

УДК 621.372.542.29

Экспериментальные исследования периодических СВЧ-структур со свойствами поверхности с высоким импедансом

Храмцов М. В., Заболоцкий А. М.

Постановка задачи: Современная тенденция к миниатюризации и повышению быстродействия, приводит к увеличению тактовых частот, скорости передачи данных, увеличению плотности монтажа, интеграции радиоэлектронных средств (РЭС) в единые системы. Это, в свою очередь, делает современные высокоскоростные системы очень чувствительными к электромагнитным помехам (ЭМП). Кроме того, РЭС используемые в критичных областях, таких как военная, промышленная, добывающая, подвергаются жестким условиям эксплуатации, в виде повышенных и пониженных температур. В свою очередь, традиционные устройства помехозащиты имеют узкий диапазон рабочих частот из-за своих паразитных параметров, большие габариты и ограниченный рабочий температурный диапазон. В этих условиях целесообразно использовать проводящий рисунок в слоях ППП, выполненный особым образом, для защиты цепей питания ППП от кондуктивных ЭМП. Такое техническое решение имеет минимальные габариты, малую стоимость, просты в изготовлении по технологическим процессам, используемым производителями ППП и способно работать в широком диапазоне температур в зависимости от токовой нагрузки. Для решения данной задачи предлагается исследовать периодические структуры со свойствами поверхности с высоким импедансом (ПВИ). **Целью работы** является исследование периодических ПВИ-структур для обеспечения целостности питания (ЦП) РЭС в условиях воздействия температуры окружающего воздуха от минус 60 до +30°C. **Используемые методы:** Для измерения частотных характеристик (S -параметров) предложено применение векторного анализатора цепей (ВАЦ), а на их основе вычисление временных откликов на воздействие импульсной помехи. Для оценки нагрева проводящего рисунка предлагается использование термопары K -типа, совместно с вольтметром универсальным, а токовая нагрузка задается источником электрического тока. При этом условия воздействия широкого диапазона температур создаются с помощью термокамеры. **Новизна:** впервые экспериментально получены частотные характеристики ПВИ-структуры с двойной спиралью для обеспечения ЦП. На основе частотных характеристик оценено воздействие импульсной помехи на исследуемые ПВИ-структуры, а также выполнено сравнение полученных результатов. Получены зависимости нагрева проводящего рисунка от времени в условиях воздействия температуры окружающего воздуха от минус 60 до +30°C **Результат:** Разработаны и изготовлены прототипы ПВИ-структур в различных конфигурациях. Измерены их S -параметры, в диапазоне частот от 0,01 до 10 ГГц. ПВИ-структуры позволяют обеспечить подавление кондуктивной помехозащиты до минус 60 дБ на отдельных частотах, а в диапазоне от 2 до 10 ГГц не менее, чем на 25 дБ. Выполнена оценка напряжения на выходе структур при воздействии импульсной помехи. Амплитуда напряжения на выходе всех структур значительно снижается, минимальное значение составляет 13,2 мВ при 457 мВ на входе. Длительность импульса на выходе увеличивается в 1,91–2,42 раза. Исследовано влияние токовой нагрузки, величиной 5 А, на нагрев проводящего рисунка в условиях воздействия различной температуры окружающего воздуха. Измерения проводились в термокамере при температурах минус 60, 0 и +30°C. Максимальный нагрев выявлен в структуре с меандром, прирост температуры составил 58,7°C, а температура проводящего рисунка равна 88,7°C. **Практическая значимость:** представленные периодические ПВИ-структуры могут быть использованы при проектировании цепей питания печатных плат для обеспечения ЦП РЭС.

Библиографическая ссылка на статью:

Храмцов М. В., Заболоцкий А. М. Экспериментальные исследования периодических СВЧ-структур со свойствами поверхности с высоким импедансом // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 107-123. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-107-123

Reference for citation:

Khramtsov M. V., Zabolotsky A.M. Experimental investigations of periodic microwave structures with high impedance surface properties. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 107-123 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-107-123

Ключевые слова: периодическая структура, импеданс, помехоэмиссия, S -параметры, импульс, температура.

Введение

В настоящее время инженеры сталкиваются с различными проблемами в области обеспечения целостности питания (ЦП) радиоэлектронных средств (РЭС), которые восприимчивы к влиянию кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП). Постоянно растущие тактовые частоты и скорости передачи данных, а также потребность в более низких уровнях напряжения питания делают современные высокоскоростные системы очень чувствительными к ЭМП. Кроме того, это приводит к повышению уровня кондуктивной помехоэмиссии, ложным переключениям, джиттеру и сбоям в работе аналоговых или цифровых схем. Помехоэмиссия высокоскоростных цифровых и аналоговых систем считается одной из наиболее серьезных проблем, связанных с электромагнитной совместимостью (ЭМС). Поэтому система распределения питания (СРП) должна обеспечивать качественное питание интегральных схем на печатных платах (ПП).

Обычно проблемы с ЦП ПП решаются путем применения защитных устройств, развязывающих конденсаторов [1] или встроенными емкостями, образованными слоями ПП [2]. Данные методы обеспечения ЦП эффективны в диапазоне частот только до нескольких сотен мегагерц. Традиционные устройства защиты не могут эффективно защищать от кондуктивных помех на высоких частотах из-за своих паразитных параметров. Эффективным и дешевым методом решения проблем с ЦП в широком диапазоне частот может являться использование периодических структур при проектировании СРП.

Структуры со свойствами поверхности с высоким импедансом (ПВИ) являются искусственными периодическими объектами, которые препятствуют распространению электромагнитных волн в определенной полосе частот [3]. Эти структуры применяются в антенной технике для подавления поверхностных волн, уменьшения поперечных размеров и взаимного влияния между элементами в печатных антенных системах [4]. Однако, благодаря частотным характеристикам ПВИ-структур, они могут быть эффективны для подавления помех широкого диапазона частот в высокоскоростных ПП [5, 6]. При использовании ПВИ-структур необходимо учитывать, что их периодическая структура задает ограничение на максимальную токовую нагрузку. ПВИ-структура увеличивает сопротивление слоя питания, что, в свою очередь, приводит к падению напряжения, а также росту температуры при высокой токовой нагрузке [7].

Известны различные ПВИ-структуры [8-10], однако применительно к использованию в СРП ПП были исследованы только частотные характеристики мостовидной [11] и меандровой [12] ПВИ-структур. Поэтому актуально изучить возможность применения более сложных структур для обеспечения ЦП, исследовать воздействие импульсной помехи, температурные характеристики, а также сравнить полученные результаты.

Разработка и изготовление периодических структур со свойствами поверхности с высоким импедансом

При разработке высокоскоростных многослойных ПП цепи питания полагаются во внутренних слоях. Для целостности сигнала (ЦС) важно сохранить непрерывность опорной плоскости, поэтому в разработанных структурах она сплошная, а на плоскости питания применяется структура с ПВИ. Разработанные прототипы выполнены на двухслойных печатных платах (рис. 1). Известно, что более простые структуры, такие как мостовидная, обеспечивают низкое падение напряжения за счет низкого сопротивления участка с ПВИ. При этом частотная характеристика в области низких частот имеет множественные подъемы, что ограничивает ее рабочий частотный диапазон. Более сложные структуры, например меандровая, имеют большее сопротивление ПВИ участка и, следовательно, большее падение напряжения. Однако ее рабочий частотный диапазон шире, а подавление на отдельных частотах более эффективное, поэтому разработаны и изготовлены различные ПВИ-структуры: мостовидная, меандровая, двойная спираль (рис. 2).

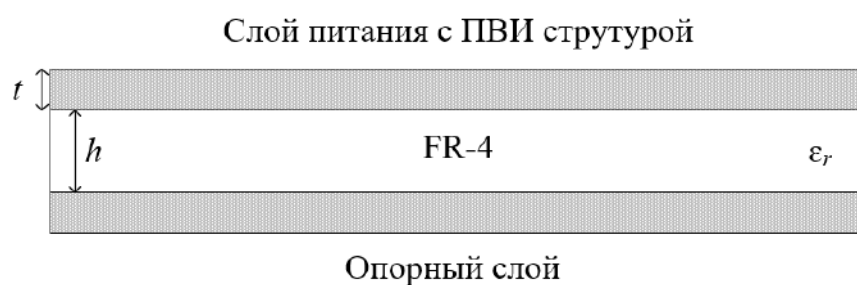


Рис. 1. Поперечное сечение ПП

Параметры разработанных ПВИ-структур: толщина диэлектрика $h=0,1$ мм, материал диэлектрика FR-4 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=4,3$, толщина проводника $t=18$ мкм, габариты прототипа $l_1=l_2=50$ мм, размеры патча $w_2=w_3=10$ мм, расстояние между патчами $g_1=10$ мм, зазор в ПВИ-структуре $g_2=0,5$ мм. Верхний слой, предназначенный для подачи питания, представляет собой периодическую структуру в которой чередуются квадратные медные участки (патчи) и ПВИ. Всего на каждом прототипе 9 участков с патчами и 12 участков с ПВИ. От размера патча зависят значения частот среза $f_{ср}$ и резонанса $f_{рез}$. При увеличении размеров патча снижаются $f_{ср}$ и $f_{рез}$ за счет увеличения собственной емкости. Изменяя тип ПВИ, можно влиять на характер частотных характеристик, поэтому изменялась ширина проводника ПВИ-структуры w_1 (0,5 и 1 мм).

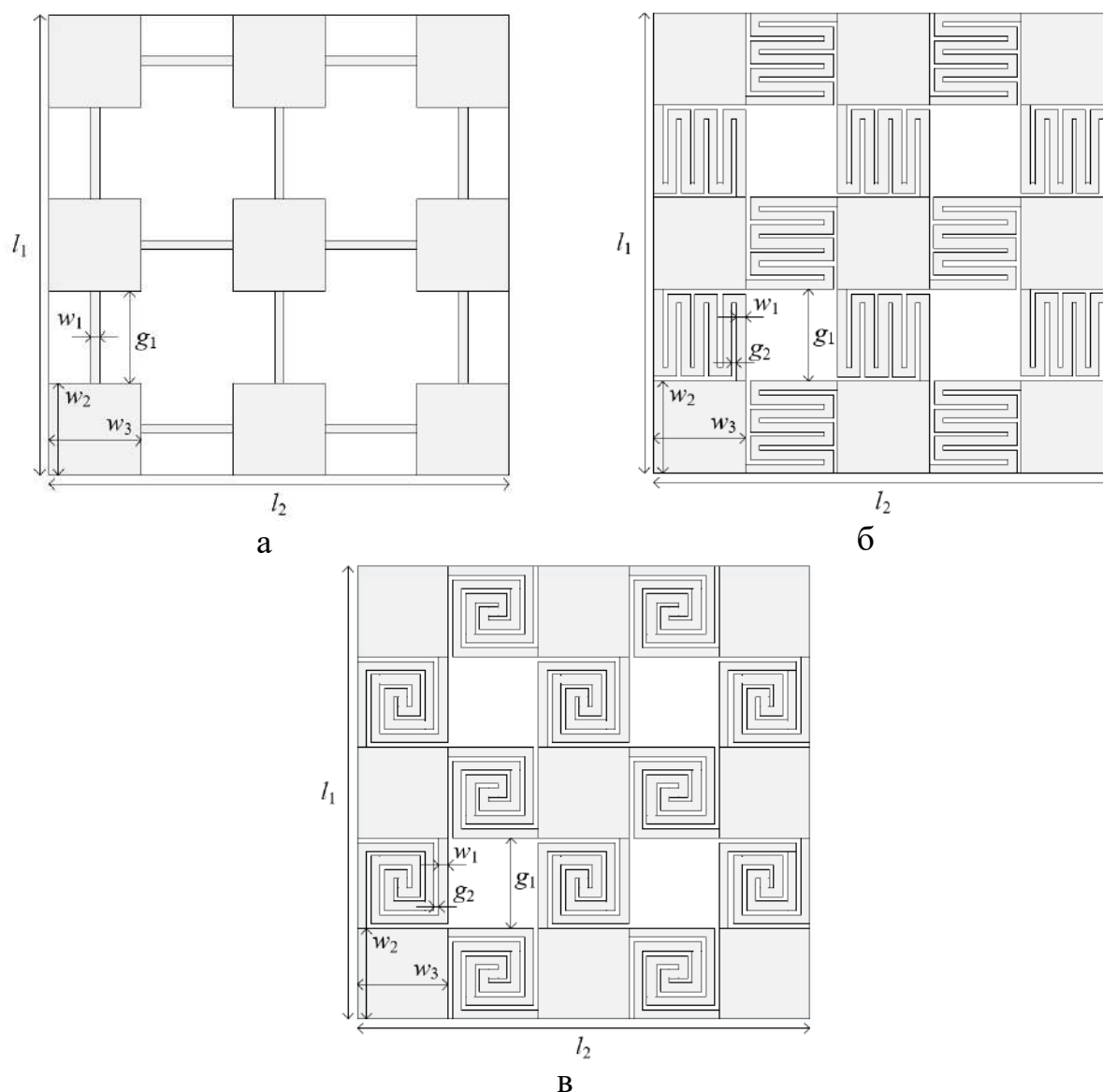


Рис. 2. Разработанные прототипы с ПВИ-структурами: мостовой (а), меандровой (б), двойной спиралью (в)

Частота резонанса $f_{рез}$ связана с одиночным плоским резонатором и определяется как первая резонансная мода f_{TMz10} [13]. Таким образом $f_{рез}$ равна 7,23 ГГц, что в дальнейшем подтверждается экспериментом

$$f_{рез} = f_{TMz10} = \frac{c}{2 \cdot w_2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

где: $f_{рез}$ – частота резонанса [Гц]; f_{TMz10} – первая резонансная мода [Гц]; c – скорость света [м/с]; w_2 – ширина патча [м]; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

Изготовленные прототипы с ПВИ-структурой показаны на рис. 3. При исследовании в частотной области применялись SMA соединители KLS1-SMA001. При этом, монтаж соединителей выполнялся на патчах в углах прототипа на максимальном удалении друг от друга.

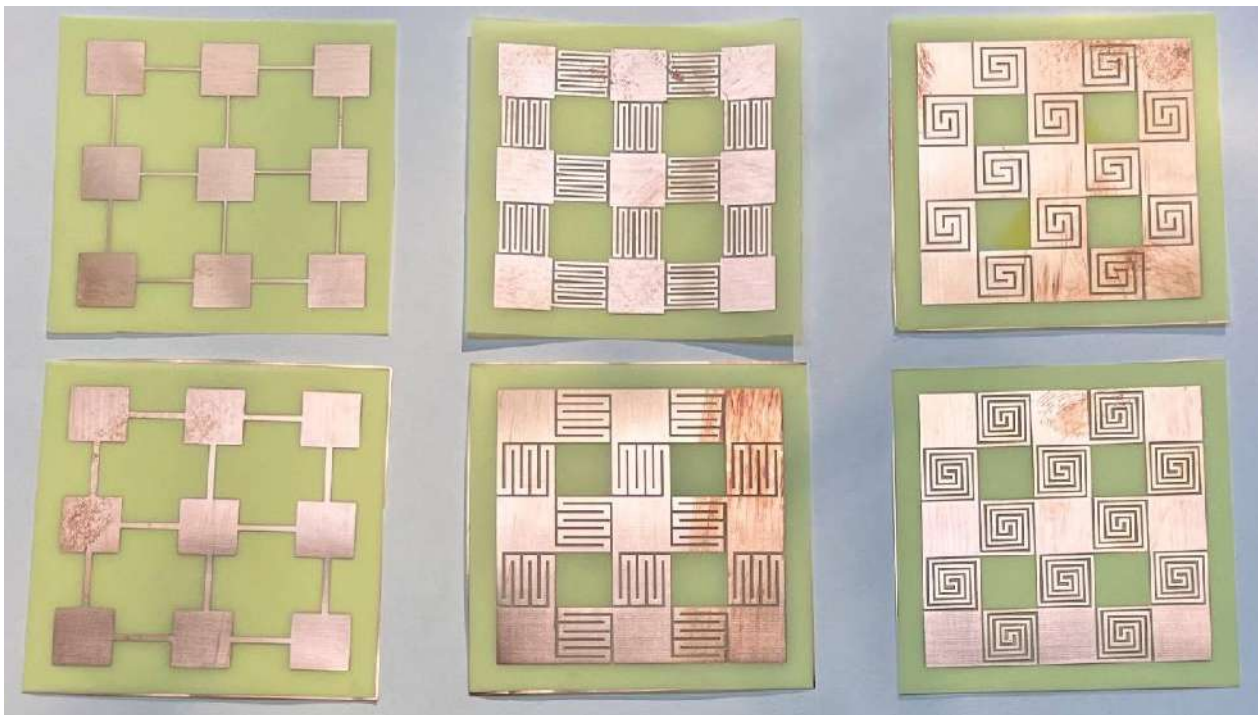


Рис. 3. Изготовленные прототипы с ПВИ-структурой

Исследование в частотной области

При исследованиях в частотной области измерены S -параметры в диапазоне частот от 0,01 до 10 ГГц. Для этого использовался векторный анализатор цепей P4M-18/2 фирмы МИКРАН. Измерительная установка представлена на рис. 4.

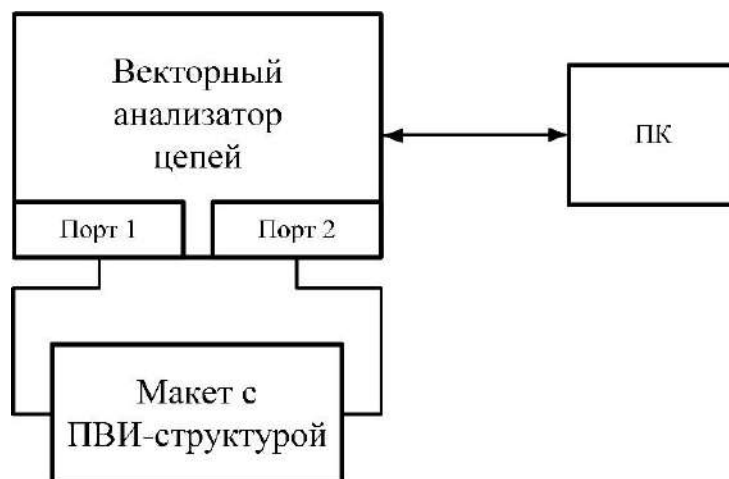


Рис. 4. Структурная схема измерительной установки

Перед измерениями, выполнена калибровка по инструкции от производителя. Полученные зависимости модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ от частоты для ПВИ-структур в диапазоне от 0,01 до 10 ГГц показаны на рис. 5 и 6.

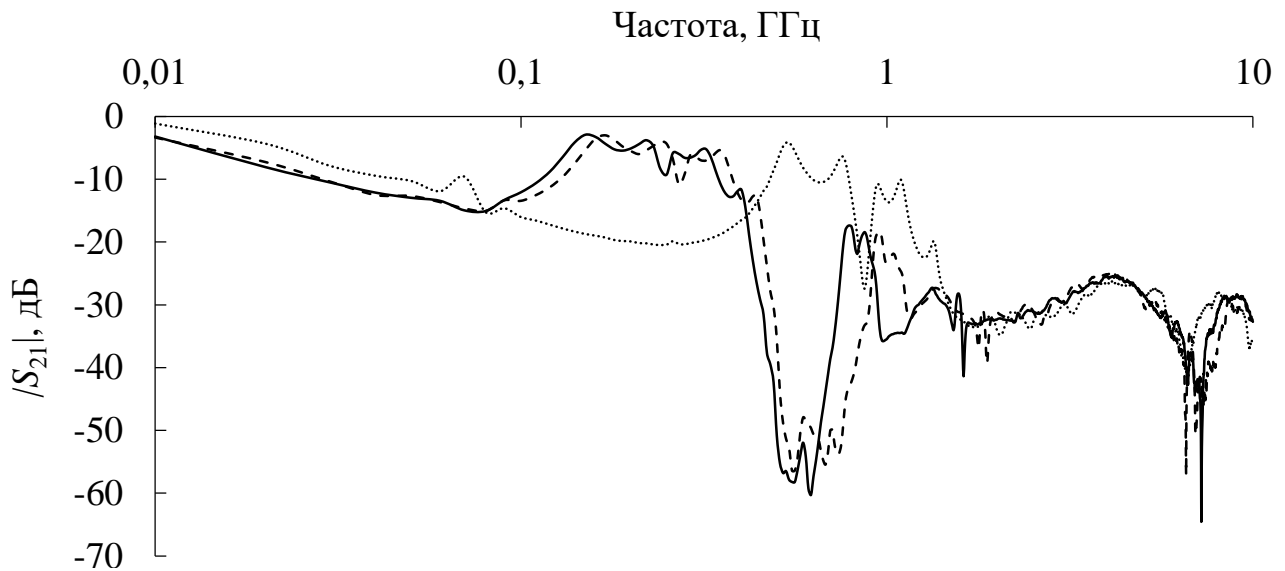


Рис. 5. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для ПВИ-структур с $w_1=0,5$ мм: мостовой ($\cdot \cdot \cdot$), меандровой ($- - -$), двойной спирали ($—$)

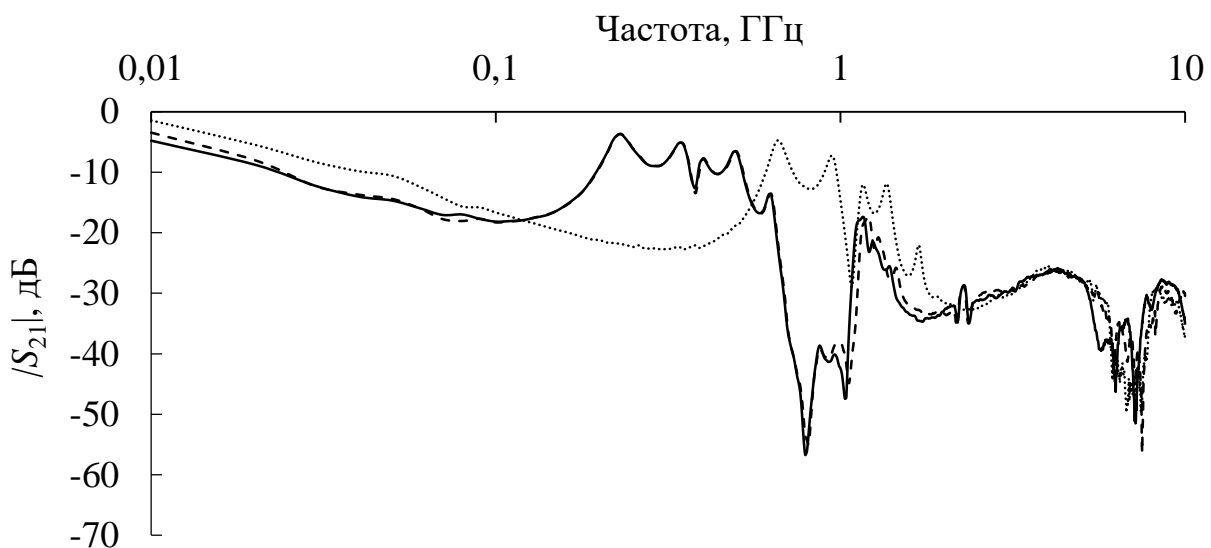


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для ПВИ-структур с $w_1=1$ мм: мостовой ($\cdot \cdot \cdot$), меандровой ($- - -$), двойной спирали ($—$)

В результате измерений видно, что с ростом частоты $|S_{21}|$ во всех случаях снижается. Однако присутствуют некоторые расхождения по частотам среза $f_{ср}$ и характеру кривой в начале частотных характеристик. Так для мостовой структуры $f_{ср}$ составляет 15 МГц. $f_{рез}$ при этом равна 6,67 ГГц. В начале характеристики наблюдается спад и в диапазоне от 202 до 302 МГц она падает ниже минус 20 дБ. После этого наблюдаются подъем и изменение характеристики в диапазоне от минус 4 до минус 20 дБ. Далее от 1,19 до 10 ГГц характеристика не поднимается выше минус 20 дБ. Для меандровой и двойной спирали $f_{ср}$ равна 10 МГц. Для меандровой структуры $f_{рез}$ при этом равна 6,97 ГГц. В диапазоне от 462 до 926 МГц частотная характеристика не

поднимается выше минус 20 дБ, а на частоте 555 МГц достигает минус 57 дБ. Далее на частоте 953 МГц она достигает минус 18 дБ и после этого в диапазоне от 973 МГц до 10 ГГц не поднимается выше минус 20 дБ. Для структуры с двойной спиралью $f_{рез} = 7,22$ ГГц. При этом $|S_{21}|$ в диапазоне частот от 424 до 759 МГц не превышает минус 20 дБ и максимальный спад минус 61 дБ наблюдается на частоте 613 МГц. От 887 МГц до 10 ГГц характеристика не превышает минус 20 дБ.

Для $w_1 = 1$ мм мостовой структуры $f_{cp} = 14$ МГц, а $f_{рез} = 7,44$ ГГц. Далее $|S_{21}|$ изменяется от минус 5 до минус 29 дБ в диапазоне частот до 1,44 ГГц. От 1,44 до 10 ГГц уровень не превышает минус 20 дБ. Для меандровой структуры $f_{cp} = 10$ МГц, а $f_{рез} = 7,51$ ГГц. До 1,23 ГГц $|S_{21}|$ изменяется от минус 4 дБ до минус 55 дБ и достигает минимума на частоте 807 МГц. В диапазоне от 1,23 до 10 ГГц частотная характеристика не превышает минус 20 дБ. Из-за ограничений измерительного прибора f_{cp} двойной спирали не удалось измерить так как она менее 10 МГц. При этом $f_{рез} = 7,18$ ГГц. В диапазоне до 1,19 ГГц $|S_{21}|$ изменяется от минус 4 до минус 57 дБ и достигает своего минимума на частоте 789 МГц. От 1,19 до 10 ГГц частотная характеристика ниже уровня минус 20 дБ.

Таким образом тип ПВИ-структуры влияет на f_{cp} , характер частотной характеристики в начале частотного диапазона и величину спада на отдельных частотах. Более сложные ПВИ-структуры сдвигают f_{cp} на более низкую частоту из-за того, что имеют большую емкость, однако этот эффект проявлен слабо, так как размеры патчей не изменяются. Так же в таких структурах на частотах до 1 ГГц появляется резонанс вплоть до минус 60 дБ. На частотах выше 2 ГГц тип ПВИ-структуры не имеет значения, а их кривые практически совпадают. На характер кривой влияет ширина проводника ПВИ-структуры. Так, при уменьшении w_1 резонанс сдвигается в область более низких частот.

Исследования во временной области

На основе измеренных S -параметров выполнен анализ отклика во временной области при воздействии импульсной помехи. Измеренные частотные зависимости S -параметров использованы для вычисления формы напряжения во временной области. Для этого полученные результаты сохранены в виде двухпортовых устройств (формат .s2p). Эти данные содержат значения, определяющие отношения между спектральными переменными каждого порта, что и позволяет с их помощью вычислять временной отклик на воздействие произвольной формы, спектр которого не шире частотного диапазона измерения S -параметров. Временные характеристики анализировались с помощью ADS, в котором ПВИ-структуры представлялись в виде двухпортовых устройств (рис. 7).

В качестве исходного воздействия SRC1 использован импульс с амплитудой 1 В и длительностями нарастания, плоской вершины и спада по 3 нс, то есть общая длительность импульса по уровню 0,5 равна 6 нс. Сопротивление резисторов R1 и R2 равно 50 Ом. Форма напряжения, воздействующего импульса показана на рис. 8.

Формы напряжения на выходе ПВИ-структур, в результате воздействия импульса показаны на рис. 9 и 10.

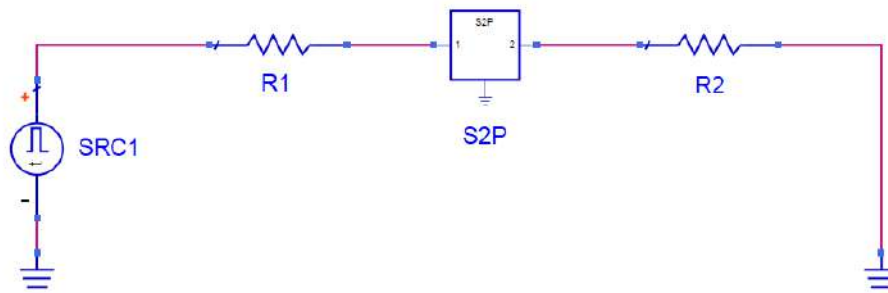


Рис. 7. Схемотехническая модель для получения временных характеристик в ADS на основе измеренных S -параметров

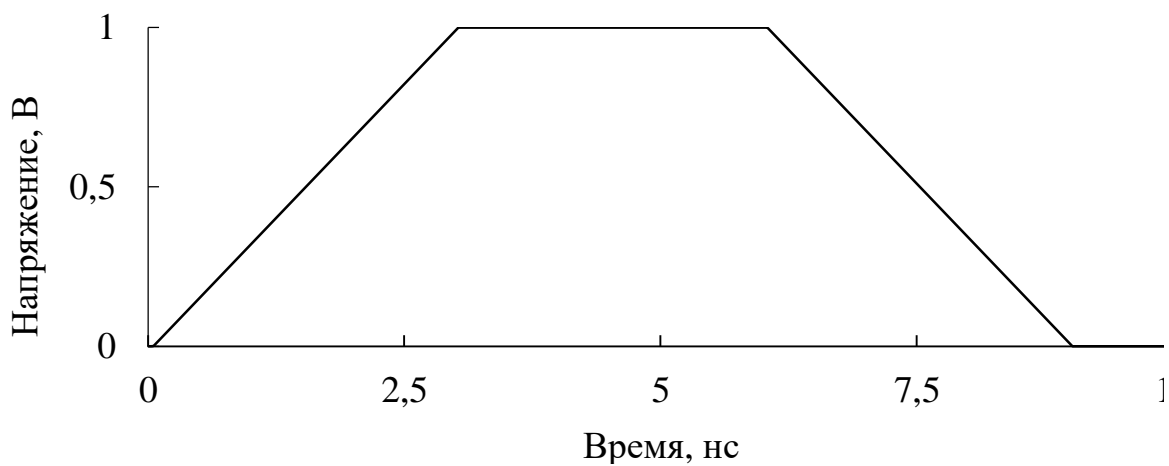


Рис. 8. Форма напряжения воздействующего импульса

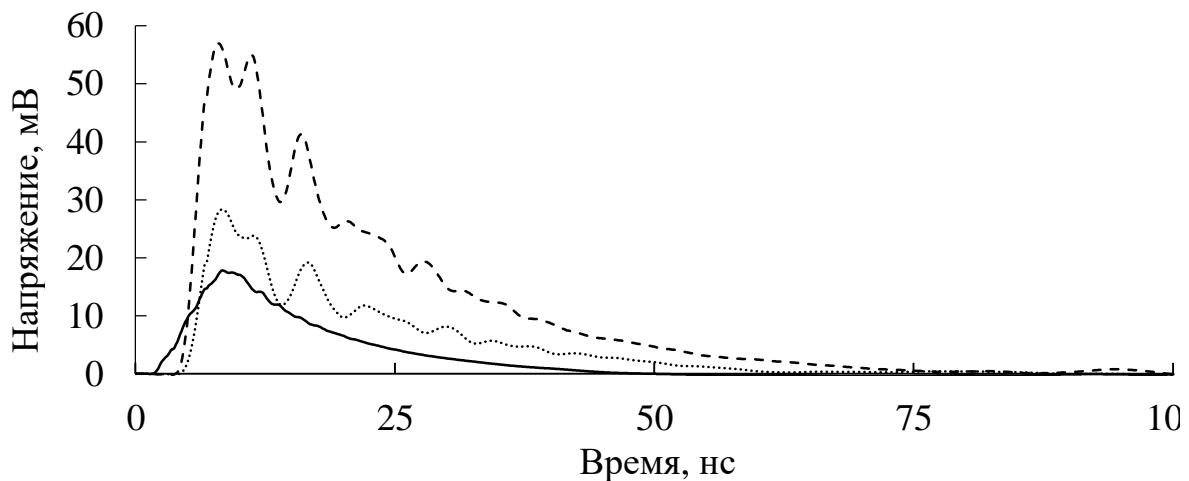


Рис. 9. Формы выходного напряжения при импульсном воздействии на ПВИ-структуры с $w_1=0,5$ мм: мостовую ($\cdot \cdot \cdot$), меандровую (- - -), двойную спираль (—)

Видно, что во всех случаях импульс на выходе значительно искажается, его амплитуда снижается, а длительность увеличивается. Так, для мостовой

структуры амплитуда на выходе равна 28,3 мВ, а длительность 11,65 нс, меандровой – 57 мВ, и 11,8 нс, а двойной спирали – 17,8 мВ и 11,45 нс.

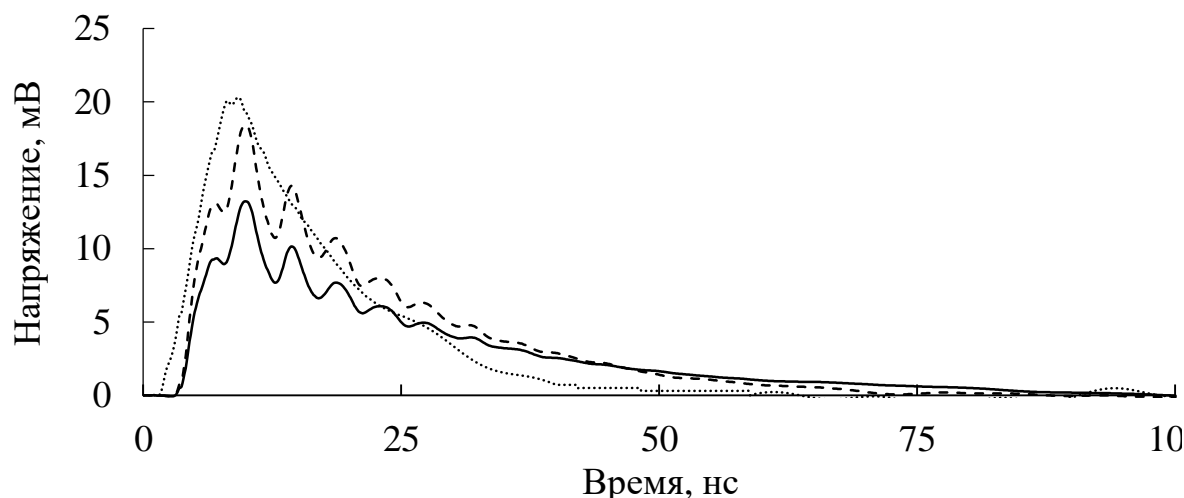


Рис. 10. Формы выходного напряжения при импульсном воздействии на ПВИ-структуры с $w_1=1$ мм: мостовую ($\cdot \cdot \cdot$), меандровую ($- - -$), двойную спираль ($—$)

При $w_1 = 1$ мм, амплитуда на выходе всех структур меньше, чем при $w_1 = 0,5$ мм. Так, для мостовой структуры амплитуда равна 20,1 мВ при длительности 12,5 нс, меандровой – 18,4 мВ и 14,3 нс, с двойной спиралью – 13,2 мВ и 14,5 нс.

Таким образом, при воздействии импульса, его амплитуда на выходе ПВИ-структур значительно снижается. При увеличении w_1 с 0,5 до 1 мм ослабление больше. Это связано с тем, что частотные составляющие спектра исходного импульса попадают в диапазон частот, который эффективно подавляется рассматриваемыми структурами. Полученные данные говорят о том, что с помощью таких структур можно эффективно подавлять высокочастотные и импульсные помехи малой длительности.

Исследования температурных характеристик

Исследована зависимость нагрева проводящего рисунка ПВИ-структур от времени, при токовой нагрузке 5 А, в условиях воздействия различных температур. При этом ток подавался с помощью источника питания GW Instek SPD-73606, с выходным напряжением 5 В. Температура окружающего воздуха $t_{\text{окр}}$ обеспечивалась с помощью термокамеры Weiss KWP 120/70 и задавалась со значениями: минус 60, 0 и +30°C. Измерение температуры осуществлялось с помощью термопары МЕГЕОН 26001, размещенной на ПВИ-структуре (рис. 11). Данные с термопары выводились на вольтметр В7-78/2, который имеет функцию измерения температуры. Структурная схема измерительной установки показана на рис. 12.

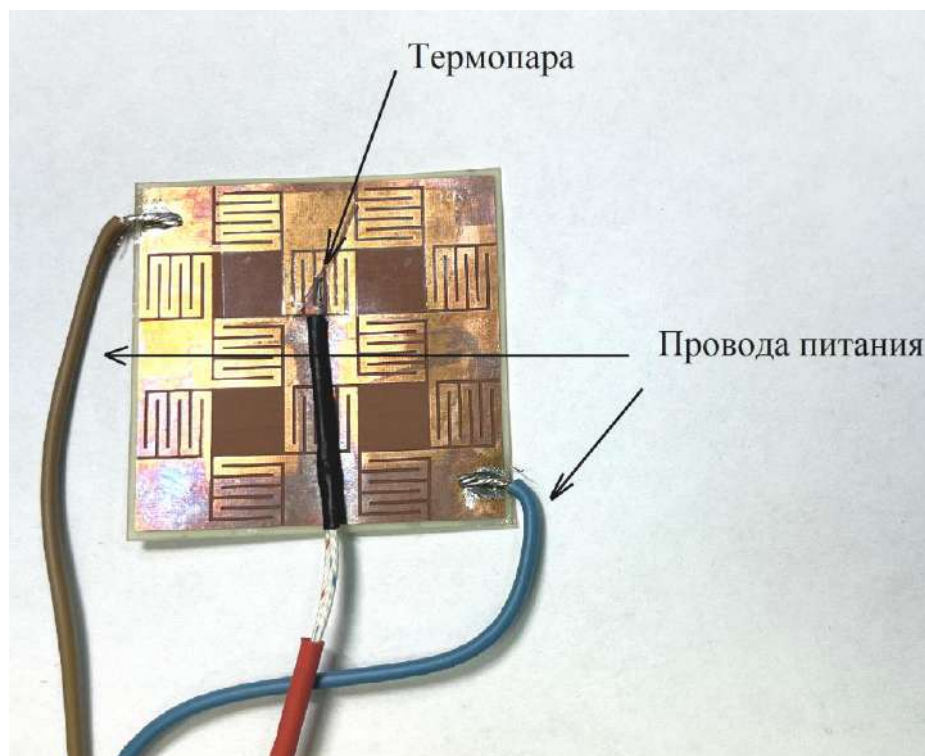


Рис. 11. Термопара, установленная на прототипе для измерения нагрева проводящего рисунка ПВИ-структуры

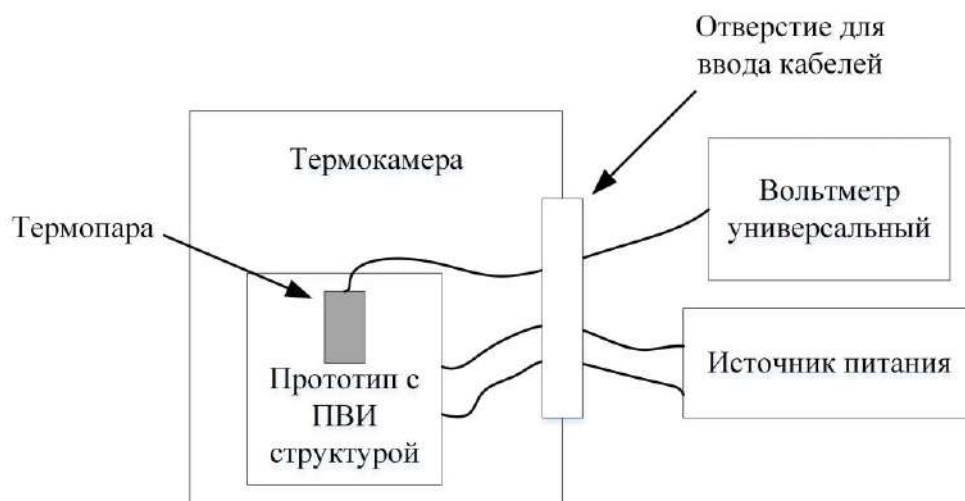


Рис. 12. Структурная схема измерительной установки для оценки нагрева проводящего рисунка ПВИ-структуры

При измерении нагрева топологии измерялась температура термопары в течение 90 с после подачи тока на ПВИ-структуры. Результаты представлены на рис. 13 и 14.

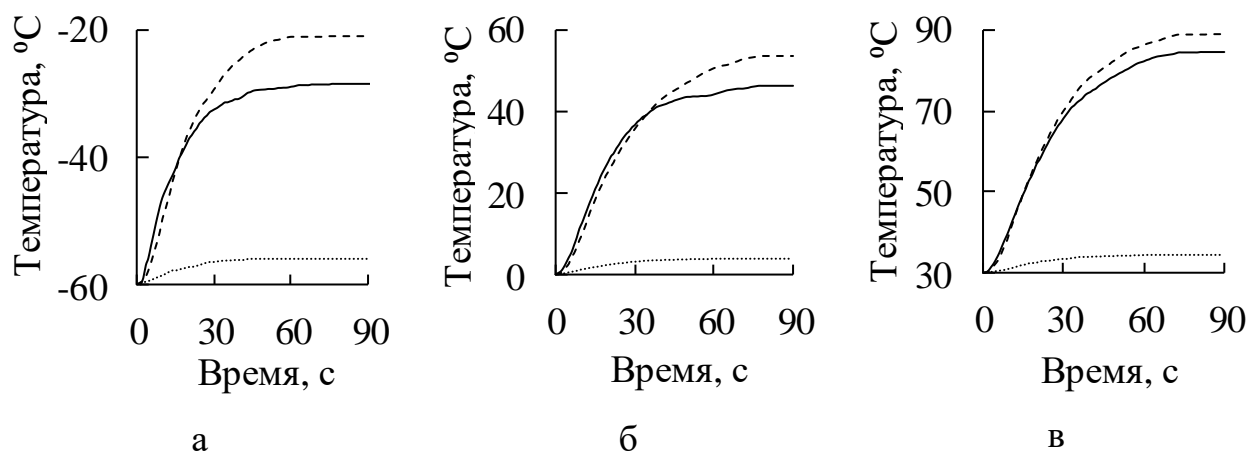


Рис. 13. Зависимости нагрева топологии ПВИ-структур с $w_1=0,5$ мм при температуре окружающего воздуха минус 60 (а), 0 (б) и 30 (в) °C: мостовой (· · ·), меандровой (- - -), двойной спирали (—)

Из результатов видно, что во всех случаях наблюдается рост температуры t_n , происходящий из-за того, что участок проводящего рисунка имеет сопротивление. Для всех структур, максимальный нагрев, происходит при $t_{окр} = 30^{\circ}\text{C}$. В мостовой структуре нагрев не значителен, так как участок ПВИ-структуры короткий относительно остальных случаев и максимальный нагрев составляет $4,5^{\circ}\text{C}$. В меандровой структуре наибольший нагрев равен $58,7^{\circ}\text{C}$, а с двойной спиралью – $54,5^{\circ}\text{C}$.

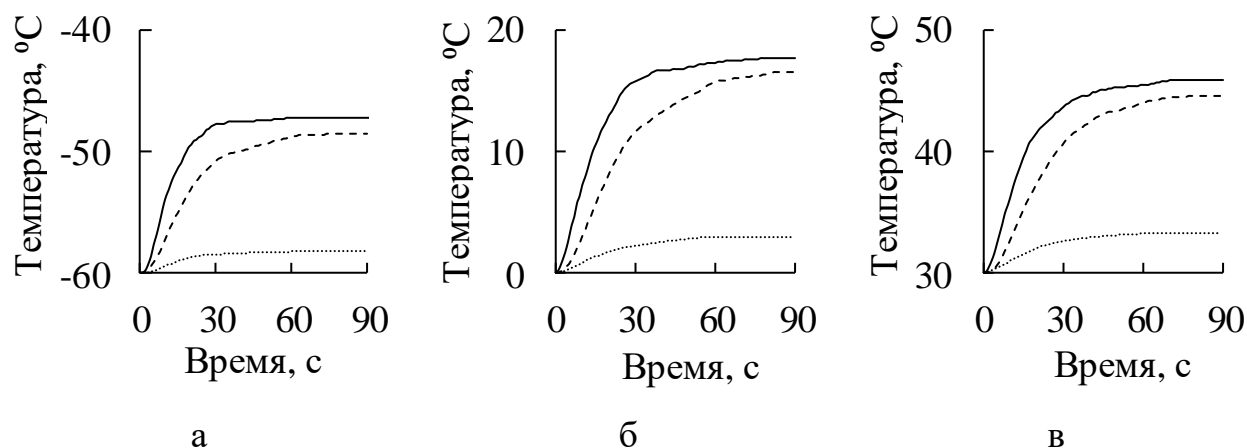


Рис. 14. Зависимости нагрева топологии ПВИ-структур с $w_1=1$ мм при температуре окружающего воздуха: минус 60 (а), 0 (б), 30 (в) °C: мостовой (· · ·), меандровой (- - -) и двойной спирали (—)

При $w_1 = 1$ мм наблюдается меньший нагрев из-за того, что сопротивление участка с ПВИ-структурой снижается. Так, для мостовой структуры максимальный нагрев составил $3,2^{\circ}\text{C}$ при $t_{окр} +30^{\circ}\text{C}$. Для структур с меандром и двойной спиралью наибольший нагрев зафиксирован при $t_{окр} = 0^{\circ}\text{C}$ и равен $16,5$ и $17,6^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Таким образом, большая длина ПВИ-структуры приводит к увеличению нагрева, из-за увеличения сопротивления участка с ПВИ. Нагрев можно уменьшить путем увеличения w_1 . Для структур с меандром и двойной спиралью увеличение w_1 позволяет снизить нагрев от 2,5 до 4 раз в зависимости от $t_{окр}$. Изменение w_1 в мостовой структуре практически не влияет на нагрев. Параметры температурных характеристик сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Температурные характеристики ПВИ-структур

Температура окружающего воздуха, °С	Рост температуры, °С					
	Мостовая структура		Меандровая структура		Структура с двойной спиралью	
	$w_1=0,5$ мм	$w_1=1$ мм	$w_1=0,5$ мм	$w_1=1$ мм	$w_1=0,5$ мм	$w_1=1$ мм
- 60	4	1,8	39	11,5	31,4	12,7
0	4,2	3	54,8	16,5	46,1	17,6
+ 30	4,5	3,2	58,7	14,5	54,5	15,8

Выводы

Представлены результаты исследования разработанных прототипов ПВИ-структур: выполнены измерения частотных и анализ временных характеристик, а также оценка температурных характеристик при токовой нагрузке в условиях воздействия различных температур окружающего воздуха.

Выявлено, что ПВИ-структуры позволяют обеспечить подавление вплоть до 60 дБ на отдельных частотах, а на частотах выше 1,44 ГГц подавление составляет не менее 20 дБ. При этом f_{cp} слабо отличается в различных структурах и составляет от 10 до 15 МГц. Полученные результаты во временной области показали, что максимальное напряжение на выходе составляет 57 мВ для меандровой структуры с $w_1=0,5$ мм, а минимальное напряжение 13,2 мВ выявлено в структуре с двойной спиралью при $w_1=1$ мм. При этом отмечено, что увеличивается и длительность импульса на выходе структур: от 1,91 до 2,42 раза. Так, минимальная длительность выявлена в структуре с двойной спиралью при $w_1=0,5$ мм и равна 11,45 нс, а максимальная в той же структуре, но при $w_1=1$ мм и составляет 14,5 нс. Исследуя воздействие различных температур окружающего воздуха, при токовой нагрузке 5 А, показано, что в течение 90 с происходит нагрев проводящего рисунка и установление постоянной температуры. В мостовой структуре во обоих случаях рост температуры слабый и максимальное значение его составляет 4,5°С при $w_1 = 0,5$ мм и $t_{окр} = -60^{\circ}\text{C}$. В случае структур с меандром и двойной спиралью рост температуры более значительный, а максимальные значения выявлены при $t_{окр} = 30^{\circ}\text{C}$ и равны 58,7 и 54,5°С соответственно.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что ПВИ-структуры позволяют эффективно обеспечивать помехозащиту от высокочастотных и импульсных помех. Однако необходимо учитывать температуру окружающего воздуха, так как при нагрузке 5 А, температура может достигать 88,7°C. Дальнейшее увеличение токовой нагрузки или температуры окружающего воздуха может привести к тому что диэлектрик достигнет температуры стеклования, а это в свою очередь приводит к механическим изменениям ПП, что является недопустимо в критичных РЭС.

В перспективе целесообразно исследовать возможность устранения подъемов частотной характеристики в диапазоне до 1 ГГц, а также применение ПВИ-структур для снижения пульсаций напряжения в цепях питания ПП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

Литература

1. Храмов М. В. Моделирование влияния развязывающих конденсаторов на полное сопротивление системы распределения питания // XXVI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 19-21 мая 2021). Томск, 2021. Т. 1. С. 214-217.

2. Xu M., Hubing T. H., Chen J., Van Doren T. P., Drewniak J. L., DuBroff R. E. Power-bus decoupling with embedded capacitance in printed circuit board design // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. № 1. – P. 22-30. doi: 10.1109/TEMC.2002.808075.

3. Sievenpiper D., Zhang L., Broas R. F. J., Alexopolous N. G. Yablonovitch E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47. № 11. – P. 2059-2074. doi: 10.1109/22.798001.

4. Vallecchi A., De Luis J. R., Capolino F. De Flaviis F. Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60. № 1. – P. 51-62. doi: 10.1109/TAP.2011.2167912.

5. Kamgaing T., Ramahi O. M., A novel power plane with integrated simultaneous switching noise mitigation capability using high impedance surface // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2003. Vol. 13. № 1. – P. 21-23. doi: 10.1109/LMWC.2002.807713.

6. Qin J., Ramahi O. M. Power plane with planar electromagnetic bandgap structures for EMI reduction in high speed circuits. – Proc. of the Antennas and Propagation Society International Symposium. – Albuquerque, NM, USA, 2006. – P. 365-368. doi: 10.1109/APS.2006.1710533.

7. Paulis F., Raimondo L., Orlandi A. IR-DROP Analysis and Thermal Assessment of Planar Electromagnetic Bandgap Structures for Power Integrity

Applications // *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2010. Vol. 33. № 3. – P. 617-622. doi: 10.1109/TADVP.2009.2033572.

8. Yang L., Fan M., Feng Z. A spiral Electromagnetic Bandgap (EBG) structure and its application in microstrip antenna arrays. – Proc of the Asia-Pacific Microwave Conference. Suzhou, China, 2005. – P. 1-4. doi: 10.1109/APMC.2005.1606740.

9. Kim Y., Yang F., Elsherbeni A. Compact artificial magnetic conductor designs using planar square spiral geometry. *Progress in Electromagnetics Research*. 2007. Vol. 77. – P. 43–54. doi: 10.2528/PIER07072302

10. Yang F., Rahmat-Samii Y. Polarization dependent electromagnetic band-gap surfaces: characterization, designs, and applications // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. 2003. Vol. 3. – P. 339-342. doi: 10.1109/APS.2003.1219856.

11. Kwon J. H., Sim D. U., Kwak S. I., Yook J. G., Novel Electromagnetic Bandgap Array Structure on Power Distribution Network for Suppressing Simultaneous Switching Noise and Minimizing Effects on High-Speed Signals // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2010. Vol. 52. № 2. – P. 365-372. doi: 10.1109/TEMC.2010.2045894.

12. Qin J., Ramahi O. M., Granatstein V. Novel Planar Electromagnetic Bandgap Structures for Mitigation of Switching Noise and EMI Reduction in High-Speed Circuits // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2007. Vol. 49. № 3. – P. 661-669. doi: 10.1109/TEMC.2007.902193.

13. Orlandi A., Archambeault B., de Paulis F., Connor S. *Electromagnetic Bandgap (EBG) Structures. Common Mode Filters for High-Speed Digital Systems*. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2017. – 221 p.

References

1. Khramtsov M. V. Modeling the effect of decoupling capacitors on the impedance of a power distribution system. XXVI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodikh uchenikh «Nauchnaya sessiya TUSUR» [XXVI International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Tomsk, 2021, V. 1, pp. 214–217. (In Russian).

2. Xu M., Hubing T. H., Chen J., Van Doren T. P., Drewniak J. L., DuBroff R. E. Power-bus decoupling with embedded capacitance in printed circuit board design. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no 1, pp. 22-30. doi: 10.1109/TEMC.2002.808075.

3. Sievenpiper D., Zhang L., Broas R. F. J., Alexopolous N. G. Yablonovitch E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, vol. 47, no 11, pp. 2059-2074. doi: 10.1109/22.798001.

4. Vallecchi A., De Luis J. R., Capolino F. De Flaviis F. Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface. *IEEE Transactions on*

Antennas and Propagation, 2012, vol, 60, no 1, pp. 51-62.
doi: 10.1109/TAP.2011.2167912.

5. Kamgaing T., Ramahi O. M., A novel power plane with integrated simultaneous switching noise mitigation capability using high impedance surface. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2003, vol. 13, no 1, pp. 21-23. doi: 10.1109/LMWC.2002.807713.

6. Qin J., Ramahi O. M. Power plane with planar electromagnetic bandgap structures for EMI reduction in high speed circuits. *Proc. of the Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, NM, USA, 2006, pp. 365-368. doi: 10.1109/APS.2006.1710533.

7. Paulis F., Raimondo L., Orlandi A. IR-DROP Analysis and Thermal Assessment of Planar Electromagnetic Bandgap Structures for Power Integrity Applications. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2010, vol. 33, no 3, pp. 617-622. doi: 10.1109/TADVP.2009.2033572.

8. Yang L., Fan M., Feng Z. A spiral Electromagnetic Bandgap (EBG) structure and its application in microstrip antenna arrays. *Proc of the Asia-Pacific Microwave Conference*. Suzhou, China, 2005, pp. 1-4. doi: 10.1109/APMC.2005.1606740.

9. Kim Y., Yang F., Elsherbeni A. Compact artificial magnetic conductor designs using planar square spiral geometry. *Progress in Electromagnetics Research*. 2007, vol. 77, pp. 43–54. doi: 10.2528/PIER07072302

10. Yang F., Rahmat-Samii Y. Polarization dependent electromagnetic band-gap surfaces: characterization, designs, and applications. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003, vol. 3, pp. 339-342. doi: 10.1109/APS.2003.1219856.

11. Kwon J. H., Sim D. U., Kwak S. I., Yook J. G., Novel Electromagnetic Bandgap Array Structure on Power Distribution Network for Suppressing Simultaneous Switching Noise and Minimizing Effects on High-Speed Signals. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 52, no 2, pp. 365-372. doi: 10.1109/TEMC.2010.2045894.

12. Qin J., Ramahi O. M., Granatstein V. Novel Planar Electromagnetic Bandgap Structures for Mitigation of Switching Noise and EMI Reduction in High-Speed Circuits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no 3, pp. 661-669. doi: 10.1109/TEMC.2007.902193.

13. Orlandi A., Archambeault B., de Paulis F., Connor S. *Electromagnetic Bandgap (EBG) Structures. Common Mode Filters for High-Speed Digital Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2017. 221 p.

Статья поступила 15 июля 2023 г.

Информация об авторах

Храмцов Максим Владимирович – аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и ра-

диоэлектроники. Начальник лаборатории. АО «НИИП имени В.В. Тихомирова». Область научных интересов: электромагнитная совместимость, целостность питания, целостность сигнала. E-mail: khramtsovmaxim@yandex.ru

Заболоцкий Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор. Заведующий лабораторией фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, модальная фильтрация, устройств защиты. E-mail: zabolotsky_am@mail.ru

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40.

Experimental investigations of periodic microwave structures with high impedance surface properties

M. V. Khramtsov, A. M. Zabolotsky

Purpose. The modern trend towards miniaturization and higher performance, leads to an increase in clock frequencies, data transmission speeds, increased mounting density, and integration of radio-electronic equipment (REE) into unified systems. This, in turn, makes modern high-speed systems very sensitive to electromagnetic interference (EMI). In addition, REE used in critical areas such as military, industrial, mining, are subjected to harsh operating conditions in the form of elevated and subzero temperatures. In turn, traditional interference protection devices have a narrow range of operating frequencies due to their parasitic parameters, large size and limited operating temperature range. In these conditions it is expedient to use a conductive pattern in the layers of the PCB, made in a special way, to protect the PCB power supply circuits from conductive EMI. Such a technical solution has minimal dimensions, low cost, is simple to manufacture according to the technological processes used by PCB manufacturers and is able to operate in a wide temperature range depending on the current load. To solve this problem, it is proposed to investigate periodic structures with high impedance surface (HIS) properties. **The aim of the work** is to investigate periodic HIS structures to ensure the power integrity (PI) of REE under the influence of ambient air temperature from minus 60 to +30°C. **The methods:** used to measure the frequency characteristics (S-parameters) are suggested to use a vector network analyzer (VNA), and on their basis to calculate the time responses to the impact of pulse interference. To assess the heating of the conducting pattern it is proposed to use a K-type thermocouple, together with a universal voltmeter, the current load is set by the electric current source. In this case, conditions of wide temperature range are created by means of thermal chamber. **Novelty:** for the first time the frequency characteristics of double helix HIS-structures for providing PI have been experimentally obtained. On the basis of frequency characteristics the impact of impulse interference on the studied HIS-structures is estimated, and also the comparison of the obtained results is made. Time dependences of the conductive pattern heating under the conditions of ambient air temperature from minus 60 to +30°C were obtained. **Result:** Prototypes of HIS-structures in different configurations were designed and manufactured. Their S-parameters were measured; in the frequency range from 0.01 to 10 GHz. HIS-structures allow suppression of conducted noise emission up to minus 60 dB at some frequencies, and in the range from 2 to 10 GHz not less than 25 dB. Evaluation of the voltage response at the output of the structures under the influence of pulse interference was performed. The amplitude of the pulse at the output of all the structures decreases significantly, the minimum value is 13.2 mV, and the maximum 57 mV. The output pulse duration increases in the range from 1.91 to 2.42 times. The effect of a current load, 5 A, on the heating of the conductive pattern under conditions of exposure to different ambient air temperatures was investigated. Measurements were carried out in the thermal chamber at temperatures of minus 60, 0 and +30°C. The maximum heating of the structure was revealed in the structure with meander, the temperature increase was 58.7°C, and the temperature of the conducting pattern was 88.7°C. **Practical Significance:** The presented periodic HIS-structures can be used in the design of PCB power circuits to provide the PI of the REE.

Key words: periodic structure, impedance, noise emission, S-parameters, impulse, temperature

Information about Authors

Maxim Vladimirovich Khramtsov – Doctoral Student of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Head of laboratory JSC «NIIP named after V.V. Tikhomirov». Research interests: electromagnetic compatibility, power integrity, signal integrity. E-mail: khramtsovmaxim@yandex.ru

Alexandr Mikhailovich Zabolotsky – Advanced Doctor of Engineering Sciences, Full Professor. Head of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; modal filtration; protection devices. E-mail: zabolotsky_am@mail.ru

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 40.