

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Невежин Виталий Николаевич

**Влияние водных растворов на электрические характеристики
линий передачи в широких диапазонах частот и температур**

Специальность 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, Комнатнов Максим Евгеньевич

Томск 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Обзор методов оценки влияния температуры и влаги на электрические характеристики радиоэлектронных средств.....	13
1.1 Обоснование необходимости учета влияния температуры и влаги на элементы и устройства радиоэлектронных средств	13
1.2 Оценка воздействия температуры и влажности на элементы и устройства радиоэлектронных средств.....	16
1.3 Влияние химических и биологических компонент жидкости и органических материалов на электрические характеристики радиоэлектронных средств	21
1.4 Устройства, используемые для измерения электрофизических параметров растворов	24
1.5 Цель и задачи работы	31
2 Методика оценки электропроводности и вносимых потерь водных растворов при изменении температуры.....	34
2.1 Модель и алгоритм для вычисления электропроводности жидкого раствора в коаксиальной камере по измеренным S -параметрам при разной температуре	34
2.1.1 Анализ S -параметров коаксиальной камеры с жидким раствором в контейнере при разной температуре	34
2.1.2 Модель и алгоритм для вычисления электропроводности воды	39
2.1.3 Достоверность и адекватность модели для оценки электропроводности воды при разных температурах.....	43
2.2 Методика оценки вносимых потерь водных растворов при изменении их температуры в коаксиальной камере.....	46
2.2.1 Методика оценки вносимых потерь водных растворов при разных температурах и концентрациях химического состава.....	46

2.2.2	Оценка вносимых потерь водных растворов при положительных и отрицательных температурах и разных концентрациях химического состава	47
2.2.3	Оценка вносимых потерь жидкостей при разных температурах и концентрациях химического состава	56
2.2.4	Анализ S -параметров коаксиальной камеры с сухими и влажными органическими материалами при разных температурах	63
2.3	Анализ методом главных компонент S -параметров коаксиальной камеры с водными растворами при изменении температуры	65
2.4	Основные результаты раздела	73
3	Оценка влияния температуры и влажности на электрические характеристики линий передачи	76
3.1	Методика анализа электрических параметров линий передачи, покрытых пленкой воды и слоем льда при различных температурах	76
3.2	Влияние покрытия и температуры на электрические характеристики микрополосковой линии	77
3.2.1	Влияние сплошного покрытия пленкой воды	77
3.2.2	Влияние частичного покрытия пленкой воды	81
3.2.3	Влияние сплошного покрытия слоем льда	85
3.2.4	Влияние частичного покрытия слоем льда	87
3.3	Влияние покрытия и температуры на электрические характеристики копланарной линии	90
3.3.1	Влияние сплошного покрытия пленкой воды	90
3.3.2	Влияние частичного покрытия пленкой воды	93
3.3.3	Влияние сплошного покрытия слоем льда	98
3.3.4	Влияние частичного покрытия слоем льда	100
3.4	Апробация методики оценки влияния пленки воды и слоя льда на частотные зависимости S -параметров микрополосковой линии	102

3.5 Оценка влияния коаксиального перехода на S -параметры линии передачи на печатной плате	109
3.6 Основные результаты раздела.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) занимают все большее место в жизни человека. Они находят применение в самых разнообразных областях, включая бытовое, промышленное, медицинское и специальное назначения. Обеспечение устойчивой и бесперебойной связи, контроля и управления различными критичными системами и устройствами предъявляет все более жесткие требования к надежности и безопасности при эксплуатации РЭС. Влияние внешних климатических (температура, влажность воздуха, давление и пр.) факторов на элементы и устройства РЭС может сопровождаться ускоренным старением, изменением электрических параметров и характеристик РЭС и пр., что снижает их надежность и повышает восприимчивость к дестабилизирующим воздействиям.

Влажность может различно влиять на материалы, из которых состоят элементы и устройства РЭС. Так, воздействие высокой или низкой влажности воздуха на резину и полимеры сопровождается диффузией воды, а воздействие температуры окружающей среды на материал может значительно повлиять на процессы диффузии, что может сопровождаться разной скоростью изменения электрических и механических свойств материала. Низкая влажность воздуха приводит к растрескиванию и хрупкости некоторых полимеров, а высокая – значительно усиливает процесс конденсации и фазовый переход воды из газообразного в жидкое агрегатное состояние с образованием пленок и капель воды, которые могут существенно увеличиться на поверхности материала за короткий период времени. Рост толщины пленки воды, вследствие повышенной влажности воздуха различно влияет на электрические характеристики РЭС, что в некоторых случаях критично, особенно для высокочастотных аналоговых и быстродействующих цифровых схем. Кроме того, появление пленки воды может повлечь коррозию металлических частей в местах пайки компонентов, механических соединений и пр., что может вызвать необратимый отказ или

повреждение РЭС. Также пленка воды на поверхности РЭС может быть благоприятной средой для размножения биологических объектов (БО), жизнедеятельность которых может привести к изменению электрических характеристик РЭС, что может повлечь изменения характеристик компонентов РЭС или его отказ. Эксплуатация РЭС в загрязненной среде и с повышенной влажностью воздуха может привести к образованию жидкого раствора на поверхности РЭС, что повлияет на его электрические характеристики, а высыхание воды в растворе приведет к образованию твердого вещества на поверхности РЭС. При этом электрические характеристики РЭС при данных видах воздействия могут меняться из-за изменения электрофизических параметров водных растворов на поверхности РЭС, вследствие перехода из одного состояния в другое. Данные явления слабо изучены, особенно для высокочастотных аналоговых и быстродействующих цифровых схем, но их учет актуален, особенно для критичных РЭС, проектируемых для эксплуатации в сложных загрязненных климатических условиях. Таким образом, разработка моделей и методик оценки влияния водных растворов на электрические характеристики элементов и устройств РЭС в широких диапазонах частот и температур весьма актуальна.

Объектом исследования являются водные растворы с разным химическим составом, расположенные на микрополосковой, копланарной и в коаксиальной линиях передачи при их различной температуре, а **предметом** – частотно-зависимые матрицы коэффициентов передачи и отражения этих линий с данными водными растворами.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в развитие моделей воды и полярных жидкостей внесли Debye P., Cole K. и Cole R., а в теории взаимодействия электромагнитных волн с водой и льдом – В.Г. Артемов, U. Kaatze, V. Uhlendorf и др. Измерением электрофизических параметров водных растворов занимаются В.А. Журавлев, А.Е. Луньков, Д.Г. Ковалев, В.И. Сусяев и др. Исследованием влияния процессов

конденсации воды на электрические параметры РЭС занимаются Н. Conseil-Gudla, R. Ambat и др. Оценкой влияния химического состава органических загрязнителей в воде на электрофизические параметры РЭС занимаются О. Korostynska, A. Mason и др., а электрофизических параметров органических жидкостей – K. Seungwan, M. Harutyun, A. Kandwal, T. Igbe и др. Изменения электрофизических параметров жидкостей с температурой исследуют А.А. Abduljabar, H. Hamzah, A. Porch и др. Разработкой методик эксплуатации различных РЭС при повышенной влажности занимаются J.J. Huselstein, F. Richardeau, M.T. Zarifi и др. Коррозионный процесс из-за воздействия температуры и влажности, исследуют Z. Jiang, X. Liu, D. Minzari и др. Обледенение различных деталей и узлов РЭС под воздействием температуры и влажности исследуют N.O. Renno, A. Arbor, E. Madi, K. Pore и др. Между тем мало исследованы влияния температуры и влаги, проявляющиеся в виде водных растворов с заданным химическим составом и появлением БО на поверхности элементов и СВЧ-устройств, входящих в состав РЭС, что важно при проектировании критичных РЭС, эксплуатируемых в сложных климатических и промышленных условиях.

Цель работы – разработать модель и методику оценки влияния водных растворов на электрические характеристики линий передачи в широких диапазонах частот и температур. Для ее достижения надо решить следующие **задачи**:

1. Разработать модель для оценки частотных зависимостей электропроводности водных растворов с разным химическим составом, в широком диапазоне температур.

2. Предложить методику анализа водных растворов с разным химическим составом, размещенных в коаксиальной камере при воздействии на них температуры.

3. Оценить по предложенной методике влияние водных растворов с разным химическим составом и агрегатным состоянием на элементы матрицы рассеяния (S -параметры) микрополосковой и копланарной линий передачи.

Научная новизна

1. Создана модель для оценки электропроводности воды, отличающаяся учетом положительных и отрицательных температур коаксиальной камеры с водой в контейнере и без нее на основе измеренных частотных зависимостей матриц коэффициентов рассеяния.

2. Разработана методика для оценки зависимости химического состава водных растворов от температуры окружающей среды, отличающаяся использованием измеренных матриц рассеяния коаксиальной камеры с образцами в контейнере и без, с наглядной визуализацией измеренных значений.

3. Разработана методика для оценки влияния температуры и влажности на электрические характеристики микрополосковой и копланарной линий передачи, отличающаяся использованием модели однородной пленки воды и слоя льда для имитации влияния климатического воздействия на РЭС.

Теоретическая значимость

1. Исследовано влияние температуры и химического состава на частотно-зависимые матрицы рассеяния водных растворов.

2. Предложен нетрадиционный подход к оценке климатического воздействия на электрические характеристики линий передачи, основанный на электрических и геометрических параметрах конденсата.

3. Доказано наличие связи между химическим составом раствора и температурой с использованием матриц рассеяния и метода главных компонент.

4. Проведена модернизация существующей методики вычисления вносимых потерь материалов при температурном воздействии.

Практическая значимость

1. Разработаны практические рекомендации для измерения матриц рассеяния коаксиальной камеры при изменении температуры.
2. Показаны перспективы использования водных растворов для имитации климатического воздействия на линии передачи ПП РЭС.
3. Разработаны практические рекомендации для оценки влияния влаги и температуры на электрические характеристики микрополосковых и копланарных линий передачи.
4. Представлены рекомендации по дальнейшему совершенствованию существующих методик для оценки климатического воздействия.
5. Результаты использованы в 4 НИР и учебном процессе ТУСУРа (три акта внедрения).

Методология и методы исследования. В работе применены аналитические методы, метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной области, метод главных компонент, лабораторные эксперименты.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданная модель для оценки электропроводности водных растворов позволяет, на основе измеренных S -параметров коаксиальной камеры с размещенным внутри контейнера раствором и без него, оценить с относительной разницей значений не более 10% электропроводность растворов с разным химическим составом в диапазонах частот от 10 МГц до 6 ГГц и температур от минус 50 до 100°C.
2. Разработанная методика оценки зависимости химического состава водных растворов от температуры окружающей среды позволяет выявить изменения вносимых потерь для водного раствора без примесей при изменении температуры от минус 50 до 50°C.
3. Разработанная методика оценки влияния температуры и влаги на микрополосковую линию передачи позволяет определить изменение её

граничной частоты до 6 ГГц вследствие воздействия на неё температуры и влаги и при образовании на ней однородной пленки воды.

Достоверность результатов подтверждена их согласованностью с результатами из других источников, апробацией на конференциях и публикацией в рецензируемых журналах.

Использование результатов исследований

1. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования. Научно-исследовательская лаборатория фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости, проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.

2. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ №19-79-10162, 2020–2021 гг.

3. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ №19-79-10162-П, 2022–2024 гг.

4. НИР «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий» Проект FEWM-2024-0005, 2024–2025 гг.

5. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУРа (бакалавриат, магистратура).

Апробация результатов. Результаты докладывались на Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2021), Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2021), Int. conf. of young specialists on

micro/nanotechnologies and electron devices (Эрлагол (Алтай), 2021 и 2024), Ural-Siberian conf. on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (Екатеринбург, 2022), Int. Ural conf. on electrical power engineering (Екатеринбург, 2022), Radiation and scattering of electromagnetic waves (Дивноморское, 2023).

Публикации. Результаты опубликованы в 10 работах (1 без соавторов):

Тип публикации	Количество
Статья в журнале из перечня ВАК	2
Доклад в трудах конференции, индексируемой WoS/Scopus	5
Доклад в трудах международной конференции	3
ИТОГО:	10

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Основной вклад автора заключается в подготовке и проведении экспериментов, а также их последующем описании.

Структура и объем. В состав диссертации входят введение, 3 раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 117 наименований. Объем диссертации с приложениями – 130 с., в т.ч. 62 рисунка и 4 таблицы.

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В разделе 1 выполнен обзор климатического воздействия на элементы и устройства РЭС. Описаны существующие методы учета влияния климатических факторов окружающей среды на изменение электрофизических характеристик. В разделе 2 представлена электрофизическая модель водных растворов, позволяющая учитывать воздействие температуры и влажности воздуха, а также представлена методика для оценки влияния климатических факторов среды на электрические параметры на примере органических материалов. Кроме того, показано влияние температуры на электрические характеристики разных жидкостей в жидком и твердом агрегатных состояниях с возможностью ее визуализации. В разделе 3 созданные модели воды и льда сравнены с существующими, а

созданная методика апробирована. В заключении рассмотрены основные результаты работы, даны рекомендации по оценке воздействия температуры и влажности на элементы и устройства ПП и приведены перспективы ее совершенствования. В Приложении А приведены копии актов о внедрении результатов диссертационной работы, а в Приложении Б – копии документов об индивидуальных достижениях.

1 Обзор методов оценки влияния температуры и влаги на электрические характеристики радиоэлектронных средств

1.1 Обоснование необходимости учета влияния температуры и влаги на элементы и устройства радиоэлектронных средств

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) все больше проникают в повседневную жизнь человека, делая его зависимым не только от разных гаджетов и средств связи, но и от критичных РЭС, например, имплантируемых устройств, протезов и пр. Важность бесперебойной работы критичных РЭС сложно оценить, поскольку даже единичный отказ может привести к значительным материальным потерям или человеческим жертвам. Подобные отказы вследствие воздействия различных факторов и климатически неблагоприятных условий [1] могут проявляться непредсказуемо. Например, конденсация воды внутри летательного аппарата, вследствие высокой влажности, может привести к непредсказуемому отказу элементов РЭС и как следствие потери управления, что может повлечь человеческие жертвы. Известен случай, когда вода сконденсировалась на критичных узлах РЭС американского самолета В-2, что вызвало отказ бортовой системы навигации повлекшее его крушение и материальные потери (2 млрд. \$) [2]. Одной из причин катастрофы, является то, что в стандарте [3] для военно-воздушных сил США не рассматривался случай, когда изменяются характеристики бортовой аппаратуры вследствие воздействия на неё влаги.

Климатические факторы, воздействующие на различные РЭС весьма обширны, их разделяют по видам физического воздействия, включающих температуру, относительную влажность воздуха, максимальное и минимальное атмосферное давление [4]. Резкое изменение давления внешней среды является причиной образования конденсата на различных частях РЭС, что весьма актуально для любых летательных аппаратов при наборе или снижении высоты. Уменьшение размеров элементов и узлов РЭС, повышение тактовых частот и

снижение уровня питающих напряжений серьезнее обостряет эту проблему. В результате чувствительность различных РЭС к воздействию влажности и температуры воздуха существенно возрастает, что делает необходимым учет влияния температуры и влаги на этапе проектирования элементов и устройств РЭС, что повысит их надежность в процессе эксплуатации.

При эксплуатации элементы и устройства РЭС подвержены воздействию дополнительных факторов, которые в совокупности с климатическими могут привести к ускоренному процессу деградации и изменению их электрических характеристик. К таким факторам можно отнести: механические, биологические, химические, электромагнитные, радиационные и пр. [5]. Механические факторы воздействия подразделяют на статические и динамические нагрузки оказываемые на РЭС, а при воздействии температуры и влаги механические характеристики могут существенно деградировать, что приведет к более быстрому износу и как следствие неработоспособности РЭС. Степень воздействия биологических факторов зависит от климатических условий эксплуатации, а также от материалов входящих в состав РЭС, с возможными благоприятными условиями для жизнедеятельности биологических объектов (БО), что также может оказать влияние на работоспособность РЭС. Химическое воздействие проявляется при воздействии химически активных веществ на материалы РЭС, а под воздействием температуры и влаги химические процессы могут существенно ускориться. Радиационное воздействие оказываемое частицами с высокой энергией и проникающей способностью, могут изменить электрофизические параметры материала, его внутренние связи, что окажет влияние на носители зарядов и повлечет различные изменения характеристик РЭС. Электромагнитное воздействие естественного происхождения, проявляется в виде космического излучения звезд, разрядов молний, магнитным полем Земли и пр., а искусственного, различными устройствами и системами созданными

человеком, и как правило учитывается при оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС на этапе проектирования.

Совокупная оценка воздействия всех вышеперечисленных факторов весьма сложна и требует значительных ресурсов для получения достоверных результатов. В связи с этим, появилось множество документов и различных стандартов, регламентирующих и направленных на обеспечение стабильной работы РЭС при заданных условиях окружающей среды. Например, в [6–10] регламентируются технические условия эксплуатации, хранения, транспортировки и пр., а также приводятся методы воздействия повышенной и пониженной температуры и влажности воздуха на РЭС. Повышение эксплуатационных характеристик РЭС, а также увеличение их общего срока службы, рассмотрено в [11], а воздействие различных по химическому составу жидкостей на процессы деградации элементов и узлов РЭС в [12].

Давление окружающей среды оказывает не меньшее влияние на работоспособность РЭС, чем другие факторы [13], поскольку у поверхности земли оно значительно отличается от давления на большой высоте, что приводит к образованию конденсата и изменению электрофизических параметров РЭС [14]. Для защиты используют защитные кожухи или исключают прямое воздействие влажности на компоненты [15]. В условиях высокой влажности накопившийся конденсат на поверхности элементов и устройств РЭС может собираться в капли воды, которые растворяют различные соли, что образует кислотное-щелочное основание, являющееся химически активным и способное повредить материал и его внутреннюю структуру [16].

В результате при проектировании критичных элементов и узлов РЭС необходимо учитывать влияние температуры и влаги, а также химических и биологических веществ на электрические и электрофизические параметры и характеристики РЭС в целом.

1.2 Оценка воздействия температуры и влажности на элементы и устройства радиоэлектронных средств

С момента появления РЭС, разрабатываются различные методы и способы, которые позволяют учесть при проектировании условия эксплуатации РЭС. В основном они направлены на минимизацию последствий от влияния внешних факторов окружающей среды. Повышение устойчивости РЭС к внешнему климатическому воздействию осуществляют с применением натуральных или виртуальных испытаний. При натуральных испытаниях получают более достоверные результаты близкие к реальным условиям эксплуатации, а при виртуальных исследуют поведение электрических характеристик РЭС при аномальных климатических воздействиях с возможным их учетом при последующем проектировании. Используя различные математические модели, включающие электрофизические параметры пленки воды, моделируют воздействие температуры и влаги на элементы и устройства РЭС. Однако единой электрофизической модели воды от температуры не существует, поэтому используют модели воды в жидком, твердом или газообразном агрегатных состояниях.

Методы оценки воздействия влажности и температуры, а также технические требования к эксплуатации РЭС при воздействии различных факторов в т. ч. климатических [17], постоянно совершенствуются. Одним из методов учета влияния температуры и влажности, является моделирование с добавлением к существующей схеме паразитных параметров в виде компонентов с сосредоточенными параметрами. Так, в схему добавляются дополнительные сопротивления, значение которых выбирают так, чтобы учесть воздействие влаги. Значения этих сопротивлений может быть значительно уменьшено при высокой влажности, что может привести к существенному изменению электрических характеристик РЭС [18]. Схоже получают оценку конденсации воды, происходящей из-за циклического изменения температуры при повышенной влажности воздуха внутри корпуса

РЭС [19]. Высокое значение теплоемкости материалов используемых в РЭС, приводит к существенной разнице температуры между разными элементами и узлами РЭС, вследствие воздействия климатических факторов, что также повышает вероятность повреждения РЭС. В [20] к основным последствиям воздействия температуры и влажности относят увеличение тока утечки, вплоть до короткого замыкания, и электрохимическую миграцию, что может привести к неисправностям РЭС.

Циклическое воздействие температуры на РЭС увеличивает скорость его старения, сопровождающегося постепенной деградацией его различных элементов и узлов [21]. Например, циклическое изменение температуры приводит к изменению геометрии проволочных соединений, расслоению припоя и появлению трещин. При этом моделировать подобные изменения, в т. ч. связанные со старением, изломами, отслоением или повреждением компонентов РЭС, весьма сложно, поскольку данные процессы плохо прогнозируемы, поэтому оценку климатического воздействия проводят при реальных испытаниях РЭС, которые могут быть достаточно продолжительны [22]. В результате влияние температуры и влажности воздуха напрямую влияет на процессы конденсации воды, что может оказать влияние на работоспособность РЭС.

Обеспечение надежной и бесперебойной связи в климатически сложных условиях является критически важным. Так, при образовании на микрополосковой антенне воды в жидком или твердом агрегатных состояниях, ее основная частота может смещаться, в связи с изменением ϵ_r воды в жидком ($\epsilon_r \approx 80$) и твердом ($\epsilon_r \approx 3,2$) агрегатных состояниях [23]. Спиральные антенны на печатной плате (ПП), могут использоваться в летательных аппаратах, а появление конденсата в различных местах на антенне снижает их эффективность и вносит помехи на низких и высоких частотах в зависимости от места появления конденсата, что ослабляет амплитуду полезного сигнала по сравнению с уровнем помех [24]. В целом воздействие температуры и

влажности на средства связи может по-разному оказывать влияние на электрические характеристики приемопередающих устройств, в т. ч. из-за воздействия растворенных в воде веществ, при ее контакте с РЭС. Соленость морей мирового океана отличается в зависимости от географического положения, что оказывает влияние на электрофизические параметры воды [25]. Конденсация воды с различным химическим составом на линии передачи (ЛП), расположенные на ПП может оказать различное влияние на ее электрические характеристики [26]. Неучет подобного воздействия при проектировании может привести к нарушению в работе устройства, сокращению его срока службы и повышенным уровням помехоэмиссии и восприимчивости к электромагнитным помехам [27].

При монтаже ПП могут использовать припой с содержанием различных кислот. Недостаточная промывка после пайки и эксплуатация устройства с такой ПП при небольшом значении влажности воздуха может вызвать значительный ток утечки, характерный для случая эксплуатации при высокой относительной влажности воздуха [28]. Кроме того в жестких условиях эксплуатации РЭС её компоненты могут нагреваться или охлаждаться, что создает градиент температур вокруг них и вызывает конденсацию воды внутри корпуса. Появление капель воды, с увеличением их количества, образует водяную пленку, электрофизические параметры которой могут значительно отличаться в зависимости от условий окружающей среды. Увеличение толщины водяной пленки приводит к повышенным амплитудам паразитного тока и влияет на амплитуду и форму сигнала [29], что может снизить производительность РЭС и повысить потребление электроэнергии [30–32].

Известно [33], что при влажности воздуха более 50% возникает риск конденсации воды на поверхности ПП в виде тонкой водяной пленки, влияющей на ее работоспособность. В [34] установлено, что при влажности воздуха до 70% вероятность выхода из строя РЭС минимальна, свыше 85% он более вероятен, а при 100% вода появляется на ПП, и вероятность отказа РЭС

максимальна [35]. В этой связи, четверть всех отказов РЭС связана с влажностью, а половина – непосредственно с температурой [36].

Отказы возникающие вследствие воздействия влаги на электронные компоненты и материалы РЭС весьма различны. Для простых компонентов, таких как конденсаторы, транзисторы, резисторы и пр. наблюдается изменение их электрических характеристик, для интегральных схем их поведение может быть гораздо сложнее. Например, вследствие изменения подвижности зарядов, диэлектрических потерь, появление химической и электрохимической коррозии. Конденсация воды из атмосферного воздуха на охлажденной поверхности происходит в виде капельной или пленочной конденсации. При капельной конденсации поверхность покрывается каплями разного размера, между которыми есть воздушный промежуток. Пленочная конденсация характеризуется образованием слоя воды, прежде всего на металлических поверхностях. Кроме того, процессы конденсации воды могут изменяться от механизма пленочной к капельной конденсации и наоборот при увеличении слоя воды [37]. Стоит отметить, что различие в физическом принципе конденсации воды на элементах и устройствах ПП напрямую влияет на процессы, приводящие к их нарушениям и отказам. В зависимости от конденсации воды в виде пленки или капель последствия повреждения РЭС могут быть различны [38]. Так, на металлических и электропроводящих частях РЭС могут образовываться трещины и расслоение металла, а на не металлических дополнительно нарушаются структура внутренних связей и снижается их прочность [39]. Для защиты элементов и устройств РЭС от подобного воздействия известны различные способы, а именно создание герметичного корпуса и нанесение влагозащитного покрытия. При этом, если на влагозащитном покрытии образуется конденсат в виде водяной пленки или слоя льда с химически активными веществами образующихся при конденсации воды в присутствии некоторых солей в воздухе или внутри РЭС [40], то это

может оказать существенное влияние на целостность покрытия или герметичность корпуса.

Моделирование с учетом изменения электрофизических параметров воды позволяет симитировать возможное влияние повышенной влажности и температуры на электрические параметры и характеристики РЭС. В зависимости от агрегатного состояния воды, изменяется ее комплексная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$), включающая электропроводность (σ) и относительную диэлектрическую проницаемость (ε_r) [41, 42], различно влияющие на электрические характеристики компонентов РЭС. Связь между ε'' и σ определяется как

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'', \quad (1.1)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85$ пФ/м – диэлектрическая постоянная, f – частота.

Электрофизические параметры пленки воды можно получить, используя различные существующие модели [43, 44], которые можно применить при определенных условиях. Вода и лед являются частотно-зависимыми материалами, у которых электрофизические параметры зависят не только от частоты, но и от температуры и концентрации примесей в них. Учесть изменения электрофизических параметров воды от температуры при оценке воздействия влажности на ПП с компонентами, возможно используя модель, описывающую электрические частотно-зависимые свойства тонкой пленки воды от температуры, расположенной на поверхности ПП. Наиболее часто для описания электрофизических параметров воды используют модель Дебая [45] и однополосную модель Коула-Коула [46]. Модель Дебая является наиболее простой моделью для описания поведения реакции полярных молекул вещества под воздействием электрического поля с различной частотой, и частотно-зависимых параметров и описывается, как

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_H - \varepsilon_\infty}{1 - j2\pi f\tau}, \quad (1.2)$$

где τ – время релаксации, ε_H и ε_∞ – низкочастотное и высокочастотное значения диэлектрической проницаемости, соответственно.

Ограничение применимости модели (1.2) связано с возможностью её применения только для однородных материалов и жидкостей, поскольку не учитывает разное время релаксации для разных молекул.

Модель Коула-Коула (1.3) используется для описания изменения электрофизических параметров материала, с присутствием внутри неоднородностей в виде разных по размеру и зарядам ионов. Используя параметрическую модель Коула-Коула [47, 48] оценивают частотную зависимость σ для разных жидкостей от температуры. Измерение σ жидкостей (до 2,5 См/м) проводят в диапазоне частот 0,01–1 МГц, используя емкостную ячейку [49, 50]. Для описания неоднородности системы используют параметр рассредоточенности (α). При $\alpha \approx 0$ жидкость является однородной и ионы внутри обладают одинаковым размером, зарядом и временем релаксации. В случае когда $\alpha > 0$, в сложной структуре жидкости присутствуют примеси, и как следствие ионы имеют разный размер и заряд.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{\infty}}{1 - (j2\pi f\tau)^{1-\alpha}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0} \quad (1.3)$$

Электрические параметры используемые в выражениях (1.2) и (1.3) выбирают на основе измерений воды и льда при соответствующей температуре или из [45, 46, 51–54]. При этом не существует универсальной электрофизической модели воды, учитывающей воздействие температуры, а известные применяются при определенных условиях [55], что делает поиск и разработку новых моделей и методик крайне актуальной.

1.3 Влияние химических и биологических компонент жидкости и органических материалов на электрические характеристики радиоэлектронных средств

Вода является основным растворителем для большинства химических веществ. Электрофизические параметры растворов, в т.ч. агрегатное состояние, могут существенно различаться в зависимости от температуры. Известны различные методы, позволяющие определить электрофизические параметры

раствора, в зависимости от его агрегатного состояния (жидкое, твердое, газообразное). В этой связи различные методы и подходы, учитывающие эти особенности, совершенствуются. Так, обзор различных исследований электрических параметров жидкостей в зависимости от их химического состава и содержания в них БО приведен в [56]. Как правило, электрофизические параметры воды зависят от строения ее молекул и Броуновского движения, которое приводит к поляризации жидкости. Кроме того вода является полярной жидкостью, электрофизические параметры которой зависят от температуры [57]. В твердом состоянии вода имеет минимум внутренней энергии, что затрудняет движение зарядов внутри нее, что различает измеренные значения ϵ_r и σ разных растворов в жидком и твердом агрегатном состоянии [58]. В [59] показано, что химические свойства и растворимость химических соединений в жидкостях зависят от температуры, которые оказывают влияние на ее электрические свойства и как следствие на частотные зависимости S -параметров жидкости. В результате целесообразно исследовать электрофизические параметры растворов в широких диапазонах частот и температур в жидком и твердом агрегатных состояниях, что позволит выявить изменения их электрических свойств от температуры, полученных на основе результатов измерения частотных зависимостей S -параметров при помощи различных устройств.

Климатическое воздействие может оказать влияние на электрофизические параметры материалов, а также на детали и узлы РЭС из которых они состоят. Кроме того, новые органические материалы все чаще применяют в качестве радиопоглощающего материала (РПМ) [60]. Органические материалы используют при создании новых строительных материалов с повышенной защитой человека и РЭС от воздействия ЭМИ. Примером использования таких материалов может служить цемент с добавлением углеродного волокна [61–63], который используют для повышения экранирующих свойств и механической прочности цемента. Добавление биоугля в гипсовую смесь используемую при

строительстве повышает экранирующие свойства в области СВЧ-диапазона и увеличивает теплоизоляцию [64], а солевая пропитка РПМ увеличивает их экранирующую способность и повышает стабильность при работе в экстремальных условиях [65].

Пористые материалы органического происхождения, используют в первую очередь из-за высоких внутренних переотражений ЭМИ в материале, что делает их привлекательными для использования в качестве экранирующего материала [66]. Добавление активированного (пористого) угля [67] и нановолокна содержащего углерод, позволяет повысить экранирующие свойства материала. Особый интерес представляют материалы с частотно-избирательными свойствами, содержащие органические компоненты [68]. Современные материалы являются устойчивыми к механическим воздействиям и позволяют ослабить воздействие ЭМИ на человека [69]. Определенное влияние на электрофизические параметры РПМ оказывает влажность воздуха, что приводит к увеличению электромагнитных потерь при прохождении электромагнитной волны (ЭМВ) через вещество. Воздействие внешних факторов окружающей среды может оказать влияние на электрофизические параметры материалов, в особенности на содержание солей и воды, что может изменить электрофизические параметры и характеристики РПМ [70]. Воздействие электромагнитным полем на каплю воды приводит к изменению пространственного содержания ионов, что влияет на значения ϵ и σ [71]. Вычисления эффективности экранирования (ЭЭ) и вносимых потерь (ВП) различных материалов в т.ч. РПМ, осуществляют на основе известных значений ϵ и σ [72]. Увеличение ВП оказывает влияние на ЭЭ РПМ, что необходимо учитывать при оценке экранирующих свойств самого материала, при различных климатических условиях [73, 74].

В промышленности могут быть использованы различные химические составы которые при воздействии температуры и влажности могут осаживаться, в т.ч. в виде конденсата на элементы и устройства РЭС. В этой

связи для имитации возможных негативных последствий происходящих при эксплуатации РЭС в разных климатических условиях среды необходимо исследовать жидкости с разным химическим составом.

1.4 Устройства, используемые для измерения электрофизических параметров растворов

Исследование электрофизических параметров разных жидкостей с заданным агрегатным состоянием проводят используя различные СВЧ-устройства. В жидком агрегатном состоянии вода и подобные ей жидкости обладают высоким значением ϵ_r , что необходимо учитывать при их исследовании, используя СВЧ-устройства. Особенностью их применения является возможность вычисления частотных зависимостей ϵ жидкостей из измеренных S -параметров [75], а также определение содержания различных химических веществ в ее составе, в т. ч. в воде. При исследовании различных растворов применяют СВЧ-устройства измеряя их частотные зависимости S -параметров. Так, например в [76], показано, что амплитуда значений $|S_{11}|$ специального датчика погруженного в жидкость снижается при повышении концентрации органических веществ и NO_3 в воде.

Подход к исследованию электрофизических параметров растворов в твердом агрегатном состоянии отличается от жидких растворов. Так для выявления воды в жидком и твердом агрегатных состояниях в компонентах РЭС представлено в [77] СВЧ-устройство оснащенное нагревательным элементом для удаления замерзшей воды. СВЧ-устройство из [78], позволяет проводить измерения электрофизических параметров в режиме реального времени на основе измеренных $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ СВЧ-устройства с водой в жидком и твердом агрегатных состояниях. Также известно устройство, позволяющее определять по величине отраженного сигнала наличие воды в жидком и твердом агрегатном состояниях на металлических поверхностях [79].

Во влажной среде возможно появление различных БО, а процесс их жизнедеятельности может заметно повлиять на электрические параметры при

эксплуатации РЭС. Своевременная оценка и контроль концентрации различных БО, возможен при помощи микрополосковых и волноводных резонаторов, а также ЛП. Преимуществами их использования являются простота конструкции, а также отсутствие сложной предварительной подготовки исследуемых материалов, связанных с конструктивными особенностями СВЧ-устройств, что позволяет довольно просто получить частотные зависимости электрофизических параметров БО различного происхождения. При изучении жидкостей органического происхождения учитывают их химические особенности. Так, при оценке содержания глюкозы в крови человека с помощью СВЧ-резонатора обнаружен сдвиг резонансной частоты и изменение значений $|S_{11}|$, что позволяет определить ее концентрацию [80]. Аналогичные результаты получены и для неинвазивного способа измерения глюкозы в крови человека. Использование кольцевого резонатора с замкнутым внешним контуром и разомкнутым внутренним для неинвазивного измерения глюкозы в крови человека дало схожие результаты, что и при инвазивном измерении [81]. Используя прямоугольный резонатор, определяют содержание антибиотиков и концентрацию бактерий в жидкостях за счет измерения $|S_{11}|$ и смещения резонансной частоты резонатора [82].

Повышенная точность измерения ϵ_r растворов на заданной частоте может быть достигнута, используя резонатор с разъемным кольцом [83]. Используя кольцевой резонатор, возможно оценить концентрацию различных микроорганизмов в пробе, размещенной на его поверхности, за счет изменения амплитуды и частоты резонатора вблизи 2,5 ГГц [84]. Аналогичное устройство позволяет определить наличие вируса Денге в крови человека, а также оценить тяжесть заболевания им [85].

Используя микрополосковые резонаторы и ЛП определяют концентрацию солей, растворенных в воде [86] и содержание различных химических веществ в ее составе [87] на основе вычисленных частотных зависимостей ϵ_r из измеренных S -параметров резонаторов (рисунок 1.1).

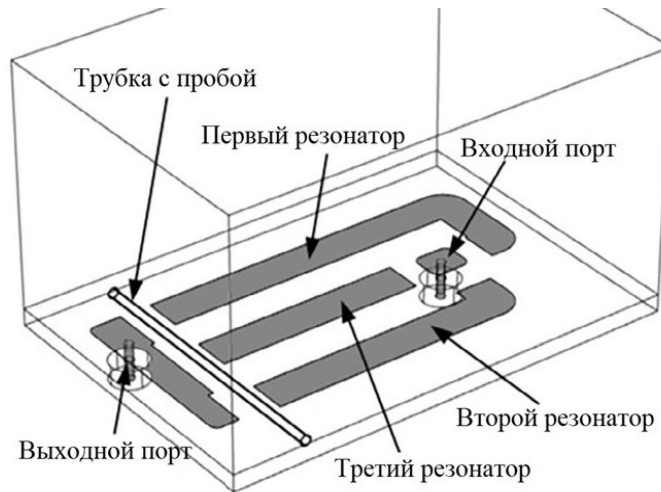


Рисунок 1.1 – Модель устройства на основе трех микрополосковых резонаторов [87]

Для этого измеряют $|S|$ -параметры резонаторов с жидкостью в трубке (рисунок 1.2), добавление которой приводит к изменению резонансных частот резонаторов, а соответственно ϵ' и ϵ'' (рисунок 1.3).

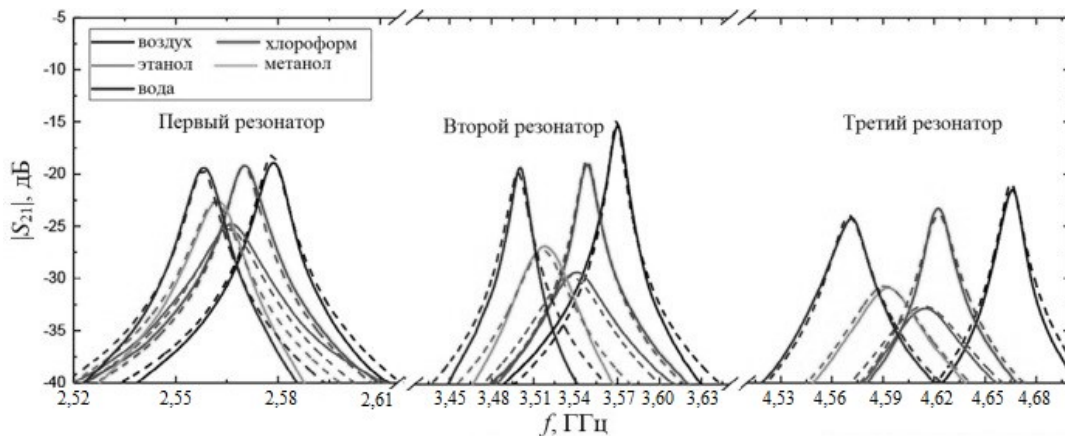


Рисунок 1.2 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ пустой трубки и с жидкостями и их моделями Дебая (- - -) при температуре 25°C [87]

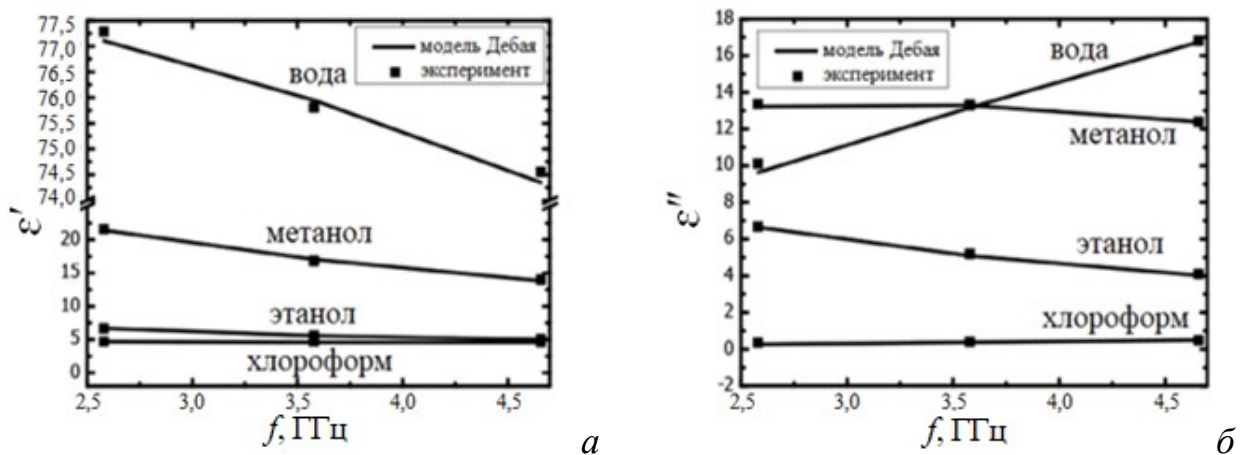


Рисунок 1.3 – Частотные зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) жидкостей [87]

Аналогично, используя устройство на основе микрополосковой линии передачи (МПЛП), определяют содержание метанола в воде, а также вычисляют ϵ жидкостей в диапазоне частот 1–20 ГГц [88]. Используя копланарную линию передачи (КЛП), определяют содержание и концентрацию глюкозы в растворах и в крови человека [89]. Обнаружение антибиотиков [90] и микроорганизмов [91] в жидкостях в режиме реального времени и без необходимости дополнительной обработки образцов, позволяет выявить взаимосвязи между измеренными $|S_{11}|$ и концентрацией антибиотика [90], а также отличить микроорганизмы друг от друга. Используя объемный резонатор и резонатор со встречно штыревой структурой, оценивают концентрацию свинца в жидкости в режиме реального времени [92].

Кроме того, известно, что жидкие масла обладают сложной химической структурой, с множеством химических соединений. При смешивании нескольких масел, выявление химического состава одного из них является достаточно сложной процедурой, особенно когда его содержание в общей смеси незначительно. Одним из возможных способов решения данной задачи является использование объемного резонатора или коаксиального зонда. Измерение и анализ частотных зависимостей S -параметров чистых образцов и их различных смесей при помощи коаксиального зонда (рисунок 1.4) позволило в [93, 94] определить процентное содержание примесей в масле. Зонд представляет собой ЛП, предназначенную для определения частоты релаксации молекул масла в смесях.



Рисунок 1.4 – Конструкция коаксиального зонда [93]

В результате изучения частотных зависимостей S -параметров различных устройств, взаимодействующих с жидкостями актуально для определения свойств и концентрации веществ в жидкостях.

Используя безэховую камеру с приемной и передающей антеннами, возможно измерить ЭЭ различных материалов [95]. Значение ЭЭ материала определяется отношением коэффициента передачи между приемной и передающей антеннами без и с материалом между ними. Метод с использованием безэховой камеры применим для измерения ЭЭ твердых, жидких и сыпучих (с применением специальных контейнеров) материалов. Недостатками данного метода являются трудоемкость и использование дорогостоящего оборудования, а именно специальной безэховой камеры с перегородкой во внутренней области, множества антенн и пр..

Альтернативный метод измерения предложен в [96]. Данным методом измеряют ЭЭ твердых материалов используя коаксиальную камеру, содержащую внутренний проводник соосно расположенный во внешнем. Разные материалы обладают собственными значениями электрофизических параметров, что по разному оказывает влияние на отраженную и прошедшую мощность ЭМИ. Мощность подводимая к коаксиальной камере ($P_{вх}$), является векторным произведением напряженностей электрического (E_i) и магнитного (H_i) полей воздействующих на материал заданной толщины (d) обладающим собственными значениями диэлектрической (ϵ_m), магнитной (μ_m) проницаемости и электропроводностью (σ_m) (рисунок 1.5).

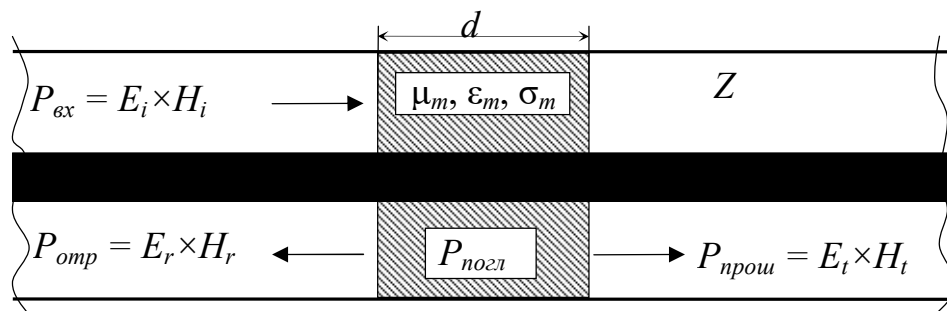


Рисунок 1.5 – Распространение ЭМВ в коаксиальной камере с материалом, расположенным внутри

Сумма отраженной ($P_{отр}$), прошедшей ($P_{прош}$) и поглощенной материалом ($P_{погл}$) мощностей будет соответствовать $P_{вх}$ как

$$P_{вх} = P_{отр} + P_{погл} + P_{прош}. \quad (1.4)$$

В зависимости от электрофизических параметров материала внутри коаксиальной камеры значение $P_{вх}$ не изменяется, тогда как $P_{отр}$, $P_{прош}$ и $P_{погл}$ зависит от электрофизических параметров объекта расположенного внутри. ВП материалом вычисляются из измеренных частотных зависимостей ненагруженной (пустая камера) ($|S_{21U}|$) и нагруженной (камера с материалом) ($|S_{21L}|$) коаксиальной камеры [97] как

$$ВП = 20 \lg(|S_{21U}|/|S_{21L}|). \quad (1.5)$$

При этом ВП материала вычисленные по (1.5) могут быть приравнены к ВП вычисленным по (1.6) для нагруженной материалом коаксиальной камеры, аналогично учитывающем тепловые потери и потери на отражения согласно [98]

$$ВП = 20 \lg(1 + 0,5Z \sigma d), \quad (1.6)$$

где Z – характеристическое сопротивление коаксиальной камеры.

При исследовании различных материалов в коаксиальной камере необходимо учитывать геометрические и электрофизические параметры объекта внутри неё. Поскольку, несущественное изменение электрических и геометрических параметров объекта [99, 100] расположенного внутри коаксиальной камеры может существенно изменять структуру поля в камере. Измеренные и вычисленные [101] значения ВП могут различаться на высоких частотах для разных толщин неоднородных материалов размещаемых внутри коаксиальной камеры [102]. В результате при исследовании сложных объектов в коаксиальной камере возможно ограничение диапазона рабочих частот на которых совпадают данные моделирования и измерения.

В [103, 104] предложена коаксиальная камера для измерения эффективности экранирования композиционных материалов. Камера основана

на коаксиальной ЛП с воздушным заполнением с параметрами $|S_{11}|$ менее минус 20 дБ в диапазоне частот до 10 ГГц (рисунок 1.6).

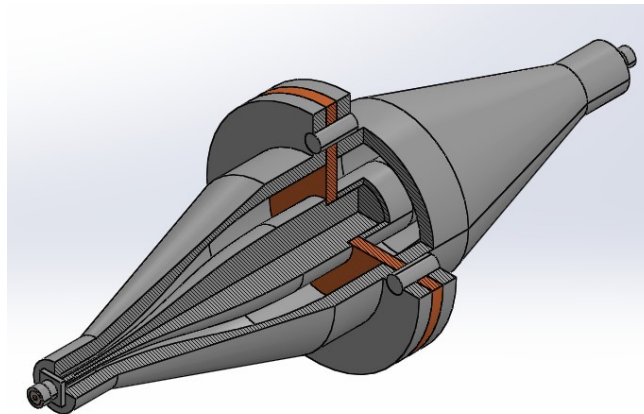


Рисунок 1.6 – Изометрический вид коаксиальной камеры

Коаксиальная камера (рисунок 1.6) состоит из внешнего проводника выполненного в виде двух симметричных элементов соединенных резьбовым соединением. Центральный проводник состоит из двух половин, соединяемых между собой, что позволяет измерять ЭЭ различных материалов [103].

При сопоставлении результатов вычисления и измерения СВЧ-устройств в широком диапазоне частот используют различные методы оценки погрешности. Так, одним из методов, применяемых для валидации данных является метод «feature selective validation method» (FSV), включенный в стандарт IEEE STD 1597, и регламентирующий валидацию математического и программного обеспечения, предназначенного для электромагнитного моделирования [105]. Интерпретация методом FSV включает сопоставление данных между собой по уровням «Отлично», «Очень хорошо», «Хорошо», «Удовлетворительно», «Плохо» и «Очень плохо». Критериями метода FSV являются разности амплитуд (amplitude difference measure, ADM), мера разности признаков (feature difference measure, FDM) и глобальная мера разности (global difference measure, GDM). Для получения полной информации между сравниваемыми данными используются все три критерия в методе FSV, а именно ADM, FDM и GDM.

Используя метод FSV [105, 106] строят доверительную гистограмму между двумя наборами данных, а полученные результаты интерпретируют между вычисленной мерой и качественной категорией выражаемой в процентах. Если

при сравнении двух наборов данных, полученных при моделирование и эксперименте, методом FSV количество оценок «Хорошо» и «Отлично» превышают 50%, результаты моделирования считаются достоверными. Стоит отметить, что если количество оценок «Удовлетворительно» превышает 50%, тогда результаты моделирования могут считаться достоверными, но с обязательным упоминанием о результатах анализа методом FSV. В случае, когда количество оценок «Плохо» и «Очень плохо» превышают значение 50%, то результаты моделирования не могут считаться достоверными.

При сравнении большого количества экспериментальных данных между собой применяют различные математические методы, например, метод главных компонент (МГК), позволяет наглядно представить наборы данных в виде целочисленного значения по главным компонентам (ГК). Для этого вычисляются собственные векторы и собственные значения ковариантной матрицы из анализируемого набора данных. Использование метода упругих карт позволяет наглядно визуализировать полученные результаты при помощи МГК [107], что подходит для наглядного представления измеренных частотных зависимостей S -параметров в пространстве ГК.

1.5 Цель и задачи работы

Из п. 1.1 следует, что даже единичный отказ критичной для человека РЭС может сопровождаться катастрофическими последствиями и прямой угрозой жизни человека. Основные факторы приводящие к нарушению работоспособности РЭС это прежде всего температура и влажность. Воздействия механических, биологических, химических и других факторов может усилить негативное последствия от влияния температуры и влажности на критичную РЭС, что необходимо учитывать на этапе её проектирования.

Из п 1.2 следует, что воздействия температуры и влажности критически влияют на надежность и работоспособность РЭС. Высокая влажность, как правило снижает сопротивление изоляции, что может привести к образованию токов утечки и коротким замыканиям, электрохимической миграции и

коррозии. Циклические изменения температуры приводят к различным механическим повреждениям таким как образование трещин, расслоения материала или припоя. При этом, существенную опасность представляют процессы конденсации на ПП РЭС. При влажности воздуха более 70% значительно увеличивается риск конденсации и последующих отказов РЭС. Тогда как, состав конденсата (содержание солей или других примесей) и его агрегатного состояния (жидкое или твердое) неодинаково повлияет на диэлектрические параметры и как следствие смещение рабочих частот компонентов. Моделирование подобного воздействия достаточно сложная задача, так как требует учета множества различных параметров таких как частота, температура, химический состав воды и неоднородность материалов. Для этого используют параметрические модели (Дебая, Коула-Коула), описывающие диэлектрическую проницаемость и электропроводность конденсата в виде пленки воды. Однако универсальной модели, точно предсказывающей поведение конденсата на РЭС не существует, поэтому важнейшее значение имеют длительные натурные испытания, но они весьма затратные. В этой связи видится целесообразным совершенствование моделей и методик, позволяющих вычислять электрофизические параметры различных растворов в широком диапазоне частот и температур.

Из п 1.3 следует, что химический состав и наличие органических материалов в водном растворе контактирующем с РЭС значительно влияет на его электрические характеристики. Для анализа электрофизических параметров используются различные методы измерений на основе СВЧ-устройств, что является приемлемым инструментом для оперативного контроля химического состава жидкости и концентрации в ней различных веществ. Температура и химический состав раствора оказывает влияние на ВП материала от которых зависят его электрофизические параметры. Поэтому для достоверной оценки устойчивости РЭС к воздействию климатически сложных условий

эксплуатации на этапе проектирования, необходимо использовать как чистую воду, так и различные растворы, имитирующие химическое загрязнение среды.

В п. 1.4 показаны основные методы измерения ВП различных материалов. Метод использующий коаксиальную камеру позволяет оценить изменение S -параметров при размещении в ней различных композитных материалов с заданными электрофизическими параметрами. Используя коаксиальную камеру с различными растворами в контейнере и без них возможно оценить изменение частотных зависимостей S -параметров при воздействии температуры и изменении химического состава. Анализ и последующая обработка с использованием МГК, позволит визуализировать и классифицировать результаты вычисления и измерения.

Вследствие этого возникает потребность в создании более простых и доступных моделей и методик оценки влияния растворов на электрические характеристики элементов и устройств РЭС в широких диапазонах частот и температур.

Цель работы – разработать модель и методику оценки влияния водных растворов на электрические характеристики ЛП в широких диапазонах частот и температур.

Для ее достижения надо решить следующие задачи:

1. Разработать модель для оценки частотных зависимостей электропроводности водных растворов с разным химическим составом, в широком диапазоне температур.

2. Предложить методику анализа растворов с разным химическим составом, размещенных в коаксиальной камере при воздействии на них температуры.

3. Оценить по предложенной методике, влияние водных растворов с разным химическим составом и агрегатным состоянием на элементы матрицы рассеяния (S -параметры) МПЛП и КЛП.

2 Методика оценки электропроводности и вносимых потерь водных растворов при изменении температуры

Здесь разработана модель для вычисления электропроводности водных растворов в широких диапазонах частот и температур [108]. Представлен алгоритм для вычисления электропроводности водных растворов при разных температурах на основе измеренных S -параметров коаксиальной камеры с размещенным внутри контейнером заполненным раствором с заданным химическим составом [109]. Разработана методика оценки вносимых потерь органических материалов при воздействии температуры. Визуализировано с использованием метода главных компонент (МГК) влияние температуры на S -параметры коаксиальной камеры, с размещенным внутри контейнером, заполняемым водными растворами [59, 110, 111].

2.1 Модель и алгоритм для вычисления электропроводности жидкого раствора в коаксиальной камере по измеренным S -параметрам при разной температуре

2.1.1 Анализ S -параметров коаксиальной камеры с жидким раствором в контейнере при разной температуре

Изначально исследованы частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры [103, 104] (рисунок 2.1а) с жидким раствором в контейнере и без него при температурах от минус 50 до 100°C. Для этого создан контейнер цилиндрической формы объемом 5 мл из тефлона ($\epsilon_r = 2,1$) с одинаковыми толщинами ($d = 2$ мм) стенок и крышки (рисунок 2.1б). Тефлон выбран, поскольку обладает химически инертными свойствами и не деформируется, а его электрические свойства практически не изменяются до $T \approx 260^\circ\text{C}$ [112]. В качестве жидкого раствора изначально выбрана дистиллированная вода.

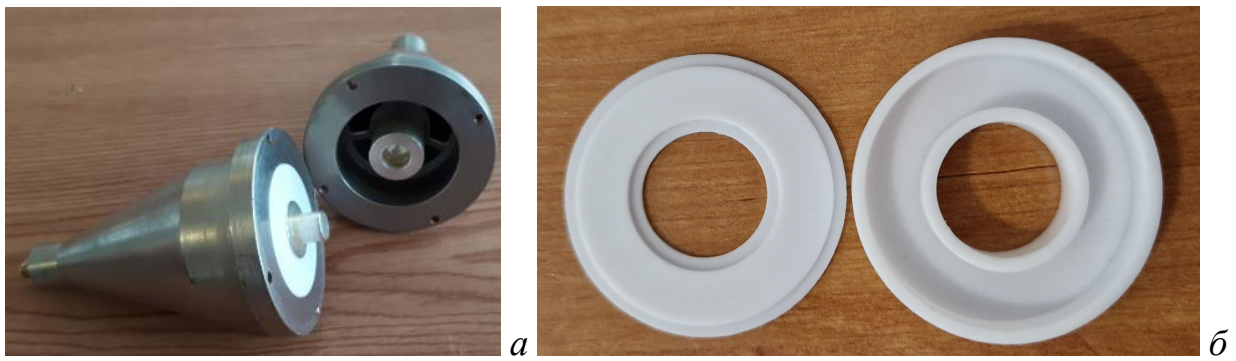


Рисунок 2.1 – Коаксиальная камера (а) с контейнером объемом 5 мл (б)

Измерения S -параметров растворов проводились при помощи установки, схема (рисунок 2.2а) которой содержит векторный анализатор цепей (ВАЦ), внешний 1 и внутренний 2 проводники коаксиальной камеры, с размещенным внутри нее контейнером 3, заполненным водой 4. Коаксиальная камера размещается внутри камеры «тепло-холод» 5. Собрана установка (рисунок 2.2б), содержащая ВАЦ Rohde & Schwarz ZVA 40 I, камеру «тепло-холод» ESPEC SU-262 2 и коаксиальную камеру 3 с верхней граничной частотой 12 ГГц [103, 104]. Измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с водой проводились ВАЦ каждые 30 с, в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц. Толщина раствора (d_p) в контейнере 5 мл составляла 8 мм. Температура внутри камеры «тепло-холод» изменялась в двух диапазонах: 1 – от 25°C до 100°C и 2 – от 25°C до минус 50°C. Стенки контейнера герметизировались в местах стыка для устранения протекания воды под воздействием высоких температур.

Температура внутри камеры «тепло-холод» контролировалась тремя датчиками температуры для учета равномерного нагрева и охлаждения коаксиальной камеры. Датчик влажности (DHT11) и температуры (DS18B20) подключались к контроллеру, а температура считалась установленной, когда ее значение было одинаковым (с учетом относительной погрешности) на всех трех датчиках.

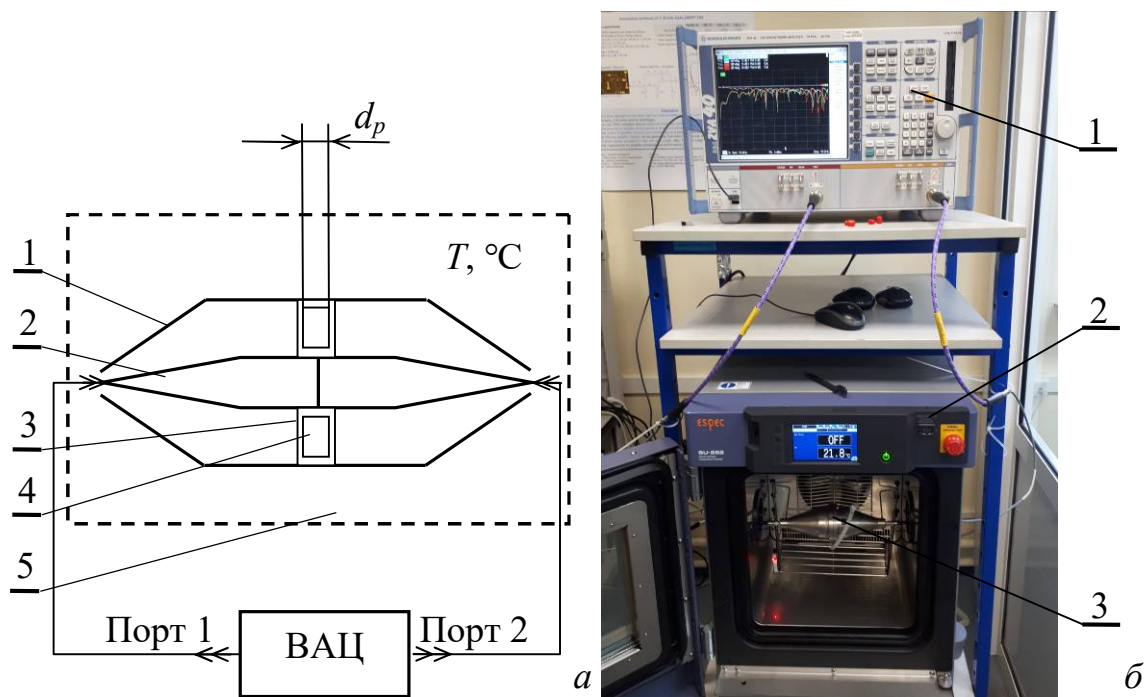


Рисунок 2.2 – Схема (а) и внешний вид (б) установки для измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с водой при изменении температуры

Для достоверности результатов использованы контейнеры объемом 2,5 и 5 мл. Частотные зависимости S -параметров пустой коаксиальной камеры и при размещении внутри нее полых контейнеров с разным объемом представлены на рисунке 2.3.

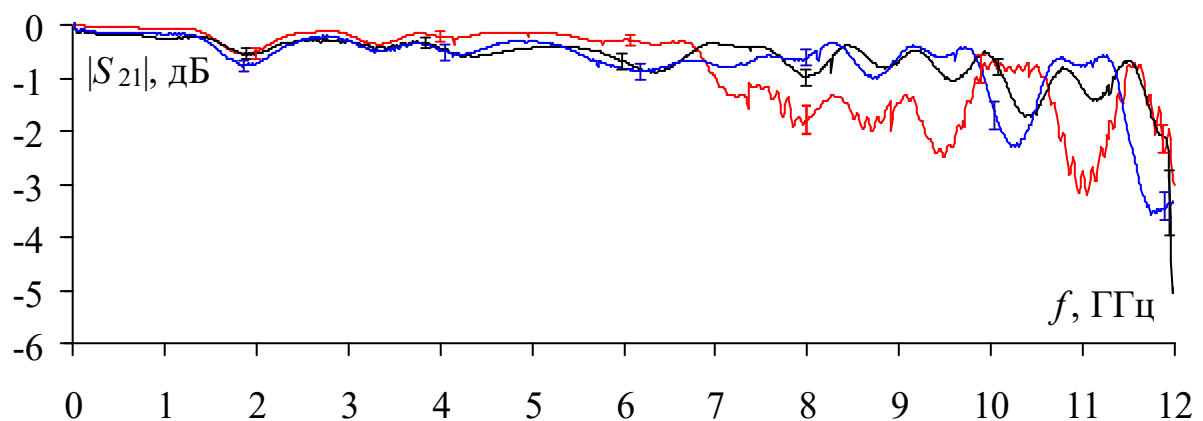


Рисунок 2.3 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ пустой (—) коаксиальной камеры и с контейнерами объемом 2,5 (—) и 5 мл (—)

Из рисунка 2.3 видно, что контейнеры слабо влияют на значения $|S_{21}|$. Так, на частотах до 6 ГГц разница (Δ) значений $|S_{21}| \leq 1$ дБ, а свыше 6 ГГц $\Delta|S_{21}| > 1$ дБ. Также различия в значениях $|S_{21}|$ незначительны ($\leq 0,5$ дБ) до частоты

10 ГГц для пустой камеры и с размещенным внутри нее пустым контейнером 5 мл. Свыше 10 ГГц разница увеличивается и достигает 1,5 дБ возле 12 ГГц. В результате, контейнеры минимально ($\pm 0,5$ дБ) влияют на частотную зависимость $|S_{21}|$ коаксиальной камеры до 6 ГГц, и могут быть применены при измерениях.

Измерены частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с размещенным внутри нее контейнером объемом 5 мл (рисунок 2.4), заполненным водой, и при изменении температуры ($T, ^\circ\text{C}$) от минус 50 до 100°C с шагом 25°C .

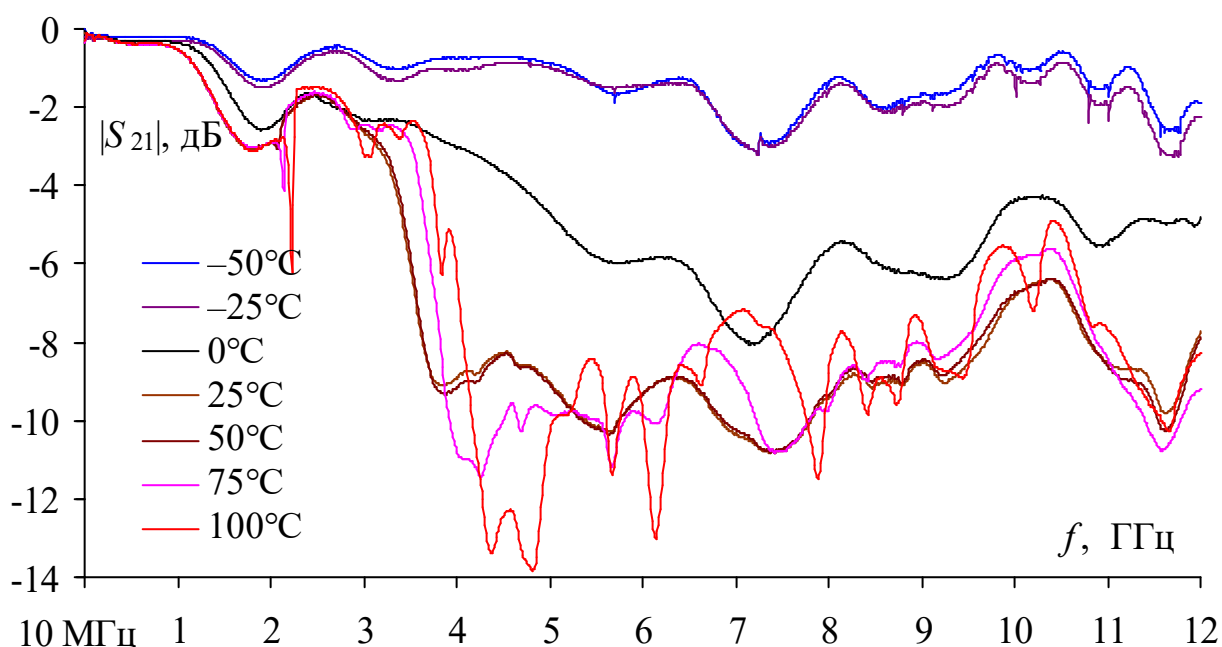


Рисунок 2.4 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с водой в контейнере при изменении их температуры от -50°C до 100°C

Вода в жидком состоянии оказывает большее влияние на $|S_{21}|$ при положительных температурах, чем при отрицательных. Так, при 25 и 50°C изменения $|S_{21}|$ составляют не более 1 дБ. Рост температуры с 50 до 100°C , существенно изменяет $|S_{21}|$ (свыше 3 ГГц), а на частотных зависимостях появляются дополнительные резонансы. Минимум $|S_{21}|$ на частотах 4–5 ГГц составляет минус 11 дБ при $T = 75^\circ\text{C}$ и минус 14 дБ при $T = 100^\circ\text{C}$. Охлаждение воды до $T = 0^\circ\text{C}$ повышает $|S_{21}|$ до минус 8 дБ, а при охлаждении до минус 25 и минус 50°C до минус 3 дБ, в диапазоне частот 7–8 ГГц. В результате, контейнер

заполненный водой при отрицательных температурах (в твердом состоянии) минимально влияет на $|S_{21}|$ коаксиальной камеры, а при положительных температурах $|S_{21}|$ вносит существенное ослабление, что увеличивает ВП. При этом, чем выше температура, тем меньше разница по частоте между минимумами на частотных зависимостях $|S_{21}|$.

Дополнительно для электродинамического анализа созданы геометрические модели коаксиальной камеры с размещенной водой в контейнере и вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ при помощи электродинамического моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Поскольку не существует однозначной модели поведения воды при температуре 100°C , как и модели описывающий взаимовлияния электрофизических параметров воды и температуры, то для моделирования и эксперимента выбраны температуры 25°C для жидкости и минус 50°C для льда. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ с использованием установки (рисунок 2.2б) содержащей коаксиальную камеру с водой при $T = 25^\circ\text{C}$ и с использованием модели Дебая [45] представлены на рисунке 2.5а. Аналогично измеренные при температуре минус 50°C и вычисленные, используя модель льда из [52], частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры со льдом, представлены на рисунке 2.5б.

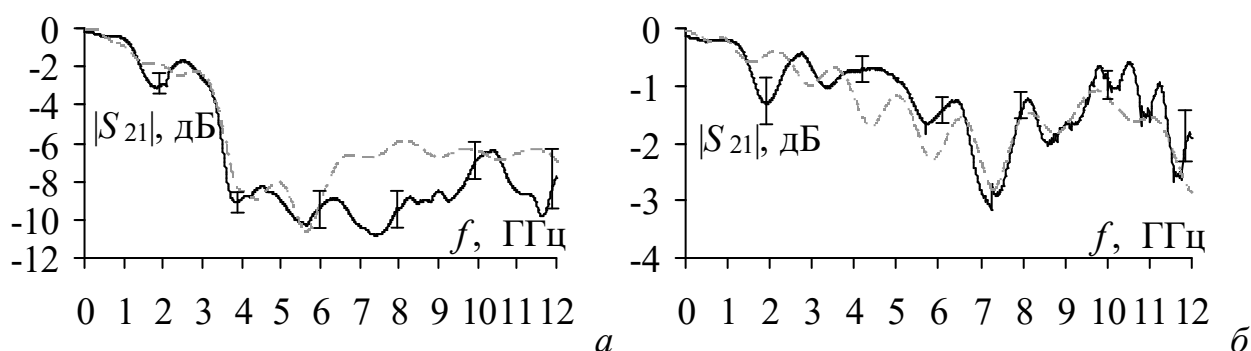


Рисунок 2.5 – Измеренные (—) и вычисленные (---) с использованием моделей [45, 52] частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с контейнером заполненным водой при $T = 25^\circ\text{C}$ (а) и льдом при минус 50°C (б)

Из рисунка 2.5а видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры совпадают, с небольшими отклонениями, до частоты 6 ГГц

($\Delta|S_{21}| \leq 1$ дБ). Минимальное значение $|S_{21}|$ составляет минус 11 дБ для модели из [45] на частоте 5,8 ГГц, тогда как аналогичное значение минимума для измеренного значения на частоте 7,5 ГГц. На частотах выше 6 ГГц разница между вычисленными и измеренными значениями $|S_{21}|$ увеличивается до 4 дБ, что вероятно связано с присутствием неоднородности внутри коаксиальной камеры в виде контейнера с водой не существенно отличающиеся геометрией и электрофизическими параметрами. Из рисунка 2.5б видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ совпадают, с небольшими отклонениями, не превышающими 1 дБ во всем диапазоне частот до 12 ГГц.

2.1.2 Модель и алгоритм для вычисления электропроводности воды

Разработана модель для оценки электропроводности (σ) воды, основанная на вычислении уровня ВП из измеренных частотных зависимостей матриц рассеяния (S -параметров) коаксиальной камеры с пустым контейнером из п. 2.1.1 и контейнером, заполненным жидким раствором, при изменении температуры ($T, ^\circ\text{C}$).

Согласно [98] вносимые потери (ВП) могут быть вычислены для пустого ($ВП' = |S_{21U}| / |S_{21PK}|$) и заполненного ($ВП'' = |S_{21U}| / |S_{213K}|$) контейнеров через значения $|S_{21}|$ для пустой камеры ($|S_{21U}|$) и с пустым контейнером ($|S_{21PK}|$), а также камеры с контейнером, заполненным раствором ($|S_{213K}|$). В результате ВП раствора без учета контейнера могут быть вычислены через отношение $ВП'' / ВП'$, а при известных значениях ВП для воды из (1.5) и (1.6) можно получить σ раствора как

$$\sigma = \left(\left| \frac{S_{21PK}}{S_{213K}} \right| - 1 \right) \frac{2}{Zd}. \quad (2.1)$$

где Z – характеристическое сопротивление коаксиальной камеры, а d – толщина раствора в контейнере.

Используя, измеренные частотные зависимости S -параметров пустой коаксиальной камеры ($|S_{21U}|$) и камеры с полым ($|S_{21PK}|$) и заполненным

раствором контейнером ($|S_{213K}|$), возможно по (2.1) вычислить σ раствора при разных ее температурах или агрегатных состояниях.

Разработан алгоритм для вычисления частотных зависимостей ВП и σ на основе измеренных S -параметров жидких растворов в коаксиальной камере при разных значениях их температуры, включающий:

1. Подготовку жидкого раствора (дистиллированная, морская или иная вода присущая географическому положению, а также вода с разным химическим составом).

2. Калибровку ВАЦ с термостабильными кабелями в камере «тепло-холод».

3. Размещение коаксиальной камеры внутри камеры «тепло-холод» и подключение её термостабильными кабелями к ВАЦ.

4. Измерение S -параметров пустой коаксиальной камеры ($|S_{21U}|$) при изменении температуры внутри камеры «тепло-холод» в диапазонах заданных температур: 1 – от положительных до отрицательных; 2 – от отрицательных до положительных.

5. Установку контейнера внутрь коаксиальной камеры и повтор измерений S -параметров ($|S_{21PK}|$) коаксиальной камеры с полым контейнером при изменении температуры внутри камеры «тепло-холод» для двух диапазонов температур.

6. Заполнение контейнера жидким раствором, после закрытия и проклейка его стенок для устранения протекания, а также проверка его герметичности.

7. Установка контейнера с жидким раствором внутрь коаксиальной камеры и измерение S -параметров ($|S_{213K}|$) коаксиальной камеры при изменении температуры внутри камеры «тепло-холод» для двух диапазонов температур.

8. Вычисление ВП по (1.5) и σ по (2.1) жидкого раствора, используя измеренные параметры $|S_{21U}|$, $|S_{21PK}|$ и $|S_{213K}|$ для заданных температур.

Алгоритм может применяться для анализа ВП и σ жидких растворов с различным химическим составом и при разных температурах.

Вычислены ВП по (1.5) на основе измеренных S -параметров коаксиальной камеры с водой в контейнере объемом 5 мл при различной температуре. Полученные зависимости (рисунок 2.6) интерполированы полиномом 4-й степени согласно [113].

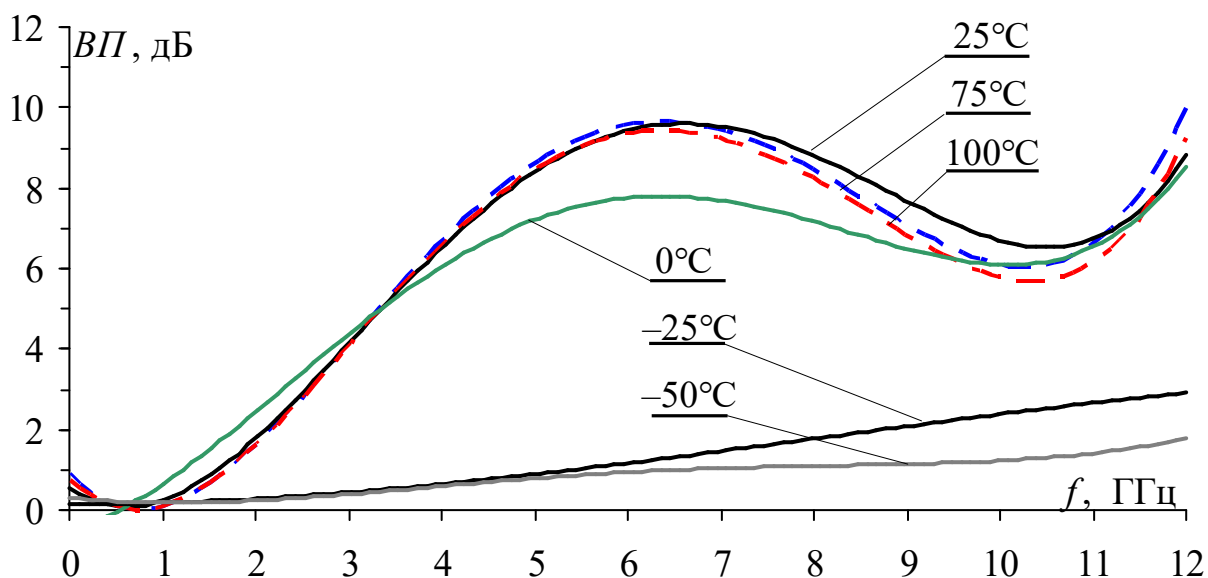


Рисунок 2.6 – Интерполированные полиномом 4-й степени частотные зависимости ВП при разных температурах воды

Из рисунка 2.6 видно, что температура существенно влияет на ВП. Так, при 25–100°C и с ростом частоты значение ВП растут до 10 дБ. При уменьшении температуры воды до 0°C максимум ВП снижается до 8 дБ, а при температуре минус 25 и минус 50°C – до 3 и 2 дБ, соответственно. Низкий уровень ВП (рисунок 2.6) связан с тем, что при отрицательных температурах вода переходит в твердое агрегатное состояние, что значительно изменяет ее электропроводность (σ) и относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r .

Вычислены по (2.1) σ (рисунок 2.7а) воды и аппроксимированы полиномом 4-й степени (рисунок 2.7б). Полученные частотные зависимости σ при $T = 25^\circ\text{C}$ сравнены со значениями из [53, 54] до частоты 6 ГГц.

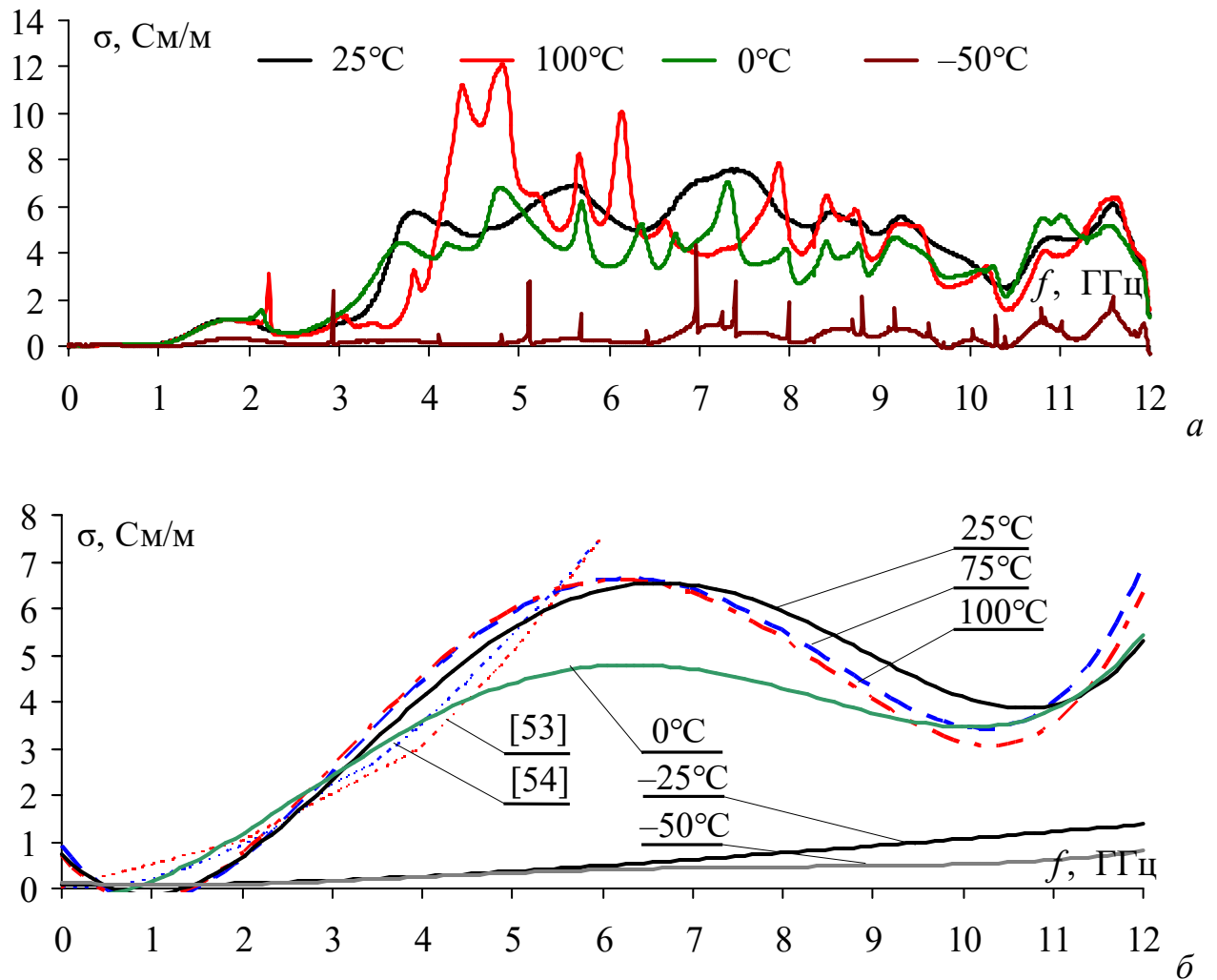


Рисунок 2.7 – Вычисленные по (2.1) частотные зависимости σ без аппроксимации (а) и с ней (б) при изменении температуры воды в контейнере от -50 до 100°C

Из рисунка 2.7а видно, что температура влияет на частотную зависимость σ . Так, максимум σ составляет 12 См/м при $T=100^\circ\text{C}$ на частоте 4,9 ГГц, а минимум – $\sigma = 1$ См/м при $T=-50^\circ\text{C}$ на частоте 12 ГГц. При аппроксимации зависимостей σ можно заметить (рисунок 2.7б), что они близки по поведению к зависимостям из [53, 54] до 6 ГГц. Так, σ увеличивается до 6,5 См/м при $T=25^\circ\text{C}$ с ростом частоты до 7 ГГц, а при $T=0^\circ\text{C}$ – до 4,8 См/м. Свыше 6 ГГц наблюдается незначительный спад, а затем рост σ . Отрицательные температуры минус 25 и минус 50°C незначительно его увеличивают до 1,3 и 0,8 См/м, соответственно. Разница значений σ составляет 1 См/м в диапазоне температур от 25 до 100°C , и увеличивается до 1,8 См/м при температуре около 0°C , а для отрицательных температур составляет 0,5 См/м.

2.1.3 Достоверность и адекватность модели для оценки электропроводности воды при разных температурах

Повторяемость результатов подтверждается измеренными в разные дни S -параметрами коаксиальной камеры с контейнером заполненным водой из одного источника при температурах минус 50°C (рисунок 2.8а), 25°C (рисунок 2.8б) и 100°C (рисунок 2.8в).

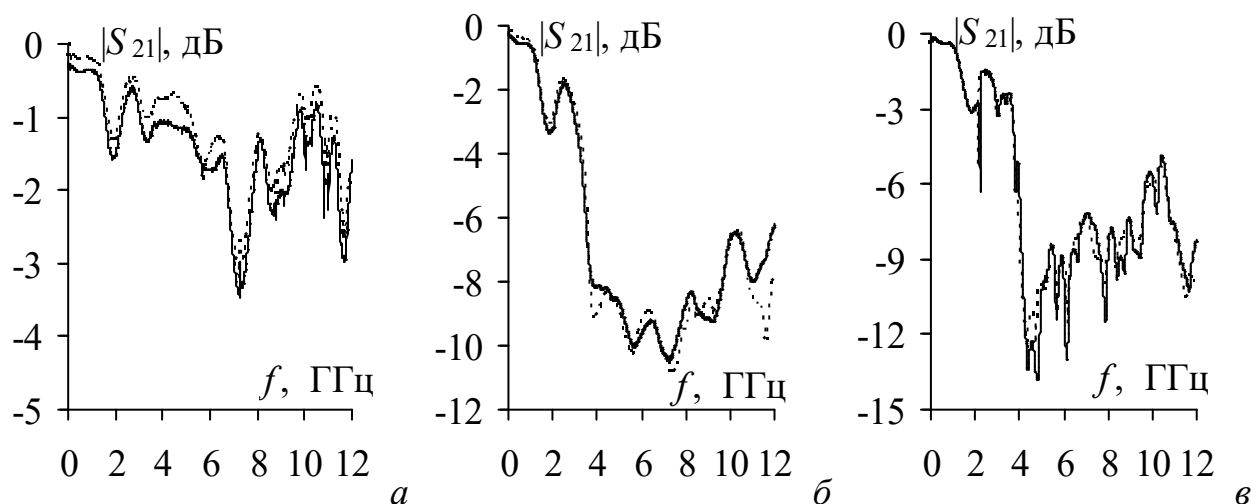


Рисунок 2.8 – Измеренные в 1 (—) и 2 (---) дни частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с водой при температурах -50°C (а), 25°C (б) и 100°C (в)

Из рисунка 2.8а, видно, что при $T = -50^{\circ}\text{C}$ разница между измеренными в разные дни значениями $|S_{21}|$ не превышает 0,7 дБ, во всем диапазоне частот. При увеличении температуры до 25°C разница не изменяется на частотах до 11 ГГц и возрастает до 2,7 дБ при 11–12 ГГц (рисунок 2.8б). Увеличение температуры до 100°C повышает $\Delta|S_{21}|$ до 4,4 дБ (рисунок 2.8в). В результате максимальная разница измеренных S -параметров воды наблюдалась при высоких температурах в разные дни и не превышала 4,4 дБ.

Выполнена методом FSV [106] оценка (п. 1.4) измеренных частотных зависимостей $|S_{21}|$ в разные дни и при разных температурах (таблица 2.1). Также для выбора наиболее достоверного диапазона частот аналогичным образом проведена оценка в двух поддиапазонах частот 0,01–6 ГГц и 0,01–12 ГГц (таблица 2.1). Для этого значения σ воды из [45] и льда из [52] использовались в моделировании коаксиальной камеры. Полученные частотные

зависимости $|S_{21}|$, сравнивались с результатами измерения $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с водой и льдом в контейнере при $T=25^{\circ}\text{C}$ и -50°C .

Таблица 2.1 – Вычисленная методом FSV [106] оценка разности (%) вычисленных и измеренных $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с водой и льдом в контейнере в разные дни и при разных температурах (1), в разных поддиапазонах частот при $T=25$ (2) и 50 (3) $^{\circ}\text{C}$

Метод вычислений	Отлично	Очень хорошо	Хорошо	Удовлетворительно	Плохо
1. Разная температура воды					
$T = -50^{\circ}\text{C}$					
ADM	6	64	30	0	0
FDM	63	30	6	1	0
GDM	2	52	44	2	0
$T = 25^{\circ}\text{C}$					
ADM	62	13	19	6	0
FDM	46	14	16	19	5
GDM	40	17	16	20	7
$T = 100^{\circ}\text{C}$					
ADM	67	20	13	0	0
FDM	40	13	32	14	1
GDM	30	18	33	18	1
2. Температура (воды) $T = 25^{\circ}\text{C}$ для двух поддиапазонов частот					
0,01–6 ГГц					
ADM	27	59	14	0	0
FDM	56	28	10	6	0
GDM	20	48	24	8	0
0,01–12 ГГц					
ADM	1	7	45	47	0
FDM	28	21	33	18	0
GDM	0	5	31	61	3
3. Температура (льда) $T = -50^{\circ}\text{C}$ для двух поддиапазонов частот					
0,01–6 ГГц					
ADM	6	35	40	14	5
FDM	34	24	23	7	5
GDM	1	26	35	25	5
0,01–12 ГГц					
ADM	13	17	37	33	0
FDM	23	15	24	23	14
GDM	4	8	22	49	15

Оценка измеренных $|S_{21}|$ в разные дни и при разных температурах показала, что сумма «Отлично», «Очень хорошо» и «Хорошо» превышает 50%, что достаточно для верификации полученных данных по результатам вычисленных и измеренных значений в соответствии со стандартом FSV и указывает на повторяемость измеренных значений с небольшим расхождением. Оценка методом FSV при $T = 25^\circ\text{C}$ воды в поддиапазоне частот 0,01–6 ГГц показала, что сумма значений по строкам ADM, FDM и GDM превышает уровень 50% для трех столбцов от «Отлично» до «Хорошо». При этом в поддиапазоне частот 0,01–12 ГГц уровень 50% превышает для GDM, что является удовлетворительным результатом и допустимо при верификации согласно [106]. Оценка методом FSV при $T = \text{минус } 50^\circ\text{C}$ льда в поддиапазоне частот 0,01–12 ГГц показала, что сумма значений по строкам ADM, FDM и GDM превышает уровень 50% по столбцам от «Отлично» до «Хорошо», что указывает на достаточную сходимость результатов. В диапазоне частот до 12 ГГц сумма значений по строкам ADM и FDM превышает уровень 50% по столбцам от «Отлично» до «Хорошо», тогда как для GDM уровень «Удовлетворительно» превышает 50%. В результате использование метода FSV [106] выявило, хорошую и удовлетворительную сходимость результатов моделирования и эксперимента в диапазонах частот до 6 и 12 ГГц, соответственно.

Оценены методом FSV значения σ из [53, 54] и вычислены по разработанной модели (2.1) с аппроксимацией и без нее при $T = 25^\circ\text{C}$ в поддиапазоне частот 0,01–6 ГГц (таблица 2.2). Из которых видно, что уровень «Хорошо» превышает 50%, что верифицирует данные эксперимента и моделирования согласно [106].

Таблица 2.2 – Вычисленная методом FSV [106] оценка разности (%) используя σ воды из [53, 54] и полученную по (2.1) при $T=25^\circ\text{C}$

Метод вычислений	Отлично	Очень хорошо	Хорошо	Удовлетворительно	Плохо
Вычисленные σ по (2.1) и значения σ из [53]					
ADM	41	28	16	12	3
FDM	45	19	17	13	4
GDM	28	23	25	13	8
Вычисленные σ по (2.1) и значения σ из [54]					
ADM	34	30	19	14	3
FDM	46	15	19	13	5
GDM	25	22	26	16	9
Вычисленные и аппроксимированные σ по (2.1) и значения из [53]					
ADM	25	65	9	1	0
FDM	90	3	3	4	0
GDM	14	59	22	5	0
Вычисленные и аппроксимированные σ по (2.1) и значения из [54]					
ADM	28	18	51	3	0
FDM	41	53	3	3	0
GDM	3	38	54	5	0

2.2 Методика оценки вносимых потерь водных растворов

при изменении их температуры в коаксиальной камере

2.2.1 Методика оценки вносимых потерь водных растворов

при разных температурах и концентрациях химического состава

Разработана методика оценки ВП позволяющая учитывать влияние температуры и влажности воздуха на органические материалы, используя измеренные при разных температурах S -параметры коаксиальной камеры с органическими материалами в контейнере, и с добавлением в них разных жидкостей.

Относительно модулей коэффициентов передачи пустого ($|S_{21ПК}|$) и заполненного материалом ($|S_{21ЗК}|$) контейнеров вычислялись ВП материала без контейнера как

$$ВП_3 = \left| \frac{S_{21ПК}}{S_{21ЗК}} \right|. \quad (2.2)$$

Аналогично влияние на ВП концентрации жидкости в сухой смеси оценивалось относительно модулей коэффициентов передачи сухой ($|S_{21\text{сух}}|$) и влажной ($|S_{21\text{влаж}}|$) смесей как

$$ВП_4 = \left| S_{21\text{влаж}} \right| / \left| S_{21\text{сух}} \right|. \quad (2.3)$$

Влияние температуры на органические материалы учитывалось как:

1. Заготовлена смесь из органических материалов.
2. Измерены S -параметры коаксиальной камеры с органическим материалом в контейнере с добавлением в них заданного количества жидкого раствора и без него.
3. Вычислены $ВП_3$ по (2.2) и $ВП_4$ по (2.3).
4. Измерены S -параметры коаксиальной камеры с различной концентрацией органических материалов в контейнерах.
5. Измерены S -параметры коаксиальной камеры с органическими материалами без и с добавлением жидкости при изменении температуры.
6. Проанализированы полученные результаты.

В результате, использование жидкостей с различным химическим составом позволит имитировать совместное влияние температуры и влажности в разных географических зонах на органические материалы.

2.2.2 Оценка вносимых потерь водных растворов при положительных и отрицательных температурах и разных концентрациях химического состава

Исследования ВП проводилось используя установку (рисунок 2.2б) с коаксиальной камерой (рисунок 2.1а) внутри которой располагался контейнер из тефлона (рисунок 2.1б), заполненный жидкостью с заданной концентрацией химического вещества. Измерения S -параметров проводились в диапазонах частот 0,01–12 ГГц и температур от минус 50°C до 50°C (с шагом 5°C). Стабилизация температуры коаксиальной камеры и исследуемых растворов перед каждым измерением S -параметров осуществлялась выдерживанием временного интервала в 600 с. Объем раствора, помещенного внутрь

контейнера (2 мл), контролировался в начале и конце измерений. При температуре от 0°C до 50°C раствор находился в жидком агрегатном состоянии, а от минус 50°C до 0°C – в твердом

Для оценки взаимосвязи между химическим составом раствора и его температурой сначала выполнялся анализ измеренных S -параметров коаксиальной камеры с растворами для положительных температур.

Измерены S -параметры для пустой камеры и с контейнером заполненным чистой водой (рисунок 2.9) и исследуемыми растворами при нормальной температуре 25°C.

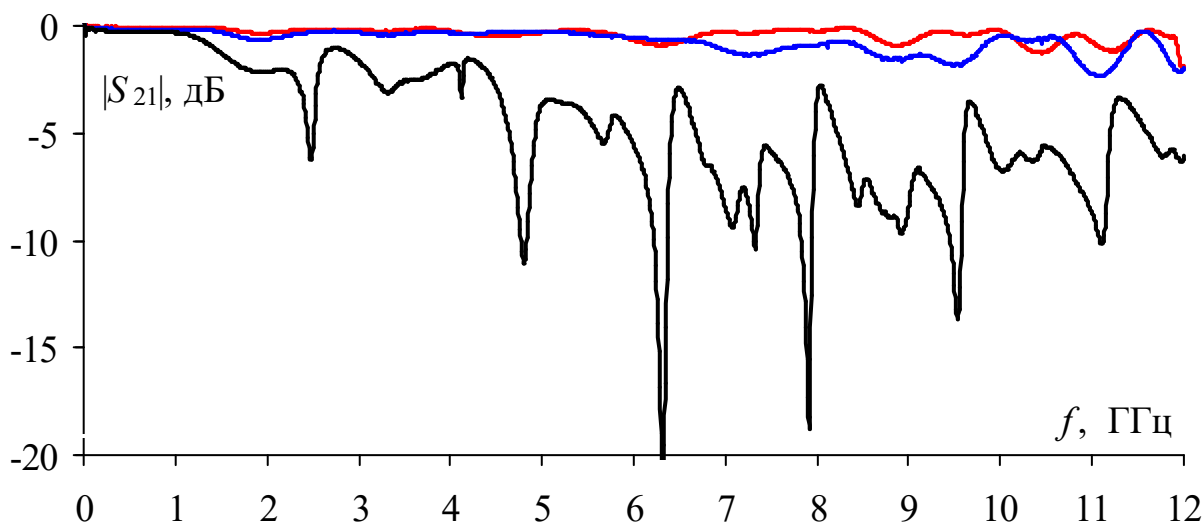


Рисунок 2.9 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ для пустой камеры (—), с пустым контейнером (—) и заполненным водой (—)

Из рисунка 2.9 видно, что размещение пустого контейнера внутри коаксиальной камеры оказывает несущественное влияние (для $|S_{21}|$ до $\pm 1,0$ дБ) на измеренную частотную зависимость S -параметров, при этом добавление чистой воды в контейнер значительно ее изменяет, аналогично ранее описанному в п. 2.1.

Измерены частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с контейнером заполненным жидкими растворами содержащие вещества: CaCl_2 , NaCl , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, сложный соляной раствор, Na_2SO_4 , $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$. Выделены наиболее отличающиеся растворы, а именно CaCl_2 , NaCl и проведены измерения их S -параметров при температурах 0, 25 и 50°C (рисунок 2.10).

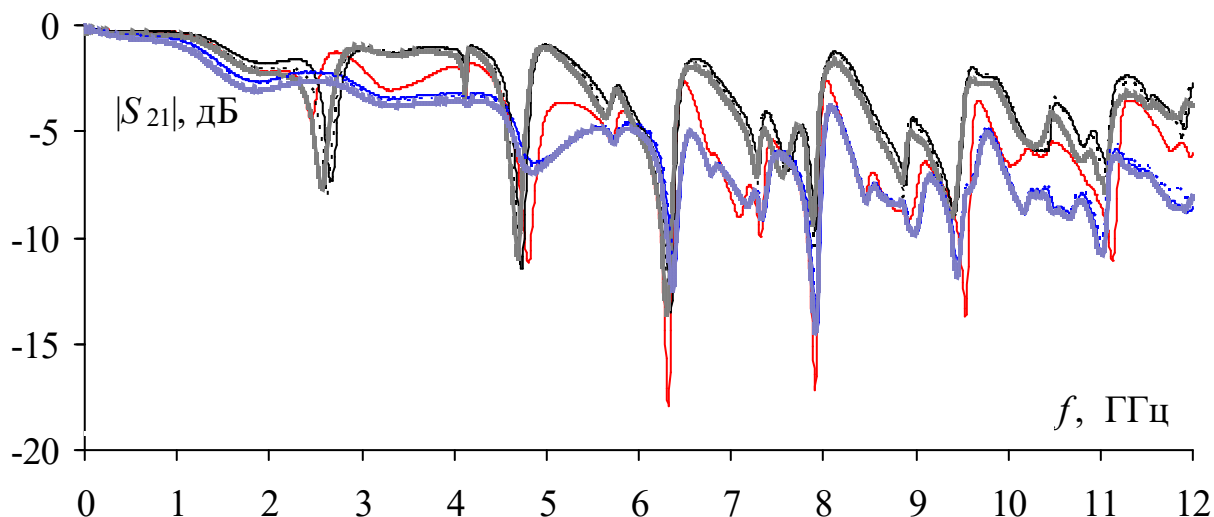


Рисунок 2.10 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ при $T = 0$ (—), 25 (---) и 50 (***)°C без растворов (—) и с ними для CaCl_2 (—) и NaCl (—)

Из рисунка 2.10 видно, что добавление солей и различных химических соединений оказывает влияние на электрические параметры раствора, что приводит к изменению S -параметров. Повышение температуры оказывает влияние на растворенные в воде химические вещества, что также приводит к изменению S -параметров для каждого исследуемого раствора. Для оценки этого влияния выполнено сравнение максимальных и минимальных значений, а также изменения этих значений на разных частотах. Так, в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц для измеренных растворов наблюдается множество локальных минимумов в трех диапазонах частот: 2–3,5 ГГц, 6–7 ГГц и 7,5–8,5 ГГц. Температура выбрана из условия того, что при минимальном, среднем и максимальном её значениях, изменения, происходящие с электрофизическими параметрами жидкостей, наиболее наглядны.

Сравнены значения частотных зависимостей S -параметров при изменении температуры растворов. Анализ частотных зависимостей S -параметров водного раствора без примесей показал множество выраженных локальных минимумов и максимумов. Значения $|S_{21}|$ в минимумах для воды без примесей минимальны относительно других растворов, а увеличение температуры воды приводит к повышению разницы $|S_{21}|$ до 2 дБ вблизи частоты 2,4 ГГц

Из анализа значений $|S_{21}|$ для 10%-го раствора CaCl_2 видно, что изменение температуры от 0 до 50 °С незначительно (до 0,5 дБ), оказало влияние на значения $|S_{21}|$ до частоты 6 ГГц, а с повышением частоты разница между ними уменьшается до 0,2 дБ.

Для 0,9%-го раствора NaCl и сложного соляного раствора сравнение значений $|S_{21}|$ близки (до 1 дБ) во всем измеренном диапазоне частот. Изменение температуры для 0,9 %-го раствора NaCl незначительно (до 0,1 ГГц) смещает частоту локальных минимумов и максимумов $|S_{21}|$. Изменение температуры от 0 до 50°С для 0,9%-го раствора NaCl уменьшает значения $|S_{21}|$ – до 2 дБ. Увеличение температуры для сложного соляного раствора уменьшает значения $|S_{21}|$ до 3 дБ и смещает частоты локальных минимумов и максимумов (до 0,1 ГГц).

Значения $|S_{21}|$ для 5%-го раствора $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ близки (до 1 дБ) к значениям $|S_{21}|$ полученным для чистой (дистиллированной) воды, но вблизи локальных минимумов и максимумов они отличаются (до 5 дБ) до частоты 6 ГГц, и с ростом частоты эта разница снижается до 2 дБ. Изменение температуры от 0 до 50°С для 5%-го раствора $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ смещает частоты (до 0,05 ГГц) и изменяет амплитуды (до 3 дБ) S -параметров во всем измеренном диапазоне частот.

Разница значений $|S_{21}|$ для растворов с 30%-м Na_2SO_4 и 10%-м CaCl_2 не превышает 2 дБ. Изменение температуры оказывает схожее влияние на значения частотной зависимости S -параметров для 30%-го раствора Na_2SO_4 , как и для 10%-го раствора CaCl_2 .

Анализ значений $|S_{21}|$ для 2%-го раствора $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$ и H_2O не превышает 1 дБ до частоты 6 ГГц, с повышением частоты значения $|S_{21}|$ для 2%-го раствора $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$ становятся близкими к значениям $|S_{21}|$ для 30 %-го раствора Na_2SO_4 . Изменение температуры в от 0 до 50°С для 2 %-го раствора $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$ приводит к уменьшению на 3 дБ значений $|S_{21}|$ и смещению (до 0,1 ГГц) локальных минимумов и максимумов по частоте.

В результате температура оказывает существенное влияние на частотные зависимости $|S_{21}|$ для жидких растворов с разным химическим составом, что связано с изменением их электрических параметров. Это отражено в вычисленной разнице между минимальными и максимальными значениями $|S_{21}|$ и анализе сдвига частот в зависимости от концентрации и состава химических веществ в жидком растворе, а также при изменении его температуры (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Разница амплитуд и частот $|S_{21}|$ для жидких растворов

$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta S_{21} , \text{дБ}$	$\Delta f, \text{ГГц}$
Диапазон частот 2,0–3,5 ГГц		
0	4,6	0,88
25	5,2	0,95
50	5,4	1,04
Диапазон частот 6,0–7 ГГц		
0	6,2	0,09
25	9,9	0,08
50	13,5	0,07
Диапазон частот 7,5–8,5 ГГц		
0	7,9	0,05
25	8,9	0,05
50	10,9	0,05

Из таблицы 2.3 видно, что при изменении температуры разница по частоте максимальна и достигает 1,04 ГГц в диапазоне частот 2–3,5 ГГц. Также наблюдается максимальная разница (13,5 дБ) значений $|S_{21}|$ в диапазоне частот 6–7 ГГц, а в диапазоне частот 7,5–8,5 ГГц изменения по частоте минимальны и не превышают 0,05 ГГц.

В результате, при положительной температуре коаксиальной камеры с жидкими растворами значения S -параметров существенно изменяются на низких частотах, чем на высоких. При этом значения ВП и вычисленные из них σ смещаются по частоте для рассматриваемых жидкостей на низких частотах, тогда как их максимальное значение сильнее изменяется с ростом частоты.

Выполнен сравнительный анализ $|S_{21}|$ жидких растворов с разным химическим составом, помещенных внутрь коаксиальной камеры, при положительных и отрицательных температурах. Поскольку электрофизические свойства воды в твердом агрегатном состоянии (лёд) с разной концентрацией солей отличаются значениями σ , то их исследование необходимо для определения льда разного происхождения в климатически сложных условиях [114, 115]. Выбраны 1% раствор NaCl и 10% раствор CaCl₂ как наиболее подходящие для имитации воздействия морской воды на элементы и устройства РЭС. Оценено влияние положительных и отрицательных температур на ВП жидких растворов используя воду без примесей и указанные выше растворы. Измерены частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с пустым и заполненным контейнером чистой водой, 1% раствором NaCl и 10% раствором CaCl₂ (рисунок 2.11), при изменении их температуры от 0°C до 50°C и от 0°C до минус 50°C.

По достижению заданной температуры, выполнялось измерение частотной зависимости $|S_{21}|$, а затем коаксиальная камера отсоединялась от измерительного приемника и вынималась наружу. Далее контейнер с раствором извлекался из коаксиальной камеры и происходила визуальная проверка агрегатного состояния раствора внутри контейнера. Данные действия проделывались для каждой интересующей температурной точки взятой с шагом 5°C диапазоне от минус 50 до 50°C.

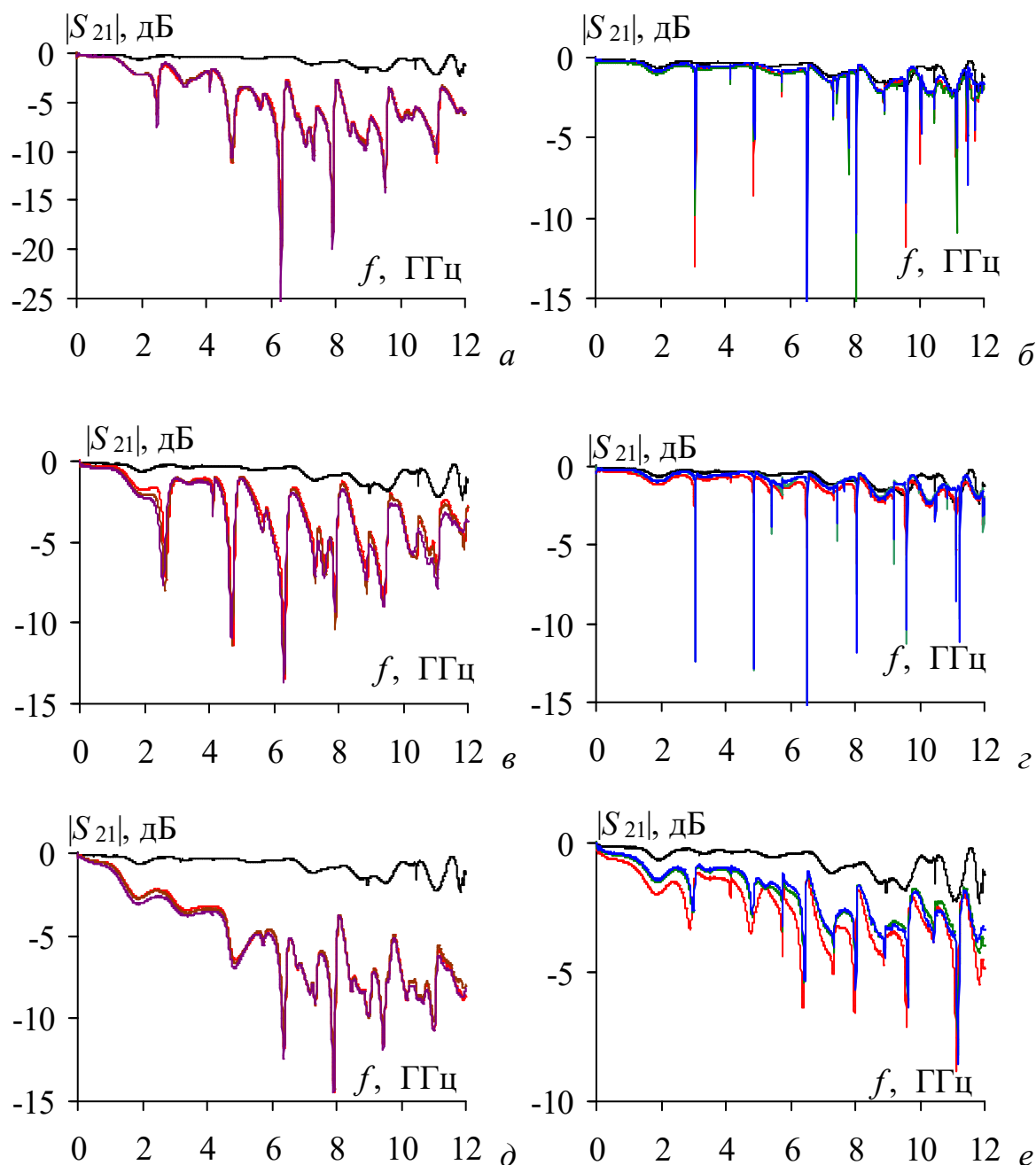


Рисунок 2.11 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ для камеры с пустым контейнером (—), заполненным чистой водой (а, б), 1% раствором NaCl (в, г) и 10% раствором CaCl_2 (д, е) в жидком (а, в, д) и твердом (б, г, е) агрегатном состояниях при температурах $T=50$ (—), 25 (—), 0 (—), -25 (—) и -50 (—) $^{\circ}\text{C}$

Из рисунка 2.11а видно, что, в среднем, значения $|S_{21}|$ плавно уменьшаются с ростом частоты до минус 7,6 дБ при 0°C и до минус 7,4 дБ при 50°C к частоте 8,8 ГГц. Из рисунка 2.11б видно, что при отрицательной температуре наблюдаются ярко выраженные локальные минимумы $|S_{21}|$, при этом усредненные значения $|S_{21}|$ плавно уменьшаются до минус 2,2 дБ при 0°C и до минус 1,7 дБ при минус 50°C . Из рисунка 2.11в видно, что при добавлении

раствора также появляются локальные минимумы значений $|S_{21}|$, при этом в локальных максимумах частотная зависимость $|S_{21}|$ принимает значения близкие к значениям, полученным для пустого контейнера, в чем проявляются признаки, частотноселективных свойств данного раствора. При этом усредненное значение $|S_{21}|$ уменьшается с ростом частоты для температуры 50°C достигает минус 5,2 дБ, а при 0°C составляет минус 4,7 дБ вблизи 9,2 ГГц. Из рисунка 2.11г видно, что для отрицательной температуры также имеется значительное количество минимумов $|S_{21}|$, тогда как усредненное значение $|S_{21}|$ плавно уменьшается до минус 1,8 ГГц при 0°C и до минус 1,6 дБ при минус 50°C . Из рисунка 2.11д видно, что значение $|S_{21}|$ плавно снижается от частоты до частоты 4 ГГц, тогда как свыше 4 ГГц появляются локальные минимумы $|S_{21}|$, несущественно отклоняющиеся от среднего значения в диапазоне частот 4–12 ГГц, составляющего минус 8,1 дБ для 50°C и минус 8 дБ для 0°C . Из рисунка 2.11е видно, что значение $|S_{21}|$ плавно снижается до частоты 2 ГГц, тогда как свыше наблюдается ярко выраженные локальные минимумы $|S_{21}|$, а при усреднение значений $|S_{21}|$ происходит его уменьшение до минус 3,3 дБ при минус 50°C и до минус 3,8 дБ при 0°C .

Выявлено, что частотные зависимости $|S_{21}|$ и их усредненные значения значительно отличаются при жидком и твердом агрегатном состоянии растворов. Таким образом, наименьшее усредненное значение $|S_{21}|$ для коаксиальной камеры с контейнером, заполненным раствором в жидком агрегатном состоянии, было получено для чистой (дистиллированной) воды, а при заполнении контейнера раствором в твердом агрегатном состоянии, было получено для водного раствора CaCl_2 , обладающим наибольшей концентрации солей. Таким образом, прослеживается связь между концентрацией солей и значением $|S_{21}|$ для жидкостей в твердом агрегатном состоянии.

Вычислены по (1.5) частотные зависимости ВП для пустого пластикового контейнера (рисунок 2.12а) и заполненного чистой водой (рисунок 2.12б) и

растворами NaCl (рисунок 2.12в) и CaCl₂ (рисунок 2.12г) в жидком и твердом агрегатных состояниях.

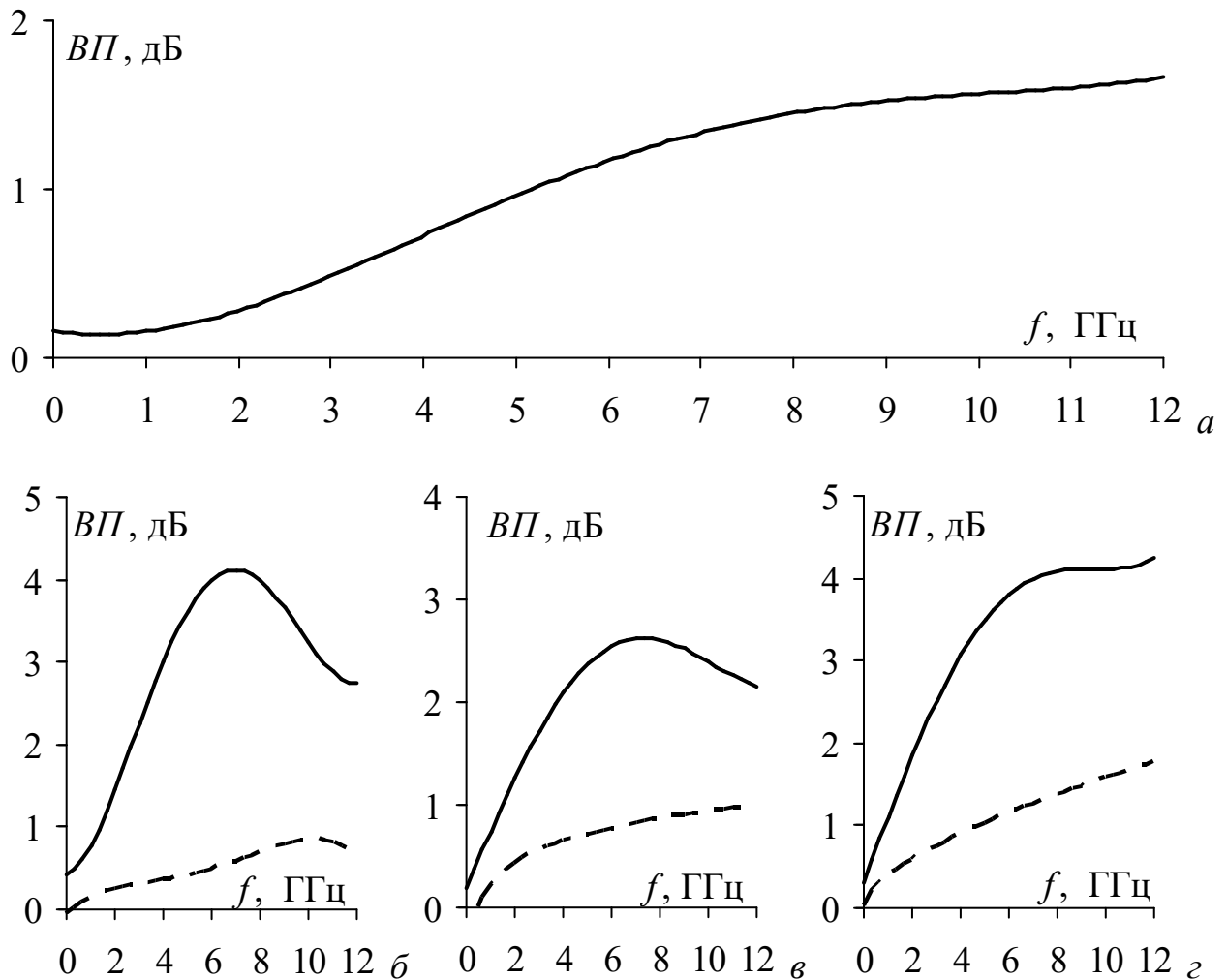


Рисунок 2.12 – Вычислены и усреднены частотные зависимости ВП для пластикового контейнера (а) с чистой водой (б) и растворами NaCl (в) и CaCl₂ (г) в жидком (—) и твердом (- -) агрегатных состояниях

Из рисунка 2.12а видно, что с ростом частоты ВП пластикового контейнера плавно увеличиваются до 1,8 дБ. Заполнение контейнера чистой водой (рисунок 2.12б) повышает максимальное значение ВП до 4,2 дБ на частоте 7 ГГц, а переход её в твердое агрегатное состояние снижает ВП не превышая 1 дБ. Из рисунка 2.12в видно, что для раствора NaCl максимальное значение ВП в жидком агрегатном состоянии составляет 2,8 дБ, а в твердом – наблюдается плавный рост до 1 дБ с увеличением частоты. Из рисунка 2.12г видно, что для раствора CaCl₂ максимальное значение ВП составило 4,2 дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц в жидком агрегатном, а в твердом состоянии происходит увеличение

значений до 1,8 дБ с ростом частоты. В результате 10% раствор CaCl_2 обладает максимальным значением ВП в широком диапазоне частот, по сравнению с чистой водой и 1% раствором NaCl .

2.2.3 Оценка вносимых потерь жидкостей при разных температурах и концентрациях химического состава

Оценены ВП жидкостей при разных температурах и концентрациях химического состава. Для этого в качестве исследуемых образцов выбраны сухие смеси в виде полимерного полисахарида (картофельный крахмал, далее – полисахарид) и активированного угля (угля с пористой внутренней структурой, далее – уголь), а также влажные смеси, полученные добавлением чистой воды, раствора NaCl и CaCl_2 в сухие смеси. Полисахарид и уголь выбраны для изучения электрофизических параметров, т.к. они могут быть использованы при создании новых материалов, обладающих радиопоглощающими свойствами.

Измерены ВАЦ R&S ZNL 20 S -параметры коаксиальной камеры с органическими материалами в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц. Контейнер использовался аналогичный контейнеру из п. 2.2, но объемом 2,5 мл. Оценено влияние химического состава органических материалов на ВП. Измерения S -параметров проводились через каждые 5°C в диапазоне температур от 30°C до минус 25°C , которые измерялись датчиком температуры размещенным внутри морозильной камеры.

Выполнены измерения частотных зависимостей S -параметров для смесей из полисахарида без жидкостей и с ними (вода, растворы NaCl и CaCl_2), а также отдельно для смеси состоящей из угля (рисунок 2.13).

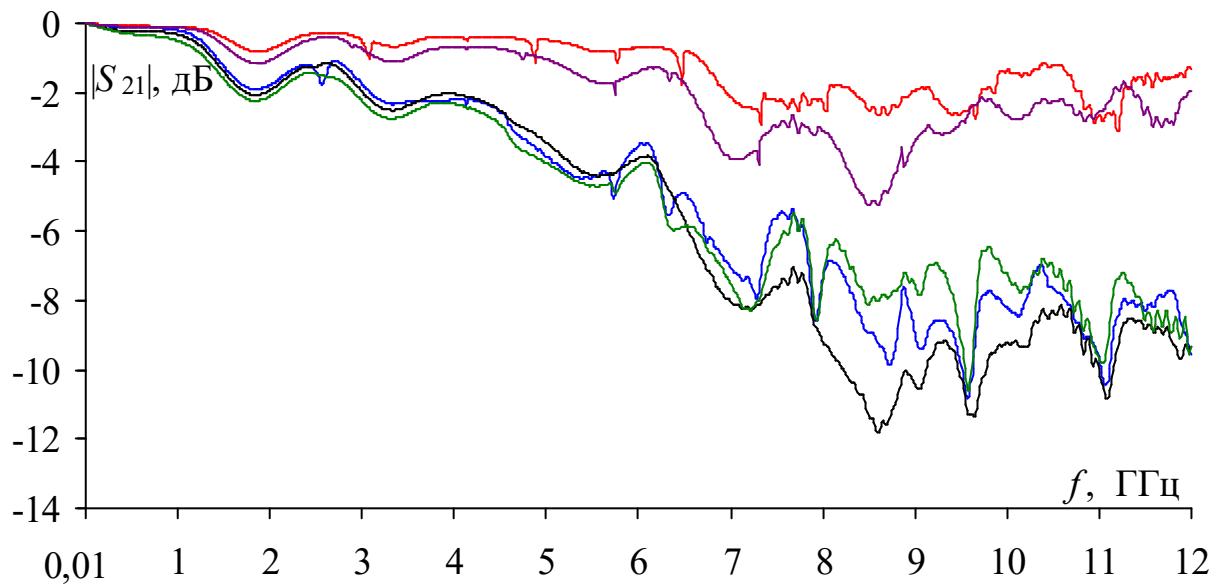


Рисунок 2.13 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с контейнером заполненным полисахаридом (—) и его смесью с водой (—), растворами NaCl (—), CaCl_2 (—) и углем (—)

Из рисунка 2.13 видно, что для полисахарида значения $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 1 и 3 дБ с ростом частоты до 6 и 12 ГГц, соответственно. Тогда как для угля значения $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 2 и 5 дБ с ростом частоты до 6 и 12 ГГц, соответственно. В результате уголь обладает большими ВП, чем полисахарид. При добавлении в полисахарид воды и жидкостей минимальное значение $|S_{21}|$ уменьшается до минус 5 дБ в диапазоне частот до 6 ГГц независимо от раствора, тогда как свыше 6 ГГц минимальное значение $|S_{21}|$ зависит от раствора, а минимум в минус 12 дБ наблюдается для раствора NaCl , тогда как для остальных растворов оно составляет минус 11 дБ. В результате, смесь из полисахарида с раствором NaCl обладает наибольшими ВП, по сравнению с водой и раствором CaCl_2 .

Измерены S -параметры коаксиальной камеры с растворами из угля и полисахарида в соотношении 1:1 и их смесью с водой, NaCl и CaCl_2 (рисунок 2.14).

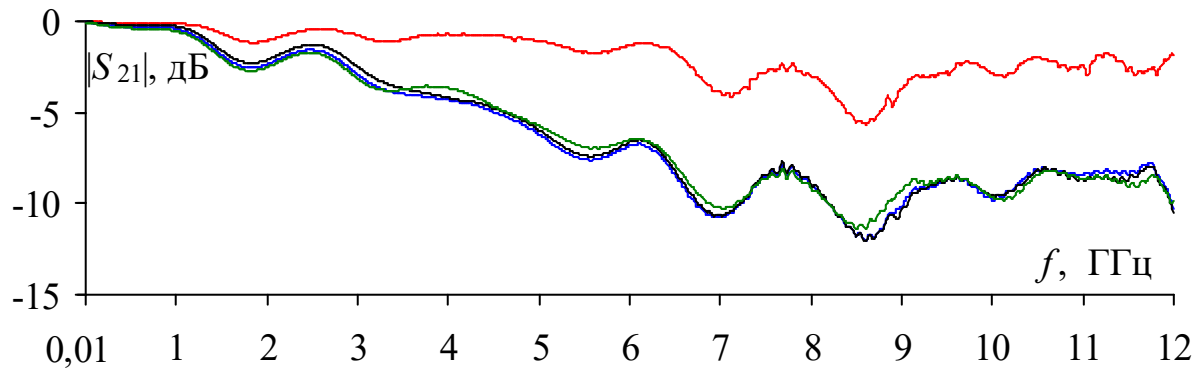


Рисунок 2.14 – Измеренные частотные зависимости значений $|S_{21}|$ для смесей полисахарид-уголь (—) и их смеси с водой (—) и растворами NaCl (—) и CaCl₂ (—)

Из рисунка 2.14 видно, что для сухой смеси значения $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 2 дБ с ростом частоты до 6 ГГц. При этом добавление в смесь воды, растворов NaCl и CaCl₂, одинаково снижает значение $|S_{21}|$ до минус 8 дБ на частотах до 6 ГГц. Свыше 6 ГГц для сухой смеси минимальное значение $|S_{21}|$ достигает минус 6 дБ, а добавление растворов существенно снижает минимальное значение $|S_{21}|$ до минус 12 дБ. В результате частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры жидкого раствора содержащего смесь из угля и полисахарида с водой, растворами NaCl и CaCl₂ близки между собой и имеют максимальное ослабление значений $|S_{21}|$, с сухой смесью из угля и полисахарида.

Вычислены ВП₃ для сухого раствора содержащего полисахарид и уголь, а также жидкого раствора с добавлением воды (рисунок 2.15).

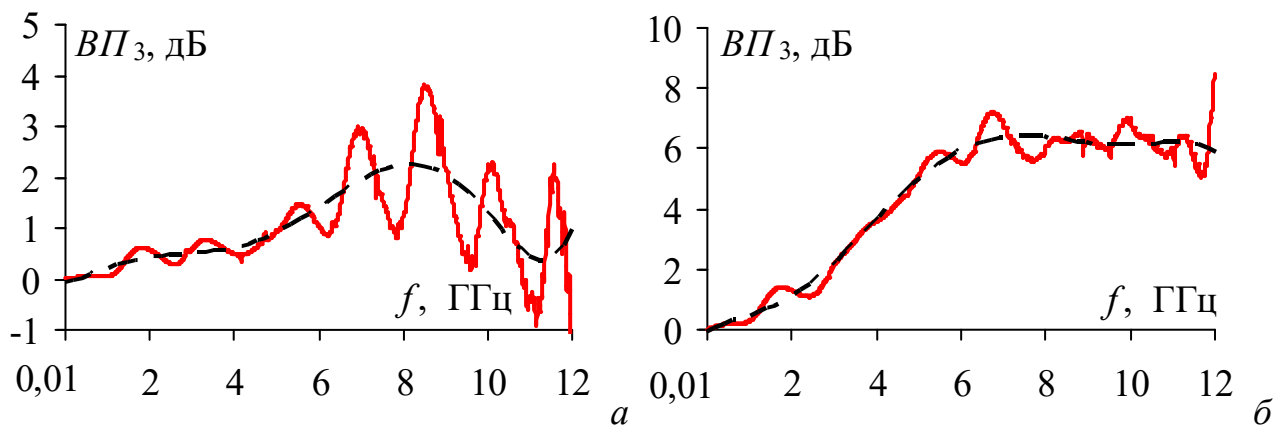


Рисунок 2.15 – Вычисленные (—) и усредненные (— —) частотные зависимости ВП для сухой смеси полисахарид-уголь (а) и с добавлением в неё воды (б)

Из рисунка 2.15а видно, что $ВП_3$ сухой смеси в диапазоне частот от 6-10 ГГц, имеет максимальное значение 4 дБ и усредненное значение до 2 дБ. Добавление воды в смесь (рисунок 2.15б) увеличивает $ВП$ до 6–7 дБ. Добавление полисахарида в смесь воды и угля необходимо, для достижения её однородности, так как в противном случае уголь будет осаждаться на дне контейнера.

Вычислены $ВП_3$ смеси из полисахарида и полисахарида с углем в соотношении 1:1, а также при добавлении в эти две смеси воды и растворов $NaCl$ и $CaCl_2$ (рисунок 2.16).

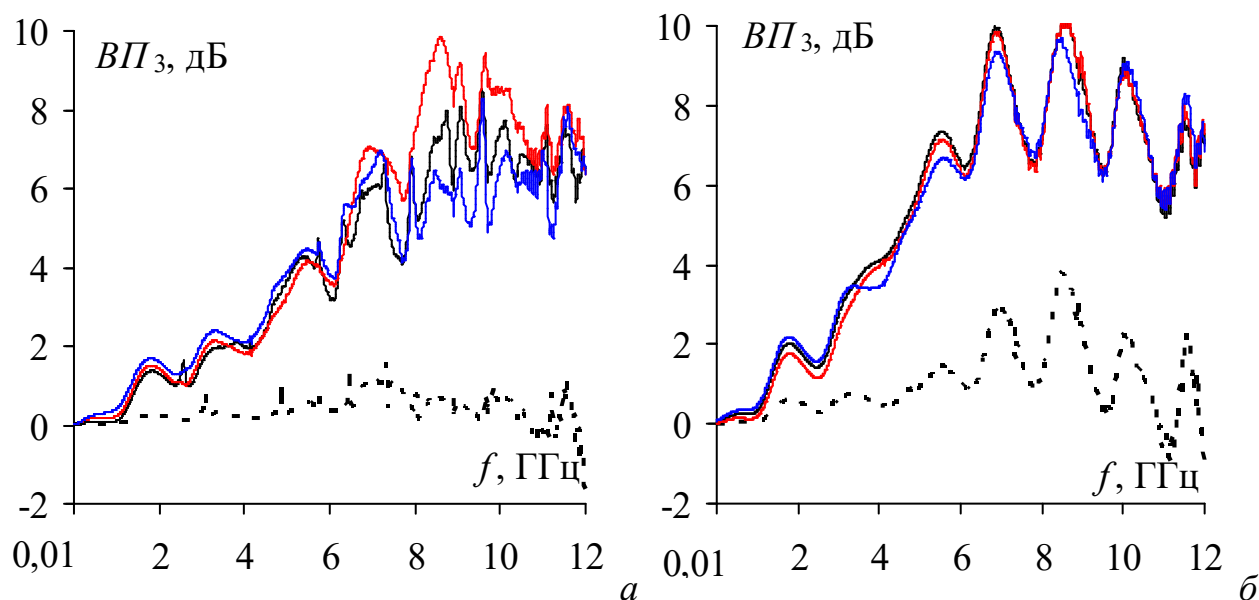


Рисунок 2.16 – Вычисленные $ВП_3$ для смесей из полисахарида без (а) и с углем (б) (---), а также при добавлении воды (—) и растворов $NaCl$ (—), $CaCl_2$ (—)

Из рисунка 2.16а видно, что полисахарид без жидкости практически не оказывает влияние на $ВП$, тогда как с ними $ВП$ значительно возрастают. Так, для полисахарида максимальное значение достигает 1 дБ, тогда как при добавлении раствора $NaCl$ увеличивается до 10 дБ. Добавление воды и раствора $CaCl_2$ повышает $ВП$ до 8 дБ. Из рисунка 2.16б видно, что смесь уголь-полисахарид повышает значение $ВП$ до 4 дБ, а добавление различных жидких растворов увеличивает $ВП$ до 10 дБ. В результате $ВП$ для смеси из

полисахарида и угля менее зависимы от типа водного раствора, чем для смеси состоящий из полисахарида.

Вычислены частотные зависимости $ВП_4$ для смесей полисахарида и полисахарид-уголь с раствором NaCl (рисунке 2.17.)

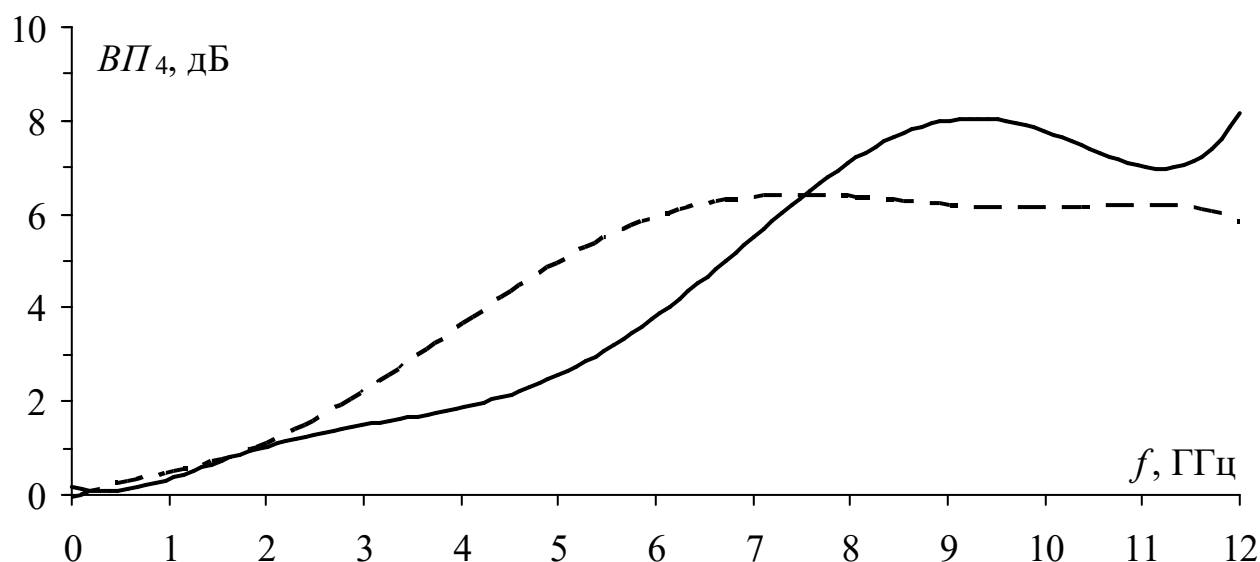


Рисунок 2.17 – Усредненные частотные зависимости $ВП_4$ для растворов NaCl с полисахаридом (—) и полисахарид-углем (— —)

Из рисунка 2.17 видно, что значения ВП увеличиваются до 6 дБ с ростом частоты до 7 ГГц для смеси полисахарид-уголь с раствором NaCl. Раствор полисахарида с NaCl увеличивает значения ВП до 8–9 дБ. В результате смесь из полисахарида с раствором NaCl и смесь полисахарид-уголь с добавлением раствора NaCl обладают разным поведением частотных зависимостей ВП.

Измерены частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с контейнером, заполненным смесями полисахарида и угля без уплотнения (механическое придание дополнительной плотности смеси давлением) и с ним (рисунке 2.18а), а также при разных концентрациях (0, 20, 50 и 100 %) полисахарида в смеси (рисунке 2.18б). Измерения проводились по схеме (рисунке 2.2а) используя морозильную камеру, скалярный анализатор цепей «Микран Р2М-40», коаксиальную камеру с размещенным внутри пластиковым контейнером.

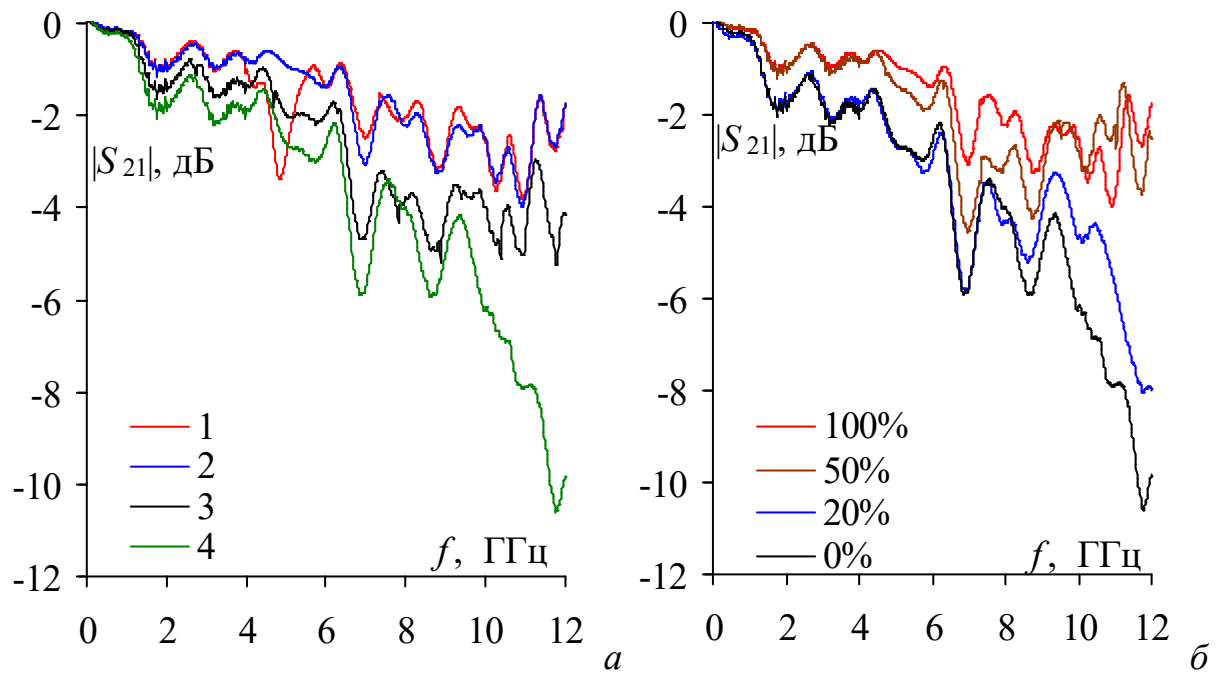


Рисунок 2.18 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ полисахарида (1, 2) и угля (3, 4) без уплотнения (1, 3) и с уплотнением (2, 4) (а), с разной концентрацией полисахарида в смеси полисахарид-уголь (б)

Из рисунка 2.18а, видно, что уплотнение угля влияет на минимум $|S_{21}|$, при этом, в среднем $\Delta|S_{21}|$ составляет 1 дБ, а наибольшая $\Delta|S_{21}|$ достигает 7 дБ, тогда как для полисахарида $\Delta|S_{21}|$ достигает 2 дБ. Из рисунка 2.18б, видно, что имеется зависимость между значениями $|S_{21}|$ и концентрацией полисахарида в смеси из полисахарид-уголь. Так при уменьшении концентрации полисахарида от 100% до 50% значение $\Delta|S_{21}|$ составляет 2 дБ. При этом минимальное $|S_{21}|$ достигает минус 11 дБ для смеси без полисахарида, а при повышении на каждые 20% полисахарида ослабление уменьшается на 1–3 дБ на частотах свыше 8 ГГц. Существенного ослабления на частотах до 8 ГГц не наблюдается и для смесей с концентрацией угля более 50%.

Оценено влияние температуры на смесь полисахарид-уголь, при разной концентрации веществ по массе (0, 20, 50, 80 и 100 %) (рисунок 2.19). Масса вещества в пластиковом контейнере составляла 2 г.

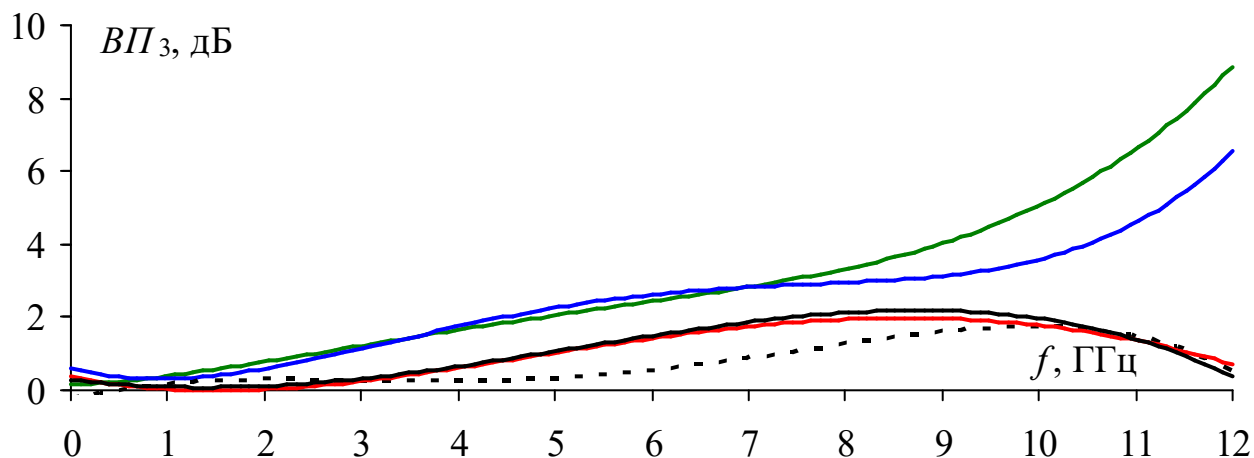


Рисунок 2.19 – Усредненные частотные зависимости $ВП_3$ сухих смесей полисахарид-уголь при концентрации угля 0 (---), 20 (—), 50 (—), 80 (—) и 100 (—) %

Из рисунка 2.19, видно, что увеличение содержания угля в смеси значительно увеличивает ВП. При достижении концентрации угля в смеси свыше 80 %, ВП увеличиваются, особенно на частотах от 8 до 12 ГГц.

Далее оценено влияние оказываемое смесью из 20% полисахарида и 80% угля и воды на $ВП_4$, поскольку смесь, состоящая только из угля теряла однородность со временем и выпадала в осадок (рисунок 2.20).

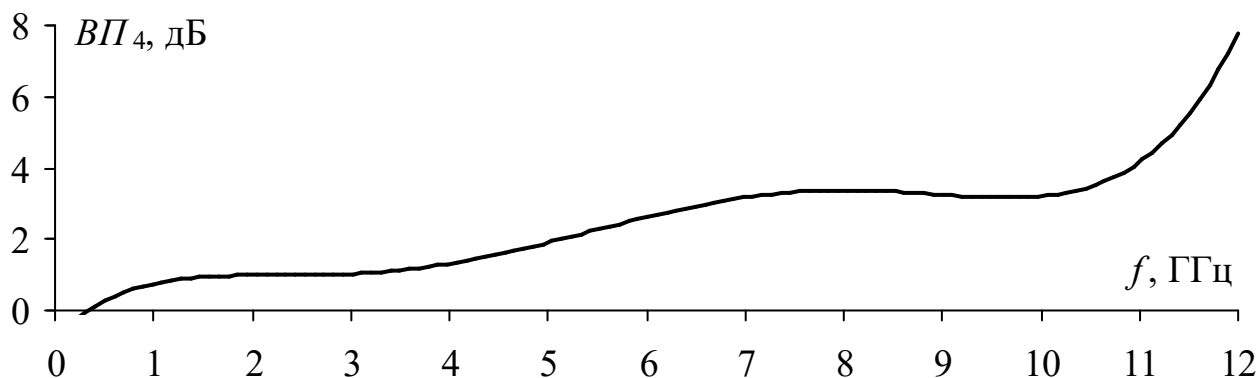


Рисунок 2.20 – Усредненные частотные зависимости $ВП_4$ для смеси содержащей 20% полисахарида и 80% угля и воды

Из рисунка 2.20 видно, что с ростом частоты ВП смеси увеличиваются. При этом существенное ослабление наблюдается в диапазоне частот от 11 до 12 ГГц с максимальным значением ВП до 8 дБ. В результате незначительное добавление полисахарида позволяет получить однородную вязкую смесь из трех компонент.

2.2.4 Анализ S -параметров коаксиальной камеры с сухими и влажными органическими материалами при разных температурах

Собрана по схеме (рисунок 2.2а) установка, включающая морозильную камеру, скалярный анализатор цепей «Микран Р2М-40», датчик температуры и влажности, а также коаксиальную камеру с размещенным внутри пластиковым контейнером (рисунок 2.21).



Рисунок 2.21 – Коаксиальная камера с исследуемым объектом внутри морозильной камеры

Измерены S -параметры (рисунок 2.22) смеси состоящей из 20% полисахарида и 80% угля при изменении температуры от 30°C до минус 25°C.

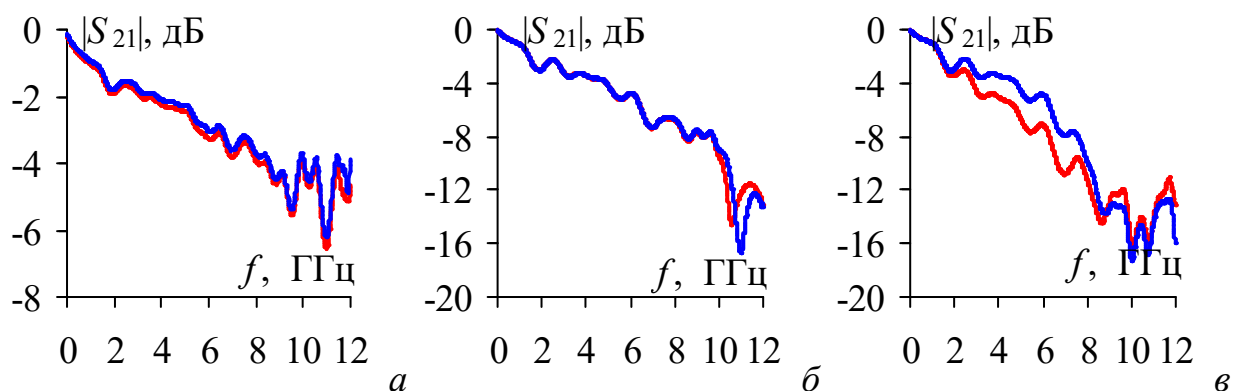


Рисунок 2.22 – Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с пустым (а), заполненным смесями полисахарид-уголь (б) и полисахарид-уголь-вода (в) контейнером при температурах минус 25 (—) и +30 (—)°C

Из рисунков 2.22а, б видно, что значения S -параметров совпадают для положительных и отрицательных температур, за исключением диапазона частот

от 10 до 12 ГГц (рисунок 2.22б) в котором минимум $|S_{21}|$ уменьшается на 2 дБ и смещается с частоты 10,5 ГГц при $T = 30^\circ\text{C}$ на частоту 11 ГГц при $T = -25^\circ\text{C}$. Из рисунка 2.22в видно, что частотные зависимости S -параметров зависят от температуры. Так, значения $|S_{21}|$ совпадают при отрицательной и положительной температурах до частоты 2 ГГц, тогда как с её ростом увеличивается $\Delta|S_{21}|$ до 2 дБ на частотах от 2 до 6 ГГц.

Из рисунка 2.22а видно, что значения $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с пустым контейнером не изменяются при изменении температуры коаксиальной камеры и контейнера. Из рисунка 2.22б видно, что при добавлении в контейнер смеси полисахарид-уголь минимальные значения $|S_{21}|$ при изменении температуры с минус 25 до 30°C изменяются на 2 дБ, а также наблюдается смещение минимума с 10,5 на 11 ГГц. Из рисунка 2.22б видно, что при добавлении в контейнер смеси полисахарид-уголь-вода значения $|S_{21}|$ при изменении температуры с минус 25 до 30°C изменяются на 2 дБ в диапазоне частот от 2 до 12 ГГц.

Используя выражение (2.3) вычислены ВП смесей при изменении температуры от минус 25 до 30°C (рисунок 2.23).

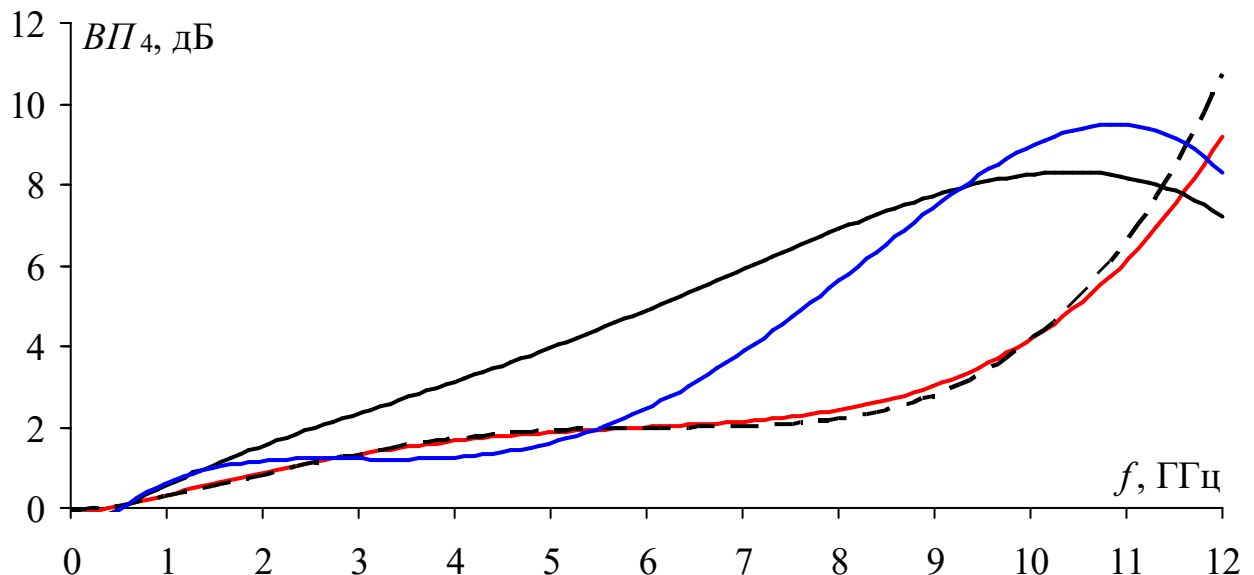


Рисунок 2.23 – Усредненные частотные зависимости $ВП_4$ для смесей полисахарида-уголь при 30°C (—) и -25°C (---), а также полисахарид-уголь-вода при 30°C (—) и -25°C (—)

Из рисунка 2.23 видно, что с ростом частоты ВП для всех смесей увеличиваются. Для смеси полисахарид-уголь значение ВП постепенно увеличивается с ростом частоты до 10 дБ при положительной и до 12 дБ при отрицательной температурах. Добавление воды в смесь полисахарид-уголь увеличивает ВП во всем диапазоне частот для положительной температуры. Тогда как, для твердой и жидкой смеси при отрицательной температуре ВП совпадают до частоты 6 ГГц, а свыше 6 ГГц для жидкой смеси значение ВП увеличиваются до 9 дБ. При положительной температуре ВП увеличиваются до 8 дБ для смеси полисахарид-уголь-вода.

В результате температура практически не оказывает влияние на значение ВП для смеси полисахарид-уголь, тогда как при добавлении воды значение ВП для положительной и отрицательной температур отличаются.

2.3 Анализ методом главных компонент S -параметров коаксиальной камеры с водными растворами при изменении температуры

Выполнен анализ частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с жидкостями содержащих различные примеси при изменении температуры окружающей среды используя МГК [107].

Определение ГК сводилось к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы измеренных S -параметров коаксиальной камеры с жидкостями и с сухими и влажными смесями. Далее выполнялась обработка полученных значений методом упругих карт для их визуализации в пространстве ГК. Это позволяет визуализировать, а затем оценить влияние температуры оказываемое на изменение электрофизических свойств разных исследуемых объектов.

Выполнена оценка влияния положительных температур на S -параметры коаксиальной камеры с жидкостями из п. 2.2.2. Результаты вычисления ГК представлены на трехмерном графике, на котором по оси OX отображены значения для групп точек, соответствующих ГК 1, по OY – ГК 2 и по OZ – ГК 3.

Расположение точек для всех измеренных значений S -параметров представлено в пространстве ГК 1 (OX) и ГК 3 (OZ) (рисунок 2.24). Выделены области для пустой коаксиальной камеры (1), камеры с пустым контейнером (2), а также для всех жидкостей, содержащихся в контейнере, помещенном в коаксиальную камеру (3).

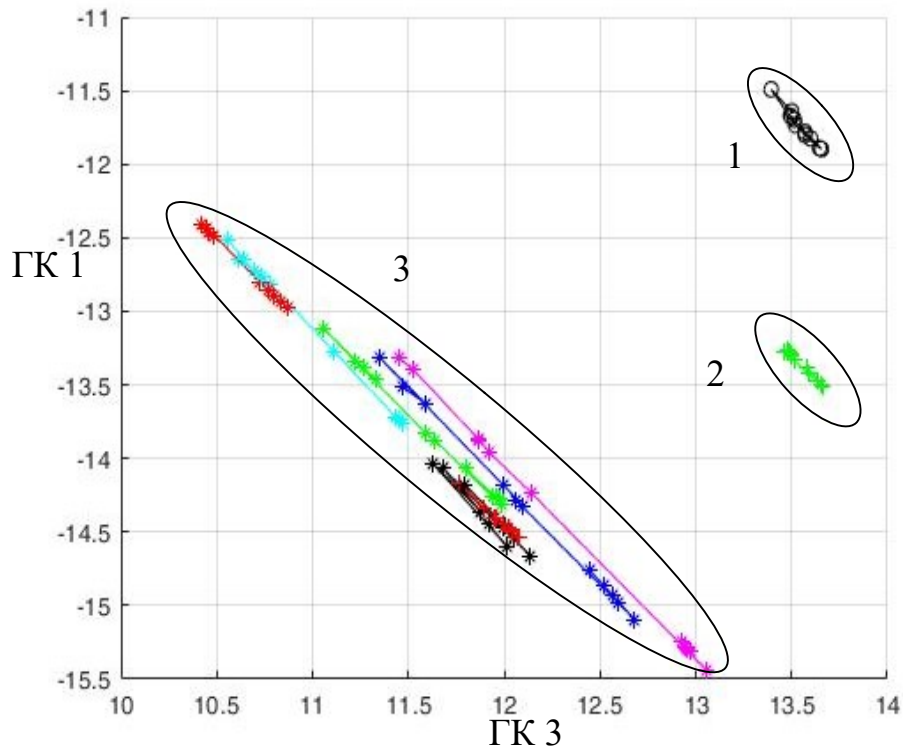


Рисунок 2.24 – Проекция $|S_{21}|$ на пространство ГК для пустой коаксиальной камеры (1), камеры с пустым пластиковым контейнером (2) и всех исследуемых жидкостей, размещенных в контейнере, расположенном внутри коаксиальной камеры (3)

На рисунке 2.24 видно, что изменение расположения точек на плоскости в большинстве случаев линейно для всех исследуемых жидкостей. Длину отрезка, на котором точки располагаются в виде линии, можно интерпретировать как влияние температуры на электрические параметры жидкости. Сравнение результатов измерения пустой коаксиальной камеры и с размещенным в ней контейнером с жидкостями показало, что температура оказывает существенное влияние на значения частотных зависимостей S -параметров. Проекция $|S_{21}|$ на пространство ГК для пустой коаксиальной

камеры и с размещенным в ней пустым контейнером представлены на рисунке 2.25.

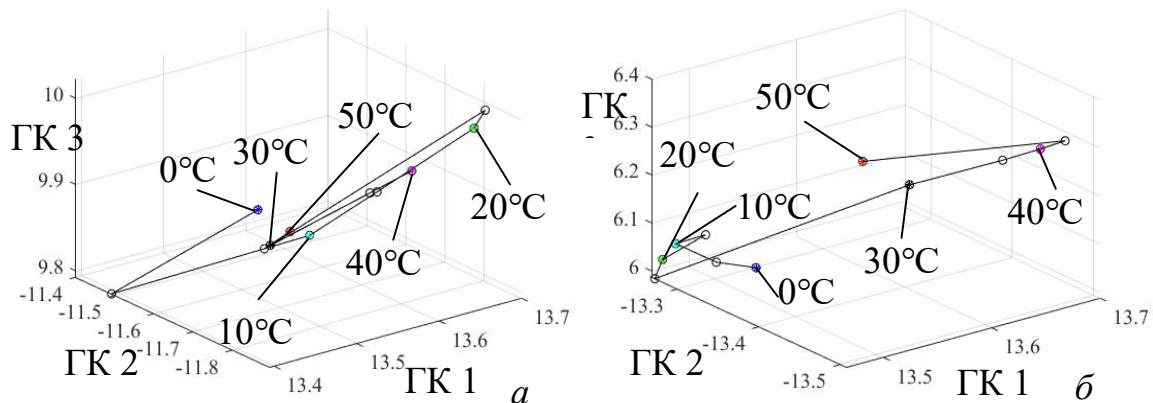


Рисунок 2.25 – Проекция $|S_{21}|$ на пространство ГК для пустой коаксиальной камеры (а) и с размещенным в ней пустым контейнером (б)

На рисунке 2.25а видно, что изменение температуры приводит к несущественным изменениям в распределении каждого значения ГК. Отклонение не превышает $\pm 0,4$ ГК2, а для ГК1 и ГК3 не более $\pm 0,3$. На рисунке 2.25б видно, что результаты измерения $|S_{21}|$ коаксиальной камеры с пустым контейнером, представленные в пространстве ГК, отличаются от результатов измерений полученных при пустой коаксиальной камере, что проявляется в виде сдвига значений по осям ГК 2 на 1,8 и ГК 3 на 3,5. При этом по оси ГК 1 смещение минимально. При этом для каждой частотной зависимости S -параметров разница между значениями не превышает $\pm 0,5$ для ГК3, а для ГК1 и ГК2 $\pm 0,25$.

Проведен анализ представленных проекций $|S_{21}|$ на пространство ГК для каждой исследуемой жидкости. Расположение точек проекции $|S_{21}|$ в пространстве ГК для чистой воды (H_2O), растворов $CaCl_2$, $NaCl$, $C_6H_{12}O_6$, Na_2SO_4 и сложного соляного раствора в зависимости от изменения температуры от 0 до 50 °C приведено на рисунке 2.26а.

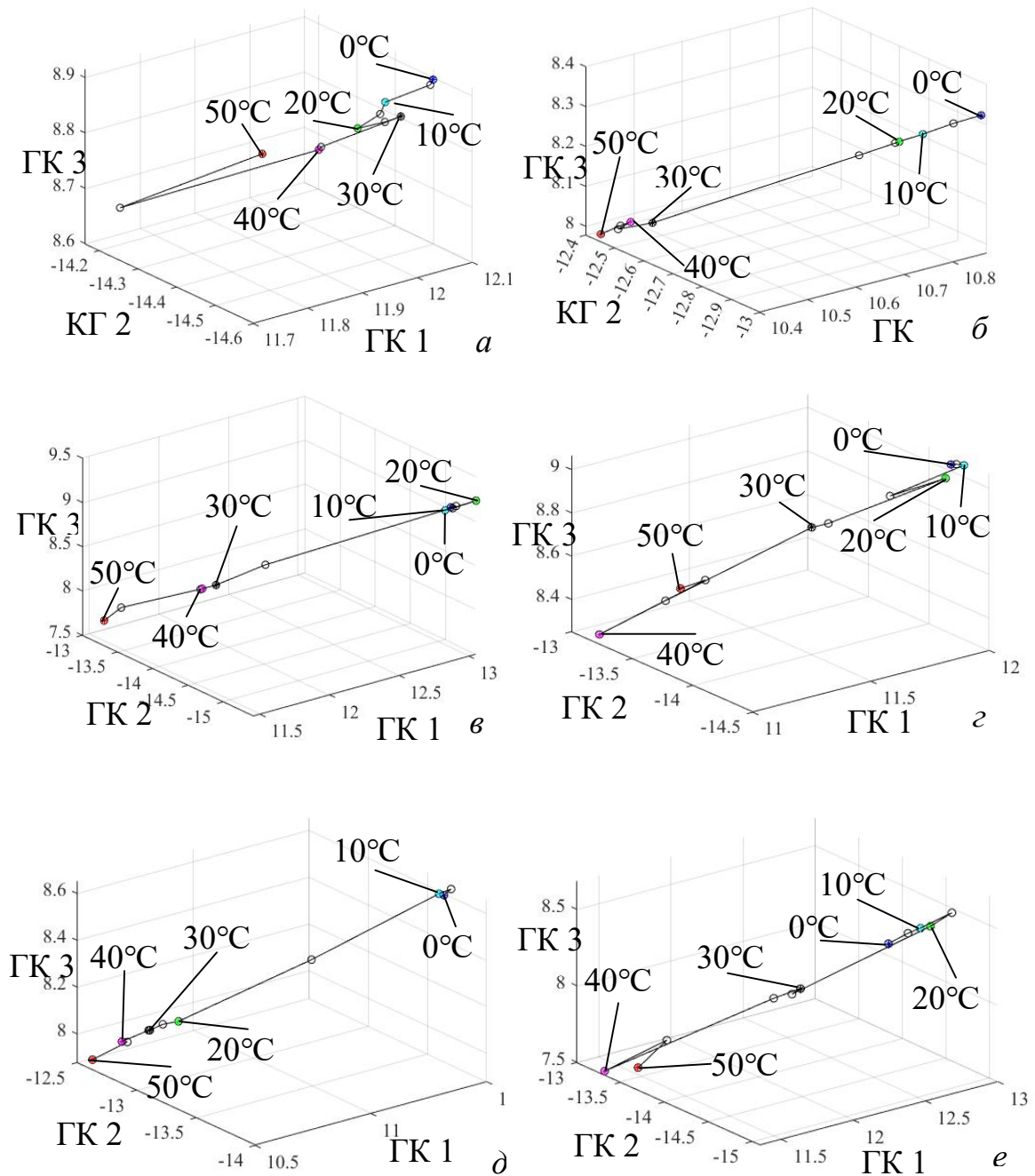


Рисунок 2.26 – Проекция $|S_{21}|$ на пространство ГК для коаксиальной камеры с размещенными внутри контейнера жидкостями: H_2O (а), $CaCl_2$ (б), $NaCl$ (в), $C_6H_{12}O_6$ (г), Na_2SO_4 (д) и сложный соляной раствор (е)

На рисунке 2.26а видно, что расположение точек $|S_{21}|$ в проекции ГК для H_2O отличается, по сравнению с пустым контейнером. При этом разница ГК для H_2O не превышает $\pm 0,4$ для GK_1 и GK_2 , а для GK_3 не более $\pm 0,3$. На рисунке 2.26б видно, что для раствора $CaCl_2$ максимальное значение по оси X различается на 0,5 в пространстве групп точек ГК для температуры $0-25^\circ C$ и $30-50^\circ C$, что говорит о влиянии температуры на изменение электрофизических

свойств жидкости. Отклонение между значениями ГК не превышает $\pm 0,6$ для ГК2, и не выше $\pm 0,5$ для ГК1 и ГК3. На рисунке 2.26в видно, что температура оказывает влияние на распределение значений проекции $|S_{21}|$ в пространстве ГК, при этом наблюдается группа точек в пространстве ГК при температуре от 0°C до 20°C , что говорит о минимальном изменении значений частотных зависимостей S -параметров, а в диапазоне температуры $25\text{--}50^\circ\text{C}$ они увеличиваются. Разница для всех значений не превышает ± 2 для ГК2 и ГК3, а для ГК1 $\pm 1,5$. На рисунке 2.26г видно, что проекции $|S_{21}|$ в пространстве ГК изменяются под влиянием температуры, а именно выделяются значения для диапазонов температуры $0\text{--}30^\circ\text{C}$ и $35\text{--}50^\circ\text{C}$. Разница между значением ГК не превышает $\pm 1,5$ для ГК2 и ± 1 для ГК1 и ГК3. На рисунке 2.26д видно, что группируются проекции частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для трех диапазонов температуры: $0\text{--}10^\circ\text{C}$, 15°C , $20\text{--}50^\circ\text{C}$. При этом значения ГК не превышает ± 1 для ГК1 и ГК3, $\pm 1,5$ для ГК2. На рисунке 2.26е видно, что группируются проекции частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для трех диапазонов температуры: $0\text{--}20^\circ\text{C}$, $25\text{--}35^\circ\text{C}$ и $40\text{--}50^\circ\text{C}$. При этом значения ГК не превышают $\pm 1,5$ для ГК1 и ГК2, и ± 1 для ГК3. Проекция ГК $|S_{21}|$, измеренных для раствора $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$, показаны на рисунке 2.27.

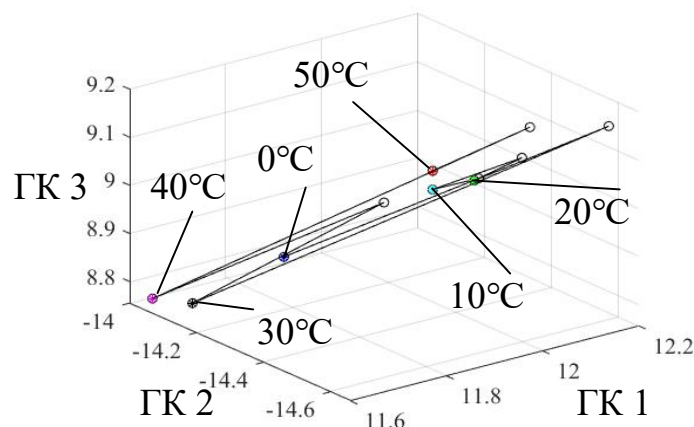


Рисунок 2.27 – Проекция $|S_{21}|$ на пространство ГК для коаксиальной камеры с размещенным внутри контейнером с раствором $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$

На рисунке 2.27 видно, что проекции $|S_{21}|$ на пространство ГК не группируются при изменении температуры, а только меняют свое значение по оси ГК 3. Возможно, это связано с тем, что раствор $C_{20}H_{21}O_4$ обладает сложным строением растворенного в нем химического соединения. При этом значения для ГК 2 не превышает $\pm 0,5$, для ГК 3 $\pm 0,6$, для ГК 1 $\pm 0,8$.

Для изучения влияния положительных и отрицательных температур выполнено отображение $|S_{21}|$ для пустой (1) коаксиальной камеры и с пустым пластиковым контейнером (2), для контейнера с водой в твердом (3) и в жидком (4) агрегатном состояниях на пространство ГК 1, ГК 2 и ГК 3 (рисунок 2.28).

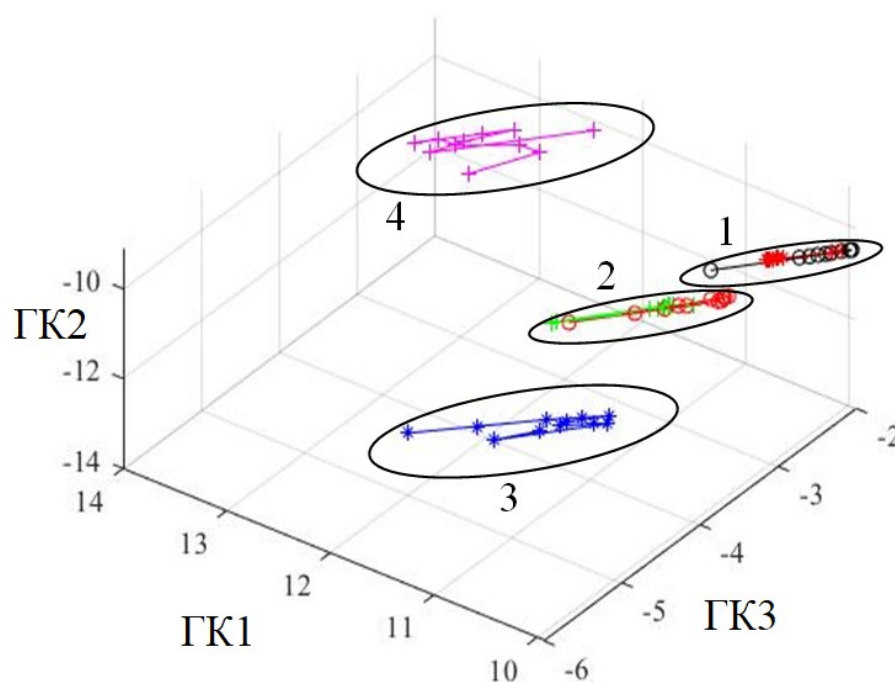


Рисунок 2.28 – Проекция $|S_{21}|$ для пустой коаксиальной камеры (1), с размещенным в ней пустым (2) и заполненным водой контейнером в твердом (3) и жидком (4) агрегатных состояниях при помощи МГК

Из рисунка 2.28 видно, что значения $|S_{21}|$ в пространстве ГК группируются в 4-х областях. Можно выделить две области, в которых располагаются проекции значений $|S_{21}|$ для пустой коаксиальной камеры и при размещении внутри нее пластикового контейнера, которые близко расположены, поскольку разница их значений $|S_{21}|$ незначительна (до 2 дБ). Для воды в жидком и твердом агрегатных состояниях значения $|S_{21}|$ разнесены между собой в

пространстве ГК. Выполнен схожий анализ МГК по влиянию температуры на растворы в жидком и твердом агрегатных состояниях (рисунок 2.29).

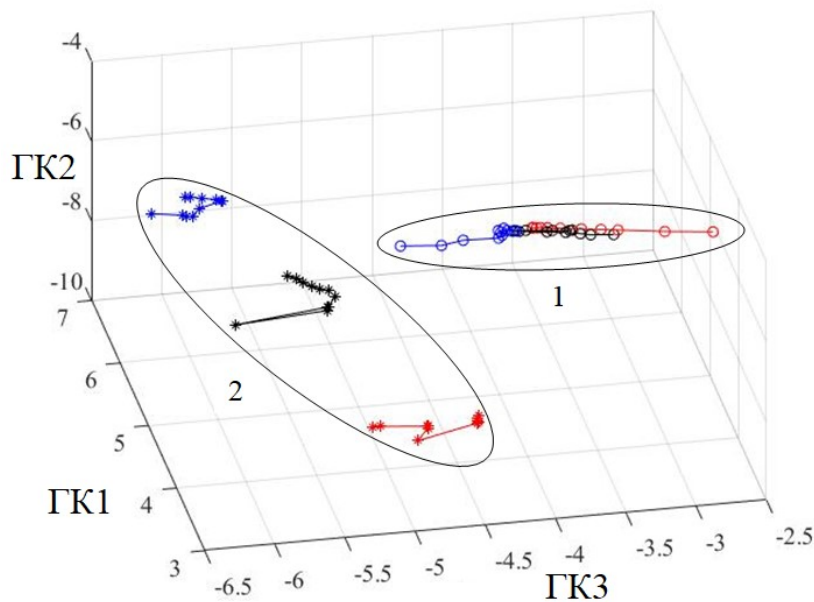


Рисунок 2.29 – Проекция $|S_{21}|$ жидкостей в жидком (1) и твердом (2) агрегатных состояниях при помощи МГК

Из рисунка 2.29 видно, что значения $|S_{21}|$ в пространстве ГК группируются в двух областях. В первой области представлены значения $|S_{21}|$ для растворов, находящихся в жидком агрегатном состоянии, также здесь располагаются проекции значений воды, растворов NaCl и CaCl₂. Во второй показаны значения $|S_{21}|$ для растворов в твердом агрегатном состоянии. Жидкости в твердом агрегатном состоянии не имеют точек пересечения между собой, но их можно выделить в пространстве ГК. Если в жидком агрегатном состоянии при разных температурах проекции их значений, в основном, отличаются по ГК 3, то в твердом агрегатном уже по трем компонентам.

Выполнен анализ влияния оказываемое температурой и водой на смесь полисахарид-уголь на частотные зависимости $|S_{21}|$ при помощи МГК (рисунок 2.30).

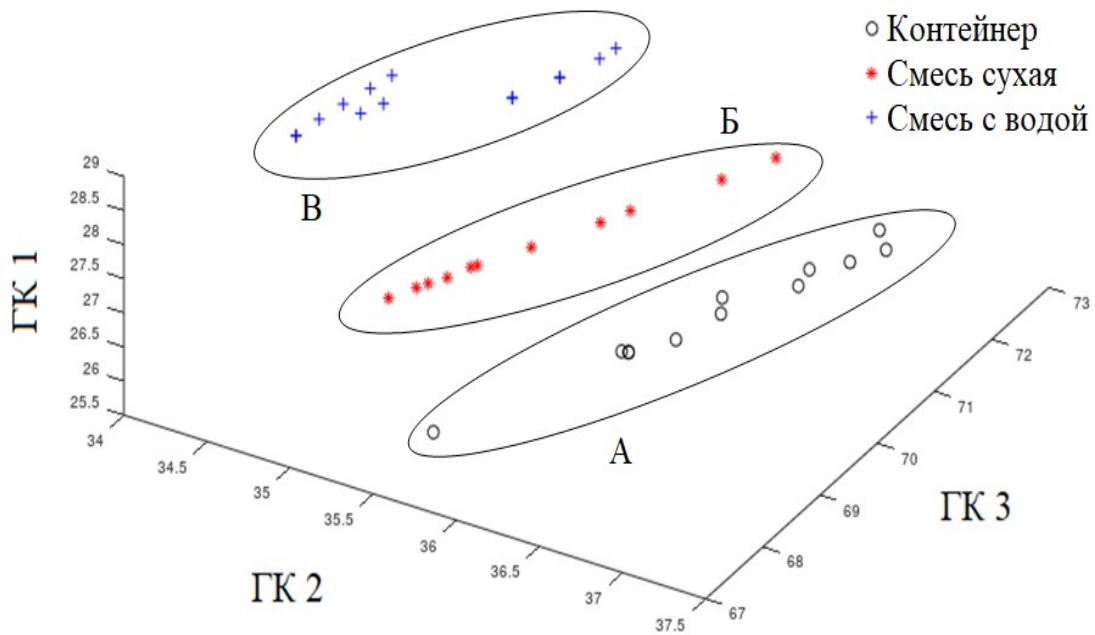


Рисунок 2.30 – Проекция $|S_{21}|$ на пространство ГК с областями значений (А – с пустым контейнером, Б – контейнер с сухой смесью, В – контейнер с влажной смесью)

Из рисунка 2.30 видно, что имеется существенная разница между расположением $|S_{21}|$ по всем трем ГК, при этом, можно выделить 3 области в которых происходит их группировка. Наибольшие отличия в отображении $|S_{21}|$ обнаружены для смеси полисахарид-уголь-вода, поскольку при отрицательной температуре вода превращается в лед, что отображено в пространстве ГК. При анализе отображений $|S_{21}|$ смеси полисахарид-уголь в пространстве ГК можно провести линию через которые соединяются все эти отображения $|S_{21}|$, тогда как для пустого контейнера лишь условно.

В результате, использование МГК дает дополнительную информацию о влиянии температуры на изменение значений частотных зависимостей S -параметров. Анализ распределения точек в пространстве ГК показал, что выделяются четыре группы исследуемых образцов по значениям всех трех ГК. Так, для группы 1 все три $ГК \leq 0,5$, для группы 2 $ГК \leq 1$, для группы 3 $ГК \leq 1,5$ и для группы 4 $ГК \leq 2$. К первой группе (со значениями $ГК \leq 0,5$) относятся такие объекты, как пустая коаксиальная камера и камера с размещенным внутри пустым пластиковым контейнером, а также контейнером содержащим H_2O . Ко второй группе (со значениями $ГК \leq 1$) относятся растворы $CaCl_2$ и

$C_{20}H_{21}O_4$. К третьей группе (со значениями $ГК \leq 1,5$) относится сложный соляной раствор и растворы $C_6H_{12}O_6$ и Na_2SO_4 . К четвертой группе (со значениями $ГК \leq 2$) относится единственный раствор $NaCl$, имеющий максимальное отличие в значениях по всем трем $ГК$. В результате, при изучении влияния температуры на растворы и жидкости необходимо учитывать значения всех трех $ГК$, за счет чего возможно будет оценить электрофизические свойства исследуемых образцов. Отклонение всех трех $ГК$ более чем на 0,5 при анализе электрофизических параметров жидкостей в широком диапазоне температуры позволяет сделать вывод о наличии в них примесей. Используя МГК наглядно показано, что частотные зависимости $|S_{21}|$ для разных жидкостей помещенных внутрь коаксиальной камеры по разному распределены в пространстве $ГК$ с учетом температуры окружающей среды и их агрегатного состояния. Поскольку при отрицательной температуре вода изменяет свое агрегатное состояние и превращается в лед, как и другие жидкости, а их отображение в пространстве $ГК$ отличалось между собой.

2.4 Основные результаты раздела

Измерены S -параметры коаксиальной камеры с водой и различными жидкостями в контейнере в диапазонах частот от 10 МГц до 12 ГГц и температур от минус 50 до 100°C. Показано, что температура существенно влияет на частотные зависимости S -параметров воды при ее нагреве до 100°C и охлаждении до минус 50°C. Выявлено, что с ростом частоты ВП повышаются до 10 дБ при положительных температурах, а при отрицательных не превышают 3 дБ, в диапазоне частот до 12 ГГц.

Разработана модель для вычисления σ воды на основе измеренных S -параметров отличающаяся вычислением уровня ВП воды в коаксиальной камере при изменении ее температуры. Разница с известными значениями σ в диапазоне частот до 6 ГГц составляет 1 См/м в диапазоне температур от 25 до 100°C и не превышает 0,5 См/м при отрицательных (минус 50°C) температурах, а при положительных (0°C) – 1,8 См/м. Достоверность и адекватность модели

для оценки σ воды при различной температуре подтверждается измеренными S -параметрами в разные дни, при разных температурах воды из одного источника, а $\Delta|S_{21}|$ не превысила 4,4 дБ. Использование метода FSV показало хорошую сходимость полученных результатов с известными значениями σ в диапазоне частот до 6 ГГц.

Разработана методика оценки ВП позволяющая учитывать влияние температуры и влажности воздуха на органические материалы, используя измеренные при разных температурах S -параметры коаксиальной камеры с органическими материалами в контейнере, и с добавлением в них разных жидкостей. Показано, что в зависимости от концентрации и состава химических веществ в жидком растворе, а также при изменении его температуры разница по частоте между минимумами $|S_{21}|$ максимальна и достигает 1,04 ГГц в диапазоне частот 2–3,5 ГГц. Показано, что химические компоненты жидкостей и органических материалов оказывают существенное влияние на частотную зависимость S -параметров при воздействии положительных и отрицательных температур.

Исследованы уровни ВП при добавлении воды и растворов NaCl и CaCl₂ в полисахарид и в смесь полисахарид-уголь. Показано, что наибольшее влияние на ВП до 10 дБ вносит полисахарид при добавлении в раствор NaCl, а наименьшее при добавлении воды и раствора CaCl₂ до 8 дБ. Добавление воды и растворов NaCl и CaCl₂ в смесь уголь-полисахарид увеличивает ВП до 10 дБ независимо от раствора. Максимальным значением ВП до 10 дБ обладает смесь полученная из 20% полисахарида и 80% угля. Повышенной зависимостью ВП от температуры обладает смесь уголь-полисахарид, которая в диапазоне частот от 10 до 12 ГГц имеет максимальное значение ВП 10 дБ при 25°C и увеличивается до 12 дБ при минус 30°C. Для смеси уголь-полисахарид-вода максимальное значение ВП плавно увеличивается до 8 дБ при 25°C, тогда как до 9 дБ при минус 30°C.

Показано, что химический состав влияет на расположение проекций измеренных частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры при разной температуре в пространстве ГК. Жидкость содержащая NaCl обладает максимальной разницей значений ГК по сравнению с другими растворами, измеренными при помощи коаксиальной камеры, что позволило сделать вывод о том, что электрофизические характеристики данного раствора наиболее зависимы от температуры. При отрицательной температуре амплитуда $|S_{21}|$ для жидкостей уменьшается, следовательно и значение ВП, но эти изменения для разных жидкостей не одинаковые, что связано с различиями их химического состава.

3 Оценка влияния температуры и влажности на электрические характеристики линий передачи

Здесь показано применение разработанной модели электропроводности воды и льда при анализе электрических параметров ЛП расположенных на ПП критичных РЭС. Разработана методика анализа электрических параметров ЛП, позволяющая учесть при проектировании ПП образование плёнки воды и слоя льда при их различных температурах. Приведена апробация методики анализа электрических параметров ЛП с использованием известных и полученных оценок электрофизических параметров воды и льда. Оценены S -параметры при полном и частичном покрытии пленкой воды и слоем льда МПЛП и КЛП [116].

3.1 Методика анализа электрических параметров линий передачи, покрытых пленкой воды и слоем льда при различных температурах

Разработана методика анализа электрических параметров ЛП покрытых плёнкой воды и слоем льда при различных температурах. Методика применима при моделировании ЛП на начальных этапах проектирования ПП критичных РЭС и позволяет учесть влияния температуры и влажности на S -параметры ЛП. Методика, включает:

1. Измерение частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с водой в контейнере в заданном диапазоне температур.
2. Вычисление частотных зависимостей ВП по (1.5) и σ по (2.1)
3. Создание геометрической модели поперечного сечения ЛП покрытой слоем воды или льда с возможностью варьирования их толщины.
4. Учет в модели электрофизических параметров металла (σ_m) и диэлектрика (ϵ_r , $\text{tg}\delta$) зависящих (при необходимости) от температуры, а также пленки воды и слоя льда в виде частотных зависимостей σ полученных по методике (п. 2.1) при разных температурах.
5. Вычисление S -параметров требуемой ЛП с использованием выбранного численного метода, например метода конечных разностей во временной

области (МКРВО) или метода конечных элементов (МКЭ), при изменении толщин пленки воды или слоя льда и изменения их электрофизических параметров в соответствии с температурой.

6. Анализ частотных зависимостей S -параметров ЛП с пленкой воды и слоем льда.

7. Применение мер по ослаблению влияния температуры и влажности на S -параметры ЛП.

Апробация методики выполнена на примере МПЛП и КЛП с разными геометрическими и электрофизическими параметрами, покрытых водой и без неё в диапазоне температур от минус 50 до 25°C в диапазоне частот от 10 МГц до 6 ГГц. Вычисление S -параметров моделей МПЛП и КЛП проводилось используя МКЭ и МКРВО.

3.2 Влияние покрытия и температуры на электрические характеристики микрополосковой линии

3.2.1 Влияние сплошного покрытия пленкой воды

Используя предложенную методику (п. 3.1), оценено влияние сплошного покрытия МПЛП пленкой воды толщиной $h_2 = 1$ мм на её S -параметры. Для этого выбрана МПЛП с $Z_0 = 50$ Ом и параметрами: $\epsilon_{r1} = 4,3$, $w = 3$ мм, $t_1 = 35$ мкм, $h_1 = 1,6$ мм и длиной 60 мм (рисунок 3.1). Температурные зависимости электрофизических параметров проводника и диэлектрика.

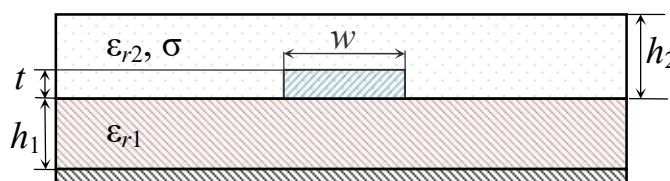


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение МПЛП со слоем воды

При моделировании использовались модели дистиллированной ($\epsilon_r = 78,4$ и $\sigma = 5,6$ мкСм/м), чистой ($\epsilon_r = 78$ и $\sigma = 1,59$ См/м) и морской воды ($\epsilon_r = 74$ и $\sigma = 3,53$ См/м), а частотнозависимая модель воды, создана на основе измеренных S -параметров и вычисленных на их основе значений σ используя

методику из п. 2.1 (рисунок 2.7б) при $T = 25^\circ\text{C}$ и $\varepsilon_r = 80$. Также использовалась частотнозависимая модель Дебая со значениями ε_r в диапазоне от 78 до 58 и σ – от 0 до 25 См/м в диапазоне частот до 12 ГГц.

Вычислены МКЭ частотные зависимости S -параметров МПЛП без слоя воды и с ним (рисунок 3.2), из которых видно, что пленка воды на поверхности МПЛП значительно влияет на S -параметры.

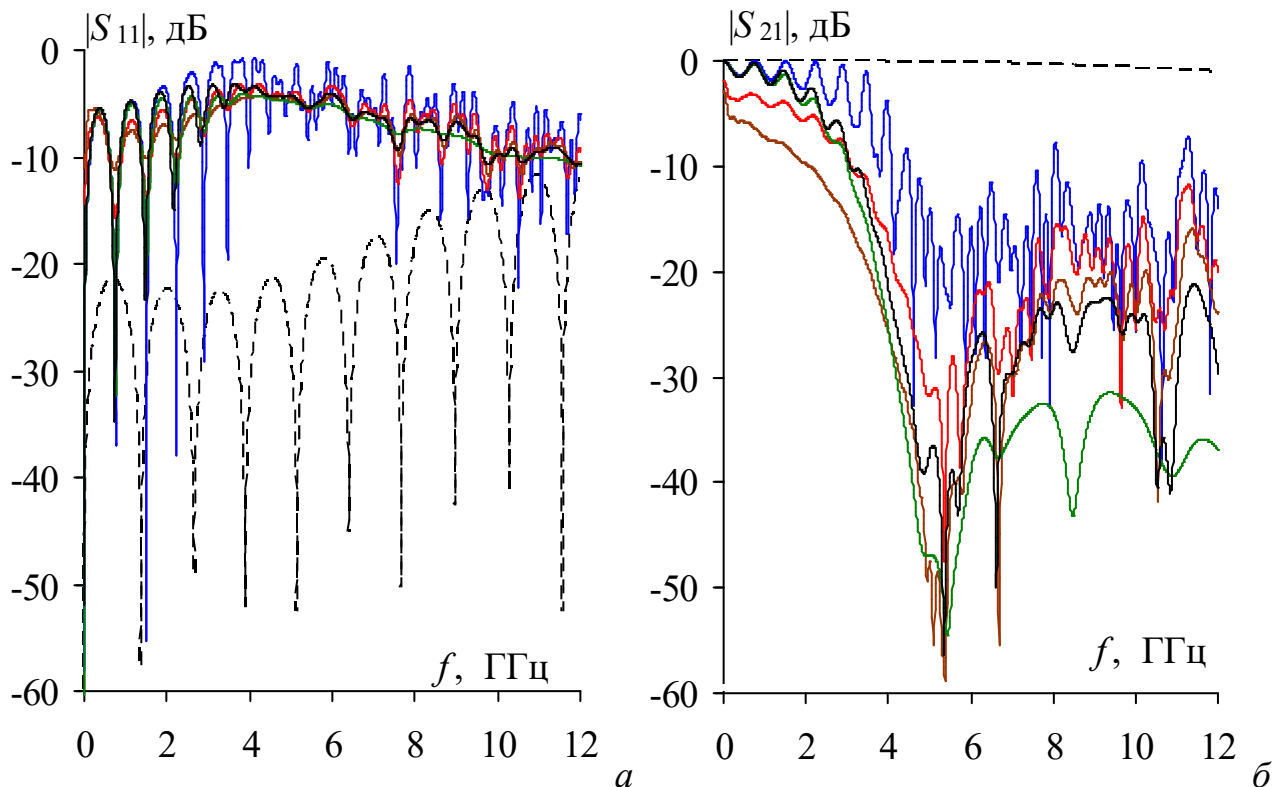


Рисунок 3.2 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) МПЛП без (— —) и со слоем дистиллированной (—), чистой (—) и морской (—) воды, с использованием моделей Дебая (—) и на основе ВП (—)

Из рисунка 3.2 видно, что без слоя воды $|S_{11}|$ меньше минус 20 дБ до частоты 6 ГГц, а с ним во всем диапазоне частот появляется множество локальных максимумов, достигающих минус 2 дБ, что указывает на рассогласование МПЛП. Также видно, что с ростом частоты $|S_{21}|$ без пленки воды не менее минус 1,2 дБ, тогда как с ней $|S_{21}|$ значительно убывает с ростом частоты и достигает минус 58 дБ (используя модель морской воды). Кроме того, МПЛП, покрытая пленкой воды, превращается в фильтр нижних частот с существенно низкими частотами среза. Так, на частотах до 3 ГГц разница $|S_{21}|$

для разных моделей воды не превышает 5 дБ, а в диапазоне 6,5–12 ГГц достигает 30 дБ. При этом, чем больше σ воды, тем меньше значение $|S_{21}|$, а наибольшие отличия в значениях S -параметров МПЛП с водой и без нее могут быть получены при использовании модели Дебая. Таким образом, для корректного учета влияния водяной плёнки на этапе проектирования ПП с МПЛП, необходимо использовать модели воды, соответствующие условиям эксплуатации ПП. Смоделировать различные условия эксплуатации РЭС с повышенной влажностью воздуха или при непосредственном ее контакте с водой возможно, используя чистую или морскую воду отличающиеся по химическому составу имея каждая собственную σ , что в зависимости от толщины слоя окажет различное влияние на электрические характеристики ПП и РЭС в целом.

Вычислены частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) пленки воды (h_2), используя модели Дебая и разработанную на основе ВП (рисунок 3.3а), а также модели чистой и морской воды (рисунок 3.3б).

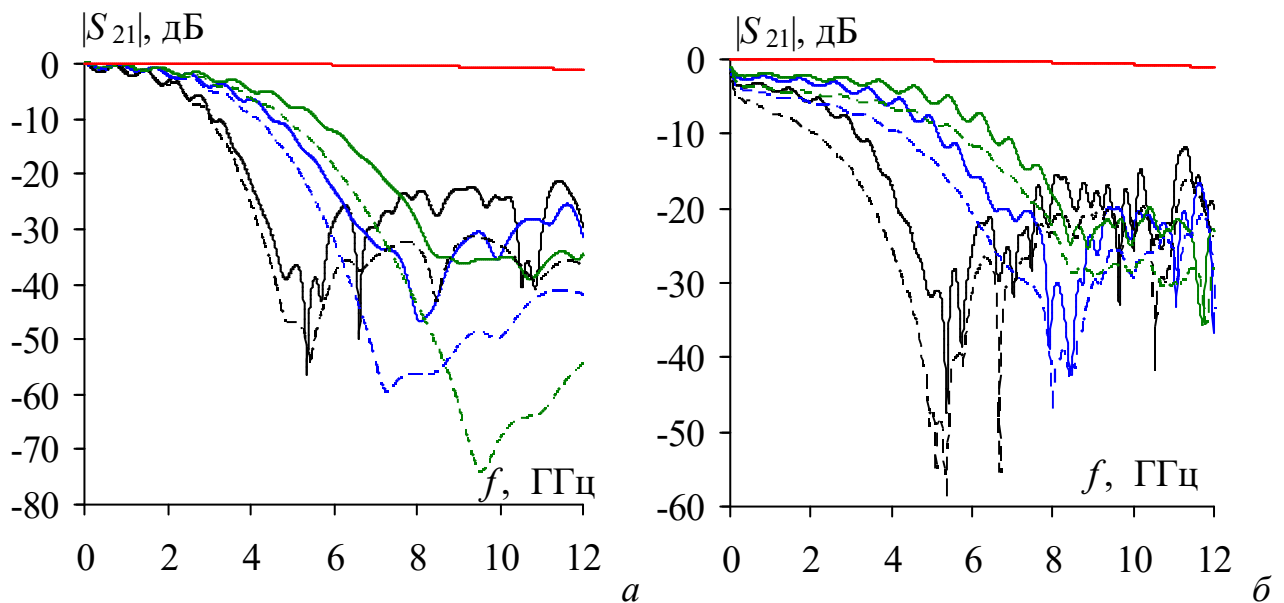


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП без (—) и с разными (— 1, — 0,5 и — 0,35 мм) толщинами пленки воды, используя модели на основе ВП (—) и Дебая (---) (а), а также модели чистой (—) и морской (---) воды (б)

Из рисунка 3.3а видно, что для модели воды на основе ВП, увеличение h_2 от 0,35 до 1 мм приводит к смещению минимумов $|S_{21}|$ по амплитуде с минус 39 до минус 56 дБ и частоте с 5–6 до 10–11 ГГц. Применяя модель Дебая минимумы $|S_{21}|$ смещаются по амплитуде с минус 53 до минус 74 дБ и частоте с 5–6 до 9–10 ГГц. В результате модель Дебая оказывает большее влияние на $|S_{21}|$, по сравнению с моделью воды на основе ВП, что может быть связано с высоким значением σ . Также из рисунка 3.3а видно, что свыше 5 ГГц значения $|S_{21}|$ не превышают минус 20 дБ для модели со слоем воды в 1 мм на основе ВП и минус 30 дБ для модели Дебая. Уменьшение слоя воды до 0,35 мм приводит к сдвигу частоты среза (с 3,0 до 1,7 ГГц) МПЛП и свыше 8 ГГц $|S_{21}|$ не превышает минус 30 дБ для модели на основе ВП и минус 40 дБ для модели Дебая. Толщина слоя воды влияет на $|S_{21}|$ как по амплитуде, так и по частоте, и чем она больше, тем частота среза меньше, а крутизна $|S_{21}|$ выше. Увеличение толщины слоя воды с 0,35 до 1 мм смещает частоту среза с 3 до 1,7 ГГц.

Из рисунка 3.3б видно, что для модели чистой воды наблюдаются заметные изменения значений $|S_{21}|$, тогда как для модели морской воды они менее заметны. Для модели чистой воды увеличение h_2 с 0,35 до 1 мм снижает минимумы $|S_{21}|$ с минус 36 до минус 48 дБ, которые смещаются по частоте с 5–6 ГГц до 11–12 ГГц. Частоты среза (108, 1260 и 3048 МГц) для модели МПЛП с морской водой смещаются в область низких частот при увеличении слоя воды (от 0,35 до 1 мм). Для морской воды аналогичное увеличение толщины слоя $|S_{21}|$ приводит к ослаблению амплитуды (с –36 до –59 дБ) и смещению частоты (с 5–6 ГГц до 11–12 ГГц). При этом частоты среза (24, 84 и 132 МГц) для модели МПЛП с морской водой смещаются в область низких частот при увеличении слоя воды (от 0,35 до 1 мм). Толщина слоя воды в 0,35 мм снижает значения $|S_{21}|$ свыше 8 ГГц до минус 20 дБ для модели чистой воды, а для морской воды до минус 25 дБ. Максимальные значения $|S_{21}|$ выше 5 ГГц для слоя в 1 мм не превышают минус 10 дБ для модели чистой воды, тогда как для морской воды минус 15 дБ.

В результате, увеличение толщины с 0,35 до 1 мм слоя воды существенно влияет на частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП, что может привести к ослаблению полезных и помеховых сигналов в линии на высоких частотах с изменением её частоты среза в широких диапазонах.

3.2.2 Влияние частичного покрытия пленкой воды

В условиях повышенной влажности на поверхности ПП может образовываться неравномерный слой воды или льда, что может привести к ее рассогласованию. Созданы модели МПЛП, представленные продольным (рисунок 3.4а) и поперечным (рисунок 3.4б) сечениями, при неравномерном покрытии поверхности МПЛП пленкой воды. В первом случае пленка воды создает неоднородное поперечное сечение МПЛП, а во втором – однородное с неполным покрытием.

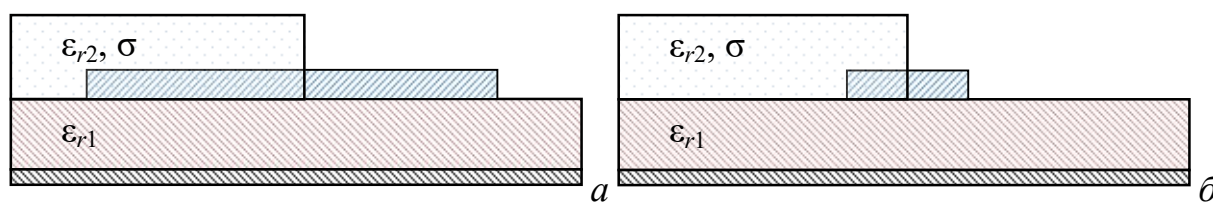


Рисунок 3.4 – Продольный (а) и поперечный (б) сечения МПЛП, при их неравномерном покрытии пленкой воды

Используя МКЭ, вычислены частотные зависимости S -параметров моделей МПЛП с толщиной слоя воды $h_2 = 1$ мм, создающего неоднородность поперечного сечения (рисунки 3.5а–в) и однородное с неполным покрытием (рисунки 3.5г, д) МПЛП.

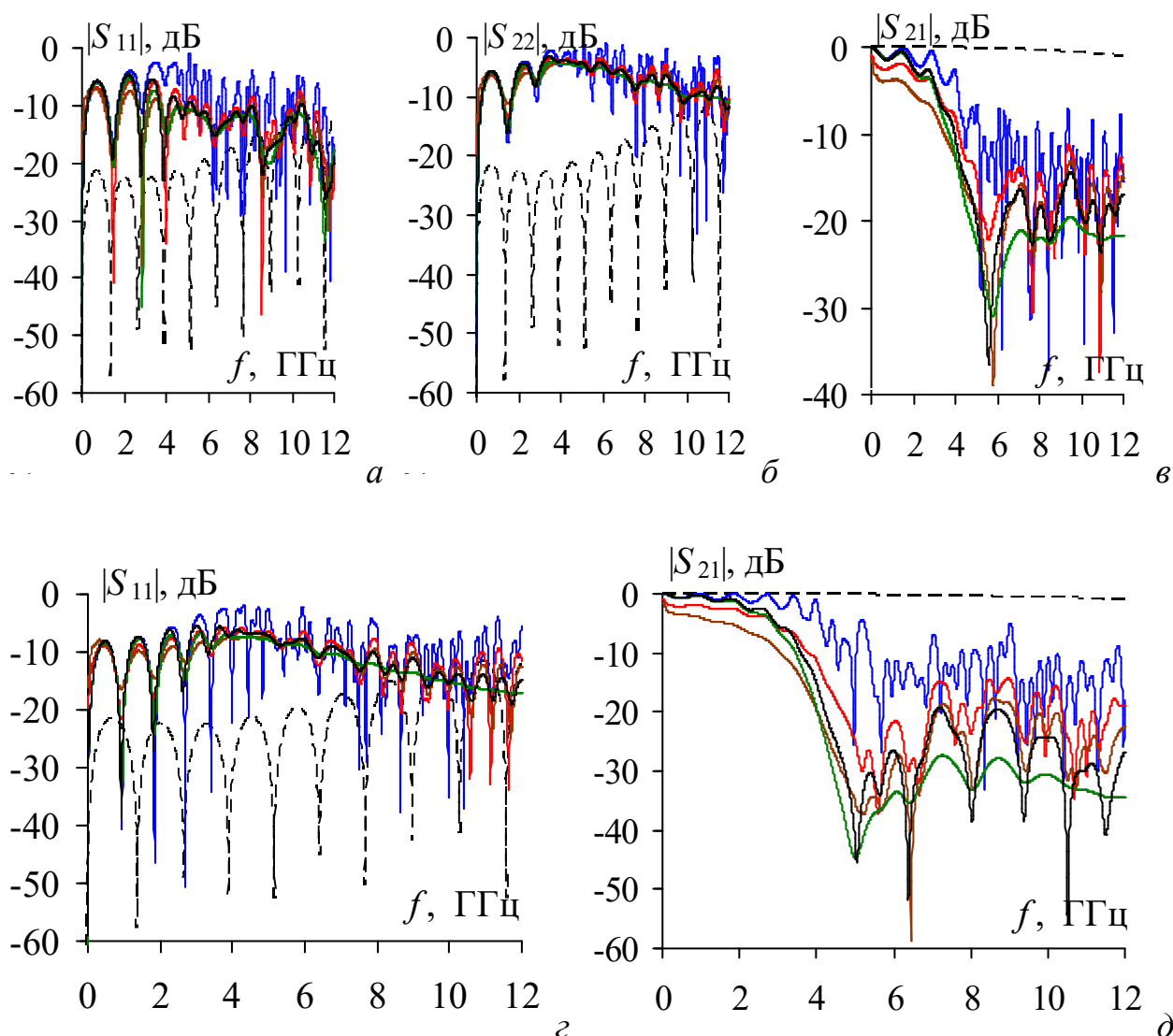


Рисунок 3.5 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а, г), $|S_{22}|$ (б) и $|S_{21}|$ (в, д) МПЛП без (---) и со слоем дистиллированной (—), чистой (—) и морской (—) воды, с использованием моделей Дебая (—) и на основе ВП (—), создающего неоднородность поперечного (а–в) и продольного сечений (г, д) МПЛП

Из рисунков 3.5а, б видно, что пленка воды, создающая неоднородность поперечного сечения МПЛП, значительно влияет на её S -параметры, при этом измерения $|S_{11}|$ выполнялись со стороны МПЛП, покрытой пленкой воды. Таким образом, между значениями $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ наблюдается расхождения, а количество максимумов $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ до частоты 3 ГГц (вблизи 0,8 и 2,2 ГГц) уменьшается в 2 раза, по сравнению с частотной зависимостью S -параметров из рисунка 3.2. Свыше 3 ГГц значения максимумов $|S_{11}|$ достигают минус 10 дБ, тогда как для $|S_{22}|$ минус 20 дБ. В результате, при появлении воды на поверхности МПЛП, создающей неоднородность поперечного сечения,

происходит изменение волнового сопротивления МПЛП, и рассогласование её входного и выходного сопротивлений. Из рисунка 3.5в видно, что частотная зависимость $|S_{21}|$ достигает минус 39 дБ при нанесении воды на один из портов, тогда как при нанесении воды на оба порта $|S_{21}|$ составляет минус 58 дБ (рисунок 3.2).

Из рисунка 3.5г видно, что частичное нанесение пленки воды, с неполным покрытием МПЛП, значительно влияет на ее S -параметры, что проявляется в значительном увеличении количества локальных максимумов и минимумов на частотной зависимости $|S_{11}|$. При этом из рисунка 3.5д видно, что $|S_{21}|$ уменьшается до минус 59 дБ, что схоже с результатами, полученными при неполном покрытии пленкой воды на поверхности МПЛП. При этом для морской и на основе ВП моделей воды, выявлен минимум $|S_{21}|$ минус 59 дБ на частотах вблизи 6–7 ГГц.

Вычислены частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) пленки воды (h_2), используя модели Дебая и разработанную на основе ВП, а также модели чистой и морской воды (рисунок 3.6). Показано (рисунок 3.6а), что при уменьшении толщины слоя воды h_2 с 1 до 0,35 мм минимумы значений $|S_{21}|$ незначительно изменяются на 1 дБ (с –38 до –39 дБ) и смещаются по частоте от 5–6 ГГц до 10–11 ГГц для модели воды на основе ВП, а для модели Дебая минимумы $|S_{21}|$ уменьшаются с минус 32 до минус 45 дБ и растут по частоте с 5–6 ГГц до 10–11 ГГц. Уменьшение толщины слоя h_2 с 1 до 0,35 мм повышает частоту среза с 2,8 до 4,3 ГГц для модели воды на основе ВП, а для модели Дебая с 2,1 до 3,9 ГГц. Анализ максимумов $|S_{21}|$ показал, что для модели на основе ВП значение $|S_{21}|$ не превышает минус 15 дБ свыше 5 ГГц для слоя в 1 мм, а для модели на основе Дебая максимальное значение $|S_{21}|$ не превышает минус 20 дБ. При уменьшении толщины слоя воды до 0,35 мм максимальное значение $|S_{21}|$ свыше 10 ГГц не превышает минус 24 дБ, а для модели Дебая минус 32 дБ.

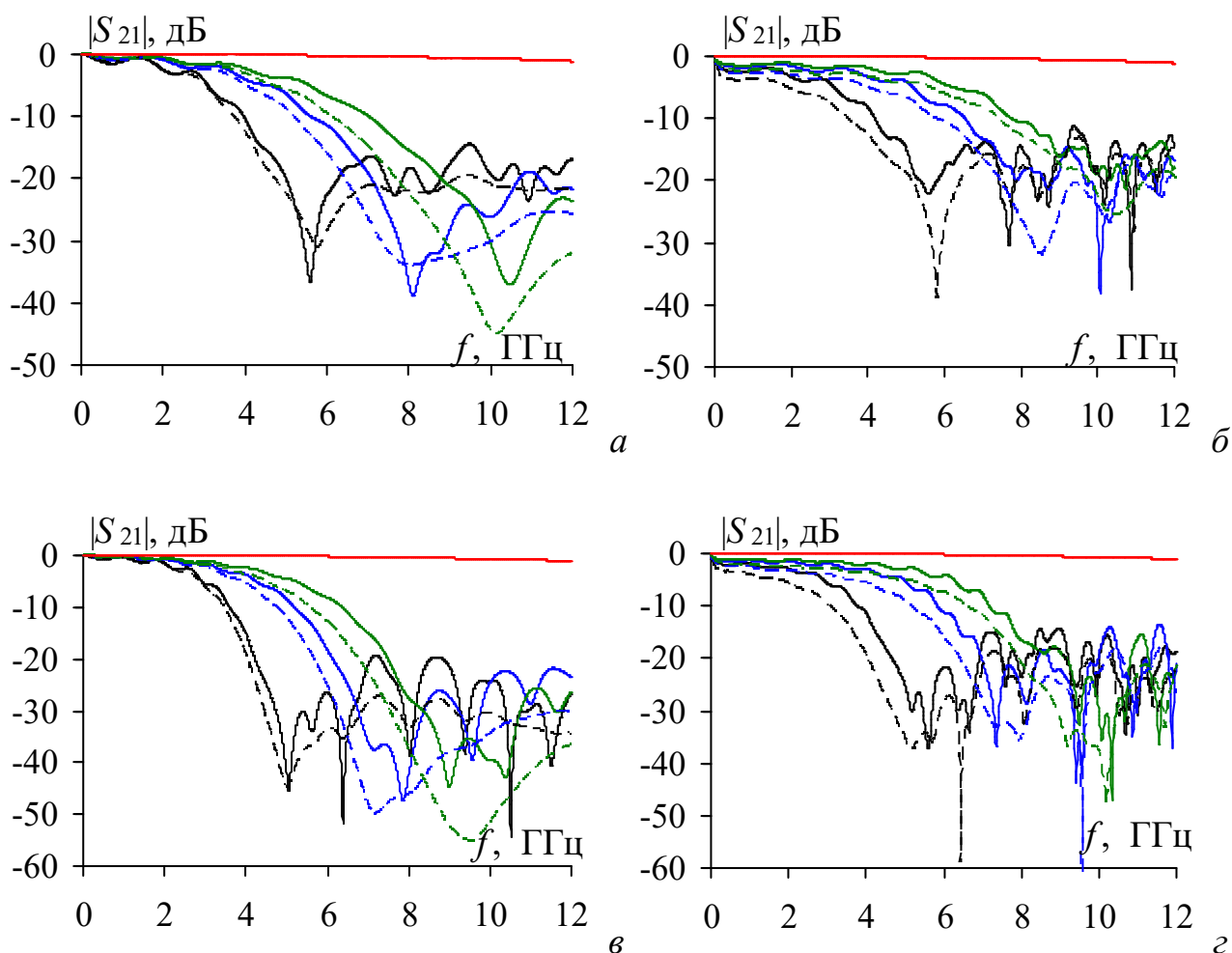


Рисунок 3.6 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП без (—) и с разными (— 1, — 0,5 и — 0,35 мм) толщинами пленки воды, используя модели на основе ВП (—) и Дебая (---) (а), а также модели чистой (—) и морской (---) воды (б) при неоднородных поперечном (а, б) и продольном (в, г) сечениях МПЛП

Из рисунка 3.6б видно, что изменение толщины пленки воды h_2 с 1 до 0,35 мм уменьшает $|S_{21}|$ с минус 31 дБ до минус 39 дБ и смещает их по частоте с 7–8 ГГц до 10–11 ГГц. Кроме того, присутствует минимум (–39 дБ) $|S_{21}|$ на частоте 10,9 ГГц при h_2 в 1 мм, который отсутствует при равномерном нанесении воды на поверхность МПЛП. В случае морской воды значения $|S_{21}|$ возрастают от минус 39 до минус 26 дБ и смещаются по частоте с 5–6 ГГц до 10–11 ГГц. Уменьшение толщины слоя воды h_2 с 1 до 0,35 мм смещает частоту среза с 1,9 до 3,9 ГГц для модели чистой воды, а для модели морской воды с 0,1 до 2,7 ГГц. Максимальные значения $|S_{21}|$ выше 5 ГГц для слоя толщиной 1 мм не превышают –12 дБ для модели чистой воды, а для морской воды минус

14 дБ. Уменьшение толщины слоя воды до 0,35 мм снижает $|S_{21}|$ до минус 15 дБ выше 8 ГГц для модели чистой воды, а для морской до минус 18 дБ.

Из рисунка 3.6в видно, что при уменьшении толщины слоя воды h_2 с 1 до 0,35 мм минимумы значений $|S_{21}|$ увеличиваются с минус 54 дБ до минус 45 дБ и смещаются по частоте от 10–11 ГГц до 9–10 ГГц для модели воды на основе ВП, а для модели Дебая минимумы $|S_{21}|$ уменьшаются с минус 44 до минус 55 дБ и растут по частоте с 5–6 ГГц до 9–10 ГГц. Уменьшение толщины слоя h_2 с 1 до 0,35 мм повышает частоту среза с 2,7 до 4,4 ГГц для модели воды на основе ВП, а для модели Дебая с 2,2 до 3,6 ГГц. Анализ максимумов $|S_{21}|$ показал, что для модели на основе ВП значения $|S_{21}|$ не превышают –19 дБ выше 5 ГГц для слоя толщиной в 1 мм, тогда как у модели на основе Дебая максимальное значение $|S_{21}|$ не превышает минус 26 дБ. При уменьшении толщины слоя воды до 0,35 мм максимальное значение $|S_{21}|$ выше 9 ГГц не превышает минус 25 дБ, а для модели Дебая минус 35 дБ.

Из рисунка 3.6г видно, что изменение толщины слоя воды h_2 от 1 до 0,35 мм уменьшает $|S_{21}|$ с минус 47 дБ до минус 37 дБ и смещает их по частоте с 5–6 ГГц до 10–11 ГГц. В случае морской воды значения $|S_{21}|$ возрастают от минус 59 до минус 48 дБ и смещаются по частоте с 6–7 ГГц до 10–11 ГГц. Уменьшение толщины слоя воды h_2 с 1 до 0,35 мм смещает частоту среза с 2,0 до 5,3 ГГц для модели чистой воды, а для модели морской воды с 0,1 до 2,6 ГГц. Максимальные значения $|S_{21}|$ выше 5 ГГц для слоя толщиной 1 мм не превышают минус 15 дБ для модели чистой воды, а для морской воды –18 дБ. Уменьшение толщины слоя воды до 0,35 мм снижает $|S_{21}|$ до минус 15 дБ выше 9 ГГц для модели чистой воды, а для морской до минус 20 дБ.

3.2.3 Влияние сплошного покрытия слоем льда

Отрицательная температура окружающей среды меняет агрегатное состояние воды, образуя из нее лед, что окажет иное влияние на S -параметры МПЛП и электрические характеристики ПП в целом. Также, конденсируемая вода на ПП может содержать разные примеси, которые при моделировании

необходимо учитывать. Выполнено моделирование МПЛП со слоем льда, представленного созданной моделью с $\varepsilon_{r2}=3,2$, и σ вычисленной на основе ВП при температуре минус 50°C, а также моделью чистого льда, для которой σ не учитывалась, а для модели электропроводящего льда $\sigma = 1$ См/м во всем диапазоне частот. Используя МКЭ, вычислены частотные зависимости S -параметров (рисунок 3.7) разных моделей МПЛП со слоем льда толщиной $h_2 = 1$ мм.

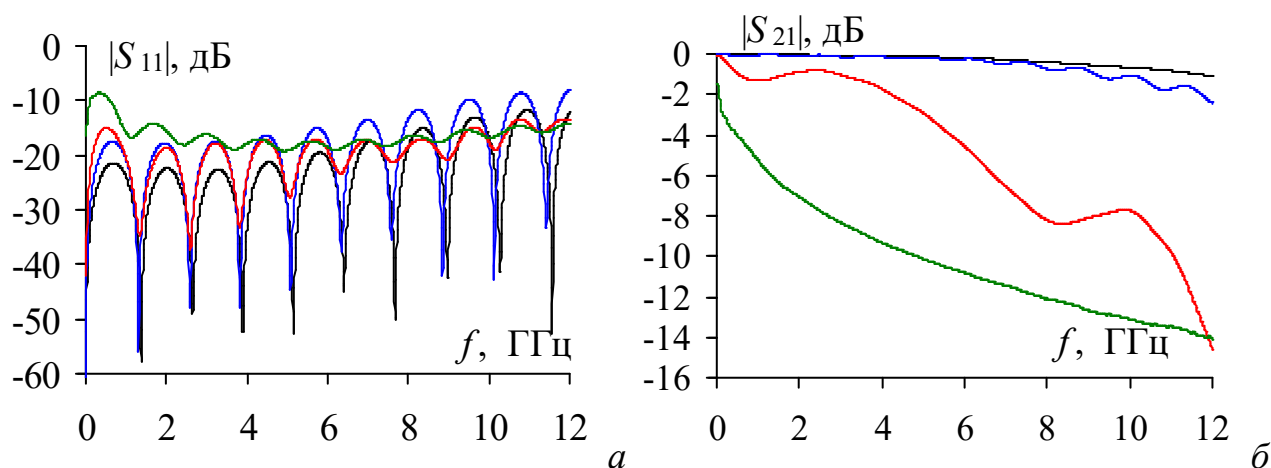


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) МПЛП (—) с использованием моделей чистого (—), электропроводящего (—) и на основе ВП (—) льда

Из рисунка 3.7а видно, что частотные зависимости $|S_{11}|$ вне зависимости от модели льда больше уровня минус 20 дБ и лед меньше оказывает влияния на электрические характеристики МПЛП. Из рисунка 3.7б видно, что с ростом частоты $|S_{21}|$ существенно уменьшается (до минус 14 дБ) с ростом частоты для моделей электропроводящего и на основе ВП льда, а для модели чистого льда разница не превышает 1 дБ. В результате слой чистого льда минимально влияет на $|S_{21}|$ МПЛП.

Вычислены МКЭ частотные зависимости $|S_{21}|$ для разных моделей льда (рисунок 3.8) при изменении его толщины слоя $h_2 = 1; 0,5; 0,35$ мм.

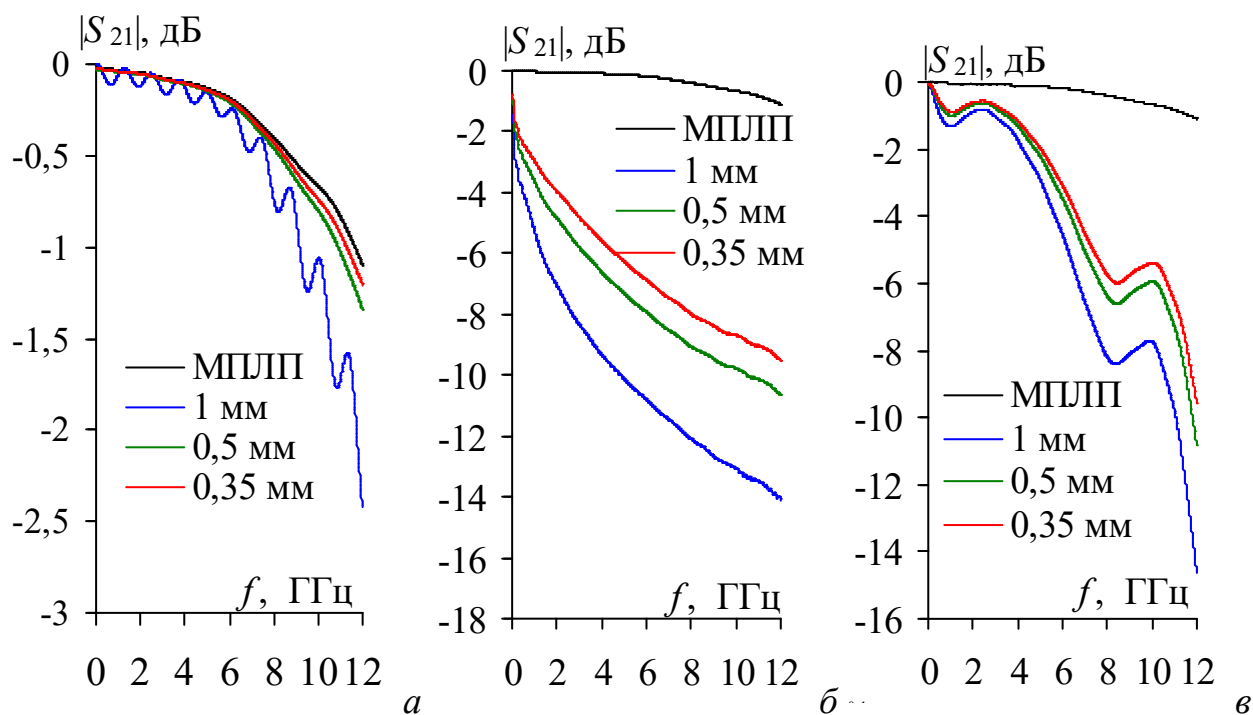


Рисунок 3.8 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП с использованием моделей чистого (а), электропроводящего (б) и на основе ВП (в) льда

Из рисунка 3.8 видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ различны. Так, при толщинах льда 1 и 0,5 мм разница достигает 3 дБ, а 0,5 и 0,35 мм минус 1 дБ.

В результате показано, что для модели МПЛП с слоем чистого льда изменения $|S_{21}|$ не менее минус 3 дБ, увеличение толщины слоя льда с 0,35 до 1 мм, смещает частоту среза с 6 до 5,1 ГГц используя модели на основе ВП и с 1 до 0,2 ГГц для модели электропроводящего льда. В результате повышенная концентрация химических веществ во влажном воздухе при резком снижении температуры может привести к появлению льда с высокой электропроводностью на поверхности МПЛП, а при его толщинах более 0,35 мм сигналы в МПЛП на частотах свыше 200 МГц будут ослабляться не менее чем на 3 дБ.

3.2.4 Влияние частичного покрытия слоем льда

Аналогично п. 3.2.1 используя МКЭ, вычислены частотные зависимости S -параметров моделей МПЛП с неполным образованием слоя льда толщиной $h_2 = 1$ мм в поперечном (рисунки 3.9а–в) и продольном (рисунки 3.9г, д) сечениях МПЛП.

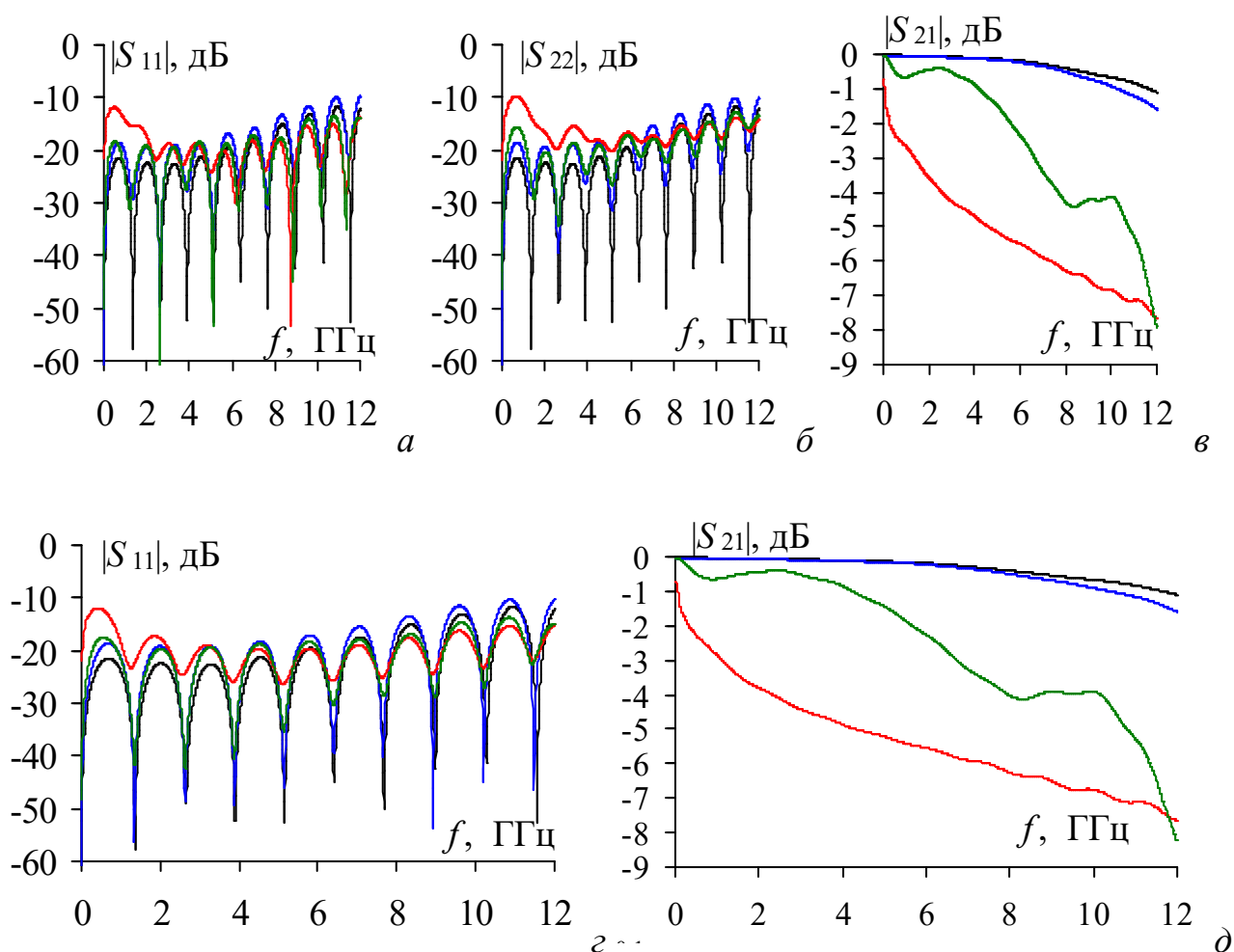


Рисунок 3.9 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а, г), $|S_{21}|$ (б, д) и $|S_{22}|$ (в) МПЛП без (—) и с использованием моделей чистого (—), электропроводящего (—) и на основе ВП (—) льда, создающем неоднородность в поперечном (а–в) и продольном (г, д) сечениях МПЛП

Из рисунков 3.9а, б видно, что первые максимумы $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ отличаются до 3 дБ для моделей льда на основе ВП и электропроводящего льда. При этом $|S_{11}|$ не превышает минус 12 дБ (рисунки 3.9а, г), а $|S_{22}|$ минус 10 дБ. Также из рисунков 3.9в, д видно, что $|S_{21}|$ постепенно уменьшается с ростом частоты. Так, для моделей МПЛП без и с моделью чистого льда разница $|S_{21}|$ составляет не более 0,5 дБ, а при покрытии электропроводящим льдом и на льдом, с моделью на основе ВП, увеличивается до 8 дБ, соответственно. В результате покрытие электропроводящим и на основе ВП льдом существенно повысит ослабление сигнала в МПЛП.

Вычислены частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) слоя льда (h_2), используя модели электропроводящего (рисунок 3.10а, в) и на основе ВП (рисунок 3.10б, г) льда.

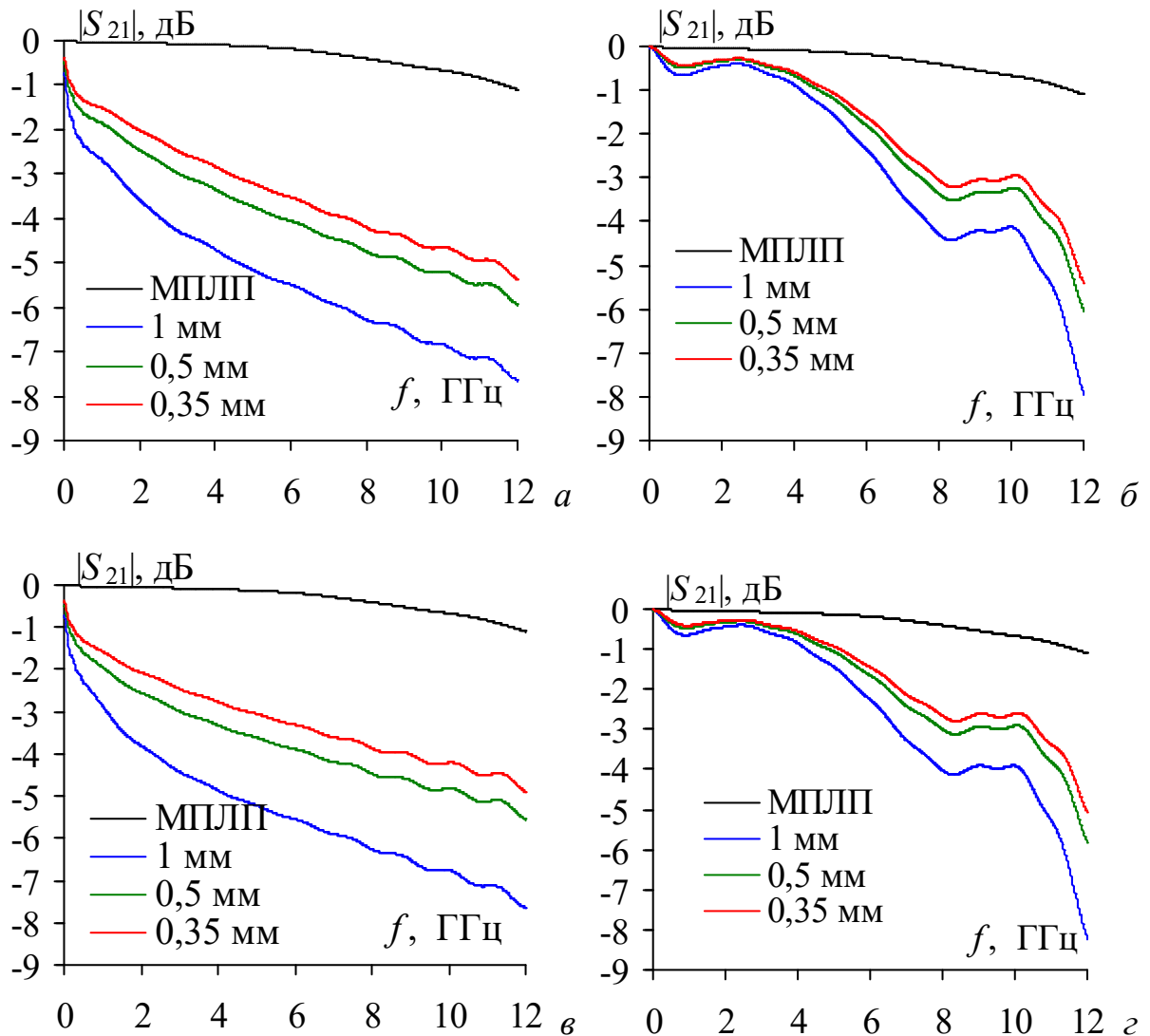


Рисунок 3.10 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП с использованием моделей электропроводящего (а, в) и на основе ВП (б, г) льда, создающего неоднородность в поперечном (а, б) и продольном (в, г) сечениях МПЛП

Из рисунков 3.10 видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ при частичном нанесении льда на один из концов (рисунки 3.10а, б) и на оба конца (рисунки 3.10в, г) МПЛП аналогичны между собой. При покрытии одного конца и частичном покрытии обоих концов МПЛП слоем льда (рисунки 3.10а–г) и уменьшении его толщины h_2 с 1 до 0,35 мм минимальные значения $|S_{21}|$ увеличиваются с минус 8 до минус 5 дБ. При этом различно смещаются частоты среза с 1,4 до 4,4 ГГц (рисунки 3.10а) при покрытии одного конца

МПЛП электропроводящим льдом и с 1,1 до 4,8 ГГц (рисунки 3.10в) при покрытии обоих концов. Однако при покрытии одного и двух концов МПЛП льдом на основе ВП, частоты среза смещаются с 6,6 до 7,9 ГГц и с 6,7 до 10,6 ГГц, соответственно

3.3 Влияние покрытия и температуры на электрические характеристики копланарной линии

3.3.1 Влияние сплошного покрытия пленкой воды

Используя предложенную выше методику из п. 3.2, вычислены МКЭ S -параметры КЛП с пленкой воды сверху. Для этого создана КЛП с $Z_0=50$ Ом и параметрами: $\epsilon_{r1} = 4,5$, $w = 3$ мм, $t_1 = 35$ мкм, расстояние между проводниками $s = 1,5$ мм, длина проводника $k = 46$ мм, толщина подложки $h_1 = 1,6$ мм и длиной 60 мм (рисунок 3.11). Электрические и геометрические параметры нанесенного слоя воды аналогичны п. 3.2.

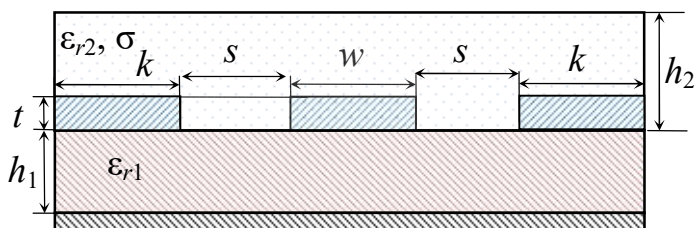


Рисунок 3.11 – Поперечное сечение КЛП со слоем воды

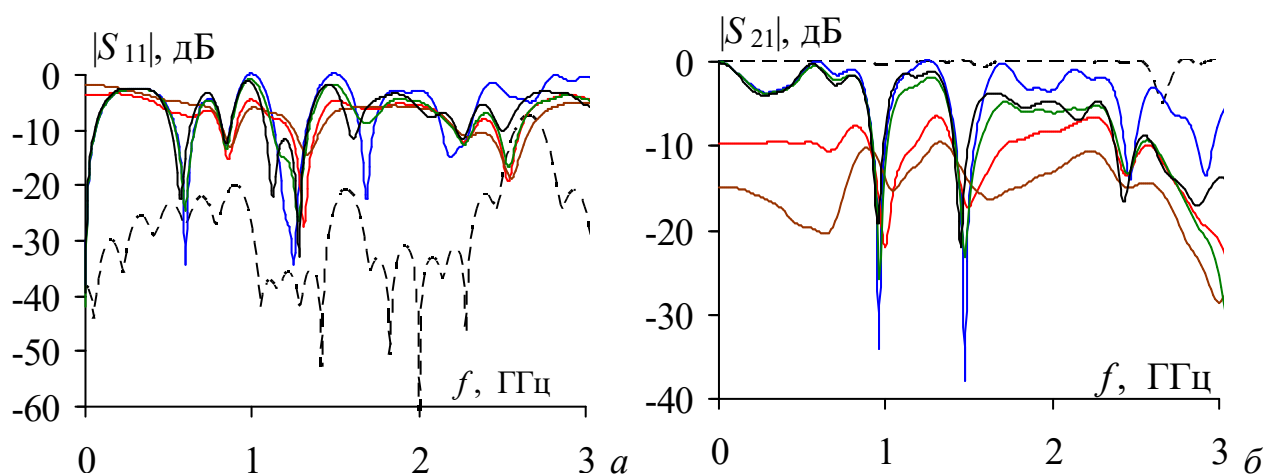


Рисунок 3.12 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) КЛП без (---) и со слоем дистиллированной (—), чистой (—) и морской (—) воды, с использованием моделей Дебая (—) и на основе ВП (—)

Из рисунка 3.12 видно, что пленка чистой и морской воды ($\sigma > 1$ См/м) на поверхности КЛП приводит к ослаблению на частотах до 10 МГц, а для моделей Дебая, на основе ВП и дистиллированной значительно влияет на S -параметры. Так, для модели МПЛП без слоя воды $|S_{11}| < \text{минус } 20$ дБ до частоты 2,6 ГГц, а со слоем воды на основе ВП увеличивается до минус 2 дБ. Из рисунка 3.12б видно, что для модели КЛП без воды с ростом частоты $|S_{21}|$ уменьшается до минус 5 дБ.

Вычислены частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) пленки воды (h_2) на КЛП, используя модели Дебая и разработанную на основе ВП (рисунок 3.13а), а также модели чистой и морской воды (рисунок 3.13б).

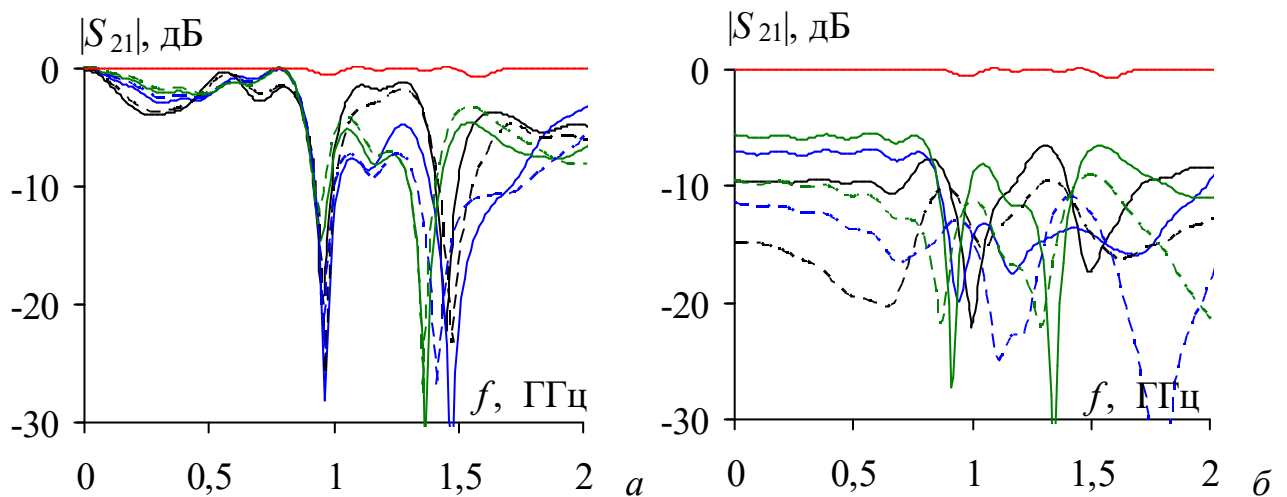


Рисунок 3.13 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ КЛП без (—) и с разными (— 1, — 0,5 и — 0,35 мм) толщинами пленки воды, используя модели на основе ВП (—) и Дебая (— —) (а), а также модели чистой (—) и морской (— —) воды (б)

Из рисунков 3.13а, б видно, что изменение толщины пленки воды на поверхности КЛП влияет на S -параметры по-разному, для моделей Дебая и на основе ВП, а также для моделей чистой и морской воды. Из рисунка 3.13а видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ при равной толщине пленки воды на КЛП изменяются не существенно. Так, если при толщине пленки в 1 мм значение $|S_{21}|$ с ростом частоты уменьшается до минус 4 дБ при 0,3 ГГц, а свыше увеличивается до 0 дБ при 0,6 ГГц. В диапазоне частот от 0,6 до 0,8 ГГц

наблюдается уменьшение значений $|S_{21}|$ до минус 3 дБ, а при увеличении до 0,8 ГГц резко уменьшается до минус 28 дБ. Свыше 1 ГГц максимальное значение $|S_{21}|$ изменяется от минус 1 до минус 9 дБ. При увеличении толщины пленки воды от 0,35 до 0,5 мм значение $|S_{21}|$ уменьшается до минус 2 и минус 3 дБ вблизи частоты 0,3 ГГц, а свыше 0,3 ГГц $|S_{21}|$ увеличивается до 0 дБ на частоте 0,8 ГГц, далее наблюдается повторное уменьшение значений $|S_{21}|$ с их изменением от минус 2 до минус 8 дБ.

Из рисунка 3.13б видно, что частотная зависимость $|S_{21}|$ имеет существенное ослабление (до минус 15 дБ) в области низких частот с увеличением толщины (от 0,35 до 1 мм) и σ (от 1,6 для чистой до 3,5 для морской) слоя воды на КЛП, а в области высоких частот для всех видов воды на поверхности КЛП проявляются частотно-селективные свойства. Так, при образовании пленки чистой воды на КЛП и уменьшении ее толщины с 1 до 0,35 мм, значения $|S_{21}|$ изменяются от минус 10 до минус 6 дБ вблизи 0,6 ГГц. Свыше 0,6 ГГц для пленки толщиной в 1 мм наблюдается существенный рост $|S_{21}|$ достигающий минус 7 дБ на частоте 0,8 ГГц, а при толщинах 0,5 и 0,35 мм значения $|S_{21}|$ неизменны и составляют минус 7 и минус 6 дБ, соответственно. Свыше 0,8 ГГц для пленки чистой воды с толщинами от 0,35 до 1 мм наблюдается аналогичное уменьшение значений $|S_{21}|$ с их изменением не превышающем минус 5 дБ.

При образовании пленки морской воды на КЛП и увеличении ее толщины от 0,35 до 1 мм значения $|S_{21}|$ (рисунок 3.13б) в области низких частот изменяются от минус 10 до минус 15 дБ. Так, при толщине 0,35 мм значение $|S_{21}|$ составляет минус 10 дБ, которое несущественно уменьшается (минус 12 дБ) с ростом частоты до 0,8 ГГц. Выше этой частоты $|S_{21}|$ резко уменьшается до минус 22 дБ (на частоте 0,9 ГГц). Далее с ростом частоты $|S_{21}|$ изменяется от минус 9 до минус 42 дБ. При увеличении толщины пленки воды до 0,5 мм значения $|S_{21}|$ уменьшаются на 2–6 дБ, а при пленке 1 мм – на 5–10 дБ.

В результате образование слоя воды на КЛП с разными толщинами и электрофизическими свойствами приводит к существенному изменению частотных зависимостей ее S -параметров.

3.3.2 Влияние частичного покрытия пленкой воды

Аналогично п. 3.2 созданы модели КЛП с неоднородными поперечным (рисунок 3.14а) и продольным (рисунок 3.14б) сечениями, возникающем за счет неравномерного нанесения пленки воды на поверхность КЛП.

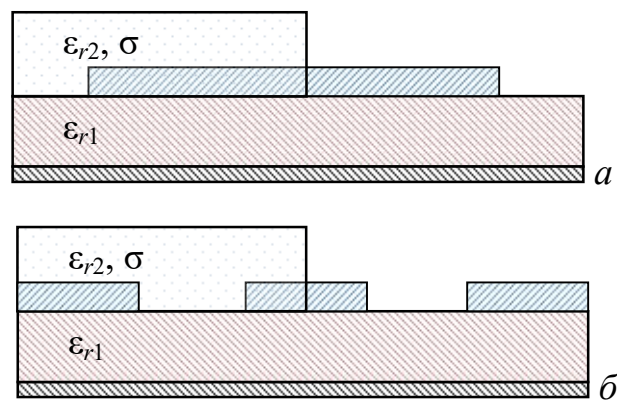


Рисунок 3.14 – Продольное (а) и поперечное(б) сечения КЛП, при их неравномерном покрытии пленкой воды

Используя МКЭ, вычислены частотные зависимости S -параметров моделей КЛП с толщиной слоя воды $h_2 = 1$ мм, создающем неоднородное поперечное (рисунки 3.15а–в) и продольное (рисунки 3.15г, д) сечений КЛП.

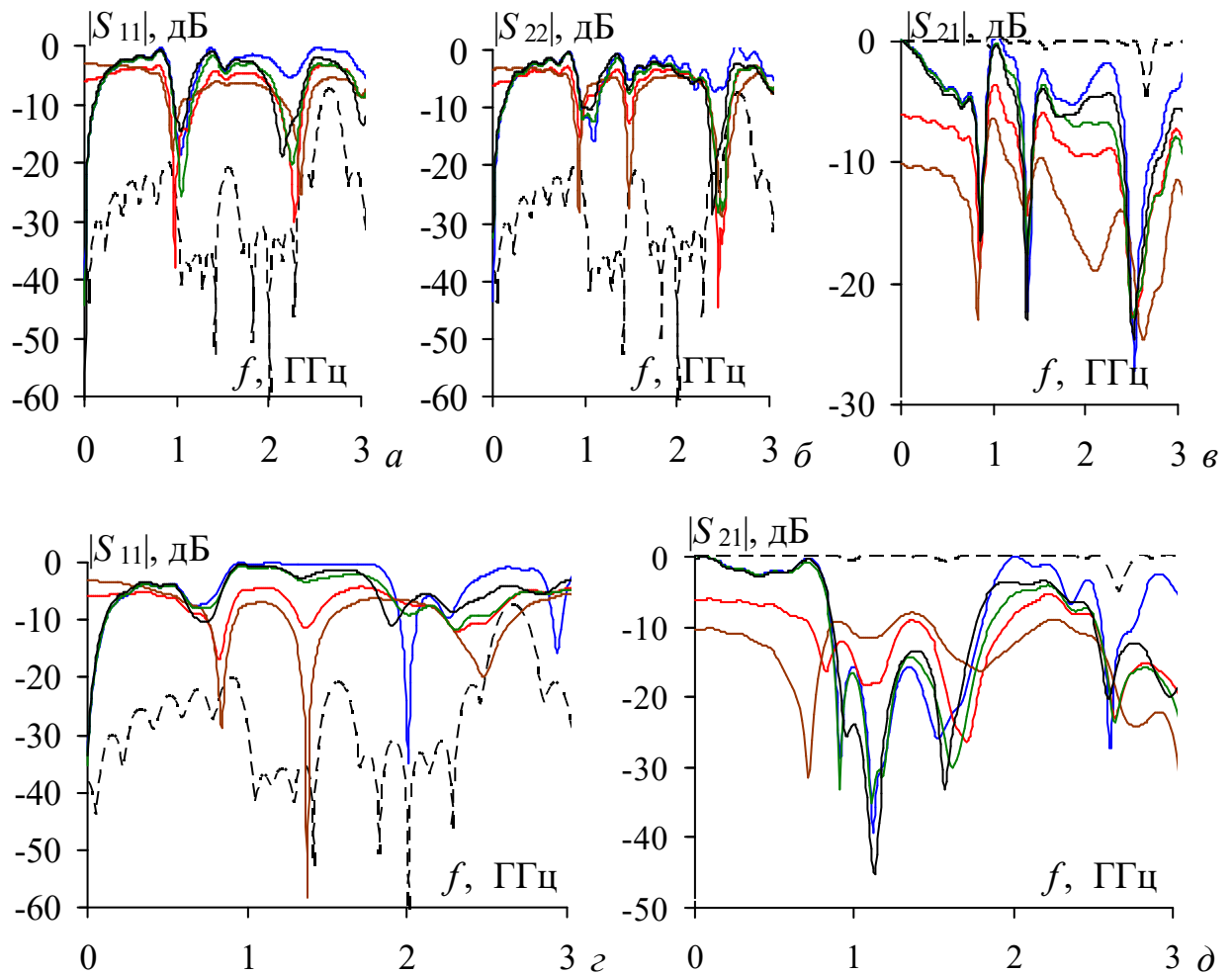


Рисунок 3.15 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а, г), $|S_{22}|$ (б) и $|S_{21}|$ (в, д) КЛП без (---) и со слоем дистиллированной (—, —), чистой (—) и морской (—) воды, с использованием моделей Дебая (—) и на основе ВП (—), создающего неоднородность в поперечном (а–в) и продольном сечениях КЛП (г, д)

Из рисунков 3.15а, б, г видно, что частичное нанесение пленки воды, создающей нерегулярности поперечного сечения КЛП, значительно влияет на ее S -параметры. Расхождение наблюдается по количеству максимумов и минимумов на $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$. Из рисунка 3.15в, видно, что максимум значений $|S_{21}|$ изменяются от 0 до минус 14 дБ в зависимости от электрофизических параметров пленки воды на КЛП. Из рисунка 3.15д видно, что значения $|S_{21}|$ близки для дистиллированной, моделей Дебая и на основе ВП, тогда как для моделей чистой и морской воды они отличаются. Кроме того значения $|S_{21}|$ составляют минус 6 и минус 10 дБ для пленки из чистой и морской воды на КЛП независимо от расположения пленки воды на поверхности КЛП.

Вычислены частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) пленки воды (h_2), используя модели Дебая и разработанную на основе ВП, а также модели чистой и морской воды (рисунок 3.16).

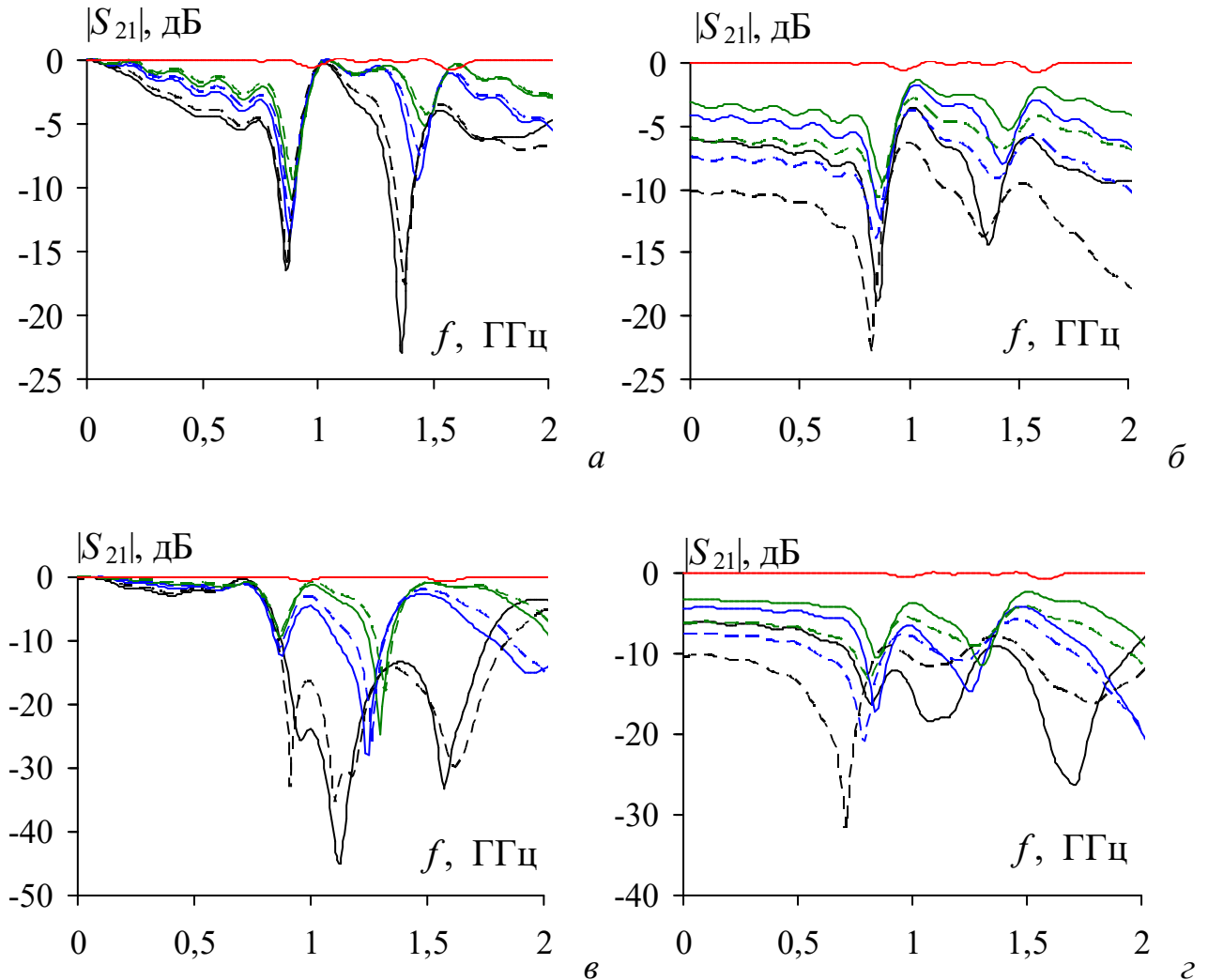


Рисунок 3.16 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ КЛП без (—) и с разными (— 1, — 0,5 и — 0,35 мм) толщинами пленки воды, используя модели на основе ВП (—) и Дебая (---) (а, б), а также модели чистой (—) и морской (---) воды (б, г), создающей неоднородность поперечном (а–в) и продольном сечениях КЛП (г, д)

Из рисунка 3.16 видно, что толщина, расположение и электрофизические параметры пленки воды на поверхности КЛП влияют на ее S -параметры. Из рисунка 3.16а видно, что при толщине пленки в 1 мм значение $|S_{21}|$ с ростом частоты уменьшается до минус 5 дБ при 0,8 ГГц. В диапазоне частот от 0,8 до 0,9 ГГц наблюдается существенное уменьшение $|S_{21}|$ до минус 17 дБ, а от 0,9 до

1 ГГц увеличение $|S_{21}|$ до 0 дБ. Свыше 1 ГГц максимальное значение $|S_{21}|$ не превышает минус 4 дБ. При увеличении толщины пленки воды от 0,35 до 0,5 мм значение $|S_{21}|$ уменьшается до минус 2 и минус 3 дБ вблизи частоты 0,8 ГГц, а свыше 0,8 ГГц наблюдаются аналогичные изменения значений $|S_{21}|$ от 3 до 7 дБ.

Из рисунка 3.16б видно, что частотная зависимость $|S_{21}|$ имеет значительное ослабление (до минус 10 дБ) в области низких частот, а в области высоких частот для всех видов образования воды на поверхности КЛП проявляются частотно-селективные свойства. Так, при образовании пленки чистой воды на КЛП и уменьшении ее толщины с 1 до 0,35 мм, значения $|S_{21}|$ изменяются от минус 10 до минус 6 дБ до 0,6 ГГц. Свыше 0,6 ГГц для пленки толщиной в 1 мм наблюдается существенное уменьшение $|S_{21}|$ достигающее минус 21 дБ на частоте 0,8 ГГц, а при толщинах 0,5 и 0,35 мм значения $|S_{21}|$ достигают минус 12 и минус 9 дБ, соответственно. Свыше 0,8 ГГц для пленки чистой воды с толщинами от 0,35 до 1 мм наблюдается аналогичное уменьшение значений $|S_{21}|$ с их изменением не превышающем минус 2 и минус 4 дБ соответственно.

При образовании пленки морской воды на КЛП и ее увеличении толщины от 0,35 до 1 мм значения $|S_{21}|$ (рисунок 3.16б) в области низких частот изменяются от минус 6 до минус 10 дБ. Так, при толщине 0,35 мм значение $|S_{21}|$ составляет минус 6 дБ, которое несущественно уменьшается (минус 7 дБ) с ростом частоты до 0,8 ГГц. Выше этой частоты $|S_{21}|$ резко уменьшается до минус 11 дБ (на частоте 0,9 ГГц). Далее с ростом частоты $|S_{21}|$ изменяется от минус 3 до минус 7 дБ. Увеличение толщины пленки воды до 0,5 мм, значения $|S_{21}|$ уменьшаются на 1–3 дБ, а при пленки 1 мм – на 4–11 дБ.

Из рисунка 3.16в видно, что частотная зависимость $|S_{21}|$ отличается в зависимости от толщины и модели пленки воды на КЛП. Так, если при толщине пленки в 1 мм значение $|S_{21}|$ с ростом частоты уменьшается до минус 3 дБ при 0,4 ГГц, а свыше увеличивается до 0 дБ при 0,7 ГГц. Свыше 0,7 ГГц значение

$|S_{21}|$ значительно уменьшается до минус 34 дБ для модели воды на основе ВП и минус 26 дБ для модели Дебая вблизи 0,9 ГГц. Свыше частоты 0,9 ГГц значение $|S_{21}|$ изменяется, а максимальное $|S_{21}|$ не превышает минус 4 дБ. При увеличении толщины пленки воды от 0,35 до 0,5 мм значение $|S_{21}|$ уменьшается до минус 2 дБ вблизи частоты 0,6 ГГц. Свыше 0,6 ГГц увеличивается до минус 1 дБ при частоте 0,7 ГГц, а в диапазоне частот от 0,7 до 0,9 ГГц наблюдается резкое уменьшение $|S_{21}|$ от минус 9 до минус 12 дБ. Свыше 0,9 ГГц максимальное значение $|S_{21}|$ не больше минус 2 дБ.

Из рисунка 3.16г видно, что частотная зависимость $|S_{21}|$ имеет значительное ослабление (до минус 10 дБ) в области низких частот, а в области высоких частот проявляются частотно-селективные свойства. Так при образовании пленки чистой воды на КЛП с уменьшением ее толщины с 1 до 0,35 мм, значения $|S_{21}|$ увеличиваются от минус 6 до минус 3 дБ на частоте 10 МГц, а с увеличением частоты уменьшается до минус 9 и минус 4 дБ при 0,7 ГГц. В диапазоне частот от 0,7 до 0,9 ГГц значения $|S_{21}|$ изменяются от минус 17 до минус 11 дБ, а свыше 0,9 ГГц происходит их рост от минус 12 до минус 3 дБ при толщинах от 1 до 0,35 мм, а максимальное значение $|S_{21}|$ достигает минус 2 дБ. При образовании пленки морской воды на КЛП и ее увеличении толщины от 0,35 до 1 мм значения $|S_{21}|$ (рисунок 3.16г) в области низких частот изменяются от минус 6 до минус 10 дБ. Так, при толщине 0,35 мм значение $|S_{21}|$ составляет минус 6 дБ, которое существенно уменьшается до минус 8 дБ с ростом частоты до 0,7 ГГц. Выше этой частоты $|S_{21}|$ резко уменьшается до минус 13 дБ (на частоте 0,8 ГГц). Далее с ростом частоты $|S_{21}|$ изменяется от минус 4 до минус 9 дБ. Увеличение толщины пленки воды до 0,5 мм, значения $|S_{21}|$ уменьшаются на с минус 2 до минус 9 дБ и смещаются по частоте до 0,1 ГГц, а при пленке 1 мм – на 5–20 дБ с минус 5 до минус 20 дБ и смещаются по частоте до 0,2 ГГц.

При образовании пленки морской воды на КЛП и ее увеличении толщины от 0,35 до 1 мм значения $|S_{21}|$ (рисунок 3.16г) в области низких частот

изменяются от минус 6 до минус 10 дБ. Так, при толщине 0,35 мм значение $|S_{21}|$ составляет минус 6 дБ, которое несущественно уменьшается (минус 8 дБ) с ростом частоты до 0,7 ГГц. Выше этой частоты $|S_{21}|$ резко уменьшается до минус 13 дБ (на частоте 0,8 ГГц). Далее с ростом частоты $|S_{21}|$ изменяется от минус 4 до минус 9 дБ. Увеличение толщины пленки до 0,5 мм, значения $|S_{21}|$ уменьшаются на 2–8 дБ, а при пленке 1 мм – на 2–18 дБ и смещаются до 0,2 ГГц по частоте.

3.3.3 Влияние сплошного покрытия слоем льда

Используя предложенную выше методику из п. 3.2, вычислены МКЭ S -параметры КЛП с пленкой льда сверху (рисунок 3.17).

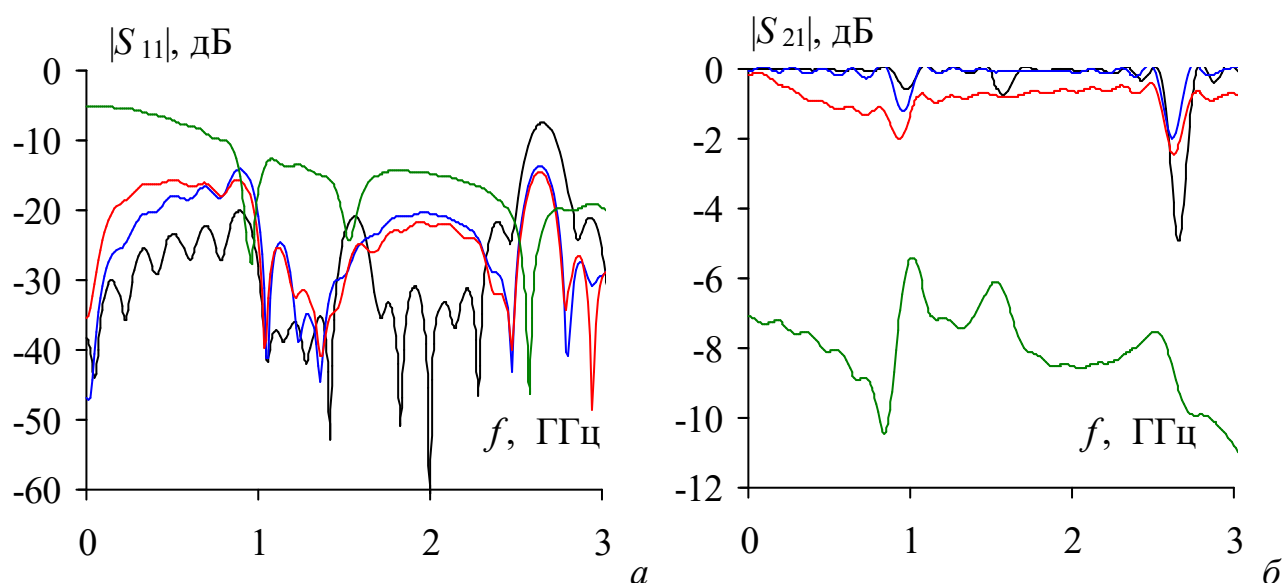


Рисунок 3.17 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) КЛП (—) с использованием моделей чистого (—), электропроводящего (—) и на основе ВП (—) льда

Из рисунка 3.17 видно, что слой электропроводящего льда ($\sigma = 1$ См/м) на поверхности КЛП приводит к ослаблению сигнала на частотах до 10 МГц, тогда как с пленкой из чистого и льда на основе ВП ее нет. Так для КЛП без слоя значения $|S_{11}|$ меньше минус 20 дБ до частоты 2,6 ГГц. Выявлено, что КЛП со слоем чистого или льда на основе ВП значения $|S_{11}|$ меньше минус 20 дБ одинаковы в диапазоне частот от 1 до 2,5 ГГц. Из рисунка 3.17 видно, что при образовании на КЛП пленки чистого или на основе ВП льда, значение $|S_{21}|$ не

менее минус 3 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц, тогда как для КЛП значение $|S_{21}|$ менее минус 3 дБ на 2,7 ГГц. Таким образом, образование льда на КЛП может уменьшить минимум $|S_{21}|$. Кроме того, значения $|S_{21}|$ для КЛП с пленкой льда на основе ВП в среднем меньше на 1 дБ во всем диапазоне частот, по сравнению со значениями $|S_{21}|$ КЛП с пленкой чистого льда.

Вычислены МКЭ частотные зависимости $|S_{21}|$ для разных моделей льда на КЛП (рисунок 3.18) с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) пленки льда (h_2).

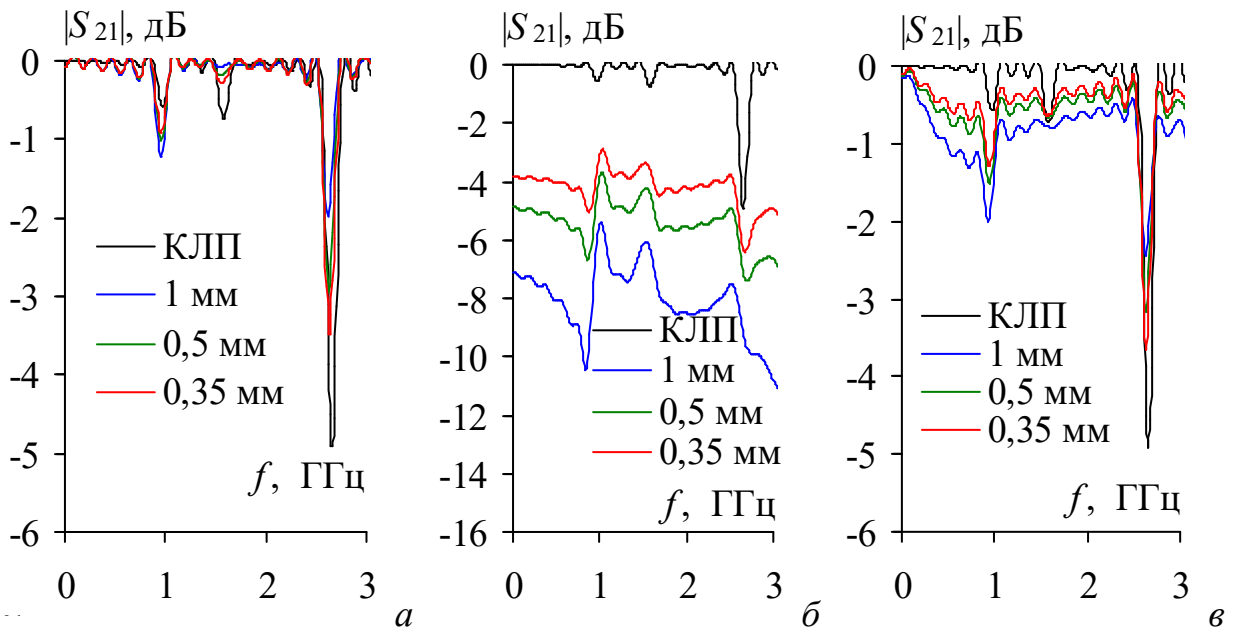


Рисунок 3.18 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ КЛП с использованием моделей чистого (а), электропроводящего (б) и на основе ВП (в) льда

Из рисунка 3.18 видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ КЛП отличаются при покрытии льда с разными электрофизическими свойствами. Из рисунков 3.18а, в видно, что максимальные значения $|S_{21}|$ существенно не изменяются (до 1 дБ) при уменьшении толщины пленки чистого и на основе ВП льда на КЛП за исключением частот вблизи 2,7 ГГц. Из рисунка 3.18б, видно, что при уменьшении толщины пленки льда с 1 до 0,35 мм значения $|S_{21}|$ увеличиваются с минус 7 до минус 4 дБ, а с ростом частоты уменьшается до минус 11 и минус 5 дБ при 0,9 ГГц. Свыше 0,9 ГГц максимальные значения $|S_{21}|$ изменяются от минус 5 до минус 3 дБ.

3.3.4 Влияние частичного покрытия слоем льда

Аналогично п. 3.2 используя МКЭ, вычислены частотные зависимости S -параметров моделей КЛП с частичным нанесением слоя льда толщиной $h_2 = 1$ мм, создающим неоднородность в поперечном (рисунки 3.19а–в) и продольном (рисунки 3.19г, д) сечениях КЛП.

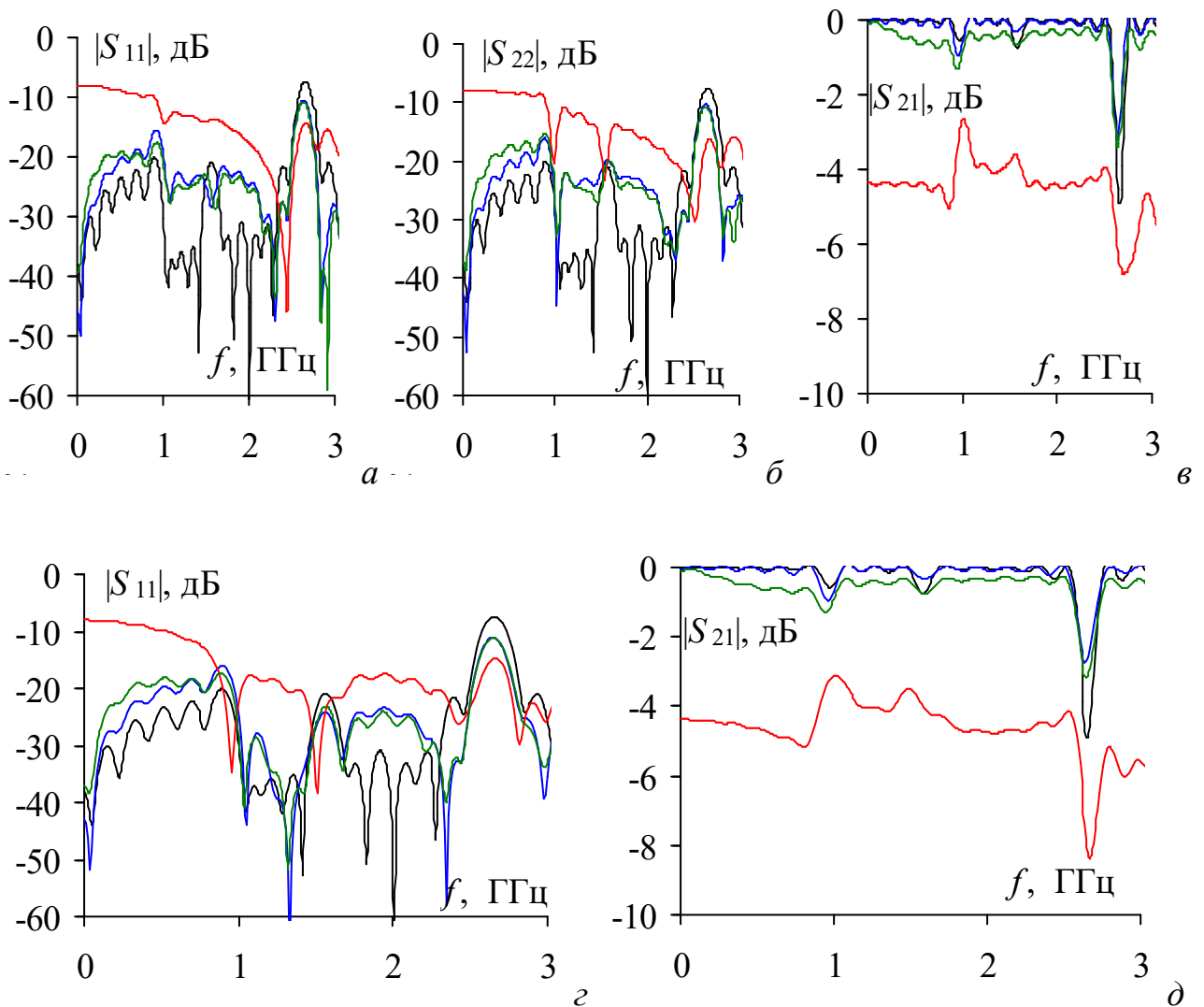


Рисунок 3.19 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а, г), $|S_{22}|$ (б) и $|S_{21}|$ (в, д) КЛП без (—) и с использованием моделей чистого (—), электропроводящего (—) и на основе ВП (—) льда, создающим неоднородность в поперечном (а–в) и продольном (г, д) сечениях КЛП

Из рисунков 3.19а, б, г видно, что $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ меньше минус 20 дБ в диапазоне частот от 1 до 2,5 ГГц как для КЛП со слоем из чистого и льда на основе ВП в диапазоне от 1 до 2,5 ГГц. Из рисунков 3.19в, д видно, что при

образовании пленки чистого и льда на основе ВП на одном или двух портах КЛП значения $|S_{21}|$ больше минус 3 дБ до частоты 2,7 ГГц.

Вычислены частотные зависимости S -параметров при помощи МКЭ с разной толщиной (1; 0,5; 0,35 мм) слоя льда (h_2), используя модели электропроводящего льда (рисунок 3.20а, в), а также модели на основе ВП (рисунок 3.20б, г).

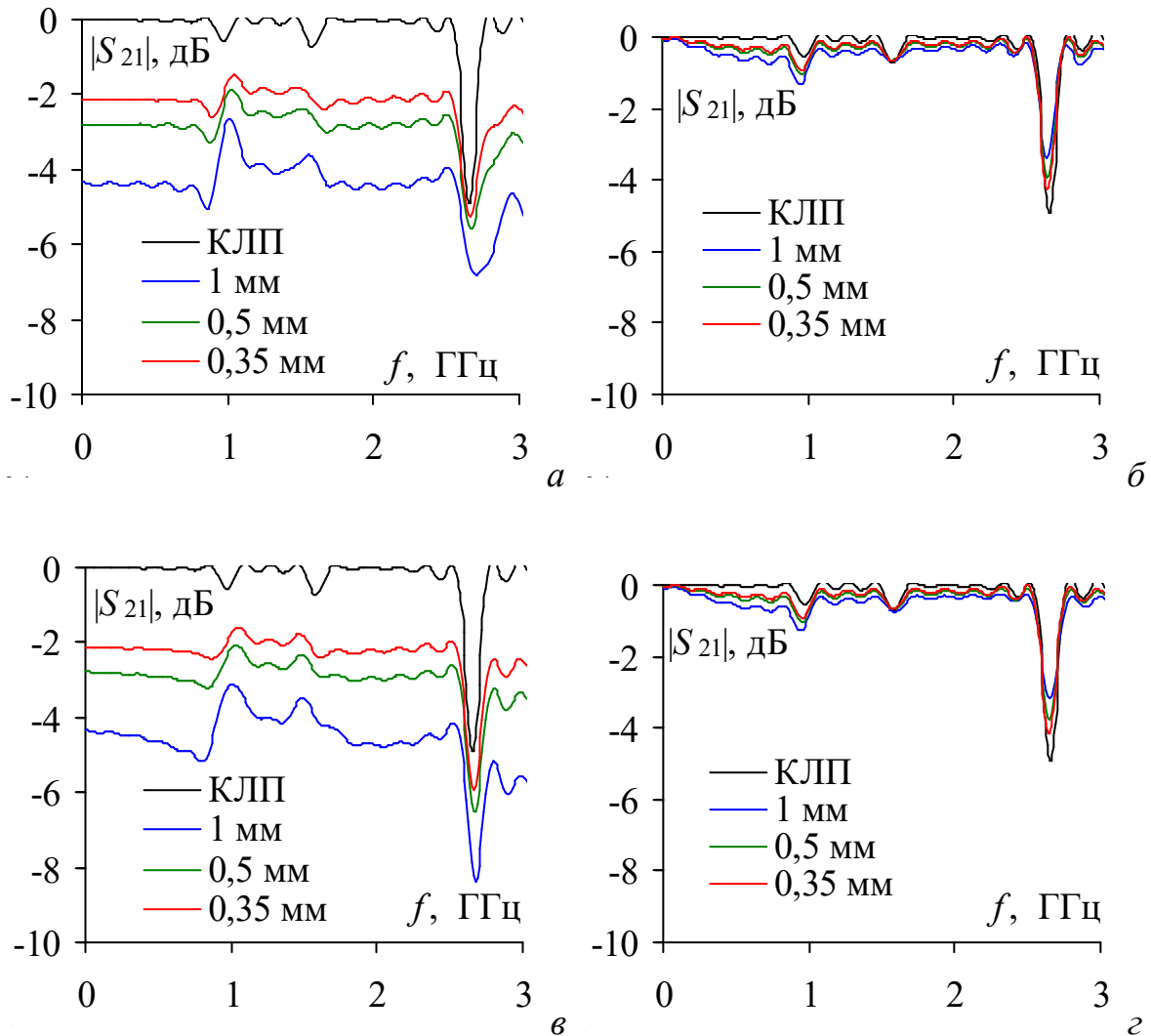


Рисунок 3.20 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ КЛП с использованием моделей электропроводящего (а, в) и на основе ВП (б, г) льда, создающим неоднородность в поперечном (а, в) и продольном (б, г) сечениях КЛП

Из рисунков 3.20а, в видно, что при образовании слоя льда на КЛП и увеличение его толщины от 0,35 до 1 мм значения $|S_{21}|$ в области низких частот уменьшается от минус 2 до минус 4 дБ до частоты 2,7 ГГц. Из рисунков 3.20б, г видно, что частотные зависимости $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 1 дБ при 1 ГГц.

Свыше 1 ГГц значения $|S_{21}|$ больше минус 1 дБ до частоты 2,7 ГГц независимо от толщины слоя льда на КЛП.

В результате расположение слоя льда на поверхности КЛП практически не оказывает влияние на S -параметры, в отличие от толщины слоя и его электрофизических параметров. Выявлено, что при толщине электропроводящего льда меньше 0,5 мм значение $|S_{21}|$ больше минус 3 дБ до частоты 2,7 ГГц. Кроме того, значение $|S_{21}|$ достигает минус 1 дБ за исключением частоты 2,7 ГГц для КЛП со слоем льда на основе ВП независимо от его толщины.

3.4 Апробация методики оценки влияния пленки воды и слоя льда на частотные зависимости S -параметров микрополосковой линии

Воздействие положительных или отрицательных температур на реальную ЛП при повышенной влажности воздуха приводит к образованию на её поверхности плёнки воды или слоя льда. Аналогично модели из п. 3.2, исследуемым объектом выбрана МПЛП с геометрической моделью поперечного сечения, представленной на рисунке 3.1, и с разными значениями (таблица 1) её параметров. Толщина проводника для всех МПЛП (t_1) равна 18 мкм. МПЛП (рисунок 3.1) покрывалась пленкой воды или слоем льда с толщиной (h_2).

Таблицы 3.1 – Электрические и геометрические параметры микрополосковой линии передачи

МПЛП	ϵ_{r1}	w (мм)	h_1 (мм)	l (мм)
1	10,2	1	1	60
2	4,3	3	1,5	60
3	4,3	1,8	0,9	72
4	4,3	1	0,5	72

Используя методику выше, данные из таблицы 3.1 и геометрическую модель ЛП (рисунок 3.1), созданы электродинамические модели. Модель ЛП с параметрами из таблицы 3.1, покрывалась пленкой воды и слоем льда равной толщины ($h_2 = 2$ мм). Электрофизическими параметрами воды и льда, выбраны

ϵ_{r2} и σ из [45, 51]. Для воды ϵ_{r2} плавно уменьшалась от 80 до 72 с ростом частоты, тогда как σ плавно увеличивалась от 0 до 6 См/м. Для льда $\epsilon_{r2} = 3,2$, а значение σ вычислено по (2.1), и постепенно увеличивалась от 0 до 0,3 См/м с ростом частоты, при этом для чистого льда $\sigma = 0$. Вычисления S -параметров моделей ЛП проводились, используя МКЭ и МКРВО с шагом сетки $\lambda/40$. Аналогично геометрическим моделям изготовлены макеты МПЛП на ПП размерами $100 \times 100 \text{ мм}^2$ (рисунок 3.21). По краям ПП со стороны, где расположен сигнальный проводник, имелся полигон земли шириной 10 мм. Материалом диэлектрика ПП для МПЛП 1 выбран композитный материал Rogers AD1000 ($\epsilon_{r1}=10,2$), для МПЛП 2, МПЛП 3 и МПЛП 4 – стеклотекстолит FR4 ($\epsilon_{r1}=4,3$). Волновое сопротивление (Z) четырех ЛП рассчитывалось на сопротивление 50 Ом, а в качестве соединителей использовались SMA-J с $Z = 50 \text{ Ом}$ и $KCBH \leq 1,1$ в диапазоне частот до 18 ГГц.

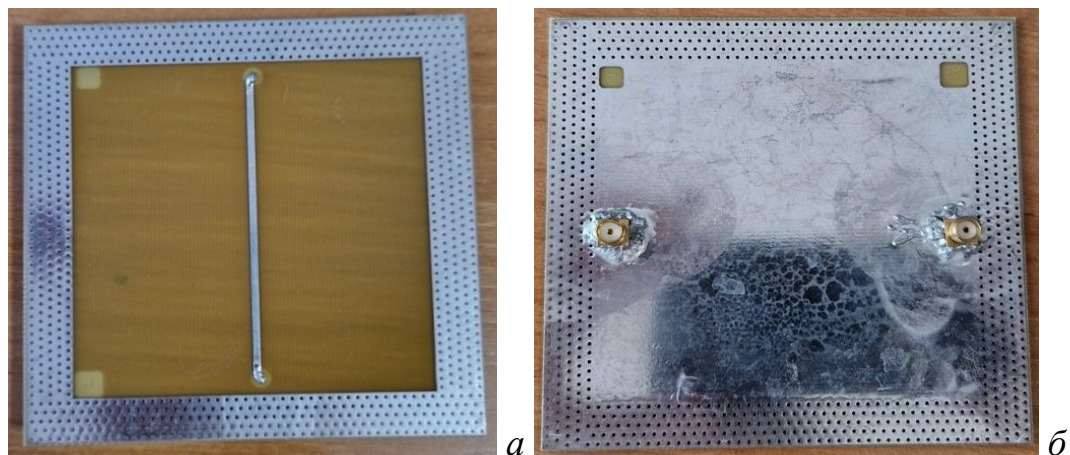


Рисунок 3.21 – Внешние виды сверху (а) и снизу (б) макета МПЛП на ПП

Однородная пленка воды на макетах МПЛП образовывалась искусственно, используя распылитель. Наблюдения показали, что при $h_2 = 1 \text{ мм}$ однородный слой водяной пленки не образуется, поскольку материалы ПП являются несмачиваемыми и гидрофобными поверхностями. Увеличение h_2 до 2 мм приводило к образованию однородной плёнки воды. Измерения S -параметров макетов МПЛП проводилось по 3 раза при поочередном помещении их внутрь камеры «тепло-холод» ESPEC SU-262 и охлаждении от 25 до минус 50°C. Измерялись S -параметры каждого макета ЛП ВАЦ Rohde & Schwarz ZVA 40

в диапазоне частот от 0,01 до 6 ГГц. Далее сравнены вычисленные и измеренные частотные зависимости S -параметров для четырех ЛП (таблица 3.1) с пленкой воды, слоем льда и без них. Погрешность измерений ВАЦ не превышает 1 дБ на частотах до 6 ГГц.

Воздействие температуры на ЛП

Измерены и вычислены по МКЭ и МКРВО частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП 1–4 при 25 и минус 50°C (рисунок 3.22).

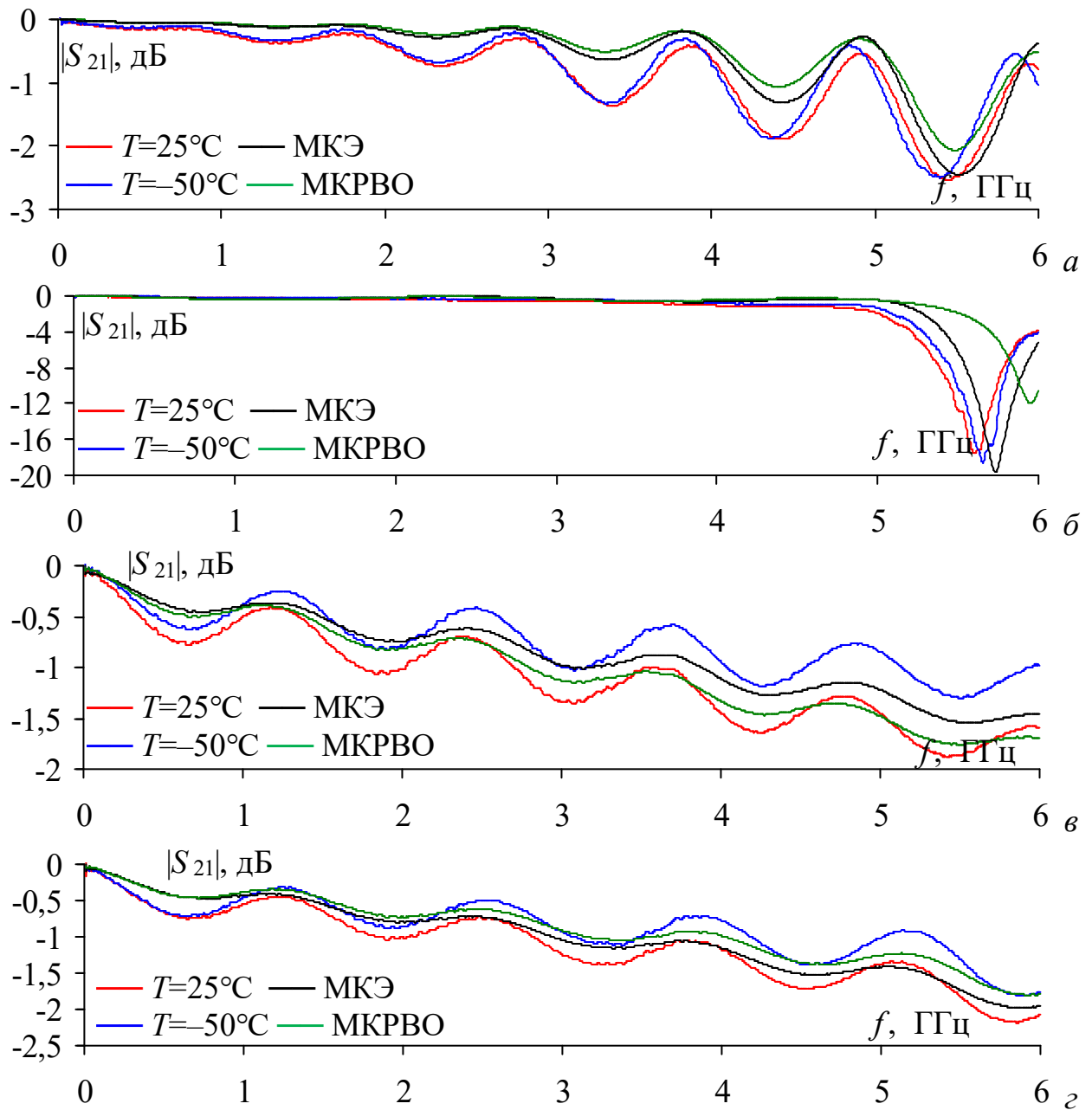


Рисунок 3.22 – Вычисленные по МКЭ, МКРВО и измеренные при $T=25$ и -50 °C частотные зависимости $|S_{21}|$ для ЛП 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)

Из рисунка 3.22а видно, что измеренные при разных температурах значения $|S_{21}|$ уменьшаются с ростом частоты до минус 2,6 дБ, тогда как вычисленные по МКЭ – до минус 2,2 дБ, а МКРВО до минус 2,5 дБ. Из рисунка 3.22б видно, что $|S_{21}|$ близки до частоты 4 ГГц, а выше есть минимум $|S_{21}|$, который на частоте 5,7 ГГц по измерению составил минус 18 дБ, а по вычислениям по – МКЭ минус 19 дБ. При этом по МКРВО составило минус $|S_{21}|$ = минус 12 дБ на частоте 5,9 ГГц. Граничная частота МПЛП по измерениям при 25 и минус 50°С составила 5,2 ГГц, а вычисленных МКЭ – 5,4 ГГц и МКРВО – 5,5 ГГц. Граничная частота устанавливалась по уровню минус 3 дБ.

Из рисунка 3.22в видно, что минимум $|S_{21}|$ по измерениям плавно уменьшается с ростом частоты до минус 1,8 дБ, а вычислениям – до минус 1,6 дБ. Разница между минимумами $|S_{21}|$ при 25 и минус 50°С постепенно возрастет с ростом частоты до 0,6 дБ. Из рисунка 3.22г видно, что по измерениям минимум $|S_{21}|$ плавно уменьшается с ростом частоты до минус 2 дБ, тогда как по вычислениям – до минус 1,8 дБ. Разница минимумов $|S_{21}|$ при 25 и минус 50°С постепенно возрастает с ростом частоты до 0,4 дБ. В результате, температура оказывает незначительное влияние (до 1 дБ) на $|S_{21}|$ МПЛП без пленки воды или слоя льда.

Образование пленки воды на поверхности линии передачи

Измерены частотные зависимости $|S_{21}|$ МПЛП 1–4 с пленкой воды при 25°С и вычислены по МКЭ и МКРВО с пленкой воды по моделям Дебая и полученные при помощи методики из п. 2.1 (рисунок 3.23).

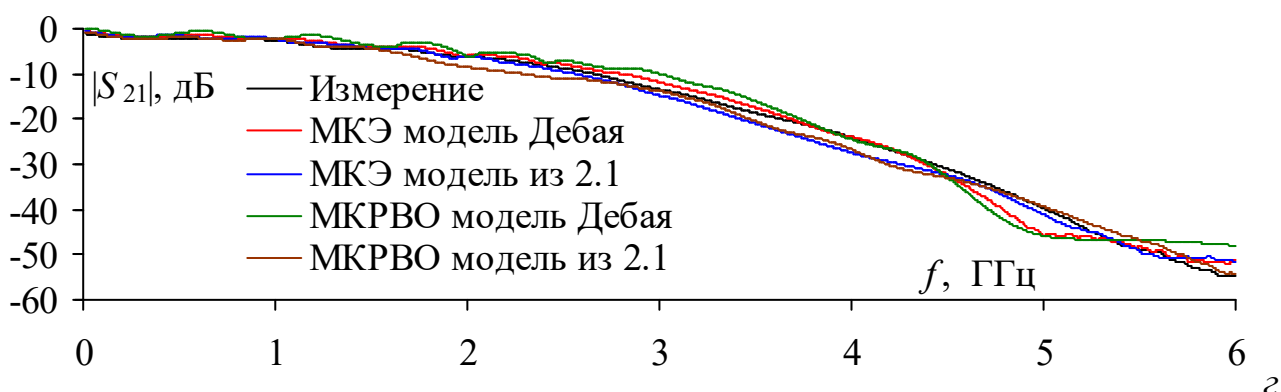
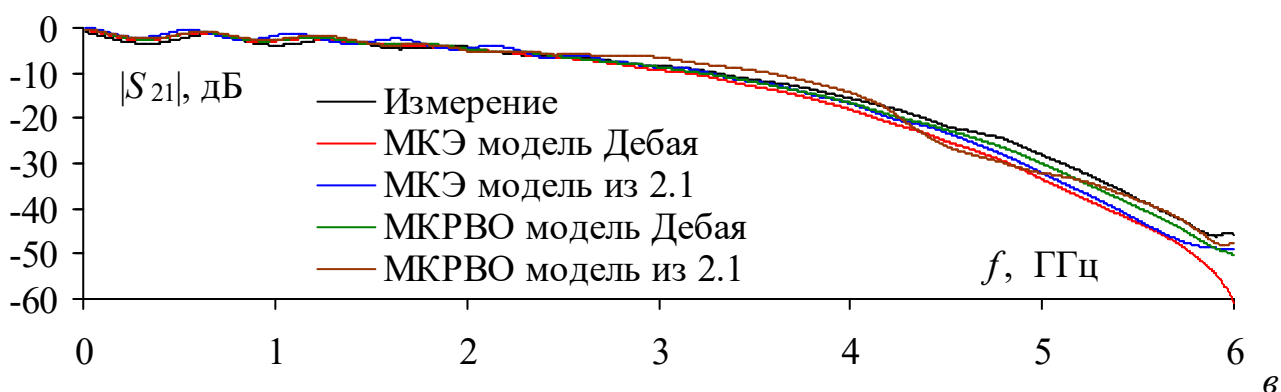
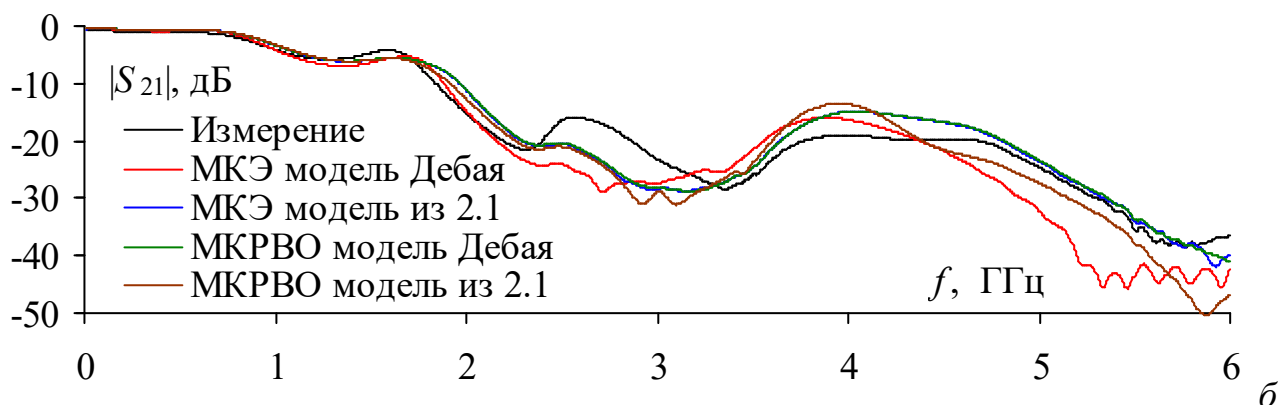
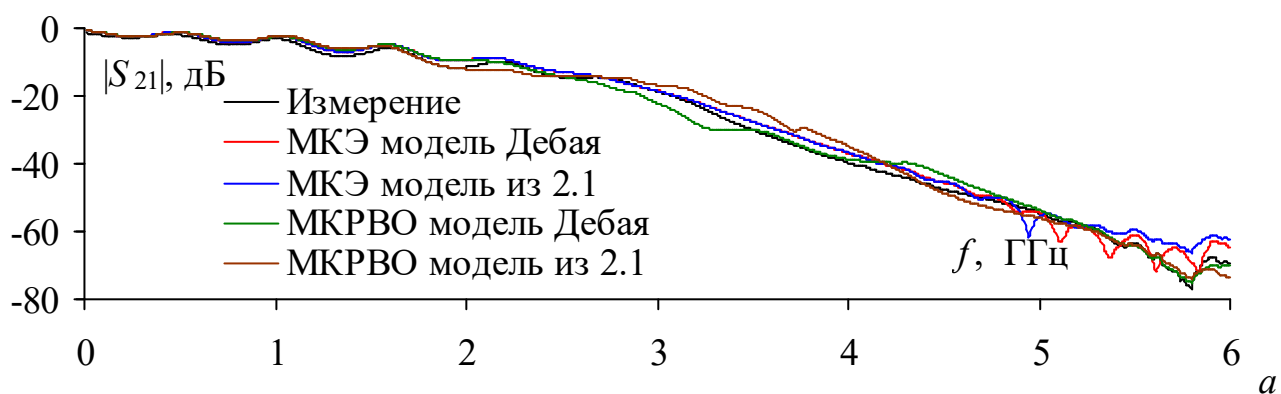


Рисунок 3.23 – Измеренные при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и вычисленные МКЭ и МКРВО частотные зависимости $|S_{21}|$ для МПЛП 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г), покрытых пленкой воды, по моделям Дебая и по методике из п. 2.1

Из рисунка 3.23а видно, что при покрытии МПЛП слоем воды $|S_{21}|$ с ростом частоты уменьшается до минус 80 дБ. Измеренные и вычисленные $|S_{21}|$ отличаются до 12 дБ в диапазоне частот от 3 до 4 ГГц для МКРВО и от 5 до 6 ГГц для МКЭ. Из рисунка 3.23б видно, что зависимости $|S_{21}|$ МПЛП с водой схожи и уменьшаются до минус 40 дБ по измерениям и до минус 50 дБ по вычислениям. Вычисленные и измеренные $|S_{21}|$ различаются до 15 дБ на частотах 2,2–3,4 ГГц для МКРВО и 4,4–6 ГГц для МКЭ. При этом граничная частота уменьшилась при измерениях до 0,6 ГГц, а вычислениях МКЭ и МКРВО до 0,7 ГГц (рисунок 3.23а). Аналогично для зависимостей из рисунка 3.23б по результатам измерений МПЛП с водой граничная частота составила 0,9 ГГц, а вычислений – 1 ГГц.

Из рисунка 3.23в видно, что с ростом частоты $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 50 дБ для измерений и минус 60 дБ для вычислений. Выявлено, что от 2,6 до 6 ГГц постепенно увеличивается разница $|S_{21}|$ до 12 дБ между результатами вычислений и измерений для МПЛП покрытой слоем воды. При этом амплитуда колебаний $|S_{21}|$ для измерений МПЛП покрытой слоем воды меняется от минус 3 дБ до минус 1 дБ в диапазоне частот 0,3–1,5 ГГц, а вычисленная граничная частота составила 1,5 ГГц. Из рисунка 3.23г видно, что с ростом частоты измеренные и вычисленные $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 55 дБ, а от 2 до 4,4 ГГц разница между ними достигает 7 дБ. Кроме того, для модели Дебая наблюдается минимум $|S_{21}|$ на частоте 5 ГГц, отсутствующий в результатах измерения и моделирования по методике из п. 2.1. При этом граничная частота составила 1 ГГц для измеренной МПЛП, 1,1 ГГц – для модели воды полученной по методике из п. 2.1 и 1,3 ГГц – для модели Дебая.

Образование слоя льда на поверхности линии передачи

Измерены частотные зависимости $|S_{21}|$ ЛП 1–4 со слоем льда при температуре минус 50°C и вычислены по МКЭ и МКРВО модели МПЛП со слоем чистого льда и льда по методике из п. 2.1 (рисунок 3.24).

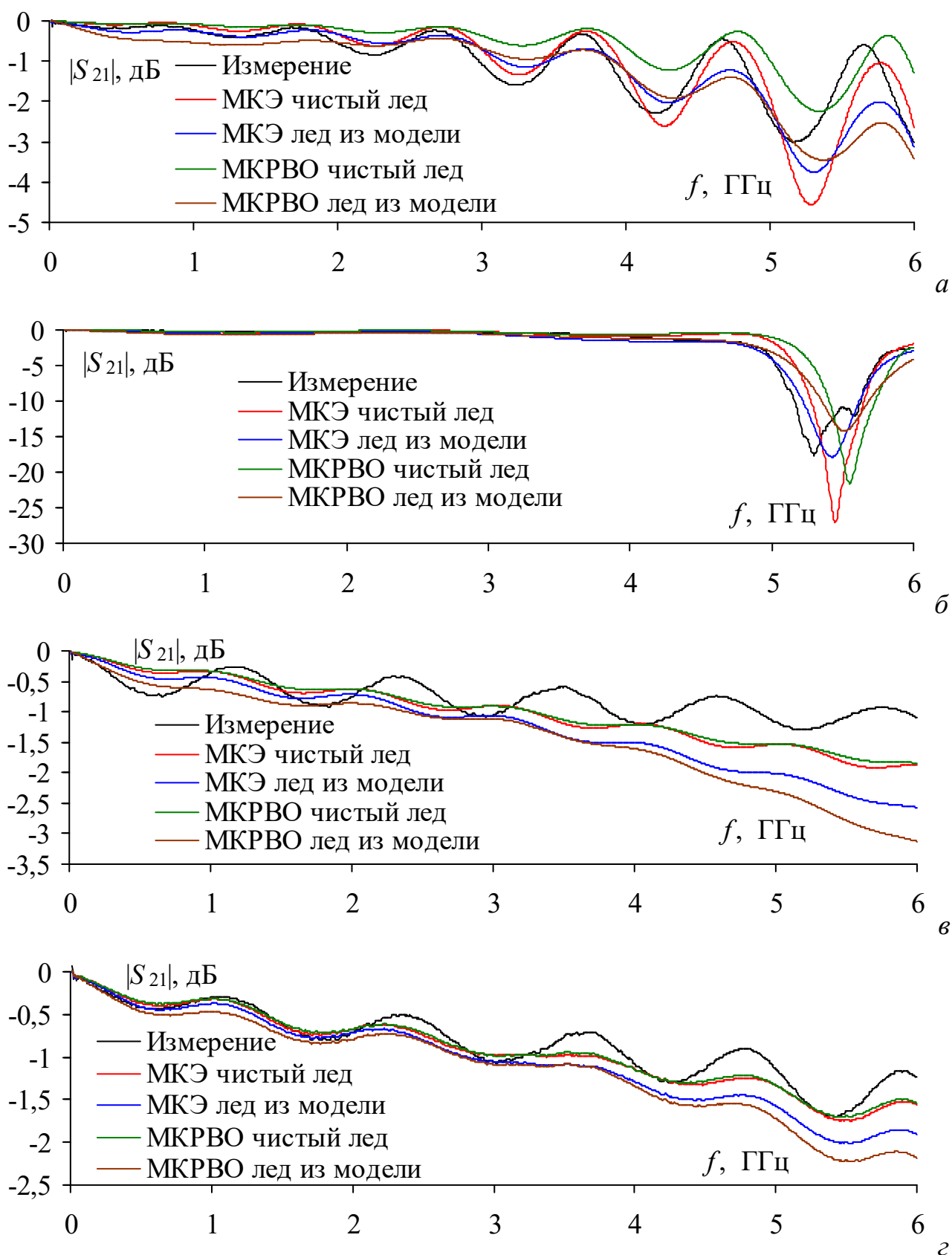


Рисунок 3.24 – Вычисленные МКЭ и МКРВО и измеренные при $T = -50^\circ\text{C}$ частотные зависимости $|S_{21}|$ для МПЛП 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) с образованным на поверхности слоем льда

Из рисунка 3.24а видно, что с ростом частоты измеренные $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 3 дБ, а вычисленные моделированием до минус 3,5 дБ для модели МПЛП со слоем льда и до минус 4,5 и 2,2 дБ для модели МПЛП с чистым льдом, полученной по методике из п. 2.1, используя МКЭ и МКРВО, соответственно. Из рисунка 3.24б видно, что минимум $|S_{21}|$ наблюдается вблизи 5,3 ГГц, а наибольшие различия $|S_{21}|$ между измерением и моделированием наблюдаются для результатов с применением модели чистого льда на частоте 5,5 ГГц, полученных МКЭ (минус 27 дБ), и МКРВО (минус 14 дБ). При этом граничная частота для модели МПЛП со слоем чистого льда, полученной по методике из п. 2.1 лежит в диапазоне 5,0–5,2 ГГц по измерениям и вычислениям (МКЭ и МКРВО).

Из рисунка 3.24в видно, что до 3 ГГц $|S_{21}| \leq$ минус 1 дБ для измеренных и вычисленных МКЭ и МКРВО значений $|S_{21}|$ МПЛП со слоем льда. Свыше 3 ГГц для измеренных $|S_{21}| \leq$ минус 1,2 дБ, а со слоем чистого льда $|S_{21}| <$ минус 2 дБ. Минимумы вычисленных МКРВО и МКЭ $|S_{21}|$ для моделей МПЛП со слоем льда, полученных по методике из п. 2.1, составили минус 3,1 дБ и минус 2,6 дБ. Из рисунка 3.24г видно, что с ростом частоты измеренные и вычисленные МКЭ и МКРВО $|S_{21}|$ уменьшаются до минус 1,8 дБ для МПЛП со слоем чистого льда, и минус 2,2 дБ для МПЛП со слоем льда, с моделью полученной по методике из п. 2.1.

3.5 Оценка влияния коаксиального перехода на S -параметры линии передачи на печатной плате

Исследуемым объектом выбраны МПЛП на ПП, специально подготовленные для измерений в ТЕМ-камере [117]. Для оценки влияния различного расположения SMA разъемов на частотные зависимости $|S_{21}|$ были созданы три разные модели. В первом случае разъемы SMA располагались с торцов ПП (рисунок 3.25а, з), во втором SMA располагались с нижней стороны ПП (рисунок 3.25б, д), а в третьем разъемы SMA отсутствовали (рисунок 3.25в, з).

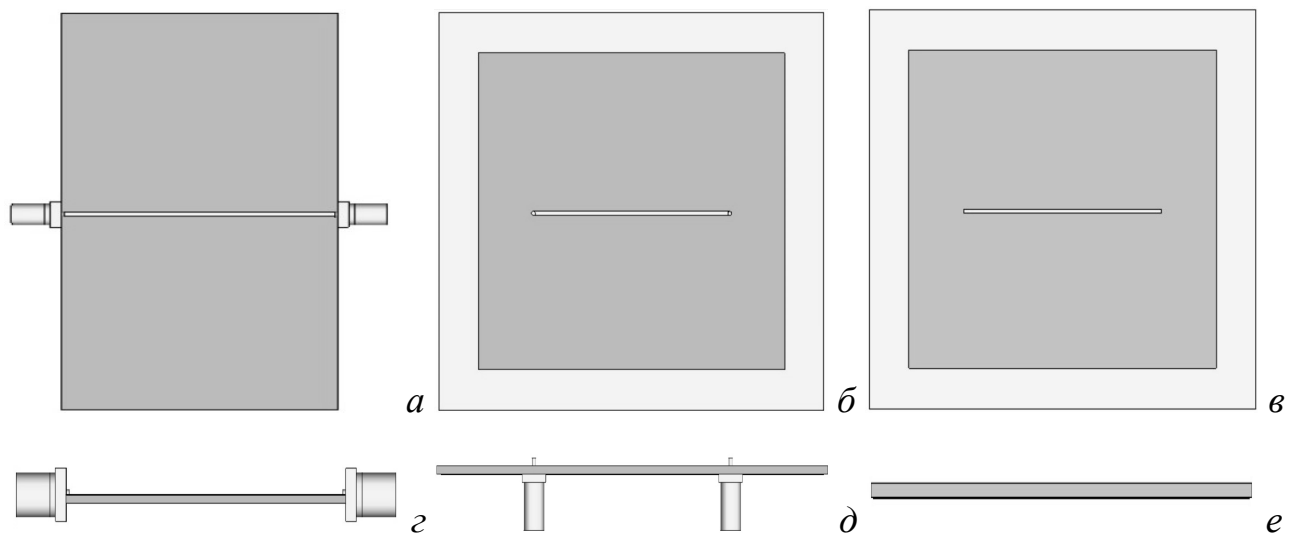


Рисунок 3.25 – Внешний вид ПП сверху (а-в) и в боковой проекции (z-е) с SMA соединителями подключенными к ЛП с торца (а, z) и через опорный проводник (б, d) и без них (в, e).

После создания геометрических моделей ПП вычислены S -параметры МПЛП с SMA портами и без них используя МКЭ и МКРВО (рисунок 3.25).

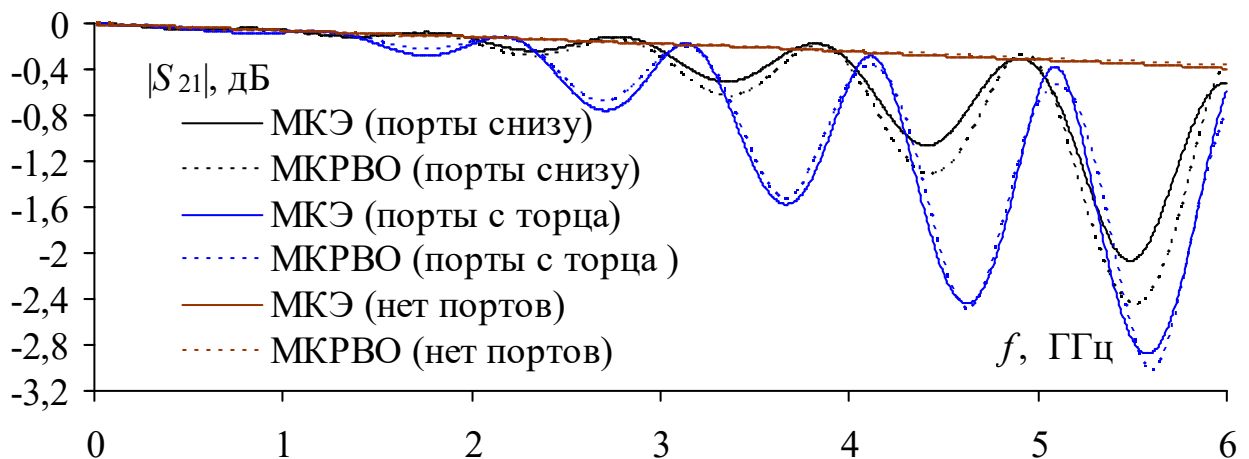


Рисунок 3.26 – Сравнительный анализ частотных зависимостей $|S_{21}|$ при расположении SMA портов с торцов и с нижней стороны ПП, а также без них

Из рисунка 3.26 видно, что расположение и наличие SMA портов на МПЛП оказывает влияние на частотную зависимость $|S_{21}|$. При этом видно, что наличие портов SMA на МПЛП оказывает заметное влияние на значение $|S_{21}|$, которое проявляется в виде возникновения максимумов и минимумов $|S_{21}|$, разница между которыми увеличивается с ростом частоты. Для МПЛП без портов SMA значение $|S_{21}|$ плавно уменьшается до минус 0,4 дБ с ростом частоты. Это показывает, что порты SMA могут оказывать влияние на

частотную зависимость $|S_{21}|$ МПЛП на ПП. В случае подключения SMA портов с торцов ПП, то до частоты 1,4 ГГц значения $|S_{21}|$ совпадают для случая МПЛП без портов, тогда как при подключении SMA портов с нижней части ПП они совпадают до частоты 2 ГГц. В результате SMA соединители необходимо установить с обратной (нижней) стороны ПП.

Анализируя частотную зависимость $|S_{21}|$ МПЛП при разном подключении портов SMA выявлено, что первый минимум значений $|S_{21}|$ (минус 0,3 дБ) располагается на частоте 1,8 ГГц при их торцевом расположении, а в случае их расположения с обратной стороны ПП на частоте 2,3 ГГц. Минимальное значение $|S_{21}|$ на частоте 5,5 ГГц составляет минус 2,1 дБ для МКЭ и минус 2,4 дБ для МКРВО при расположении портов SMA с обратной стороны ПП. В случае расположения портов SMA с торцов ПП, то минимальное значение $|S_{21}|$ достигает минус 2,9 дБ для МКЭ и минус 3 дБ для МКРВО на частоте 5,6 ГГц. В результате оптимальное подключение SMA портов к ЛП на ПП размером 100×100 мм следует выполнять с обратной (нижней) стороны ПП.

3.6 Основные результаты раздела

Разработана методика анализа электрических параметров ЛП покрытых плёнкой воды и слоем льда при различных температурах. Методика применима при моделировании ЛП на начальных этапах проектирования ПП критичных РЭС и позволяет учесть влияния температуры и влажности на S -параметры ЛП. Используя методику показано влияние покрытия пленкой воды и слоем льда, а также температуры на электрические характеристики МПЛП. Показано, что выбор электрической модели и толщины пленки воды и слоя льда, а также их расположение на ПП оказывают существенное влияние на S -параметры ЛП. Так, увеличение толщины с 0,35 до 1 мм слоя воды существенно влияет $|S_{21}|$ МПЛП, что может привести к ослаблению полезных и помеховых сигналов в ЛП на высоких частотах с изменением её частоты среза в широких диапазонах. Применение методики на этапе проектирования, позволит оценить изменение параметров сигналов РЭС в широких диапазонах частот, температур,

влажности воздуха, а также химического состава окружающей среды. По результатам применения возможно будет внести определенные изменения в конструкцию или предусмотреть необходимое усиление сигнала для заданного узла или блока РЭС при учете воздействия температуры и влажности. В результате предложенная методика может быть полезна в качестве инструмента для повышения устойчивости и срока службы РЭС.

Используя методику выявлено, что пленка воды, нанесенная на один из концов МПЛП и создающая неоднородность в поперечном сечении МПЛП, с ростом частоты уменьшает минимальное значение $|S_{21}|$ МПЛП до минус 39 дБ, а пленка воды нанесенная на одну из сторон сигнального проводника, и не создающая при этом неоднородности поперечного сечения, расположенная на двух концах, уменьшает минимальное значение $|S_{21}|$ МПЛП до минус 59 дБ. Также показано, что пленка воды на КЛП влияет на значения $|S_{21}|$, которые зависят от выбранной модели воды, поскольку для модели чистой и морской воды происходит ослабление на частотах до 10 МГц, тогда как для модели воды на основе ВП или модели Дебая она отсутствует. Выявлено, что при увеличении толщины пленки чистой воды с 0,35 до 1 мм максимальное значение $|S_{21}|$ КЛП уменьшается от минус 1 до минус 4 дБ и от минус 2 до минус 6 дБ при появлении пленки воды на одном или двух концах КЛП. Для морской воды увеличение толщины пленки воды с 0,35 до 1 мм приводит к уменьшению значения $|S_{21}|$ от минус 3 до минус 6 дБ и от минус 4 до минус 8 дБ при появлении пленки воды на одном или двух концах КЛП. При этом пленка чистой и морской воды оказывает минимальное влияние на значение $|S_{21}|$ при ее расположении на одном или двух концах КЛП.

Исследовано влияние пленки воды и слоя льда на S -параметры четырех МПЛП в диапазоне частот от 10 МГц до 6 ГГц при 25°C и минус 50°C. Показано, что температура незначительно влияет (до 1 дБ) на $|S_{21}|$ МПЛП без пленки воды и слоя льда. Показано, что измеренные и вычисленные МКЭ и МКРВО $|S_{21}|$ для МПЛП с пленкой воды могут отличаться от 7 до 15 дБ на

частотах выше 2 ГГц в зависимости от МПЛП, тогда как до 2 ГГц $|S_{21}|$ хорошо согласуются с разницей, не превышающей 2 дБ, а разница между измеренными и вычисленными $|S_{21}|$ для МПЛП со слоем льда до частоты 3 ГГц не превышает 1 дБ, а выше 3 ГГц заметно отличается в зависимости от МПЛП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты:

1. Разработана модель для вычисления σ воды на основе измеренных S -параметров отличающаяся вычислением уровня ВП воды в коаксиальной камере при изменении ее температуры. Разница с известными значениями σ в диапазоне частот до 6 ГГц составляет 1 См/м в диапазоне температур от 25 до 100°C и не превышает 0,5 См/м при отрицательных (минус 50°C) температурах, а при положительных (0°C) – 1,8 См/м. Достоверность и адекватность модели для оценки σ воды при различной температуре подтверждается измеренными S -параметрами в разные дни, при разных температурах воды из одного источника.

2. Разработана методика анализа электрических параметров ЛП покрытых плёнкой воды и слоем льда при различных температурах. Методика применима при моделировании ЛП на начальных этапах проектирования ПП критичных РЭС и позволяет учесть влияния температуры и влажности на S -параметры ЛП. Используя методику показано влияние покрытия пленкой воды и слоем льда, а также температуры на электрические характеристики МПЛП.

3. Показано, что наибольшее влияние на ВП полисахарида проявляется при добавлении раствора NaCl (до 10 дБ), а наименьшее – при добавлении воды и раствора CaCl₂ (до 8 дБ). Выявлено, что ВП смеси уголь-полисахарид зависят от температуры в диапазоне частот от 10 до 12 ГГц при 25°C максимальные ВП составляют 10 дБ, тогда как при минус 30°C увеличиваются до 12 дБ.

4. Показано, что химический состав влияет на расположение проекций измеренных частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры при разной температуре в пространстве ГК. Жидкость, содержащая NaCl, обладает максимальной разницей значений ГК по сравнению с другими растворами, измеренными при помощи коаксиальной камеры, а электрофизические характеристики данного раствора наиболее зависимы от температуры.

5. Выявлено, что при пленки воды на поверхности МПЛП происходит расширение диапазона рабочих частот, а также изменение частоты среза при изменении толщины пленки воды: от 0,1 до 3 ГГц для полного и от 0,1 до 3,9 ГГц для частичного покрытия пленкой воды.

6. Оценено влияние пленки воды и слоя льда на частотные зависимости S -параметров на примере различных ЛП. Показано, что измеренные и вычисленные по МКЭ и МКРВО $|S_{21}|$ для ЛП с пленкой воды могут отличаться от 7 до 15 дБ на частотах свыше 2 ГГц, а до 2 ГГц могут быть незначительно отличаться (до 2 дБ) в зависимости от ЛП. Также, показано, что разница между измеренными и вычисленными $|S_{21}|$ для ЛП со слоем льда до частоты 3 ГГц не превышает 1 дБ, а свыше 3 ГГц заметно отличается, в зависимости от ЛП.

Рекомендации

1. Выполнить оценку влияния климатических факторов на примере существующих пористых материалов в радиоэлектронике, которые склонны к существенному изменению их массы под воздействием влажности и температуры.

2. Доработать предложенные рекомендации для измерения матриц рассеяния коаксиальной камеры при изменении температуры с целью минимизации этого влияния на существующие измерительные системы.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Исследование и разработка новых методов по оценке влияния температуры и влажности на электрические характеристики узлов РЭС.

2. Имитация возможного климатического воздействия на критичные устройства РЭС.

3. Оценка влияния климатических факторов на экологически чистые материалы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ADM	Amplitude difference measure
FDM	Feature difference measure
FSV	Feature selective validation method
GDM	Global difference measure
БО	Биологический объект
ВАЦ	Векторный анализатор цепей
ВП	Вносимые потери
ГК	Главная компонента
КЛП	Копланарная линия передачи
ЛП	Линия передачи
МГК	Метод главных компонент
МКРВО	Метод конечных разностей во временной области
МКЭ	Метод конечных элементов
МПЛП	Микрополосковая линия передачи
ПП	Печатная плата
РПМ	Радиопоглощающий материал
РЭС	Радиоэлектронное средство
СВЧ	Сверхвысокочастотный
ЭМВ	Электромагнитная волна
ЭМИ	Электромагнитное излучение
ЭМП	Электромагнитное поле
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭЭ	Эффективность экранирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходаков В.Е. Природно-климатические факторы и социально-экономические системы / Ходаков В.Е., Соколова Н.А. – М.: НИЦ ИНФРА-М. – 2016. – 604с.
2. Popular mechanics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a60296270/most-expensive-plane-crash-in-history/> (дата обращения: 25.01.2025).
3. MIL-STD-810C. Military standart environmental test method. – 1975. – 258p.
4. Зеленский В.А. Основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств: учебное пособие / В.А. Зеленский, К.И. Сухачев. – Самара: Самарский университет, 2020. – 146 с.
5. ГОСТ 20.57.406-81 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ. – 2005. – 133с.
6. ГОСТ 15150-69 Средства связи, информатики и сигнализации реабилитационные электронные Машины приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортировка в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартинформ. – 2006.– 72с.
7. ГОСТ 15150-69 Машины приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортировка в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартинформ. – 2010.– 71с.
8. ГОСТ 14254-2015 Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP). (IEC 60529:2013) – М.: Стандартинформ. –2016.– 39с.
9. ГОСТ 16962.1-89 Изделия электротехнические. Методы испытаний на устойчивость к климатическим внешним воздействующим факторам М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – 78с.
10. ГОСТ 15543.1-89 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – 34с.
11. Conseil-Gudla H. Humidity build-up in electronic enclosures exposed to different geographical locations by RC modelling and reliability prediction / H. Conseil-Gudla, Z. Staliulionis, S. Mohanty, M.S. Jellesen, J.H. Hattel, R. Ambat // Microelectronics Reliability. – 2018. – Vol. 82. – P. 1361–146.
12. Conseil-Gudla H. Humidity Build-Up in a Typical Electronic Enclosure Exposed to Cycling Conditions and Effect on Corrosion Reliability / Conseil-

- Gudla H., Conseil H., Gudla V.C., Jellesen M.S., Ambat R. // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 6, P. 1379–1388.
13. Space engineering ECSS-E-ST-03C // Space engineering testing. – 2012. – 143p.
 14. Marshal W.L. Electrical conductance of liquid and supercritical water evaluated from 0 °C and 0.1 MPa to high temperatures and pressures. Reduced-state relationships // J. Chem. Eng. Data. – 1987. – Vol. – P.221–226.
 15. ГОСТ Р МЭК 60068-2-82-2017 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-82 Испытания. Испытания XW: Методы испытания усов в электронных и электротехнических компонентах – М.: Стандартинформ. – 2017. – 28с.
 16. Jiang Z. Analysis of the influence and mechanism of the pollution condensation environment on the electrochemical migration behaviour of printed circuit board with immersion silver / Z. Jiang, X. Liu, J. Song, Y. Tan, H. Zhang, J. Wu, C. Dong, K. Xiao // Corrosion Science. – 2024. – Vol. 233, P. 1–12.
 17. Verdingovas V. Analysis of surface insulation resistance related failures in electronics by circuit simulation / V. Verdingovas, S. Joshy, M. S. Jellesen, R. Ambat // Circuit World. – 2017. – Vol. 43(2), P. 45–55.
 18. Verdingovas V. Analysis of surface insulation resistance related failures in electronics by circuit simulation / V. Verdingovas, S. Joshy, M.S. Jellesen, R.Ambat // Circuit World. – 2017. – Vol. 43, no 2. – P. 45–55.
 19. Joshy S. Circuit analysis to predict humidity related failures in electronics - Methodology and recommendations / S. Joshy, V. Verdingovas, M.S. Jellesen, R. Ambat // Microelectronics Reliability. – 2019. – Vol. 93. – P. 81-88.
 20. Baylakoğlu İ. The detrimental effects of water on electronic devices / İ Baylakoğlu, A. Fortier, S. Kyeong, R. Ambat, H. Conseil-Gudla, M. H. Azarian, M.G. Pecht // e-Prime-Advances in electrical engineering, Electronics and energy. – 2021. – Vol. 1, No. 100016. – P. 1–20.
 21. Smet V. Ageing and failure modes of IGBT modules in high-temperature power cycling / V. Smet, F. Forest, J.J. Huselstein, F. Richardeau, Z. Khatir, S. Lefebvre, M. Berkani // IEEE transactions on industrial electronics. – 2011. – Vol. 58, no 10. – P. 4931–4941.
 22. ГОСТ 9.719-94 Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы испытаний на старение при воздействии влажного тепла, водяного и соляного тумана. М.: Межгосударственный стандарт. – 1997. – 13с.
 23. Kozak R. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection / R. Kozak, K. Khorsand, M.T. Zarifi // Scientific reports. – Vol. 11, no. 13707.
 24. Schoenlinner B. Cabin ceiling-integrated broadband antenna for wireless services in passenger aircraft / B. Schoenlinner, M. Steinmayer, B. Schulte // 2012 9th European radar conference, Amsterdam, Netherlands. – 2012. – P. 520–523.

25. Zhou Y. Seawater debye model function at L-band and its impact on sa-linity retrieval from aquarius satellite data / Y. Zhou, R.H. Lang, E.P. Dinnat, D.M. Le Vine // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2021. – Vol. 59, no. 10. – P. 8103–8116.
26. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – №4(34), ч. 1. – С. 39–45.
27. Комнатнов М.Е. Методика оценки уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере при температурном воздействии // Доклады ТУСУР. – 2024. – № 3 (27). – С. 30–36.
28. Piotrowska K., Verdingovas V., Ambat R. Humidity-related failures in electronics: effect of binary mixtures of weak organic acid activators / K. Piotrowska, V. Verdingovas, R. Ambat // Journal of materials science: Materials in electronics. – 2018. – Vol. 29, no 20. – P. 17834–17852.
29. Yi P. Electrochemical migration behavior of copper-clad laminate and electroless nickel/immersion gold printed circuit boards under thin electrolyte layers. / P. Yi, K. Xiao, K. Ding, C. Dong, X. Li // Materials. – 2017. – Vol. 10. – No. 137. – P. 1–10.
30. Onibonoje M.O. A distributed control wireless system for environmental humidity determination based on adaptive controller model // Scientific African. – 2021. – Vol. 1. – P. 1–11.
31. Conseil-Gudla H. Humidity buildup in electronic enclosures exposed to constant conditions / H. Conseil-Gudla, Z. Staliulionis, M.S. Jellesen, M. Jabbari, J.H. Hattel, R. Ambat // IEEE Trans. on components, packaging and manufacturing technology. – 2017. – Vol. 7, no. 3. – P. 412–423.
32. Ambat R. Improving intrinsic corrosion reliability of printed circuit board assembly / R. Ambat, H. Conseil-Gudla // 18th Electronics packaging technology conf. – Singapore, 30 November – 03 Dec. – 2016. – P. 540–544.
33. Суппа М., Кузнецова Т. Методика исследования и испытаний влагозащитных покрытий, паяльных паст и технологических процессов // Технологии в электронной промышленности. – 2014. – №. 7. – С. 78-82.
34. Jacobsen J. B. Climatic challenges and product level solutions for electronics in demanding applications / J.B. Jacobsen, J.P. Krog, L. Rimestad, A. Riis, A.H. Holm, // in IMAPS Nordic. – 2012. – P. 1–8.
35. Jacobsen J.B. Climatic challenges and product level solutions for electronics in demanding applications / J.B. Jacobsen, J.P. Krog, L. Rimestad, A. Riis, A.H. Holm // IMAPS Nordic Annual Conference 2012. – Helsingor, Denmark, 2–4 September 2012. – P. 1–8.
36. Wang H. Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities / H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg // IEEE Industrial electronics magazine. – 2013. – Vol. 7(2). – P. 17–26.
37. Sheng Q. et al. On the onset of surface condensation: formation and transition mechanisms of condensation mode // Scientific reports. – 2016. – Vol. 6, no. 30764. P. 1–9.

38. Minzari D. On the electrochemical migration mechanism of tin in electronics / D. Minzari, M. S. Jellesen, P. Moller, R. Ambat // Corrosion science. – 2011. – Vol. 53, no. 10. – P. 3366–3379.
39. Osenbach J. W. Corrosion-induced degradation of microelectronic devices // Semiconductor science and technology. – 1996. – Vol. 1, no. 2. – P. 155–162.
40. Jiang Z. Analysis of the influence and mechanism of the pollution condensation environment on the electrochemical migration behaviour of printed circuit board with immersion silver / Z. Jiang, X. Liu, J. Song, Y. Tan, H. Zhang, J. Wu, C. Dong, K. Xiao // Corrosion Science. – 2024. – Vol. 233. – No. 112076. – P. 1–12.
41. Artemov V. The Interaction of electromagnetic waves with water. The Electrodynamics of water and ice // Springer series in chemical physics. – 2021. – Vol. 124. – P. 54–104.
42. Zhao L. Changes of water hydrogen bond network with different externalities / L. Zhao, K. Ma, Z. Yang // International journal of molecular sciences. – 2015. – Vol. 16, no. 4. – P. 8454–8489.
43. Ley S. Ultra-wideband temperature dependent dielectric spectroscopy of porcine tissue and blood in the microwave frequency range / S. Ley, S. Schilling, O. Fiser, J. Vrba, J. Sachs, M. Helbig // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – No. 7. – PP. 1–21. DOI: 10.3390/s19071707
44. Gregory A.P. Validation of a broadband tissue-equivalent liquid for SAR measurement and monitoring of its dielectric properties for use in a sealed phantom / A.P. Gregory, K. Quéléver, D. Allal, O. Jawad // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – No. 10. – PP. 1–13. DOI: 10.3390/s20102956
45. Kaatze U. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature // Journal of Chemical & Engineering Data. – 1989. – Vol. 34(4). – P. 371–374. DOI: 10.1021/je00058a001.
46. Cole, K.S.; Cole, R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. J. Chem. Phys. 1941, 9, 341–351.
47. Ley S. Ultra-Wideband temperature dependent dielectric spectroscopy of porcine tissue and blood in the microwave frequency range / S. Ley, S. Schilling, O. Fiser, J. Vrba, J. Sachs, M. Helbig // Sensors (Basel, Switzerland). – 2019. – Vol. 19, no 7. – P. 1–21.
48. Gregory A.P. Validation of a broadband tissue-equivalent liquid for SAR measurement and monitoring of its dielectric properties for use in a sealed phantom / A.P. Gregory, K. Quéléver, D. Allal, O. Jawad // Sensors (Basel, Switzerland). – 2020. – Vol. 20, no. 2956. – P.1–13.
49. Lun'kov A.E. Dispersion of water conductivity in the frequency range of 104–106 Hz / A.E. Lun'kov, D.G. Kovalev // Russian journal of electrochemistry. – 2019. – Vol. 55. – P. 1246–1250.
50. Zhuravlev V.A. Analysis of dielectric spectra of water with conductive impurities in a wide frequency range / V.A. Zhuravlev, V.I. Suslyayev, A.V. Zhuravlev., E.Yu. Korovin // Russ. Phys. J. – 2018. – Vol. 60. – P. 1893–

- 1900.
51. Zeng X. Fundamentals of monitoring condensation and frost/ice formation in cold environments using thin-film surface-acoustic-wave technology / X. Zeng, H. Ong, L. Haworth, Y. Lu, D. Yang, M. Rahmati, Q. Wu, H. Torun, J. Martin, X. Hou, X. Lv, W. Yuan, Y. He, Y. Fu // *ACS Applied materials & interfaces*. – 2023. – Vol. 15, no. 29. – P. 35648–35663.
52. Firoozy N. Retrieval of young snow-covered sea-ice temperature and salinity evolution through radar cross-section inversion / N. Firoozy, A. Komarov, P. Mojabi, D. Barber, J. Landy, R. Scharien // *Oceanic Engineering*. – 2016. – Vol. 41, No. 2, pp. 326-338, 2016.
53. IT IS FOUNDATION. Database Summary. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary/>. (дата обращения: 21.01.2024).
54. Vidjak K. Broadband Dielectric spectroscopy with a microwave ablation antenna / K. Vidjak, C. Hessinger, M. Cavagnaro // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, no. 5. – P. 1–21.
55. Water Structure and Science [Online]. Available: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html. (дата обращения: 28.04.2025).
56. Небезин В.Н. Обзор способов определения химических и биологических компонент в жидкостях при помощи СВЧ-устройств // XVII Международная научно- практическая конференция «Электронные средства и системы управления», 17 – 19 ноября 2021 г., Томск, Россия.
57. Abduljabar A.A. Double microstrip microfluidic sensor for temperature correction of liquid characterization / A.A. Abduljabar, H. Hamzah, A. Porch // in *IEEE Microwave and wireless components letters*. – 2018. – Vol. 28, No. 8. – P. 735–737.
58. Artemov V. The Dielectric properties and dynamic structure of water and ice. In: *The Electrodynamics of water and ice* // Springer series in chemical physics. Springer, Cham. – 2021. – Vol. 124. – P. 131–169.
59. Nevezhin V. Analysis of electrical parameters of various liquids in a coaxial cell / V. Nevezhin, A. Busygina, M. Komnatnov // 2022 Ural-Siberian conference on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT). – 2022. – P. 313–317.
60. Bizhani H. Highly deformable porous electromagnetic wave absorber based on Ethylene-Propylene-Diene monomer/multiwall Carbon nanotube Nanocomposites / H. Bizhani, A.A. Katbab, E. Lopez-Hernandez, J.M. Miranda, R. Verdejo // *Polymers (Basel)*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1–14.
61. Chung D.D.L. Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing // *Carbon*. – 2012. – Vol. 50(9). – P. 3342–3353.
62. Chen J. Graphene oxide-deposited Carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application / J. Chen, D. Zhao, H. Ge, J. Wang // *Construction and building materials*. – 2015. – Vol. 84. – P. 66–72.

63. Nam I.W. Synergistic effect of MWNT/fly ash incorporation on the EMI shielding/absorbing characteristics of cementitious materials / I.W. Nam, H.K. Lee // *Construction and building materials*. – 2016. – Vol. 115. – P. 651–661.
64. Natalio F. Sustainable lightweight Biochar-Based composites with electromagnetic shielding properties / F. Natalio, T.P. Corrales, Y. Feldman, B. Lew, E.R. Graber // *ACS Omega*. – 2020. – Vol. 5. – P. 32490–32497.
65. Huang Y. Metal Oxide/Nitrogen-Doped Carbon nanosheet heteronanostructures as highly efficient electromagnetic wave absorbing materials / Y. Huang, W. Xue, X. Hou, R. Zhao // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26. – P. 1–13.
66. Thomassin J.-M. Polymer/Carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials / J.-M. Thomassin, C. Jérôme, T. Pardoen, C. Bailly, I. Huynen, C. Detrembleur // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2013. – Vol. 74(7). – P. 211–232.
67. Karthik D. Activated Carbon derived from carbonization of Kevlar waste materials: A Novel single stage method / D. Karthik, V. Baheti, J. Militky, M.S. Naeem, V. Tunakova, A. Ali // *Materials (Basel)*. – 2021. – Vol. 14, Iss. 6433. – P. 1–15.
68. Zhang Y. Confinedly implanted NiFe₂O₄-rGO: Cluster tailoring and highly tunable electromagnetic properties for selective-frequency microwave absorption / Y. Zhang, X. Wang, M. Cao // *Nano research*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1426–1436.
69. Jia Z. Progress in low-frequency microwave absorbing materials / Z. Jia, D. Lan, K. Lin, et al // *J. Mater. Sci: Mater. electron.* – 2018. – Vol. 29. – P. 17122–17136.
70. Рыжкин М.Е. Экранирование электрического поля в воде / М.И. Рыжкин, И.А. Рыжкин, А.В. Ключев // *Письма в ЖЭТФ*. – 2019. – С. 1–4.
71. Pillai R. Electrolytic drops in an electric field: A numerical study of drop deformation and breakup / R. Pillai, J.D. Berry, D.J.E. Harvie, M.R. Davidson // *Physical review E*. – 2015. – Vol. 92(1). – P. 1–15.
72. Tamburrano A. Coaxial waveguide methods for shielding effectiveness measurement of planar materials up to 18 GHz. / A. Tamburrano, D. Desideri, A. Maschio, M. Sabrina Sarto // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2014. – Vol. 56(6) – P. 1386–1395.
73. Wang Y. Hydro-sensitive sandwich structures for self-tunable smart electromagnetic shielding / Y. Wang, X-D. Cheng, W-L. Song, C-J. Ma, X-M. Bian, M. Chen // *Chemical engineering journal*. – 2018. – Vol. 344. – P. 342–352.
74. Jia X. Evaluation, fabrication and dynamic performance regulation of green EMI-shielding materials with low reflectivity: A review / X. Jia, Y. Li, B. Shen, W. Zheng // *Composites part B: Engineering*. – 2022. – Vol. 233. – P. 1–23.
75. Abduljabar A.A. Multi-resonators, microwave microfluidic sensor for liquid

- characterization / A.A. Abduljabar, H. Hamzah, A. Porch // Microwave and optical technology letters. – 2021. – Vol. 63(4). – P. 1042–1047.
76. Korostynska O. Electromagnetic wave sensing of NO₃ and COD concentrations for real-time environmental and industrial monitoring / O. Korostynska, A. Mason, M. Ortoneda-Pedrola, A. Al-Shamma'a // Sensors and actuators B: Chemical. – 2014. – Vol. 198. – P. 49–54.
 77. Azimi Dijvejin Z. Smart low interfacial toughness coatings for on-demand de-icing without melting / Z. Azimi Dijvejin, M.C. Jain, R. Kozak, M.H. Zarifi, K. Golovin // Nature communication. – 2022. – Vol. 13, no 5119. – P. 1–12.
 78. Пат. US9302777B2 США, МПК B64D15/20. Aircraft icing detector / N.O. Renno (US), A. Arbor (US). – №61/895,038; заявл. 23.10.2014; выдан 05.04.2016.
 79. Madi E. A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades / E. Madi, K. Pope, W. Huang, T. Iqbal // Renewable and sustainable energy reviews. – 2018. – Vol. 103. – P. 269–281.
 80. Seungwan K. Noninvasive in vitro measurement of pig-blood D-glucose by using a microwave cavity sensor / K. Seungwan, M. Harutyun, K. Jongchel, B. Arsen, L. Jung-Ha, E. Lkhamsuren, F. Barry, L. Kiejn // Diabetes research and clinical practice. – 2012. – Vol. 96, no. 3. – P. 379–384.
 81. Kandwal A. Highly sensitive closed loop enclosed split ring biosensor with high field confinement for aqueous and blood-Glucose measurements / A. Kandwal, T. Igbe, J. Li, Y. Liu, S. Li, L.W. Y. Liu, Z. Nie // Scientific reports. – 2020. – Vol. 10(4081). – P. 1–9.
 82. Guliy O.I. Sensor for ampicillin based on a microwave electrodynamic resonator / O.I. Guliy, B.D. Zaitsev, A.V. Smirnovc, O.A. Karavaeva, I.A. Borodina // Biosensors and bioelectronics. – 2019. – Vol. 130. – P. 95–102.
 83. Zarifi M.H. High resolution microwave microstrip resonator for sensing applications / M.H. Zarifi, T. Thundat, M. Daneshmand // Sensors and actuators A: Physical. – 2015. – Vol. 233. – P. 224–230.
 84. Narang R. Sensitive, real-time and non-intrusive detection of concentration and growth of pathogenic bacteria using microfluidic-microwave ring resonator biosensor / R. Narang, S. Mohammadi, M.M. Ashani, H. Sadabadi, H. Hejazi, M.H. Zarifi, A. Sanati-Nezhad // . Scientific reports. – 2018. – Vol. 8(1). – P. 1–10.
 85. Asghar Qureshi S. Double-Layered metamaterial resonator operating at millimetre wave for detection of dengue virus / S. Asghar Qureshi, Z. Zainal Abidin, H.A. Majid, A.Y.I. Ashyap, C. Hwang See // International journal of electronics and communications. – 2022. – Vol. 146, no. 154134.
 86. Luckasavitch K. Magnetically coupled planar microwave resonators for real-time saltwater ice detection / K. Luckasavitch, R. Kozak, K. Golovin, M.H. Zarifi // Sensors and actuators A: Physical. – 2022. – Vol. 333, no 113245. – P. 1–9.
 87. Abduljabar A.A. Multi-resonators, microwave microfluidic sensor for liquid

- characterization / A.A. Abduljabar, H. Hamzah, A. Porph // *Microwave and optical technology letters*. – 2021. – Vol. 63(4). – P. 1042–1047.
88. Abdulkarim Y.I. Novel metamaterials–based hypersensitized liquid sensor integrating omega–shaped resonator with microstrip transmission line / Y.I. Abdulkarim, L. Deng, M. Karaaslan, O. Altıntaş, H.N. Awl, F.F. Muhammadsharif, C. Liao, E. Unal, H. Luo // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20(943). – P. 1–18.
 89. Mason A. A resonant co–planar sensor at microwave frequencies for biomedical applications / A. Mason, O. Korostynska, M. Ortoneda–Pedrola, A. Shaw, A. Al–Shamma’a // *Sensors and actuators A: Physical*. – 2013. – Vol. 202. – P. 170–175.
 90. Soprani M. Real–Time microwave, dielectric, and optical sensing of Lincomycin and Tylosin antibiotics in water: Sensor fusion for environmental safety / M. Soprani, O. Korostynska, A. Amirthalingam, J. Cullen, M. Muradov, E.N. Carmona, G. Sberveglieri, V. Sberveglieri, A. Al–Shamma’a // *Journal of sensors*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–11.
 91. Nakouti I. Detection of pathogenic bacteria in aqueous media: Assessing the potential of real–time electromagnetic wave sensing / I. Nakouti, O. Korostynska, A. Mason, A.I. Al–Shamma’a // *International journal on smart sensing and intelligent systems*. – 2014. – Vol. 5. – P. 1–6.
 92. Frau I. Comparison of electromagnetic wave sensors with optical and low frequency spectroscopy methods for real–time monitoring of lead concentrations in mine water / I. Frau, O. Korostynska, A. Mason, P. Byrne // *Mine water and the environment*. – 2018. – Vol. 37. – P. 617–624.
 93. Cataldo A. Quality and anti–adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy / A. Cataldo, E. Piuze, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone // *Measurement*. – 2010. – Vol. 43(8). – P. 1031–1039.
 94. Praveen Kumar A.V. Dielectric characterization of common edible oils in the higher microwave frequencies using cavity perturbation / A.V. Praveen Kumar, A. Goel, Ritish Kumar, A.K. Ojha, J. John, Jose Joy // *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. – 2019. – Vol. 53. – P. 48–56.
 95. IEEE Std-299–2007. IEEE Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures
 96. ASTM-D4935. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials
 97. Wilson P.F. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I. Far–field source simulation / P.F. Wilson, M.T. Ma, J.W. Adams // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 1988. – Vol. 30, no. 3. – P. 239–250.
 98. Wilson P.F. A study of techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials / P.F. Wilson, M.T. Ma // *Natl. Bur. Stand. Tech. Note 1095*. – USA. – 1986. – 72 p.
 99. Wagner N. Broadband electromagnetic characterization of two–port rod based

- transmission lines for dielectric spectroscopy of soil / N. Wagner, B. Muller, K. Kupfer, F. Bonitz, M. Schiwing, A. Scheuermann // Proc. First European Conference on Moisture Measurement - Aquametry 2010. – Weimar, German. 2010. – Vol. 1. P. 228-237.
100. La Gioia A. Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Measurement of Biological Tissues: Challenges and Common Practices / A. La Gioia, E. Porter, I. Merunka, A. Shahzad, S. Salahuddin, M. Jones, M. O'Halloran // *Diagnostics* (Basel). – 2018. – Vol. 8. P. 1–38.
 101. Щелкунов С.А. Антенны (теория и практика) = *Antennas (theory and practice)* / С.А. Щелкунов, Г.Т. Фриис; перевод с английского под редакцией Л.Д. Бахрах. — М: Советское радио, 1965. — 604 с. : ил., табл., схем., граф.
 102. Badic M. The failure of coaxial TEM cells ASTM standards methods in H.F. range / M. Badic, M.J. Marinescu // 2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Minneapolis, MN, USA. 2002. – Vol. 1, P. 29–34.
 103. Demakov A.V. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // *IOP Conference series: Materials science and engineering*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 734, no. 1. – P. 1–6.
 104. Патент на изобретение №2759079 РФ. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов. Авторы: А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Иванов И.И. Николаев, Т.Р. Газизов Заявка №2020131978. Приор. изобр. 29.09.2020. Оpub. 09.11.2021. Бюл. №31.
 105. Шайманов Н.Ю. Использование метода валидации выделением особенностей для сопоставления наборов экспериментальных или смоделированных данных / Н.Ю. Шайманов, В.П. Авраамов, А.А. Иванов, С.П. Куксенко // *Програмные продукты и системы*. – С. 310–317.
 106. IEEE Standard for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations // *IEEE Std. 1597.1-2022*. – 2022. – P. 1–52.
 107. He R. Robust Principal Component Analysis Based on Maximum Correntropy Criterion, / R. He, B.G. Hu, W.S. Zheng, Kong X.W. // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2011. – Vol. 20(6). – P. 1485-1494.
 108. Nevezhin V. N. Estimation of water conductivity using a coaxial cell under temperature change / V.N. Nevezhin M.E. Komnatnov // 2024 IEEE 25th International conference of young professionals in electron devices and materials. – Altai , June 28 – July 2, 2024 – P. 1570–1574.
 109. Невежин В.Н. Анализ электрических параметров жидкостей в коаксиальной камере при изменении температуры / В.Н. Невежин, А.В. Бусыгина, М.Е. Комнатнов // *Ural radio engineering journal*. – 2023. – Т. 7, №. 1. – С. 37–55.
 110. Nevezhin V.N., Komnatnov M.E., Busygina A.V. Measurement of Insertion

- Losses of Aqueous Calcium and Sodium Chloride Solutions in Liquid and Solid Aggregate States in a Coaxial Cell / V.N. Nevezhin, M.E. Komnatnov, A.V. Busygina // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE. – 2023. – P. 96–99.
111. Nevezhin V. Research of attenuation of the electromagnetic wave amplitude by organic materials in a coaxial cell / V. Nevezhin, M. Komnatnov, A. Busygina // 2022 International Ural conference on electrical power engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. – 2022. – P. 313–317
 112. ГОСТ 10007-80 Фторопласт-4. Технические условия. М.: Межгосударственный стандарт. – 2008. – 16с.
 113. Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEC/IEEE International Standard-Measurement Procedure for the Assessment of Specific Absorption Rate of Human Exposure to Radio Frequency Fields from Hand-held and Body-mounted Wireless Communication Devices: Human Models, Instrumentation, and Procedures (Frequency Range of 4 MHz to 10 GHz). – IEEE. – 2020.
 114. Arndt S. Sea-ice surface properties and their impact on the under-ice light field from remote sensing data and in-situ measurements. – 2017. – 149 p.
 115. Flatscher M. Measurement of complex dielectric material properties of ice using electrical impedance spectroscopy / M. Flatscher, M. Neumayer, T. Bretterklieber, B. Schweighofer // 2016 IEEE SENSORS, Orlando, FL, USA 2016. – 2017. – P. 1–3.
 116. Невежин В.Н., Комнатнов М.Е. Оценка влияния тонкой пленки воды на частотные зависимости S-параметров линии передачи при положительной и отрицательной температурах // Труды учебных заведений связи. – 2024. – №. 5(10). – С. 24–33.
 117. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2018. – №1 (21). – С. 52–56.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

Копии актов о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
и инновациям ФГАОУ ВО «ТГУС УР»
С.П. Куксенко
« 5 » 09 2025 г.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы

Невежина Виталия Николаевича

Мы, нижеподписавшиеся, зав. каф. телевидения и управления (ТУ), д.т.н., профессор, Газизов Т.Р., руководитель НИР по грантам РНФ №19-79-10162 и РНФ №19-79-10162-П, д.т.н., Комнатнов М.Е., настоящим актом подтверждаем факт использования следующих результатов диссертационной работы Невежина В.Н. при выполнении работ в рамках соответствующих НИР:

1. S-параметры коаксиальной камеры с органическими материалами и примесями с различным химическим составом, растворенных в воде. Оценки ослабления амплитуды волны органическими материалами в зависимости от их химического состава. Оценка влияния температуры и влажности на вносимые потери. Указанные результаты представлены в итоговом отчёте по гранту РНФ №19-79-10162 «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров» (2021–2022 гг.). Эти результаты позволили подготовить победившую заявку на продолжение проекта.

2. Методика оценки вносимых потерь дистиллированной воды при разных температурах. S-параметры коаксиальных камер с дистиллированной водой в контейнерах 5 мл и 10 мл, в диапазонах частот 10 МГц–12 ГГц и температур минус 50°C–100°C. Оценки вносимых потерь воды в трёх агрегатных состояниях на основе измеренных S-параметров. Частотные зависимости электропроводности воды с различным химическим составом. Указанные результаты представлены в отчёте по гранту РНФ №19-79-10162-П «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров» (этап 1, 2022–2023 гг.). Эти результаты позволили перейти к этапу 2.

3. Методика вычисления удельной электропроводности воды на основе измеренных S-параметров коаксиальной камеры, при изменении её температуры. Методика представлена в итоговом отчёте по гранту РНФ №19-79-10162-П «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров» (2023–2024 гг.). Этот результат позволил успешно завершить проект.

Зав. каф. ТУ, д.т.н., профессор

 Т.Р. Газизов
« 5 » 09 2025 г.

Руководитель проектов в рамках НИР по грантам
РНФ №19-79-10162 и РНФ №19-79-10162-П

 М.Е. Комнатнов
« 3 » сентября 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО «ТУСУР»

С.Н. Куксенко
«5» 09 2025 г.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы

Невежина Виталия Николаевича

Мы, нижеподписавшиеся, зав. каф. телевидения и управления (ТУ), д.т.н., профессор, Газизов Т.Р., руководитель проектов госзадания FEWM-2020-0041, FEWM-2024-0005, д.т.н., профессор Заболоцкий А.М., настоящим актом подтверждаем факт использования следующих результатов диссертационной работы Невежина В.Н. при выполнении работ в рамках соответствующих НИР:

1. Сравнительный анализ типов жидкости в коаксиальной камере при помощи скалярного анализатора цепей. Частотные зависимости S -параметров коаксиальной камеры с различным химическим составом жидкостей. Сравнительный анализ химического состава жидкостей, позволившие выявить и идентифицировать жидкости с различными химическими компонентами, находящиеся в растворе. Указанные результаты представлены в отчёте по проекту в рамках госзадания FEWM-2020-0041 «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» (этап 2, 2021 г.). Они позволили перейти к следующему этапу проекта.

2. Математическая модель для учета влияния температуры и влажности окружающей среды на S -параметры линий передачи, позволяющая моделировать влияние климатических факторов среды на электрические характеристики линий передачи печатной платы. Оценка S -параметров с учетом неодинакового расположения льда и воды на соединителях линии передачи. Указанные результаты представлены в отчёте по проекту в рамках госзадания FEWM-2024-0005 «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий» (этап 1, 2024 г.). Они позволили перейти к следующему этапу проекта.

Зав. каф. ТУ, д.т.н., профессор

Т.Р. Газизов
«5» 09 2025 г.

Руководитель проектов госзадания
FEWM-2020-0041, FEWM-2024-0005, д.т.н., профессор

А.М. Заболоцкий
«5» 09 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ

Директор департамента по учебной работе

Ким М.Ю.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы

Невежина Виталия Николаевича

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ), д.т.н. Газизов Т.Р. и заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе, Бусыгина А.В., настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ следующих результатов диссертационной работы Невежина В.Н.:

1. Методика по оценке электрофизических параметров органических материалов с различным химическим составом при разной температуре окружающей среды.
2. Методика по учету влияния температуры и химического состава водных растворов на их электрофизические характеристики.
3. Алгоритм построения модели линии передачи с жидкостями различного происхождения, учитывающий их электрофизические параметры.

Указанные результаты использованы при проведении практических занятий и лабораторных работ по дисциплине «Электромагнитная совместимость биомедицинских систем» магистратуры по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и «Основы проектной деятельности» бакалавриата по направлениям 11.03.01 «Радиотехника», 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», в 2020–2023 учебных годах.

Заведующий каф. ТУ, д.т.н., профессор

Т.Р. Газизов

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе

А.В. Бусыгина

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Индивидуальные достижения



Young Professionals Involvement
CERTIFICATE OF PARTICIPATION
Awarded to the Finalist

Vitaly Nevezhin

**“Analysis of electrical parameters of various liquids in a
coaxial cell”**

Hereby confirm the International Competition participation at 2022 IEEE USBEREIT 19-21/09 2022

Zeyde Kirill, IEEE R8 Russia (Siberia) YP Affinity Group Chair
