекта максимум плотности тока передаваемого сигнала следует вдоль поверхности проводника и толщина такого слоя может измеряться единицами, десятками или сотыми долями мкм в зависимости от частоты передаваемого сигнала. В этом случае наблюдается повышение сопротивления высокочастотному току, следующему вдоль рельефа, образованного шероховатостью основного материала и подложки, которое может достигать значений 50-100% относительно исходного сопротивления этого проводника постоянному току или сигналу НЧ. Это приводит к значительному ослаблению передаваемого сигнала на нагрузке и серьезному сужению полосы пропускания такой электрической линии связи.

Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
2-158	26.05.09	2-144		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ВИДК.460009.008

Лист
68

