

На правах рукописи

Паршина Наталья Валерьевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ
СТРУКТУРЫ УСТРОЙСТВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Специальность: 05.11.17

Приборы, системы и изделия медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2017 г.

Работа выполнена в Южном федеральном университете на кафедре радиотехнической электроники института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

Научный руководитель: Червяков Георгий Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
г. Таганрог

Официальные оппоненты: Фролов Сергей Владимирович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», г. Тамбов

Кубланов Владимир Семенович
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. Первого президента России Б.Н. Ельцина», г.
Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», г. Тула

Защита состоится «08» июня 2017 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д212.208.23 в Южном федеральном университете по адресу: Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, к. Е, ауд. Е-306.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной библиотеке Южного федерального университета, расположенной по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 21-ж и на сайте <http://hub.sfedu.ru/diss/>

Отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью организации и оформленный согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней» (п. 28), с указанием ФИО (полностью) лица, представившего отзыв, почтовым адресом, наименованием организации, его должности в этой организации, телефона и адреса электронной почты, просим направлять в ЮФУ по адресу: 347922, Россия, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корпус "Е", лаб. 112, ученому секретарю совета Д212.208.23 Исаевой А.С.

Автореферат разослан « » апреля 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.208.23

Исаева А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Электромагнитные волны (ЭМВ) миллиметрового диапазона, называемые крайне высокочастотными (КВЧ), в последние годы широко исследуются и применяются в различных областях науки, техники и медицины. КВЧ-устройства нашли применение как в составе отдельных элементов, так и в сложных радиометрических комплексах.

Важно отметить, что необходимость использования ЭМВ КВЧ-диапазона на сегодняшний день очень актуальна. Особый интерес представляют те возможности, которые открываются при использовании ЭМВ для влияния на процессы жизнедеятельности биологических объектов: микроорганизмов, животных, в том числе и человека.

Изучением вопросов, связанных с терапевтическим воздействием КВЧ-волн, занимались с конца 80-х годов прошлого века известные учёные: Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бецкий, И.В. Лебедев, А.Н. Веткин, В.Д. Искин, А.Х. Тамбиев и другие. Этими и другими авторами обнаружено важное свойство, проявляющееся при взаимодействии биообъектов с КВЧ-полями – зависимость процессов метаболизма от конкретных частот.

Одной из определяющих особенностей, которые демонстрирует частотная зависимость гомеостаза биообъекта, является содержание в нём воды. В последние годы такие исследования ведутся особенно интенсивно. Существует значительное количество публикаций, посвящённых структуризации водных растворов биологических объектов и сред под воздействием КВЧ-поля, которое вызывает изменение проводимости и в итоге, влияет на жизненную активность биообъектов и сред и может привести к их гибели.

Наряду с такими исследованиями, которые предполагали разработку моделей, объясняющих поведение биосред в КВЧ-полях, большую важность представляют разработки радиометрических комплексов, способных осуществлять различные сложные воздействия на исследуемые образцы и регистрировать отклик на них. При этом использование сложных многочастотных преобразований позволяет регистрировать частоты, оказывающие наибольшее влияние на различные биологические среды в указанном диапазоне. Все эти исследования в конечном счёте позволяют разрабатывать установки, способные влиять на процессы жизнедеятельности как, например, бактерий или дрожжей, так и сложных клеточных структур.

На сегодняшний день КВЧ-установки являются важным инструментом не только при лечении целого ряда заболеваний, но и для воздействия на метаболические процессы различных микроорганизмов (активацию или угнетение их жизнедеятельности). При этом воздействии КВЧ-излучение осуществляется чаще всего на основных четырёх частотах 7,1 мм (42,25 ГГц), 5,6 мм (53,57 ГГц), 4,9 мм (61,22 ГГц), или 2,53 мм (118,57 ГГц), оказывающих максимальное воздействие на биологические среды и организмы различной степени организации. Очевидно, это не полный частотный перечень, поэтому основной задачей, стоящей перед исследователями, является выявление именно тех частот, которые наиболее

эффективно влияют на жизнедеятельность организмов. Для этого необходимо определить основные механизмы, лежащие в основе этого воздействия.

Целью работы является разработка методов моделирования поведения биологических структур при взаимодействии с электромагнитными волнами миллиметрового диапазона и создание устройств, позволяющих влиять на их метаболизм, что позволит регулировать жизнедеятельность таких структур и организмов.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач диссертационной работы:

- разработать и проанализировать макромодели клетки, построенные на базе нескольких электрических эквивалентных схем структуры мембрана-протоплазма и усреднённых электрофизических параметров;

- разработать и проанализировать усреднённую модель эритроцита человека в виде обобщенной электрической эквивалентной схемы;

- модифицировать объёмную трёхмерную электродинамическую модель киральной биосреды и получить соотношения, определяющие пространственные компоненты волн в объёме среды;

- провести оценку взаимодействия электромагнитных волн КВЧ-диапазона с биологическими средами, содержащими киральные элементы (молекулы белка, ДНК, РНК);

- разработать методы учета киральных свойств в биологических средах с различной концентрацией воды с помощью введения квазилинейных параметров для расчета коэффициента киральности;

- разработать эффективные радиометрические способы выявления частот влияющих на метаболизм биологических объектов, а также описать структурную и аппаратную реализации этих методов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- предложены макромодели биологической клетки, учитывающие реальные усреднённые электрофизические параметры мембраны и протоплазмы, проанализированы их свойства в КВЧ-диапазоне длин волн и выявлена возможность применения некоторых из них для моделирования биологических сред;

- предложена обобщённая модель эритроцита человека, которая объясняет резонансные свойства этой структуры в КВЧ-диапазоне;

- модифицирована обобщённая трехмерная модель киральной биосреды, учитывающая электродинамические и материальные уравнения и описывающая распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) в её объёме;

- проведена оценка киральности водосодержащих биосред при их взаимодействии с электромагнитными волнами КВЧ-диапазона. Определено, что большинство биологических водосодержащих сред обладают киральными свойствами и это, в ряде случаев, необходимо учитывать в КВЧ-диапазоне;

- получены уточнённые частотные зависимости для величин амплитуды и фазы проводимостей водосодержащей и водонесодержащей сред, позволяющие сделать выводы о необходимости учёта киральных свойств в моделях некоторых водосодержащих биосред;

- предложены радиометрические динамические методы «на проход» и «на отражение», позволяющие выявлять терапевтические частоты по изменениям проводимости сред в сверхвысокочастотных (СВЧ-) и КВЧ-полях;

- предложен метод эффективного исследования воздействия КВЧ-волн на биообъекты, учитывающий низкочастотные объёмно-резонансные свойства среды, помещённой в специальный контейнер.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- проведены классификация и анализ методов исследования параметров проводимости водосодержащих биосред в результате которых выяснено, что большинство из них носят ограниченный характер, требуют больших аппаратных затрат и не исследуют их свойства в широком частотном диапазоне;

- предложены радиометрические комплексы (РК), позволяющие регистрировать изменение проводимости биологической среды по методу «на проход» и «на отражение». Данные РК были использованы для исследования роста и угнетения колоний *Candida albicans* и *Escherichia coli* в диапазоне 38,02 – 48,00 ГГц. Выявлены характерные частоты, которые дают рост колоний бактерий до 160 %, а также частоты, которые угнетают их рост и могут привести к гибели. Излучения на этих частотах позволяют активно влиять на процессы жизнедеятельности биологических сред различного уровня организации;

- разработаны два радиометрических комплекса, позволяющих определять собственные излучения биообъектов в спектре КВЧ-колебаний находящихся на уровнях тепловых шумов;

- предложена установка для исследования воздействия на биосреды импульсно-модулированными КВЧ-волнами, частота модуляции которых совпадает с собственной частотой объёма системы, состоящей из контейнера с исследуемым образцом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Макромодели клеточной структуры и модель эритроцита человека в виде обобщенных электрических эквивалентных схем, позволяющие объяснить проявление резонансных свойств этих структур в КВЧ-диапазоне;

2. Результаты оценки взаимодействия водосодержащих дисперсных биосред, содержащих киральные элементы, с ЭМВ КВЧ-диапазона, для последующих разработок методов учёта обнаруженных эффектов в биологических средах с различной концентрацией воды. Получение уточнённых частотных зависимостей для величин амплитуды и фазы проводимостей водосодержащих и водонесодержащих сред.

3. Радиометрические методы контроля изменений проводимости биологической среды на основе регистрации отклика на воздействующий КВЧ-сигнал по методикам «на проход» и «на отражение».

4. Метод исследования воздействия модулированных КВЧ-волн на биообъекты, учитывающий низкочастотные собственные объёмно-резонансные свойства специально разработанного контейнера с биоматериалом.

Реализация результатов работы:

- диссертационные исследования проводились согласно плану научно-исследовательских работ кафедры радиотехнической электроники ЮФУ в 2012-

2017 годах и использовались в учебном процессе.

- в научно-исследовательских работах кафедры молекулярной генетики Академии Биологии и Биотехнологии ЮФУ проведённых совместно с кафедрой радиотехнической электроники ИНЭП ЮФУ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих научных конференциях: Международная Научно-техническая конференция «Нанотехнологии – 2012» (Таганрог, 25-29 июня 2012 г.); Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» («КРЭС-2012»). (Таганрог, ЮФУ, 2012 г.); Фестиваль Недели науки Юга России. Региональная студенческая конференция (Ростов-на-Дону, ЮФУ, 2013 г.); X Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН (Ростов-на-Дону, 2014 г.), Молодежная научная конференция «NanoTech-2015» (г. Таганрог, 21–25 сентября 2015 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, из них 6 статей – в журналах, включенных в Перечень ВАК и 1 статья, индексируемая в базе SCOPUS.

Личный вклад автора. Основные научные результаты: анализ макромоделей биологических структур, расчёты проводимостей биосред, а также результаты исследований, аналитические выражения для описания трехмерной киральной модели и разработка радиометрических комплексов, приведенные в диссертации, получены автором лично.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, списка сокращений, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 157 страниц, в том числе 47 рисунков и 1 таблица, список литературы из 119 наименований и приложение, содержащее акты о внедрении результатов, полученных в кандидатской диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель диссертации, отмечается научная новизна и практическая ценность, приводятся положения, выносимые на защиту, дается краткая аннотация по главам.

В первой главе рассмотрены общие вопросы взаимодействия низкоинтенсивных ЭМВ КВЧ-диапазона и биологических структур различной степени организации и основные биофизические эффекты, проявляющиеся при этом. Определено, что воздействие КВЧ ЭМИ с биологическими объектами носит комплексный характер, а важнейшим эффектом является клеточный резонанс. Большим значением при этом имеет наличие и концентрация воды в биоструктурах. Были определены основные исследовательские задачи и намечены пути их решения.

Во второй главе диссертации предложены макромоделей биологических микро- и наноструктур, полученные на основе усреднённых электрофизических параметров клетки, демонстрирующие частотные зависимости, подтверждающие результаты экспериментальных исследований. Исследовано влияние концентрации жидкой фракции в структуре клетки на частотную зависимость

проводимости и приведены основные методы исследования комплексной диэлектрической проницаемости.

Среди известных методов активации клеточных структур внешними воздействиями в последние годы наиболее перспективными считают частоты с длинами волн: 8,34 мм, 7,1 мм, что дает значительный (до 216 %) по сравнению с контрольной группой прирост массы биоматериалов и с длинами волн 4,9 мм, 5,6 мм и 7,1 мм, используемыми в физиотерапевтической лечебной практике.

Максимальный отклик биологической среды на воздействующее КВЧ-излучение наблюдается при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой колебаний клеточной системы, что объясняют резонансным взаимодействием на структурно-клеточном уровне. Это обосновывает необходимость нахождения собственных частот электромагнитных колебаний различных биологических структур.

Такие структуры представляют собой сложные многорезонансные контуры, настроенные на собственные резонансные колебания клетки. В работе проведён анализ подобных контурных цепей, который позволяет промоделировать поведение биологической системы в диапазоне частот на уровне макромоделей. Учитывая, что проводимость клетки определяется совокупностью её электрических параметров (сопротивления мембраны и среды, заполняющей клетку, относительной диэлектрической проницаемости, ёмкости), были представлены отдельные клетки (или группы клеток) в виде электрической схемы замещения, состоящей из распределённых RLC -элементов: сопротивлений R , электрических ёмкостей C и индуктивностей L . Для такой системы были определены собственные (резонансные) частоты.

Рассмотрена макромоделю клеточной мембраны в составе протоплазмы и липидно-белковой среды. Рассчитано, что сопротивление канала для транспортировки иона K^+ равно $R_{кан} = 5 \cdot 10^{10}$ Ом. Межклеточная жидкость представляет собой водный раствор различных химических веществ и величина её сопротивления изменяется в пределах от 1 до 10 кОм. Значение электрической ёмкости мембраны составляет $10^{-14} \dots 2 \cdot 10^{-13}$ Ф (при $r_m \approx 10^{-6}$ м).

Интервалы изменения значений физических параметров биологических систем могут достигать нескольких порядков, поэтому при моделировании различных физических процессов в биологических системах приходится сталкиваться с большим разбросом величин этих параметров.

В предложенных макромоделях клеточной структуры с мембраной учтены, в основном, те параметры, которые определяют частотные свойства всей структуры, т.е. водосодержащие слои и содержащиеся в них частицы с наиболее известными уточненными электрофизическими параметрами. Степень достоверности такого подбора оценена по критерию соответствия рассчитанной АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) модели реальным электрофизическим выходным параметрам клеточной структуры.

Так как вода и многие органические вещества являются диамагнитными, то значение относительной магнитной проницаемости в расчётах принималось $\mu \approx 1$.

Проведён анализ некоторых вариантов расчетов электрических эквивалентных схем замещения (ЭЭСЗ), реализующих вышеизложенную

макромодель. Были предложены структуры «мембрана (m) (индекс 1) – протоплазма (n) (индекс 2)» (рис. 1, 3, 5, 8) в виде 4-х вариантов электрических схем, построенных на основе логически очевидных комбинаций этих структур.

Эквивалентная схема последовательного типа приведена на рис. 1.

За переменный параметр была взята ϵ_m – диэлектрическая проницаемость мембраны ($\epsilon_m = 2 \dots 9$), откуда получено: $L_m = L1 = 0,709 \cdot 10^{-9} \dots 0,158 \cdot 10^{-9}$ Гн при $C_m = C1 = 10^{-14}$ Ф ($R_m = R1 = 10^6$, $R_n = R2 = 10^3$ Ом), и были рассчитаны АЧХ И ФЧХ (фазочастотная характеристика) этой цепи показанные на рис. 2.

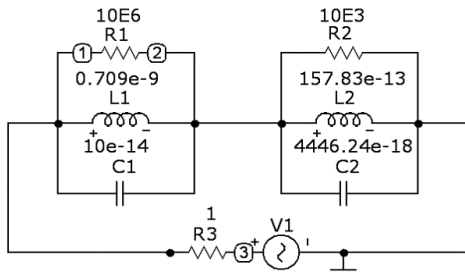


Рисунок 1 – Эквивалентная схема модели m - n -первого типа

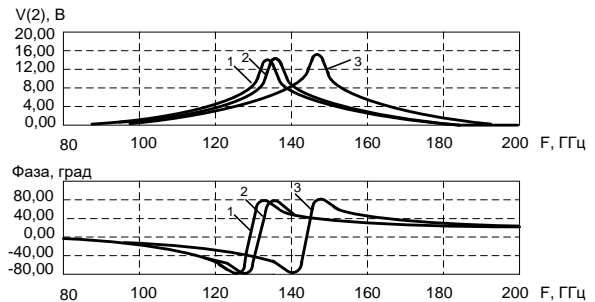


Рисунок 2 – АЧХ и ФЧХ эквивалентной схемы модели m - n -первого типа
(1 – $\epsilon_m = 3$; 2 – $\epsilon_m = 6$; 3 – $\epsilon_m = 9$)

Аналогичные результаты получены и для схем, представленных на рис. 3 и рис. 5, при этом резонансные эффекты наблюдались на других частотах указанного диапазона (от 10 до 70 ГГц) (рис. 4 и рис. 6)

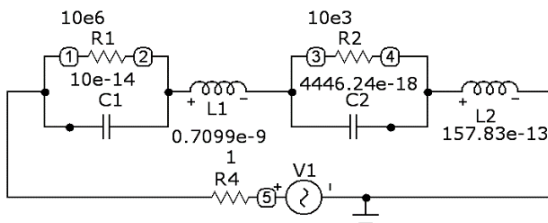


Рисунок 3 – Эквивалентная схема модели m - n -второго типа

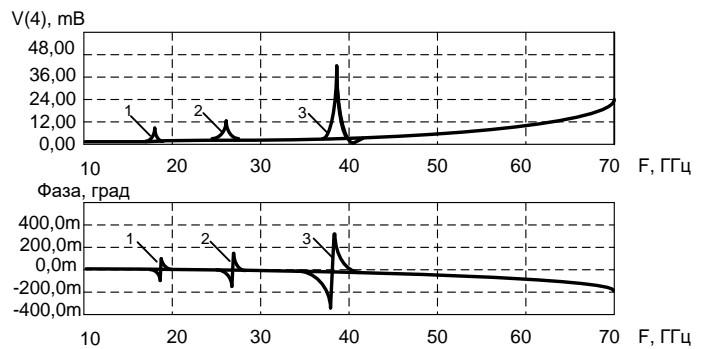


Рисунок 4 – АЧХ и ФЧХ эквивалентной схемы модели m - n -второго типа (1 – $\epsilon_m = 3$; 2 – $\epsilon_m = 6$; 3 – $\epsilon_m = 9$)

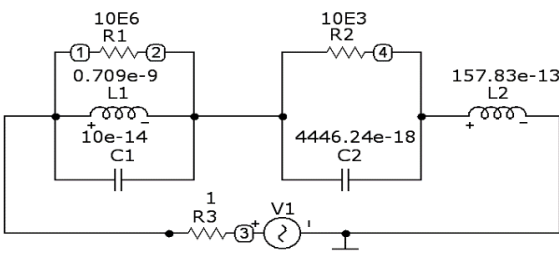


Рисунок 5 – Эквивалентная схема модели m - n -третьего типа

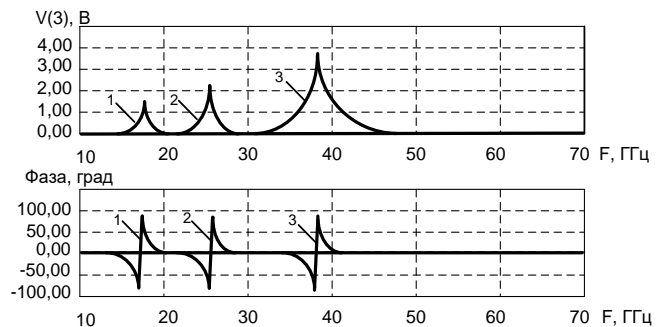


Рисунок 6 – АЧХ и ФЧХ эквивалентной схемы модели m - n -третьего типа
(1 – $\epsilon_m = 3$; 2 – $\epsilon_m = 6$; 3 – $\epsilon_m = 9$)

При расчете параметров ЭЭСЗ предполагалось, что протоплазма имеет постоянное значение $\varepsilon_n = 40$. Однако, в других источниках утверждается, что этот параметр также изменяется от 40 до 80. Это предположение отдельно исследовано для схемы, показанной на рис. 3, и результаты приведены на рис. 7.

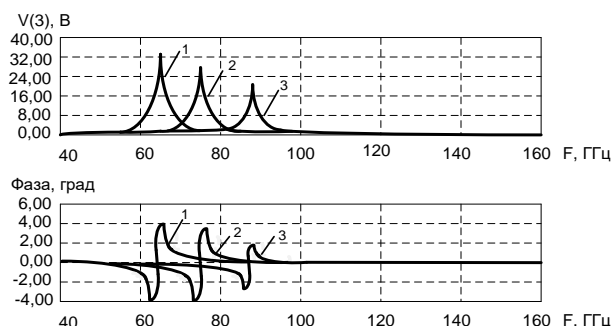


Рисунок 7 – АЧХ и ФЧХ эквивалентной схемы модели *m-n*-второго типа при $\varepsilon_n = 40; 60; 80$ (1 – $\varepsilon_n = 40$; 2 – $\varepsilon_n = 60$; 3 – $\varepsilon_n = 80$)

Был проведен частотный анализ схемы, представленной на рис. 8, который показал, что в диапазоне частот 10 – 120 ГГц не наблюдается «всплесков» АЧХ, а, напротив, имеет место поглощение падающей мощности при постоянной величине фазы (рис. 9). Очевидно, эта схема мало пригодна для включения её в модели клеточных структур более сложных уровней.

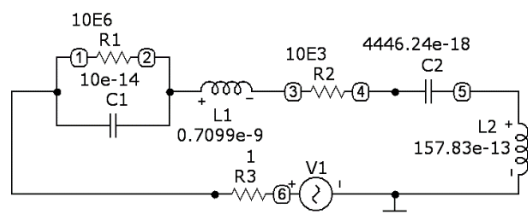


Рисунок 8 – Эквивалентная схема модели *m-n*-четвёртого типа

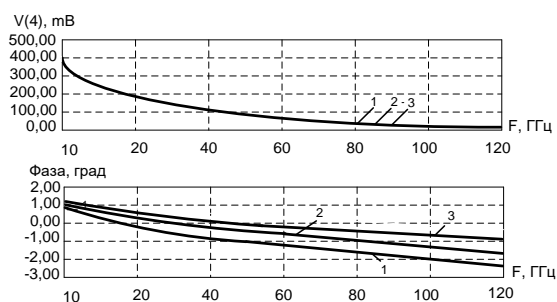


Рисунок 9 – АЧХ и ФЧХ эквивалентной схемы модели *m-n*-четвертого типа (1 – $\varepsilon_m = 3$; 2 – $\varepsilon_m = 6$; 3 – $\varepsilon_m = 9$)

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что для задач макро моделирования биологических структур, третья ЭЭСЗ представляется наиболее предпочтительной, поскольку она более точно описывает частотные характеристики биообъектов, а в полосы пропускания АЧХ попадают резонансные частоты, на которых наблюдается максимальный отклик биологической структуры на КВЧ-воздействие, что подтверждается результатами экспериментов.

Дальнейшее развитие и применение предложенных моделей возможно вести по пути разработки макромоделей клеточных структур, связанных друг с другом подобными электрическими цепями, что позволит получить эквивалентные схемы биообъектов более высокой степени организации.

Правильность предложенного метода моделирования была подтверждена на примере модели эритроцита крови человека. Допущение, с которым была проведена замена эритроцита эквивалентной схемой, заключалось в представлении его в виде «микроцилиндра», площадью S_{ep} , имеющего свою ёмкость C_{ep} , индуктивность L_{ep} , сопротивление R_{ep} и диэлектрическую

проницаемость $\varepsilon_{\text{эп}}$. Кроме того, в модели учтена ёмкость мембраны C_m . Для расчёта параметров цепи использовались справочные данные из работ авторов (Жулев В. И., Ушаков И. А., Бецкий О.В., Девятков Н.Д., Никулин Р. Н.) В результате рассмотрения пути протекания электрического тока в такой пассивной цепи предложена ЭЭСЗ в виде пассивного резонансного контура, показанного на рис. 10.

Анализ этой ЭЭСЗ в частотном диапазоне от 10 ГГц до 100 ГГц показал «всплеск» АЧХ в виде резонансного эффекта на частоте $f = 42$ ГГц. Этот результат приведён на рис. 11 ($\varepsilon_{\text{эп1}} > \varepsilon_{\text{эп2}}$). При моделировании использовался источник напряжения с постоянной амплитудой. Такая реакция схемы на воздействие КВЧ-напряжения находит своё практическое подтверждение при рассмотрении клинических эффектов.

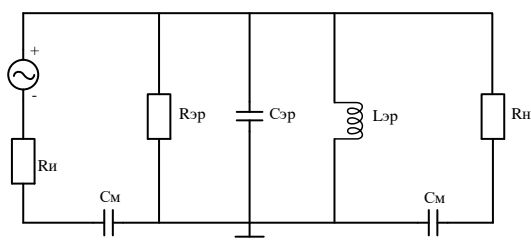


Рисунок 10 – ЭЭСЗ в виде пассивного резонансного контура

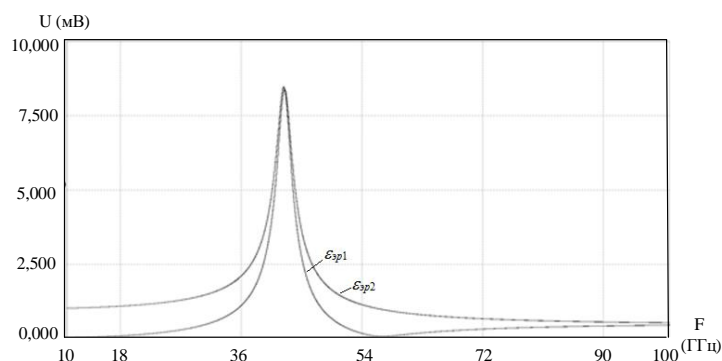


Рисунок 11 – АЧХ ЭЭСЗ в виде пассивного резонансного контура

Развитие предложенного метода предполагает включение модели структуры эритроцита в жидкую среду протоплазмы, а также в состав других элементов живых организмов. Таким образом, этот метод моделирования можно использовать для определения частотных характеристик различных биологических структур, у которых существует возможность определения электрофизических параметров, определённых из особенностей их конфигурации.

Третья глава диссертации посвящена исследованию общей электромагнитной теории киральных свойств биологических сред, которые относятся к категории биизотропных, определяющих, в конечном счете, их проводимость. Получена общая модель трёхмерной киральной среды и предложены соотношения определяющие проекции падающих волн на соответствующие стороны объёма среды (0хуз). Выяснено, что естественная биизотропная среда относится к категории сред, обладающих киральными свойствами, которые влияют на процессы взаимодействия с ЭМИ КВЧ-диапазона. Проведён расчёт параметров проводимости таких сред с использованием математической модели, учитывающей киральные свойства. Киральные среды, которые обладают пространственной дисперсией, являются оптически активными.

Большинство биологических объектов и сред содержат киральные элементы, имеющие форму спирали (ДНК, РНК, белки, оболочка поверхности нервов и т. д.). Молекулы белка представляют собой полимеры аминокислот, существующие в форме *L*- и *D*-изомеров (кроме глицина, который не обладает киральными свойствами). Все белки построены из 20 основных видов аминокислот

(исключительно из L-аминокислот), которые являются киральными, т.е. способны существовать в виде несовместимых друг с другом изомерных форм, являющихся зеркальными отражениями друг друга и представляющие собой главные структурные элементы живых организмов.

Нуклеиновые кислоты ДНК и РНК также, как и белки, являются биополимерами, существующими в природе лишь в одной киральной форме (L- или D-симметрии). Кислоты состоят из четырех видов мономеров, которые содержат остаток киральной молекулы сахара (D-изомер сахара), поэтому ДНК и РНК образуют правую спираль.

С электрофизической точки зрения для киральной среды в отличие от изотропной характерна другая форма записи материальных уравнений, где векторы электрической \vec{B} и магнитной \vec{D} индукции связаны с напряженностями электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей следующим образом:

$$|\vec{B}, \vec{D}| = \varphi\{\vec{E}, \vec{H}, \varepsilon, \mu, \chi\}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент киральности среды.

Связь между компонентами полей \vec{E} и \vec{H} описывается соотношением:

$$\vec{H} = \pm i\vec{E} / \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где знак «+» обозначает ЭМП с левой поляризацией, а «-» – с правой обобщенной круговой поляризацией.

Условием кирального резонанса считается равенство групповой и фазовой скорости ЭМВ в киральной биологической среде:

$$V_{\phi} = \omega/k = V_{gp} = d\omega/dk = c/\chi, \quad (3)$$

где $\omega^2/c^2 = k^2/\chi^2$, т.е. $\chi = kc/\omega$.

Одной из важных особенностей биологической среды является то, что в условиях кирального резонанса, ЭМВ с левой поляризацией гораздо меньше отражаются от слоёв киральных биосред, чем волны с правой поляризацией. Таким образом, для киральных биосред наиболее характерными являются ЭМВ с левой обобщенной круговой поляризацией.

Материальные уравнения для биизотропной киральной среды в общем случае можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon\vec{E} - (\zeta + i\chi)\vec{H}, \\ \vec{B} &= \mu\vec{H} + (\zeta - i\chi)\vec{E}, \end{aligned} \quad (4)$$

где ζ – коэффициент Теллегена.

При этом выделяют две среды: $\chi = 0$ и $\zeta \neq 0$ – среда Теллегена, а $\chi \neq 0$ и $\zeta = 0$ – среда Пастера.

Для дальнейших расчётов были построены зависимости $\varepsilon = f(F)$ для водосодержащей биологической среды и аппроксимированы в виде:

$$\varepsilon = aF + b, \quad (5)$$

где $a = -1,2 \cdot 10^{-9}$ 1/Гц, $b = 49,6$ для диапазона $F = 3 - 23$ ГГц

и $a = -0,15 \cdot 10^{-9}$ 1/Гц, $b = 28,57$ для $F = 23 - 90$ ГГц. Аналогичные расчёты были проведены и для водонесодержащей среды.

Везде в расчетах полагалось, что киральные свойства проявляются в большей степени за счёт частотной зависимости $\varepsilon(F)$, а не $\mu(F)$, вследствие чего принято $\mu = \text{const} = 1$.

На рис. 12 представлены рассчитанные частотные зависимости глубины проникновения мм-волн в водосодержащие и воонесодержащие биологические среды. С их помощью можно оценить толщину образцов, используемых в эксперименте.

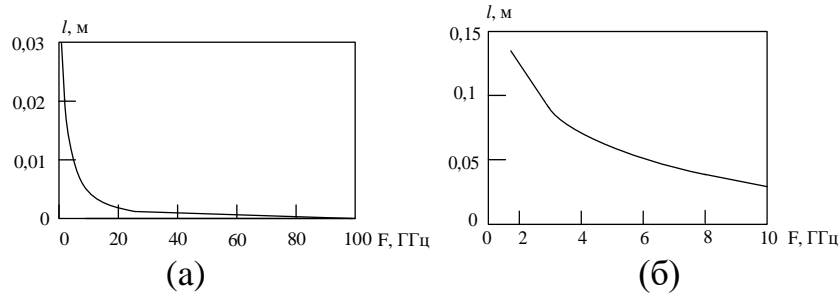


Рисунок 12 – Теоретические зависимости глубины проникновения КВЧ-волн в биологические среды с различными диэлектрическими проницаемостями: а – водосодержащая среда ($\varepsilon = 15 \dots 49$), б – водонесодержащая (слабоводосодержащая) среда ($\varepsilon = 4,5 \dots 5,5$)

При расчёте и построении этих зависимостей не рассматривались киральные свойства среды. Однако, этот эффект, может проявляться в биосредах и будет тем сильнее, чем короче длина волны облучения. Это утверждение рассмотрено более подробно, так как реальные структуры сред биизотропны, т.е. обладают пространственной дисперсией и, очевидно, связь параметров электрического и магнитного полей будет проявляться через коэффициент киральности в материальных уравнениях (4).

При записи уравнений (4) для киральной биологической среды в виде:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_c \vec{E} - i \zeta_c \vec{B}, \\ \vec{H} &= i \zeta_c \vec{E} + \vec{B} / \mu_c, \end{aligned} \quad (6)$$

($\varepsilon_c = \varepsilon - \chi^2 / \mu$, $\mu_c = \mu$, $\zeta_c = \chi / \mu$ – киральный адмитанс) видно, что величина ε_c зависит от степени киральности и в случае $\chi = 0$, переходит в диэлектрическую проницаемость некиральной среды.

В ходе экспериментальных исследований контейнер с биосредой, облучали КВЧ-полем. При этом исследуемый биологический объём представлялся как «микроцилиндр» с проводимостью:

$$\sigma = \frac{S}{\rho l}, \quad (7)$$

где ρ – удельное сопротивление среды. Глубина проникновения КВЧ-излучения в среду l находилась из соотношения:

$$l = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} [\sqrt{(1 + \text{tg} \delta^2)} - 1]}}, \quad (8)$$

где λ – длина волны излучения в воздухе на выходе из излучающей рупорной антенны; $\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды, где ε' и $i\varepsilon''$ – соответственно действительная и мнимая части, при этом $\varepsilon' = \varepsilon$ и

$\varepsilon'' = \sigma/\omega\varepsilon_0$, где $\omega = 2\pi F$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная, $\operatorname{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ – тангенс угла потерь.

Так как среда является биизотропной, то проводимость, определяемая из (7), состоит из активной σ_a и реактивной (ёмкостной) σ_r составляющих ($\sigma_a = \frac{S}{\rho l}$, $\sigma_r = \frac{1}{\omega C}$), которые обусловлены потерями в среде: $\operatorname{tg}\delta = (\rho\omega\varepsilon'\varepsilon_0)^{-1}$, где ρ – удельное сопротивление, $C = \varepsilon'\varepsilon_0 S/l$ – ёмкость «микроцилиндра».

На основании полученных выражений рассчитаны амплитудно- и фазо-частотные характеристики исследуемых сред в широком частотном диапазоне.

В расчётах проводимости использован киральнозависимый параметр $\varepsilon_c = \varepsilon - \chi^2/\mu$. Коэффициент киральности χ при этом определялся из соотношения:

$$\chi = Q \frac{d}{\lambda}, \quad (9)$$

где Q – постоянная величина, пропорциональная концентрации дисперсных частиц, d – диаметр дисперсных частиц.

При $d/\lambda \rightarrow 0$ проявления киральности в средах не наблюдаются. Следовательно, величина этого соотношения (особенно при $d/\lambda \rightarrow 1$) влияет на изменение дисперсии и проводимости.

В результате проведены уточнения значений компонент проводимости, частотные зависимости амплитуд A_σ и фаз φ_σ которых приведены на рис. 13 (а) и (б) для водосодержащих и водонесодержащих сред соответственно.

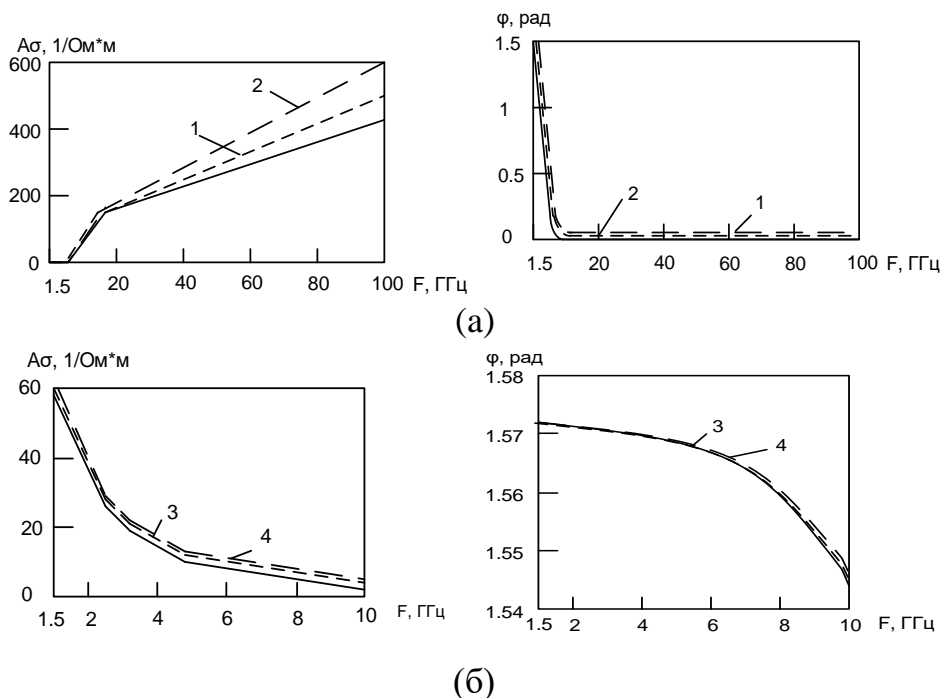


Рисунок 13 – Частотные зависимости: а) амплитуды A_σ и фазы φ_σ проводимости водосодержащей среды с $\varepsilon = 15..49$ и диаметрами дисперсных частиц $d = 4,5$ мкм (кривая 1) и $5,5$ мкм (кривая 2); б) амплитуды A_σ и фазы φ_σ проводимости водонесодержащей среды с $\varepsilon = 4,5..5,5$ и диаметрами дисперсных частиц $d = 15$ мкм (кривая 3) и 30 мкм (кривая 4).

При этом сплошные кривые для различных диаметров дисперсных частиц, получены без учёта коэффициента киральности (9), а штриховые кривые – с его

учётом. Из графиков следует, что с увеличением частоты в зависимостях АЧХ и ФЧХ проводимостей сред наблюдаются отклонения от значений, полученных без учёта коэффициента киральности χ , что объясняется усилением влияния взаимодействия миллиметровых волн и распределённых мелкодисперсных частиц на электрофизические параметры структуры.

Предлагаемый метод определения биологически активных частот, влияющих на изменение проводимости сред в СВЧ- и КВЧ-полях, представляет интерес для изучения поведения живых организмов, так как позволяет уточнять значения этих частот и может использоваться для оценки характера воздействия на процессы метаболизма в биологических системах.

Четвёртая глава посвящена исследованиям радиометрических локационных комплексов, позволяющих выявить спектр собственных ЭМ КВЧ-излучений на фоне тепловых шумов биообъекта, и в дальнейшем осуществлять воздействие на частотах этих излучений. Проведена классификация имеющихся и предложенных методов регистрации реакции биологических сред на ЭМИ.

Рассмотрена реализация прямых методов на примере разработанных установок, выполненных в волноводном варианте поддиапазонов частот в интервале от 10 до 100 и более ГГц, которые могут быть конфигурированы как для облучения образцов «на проход» так и «на отражение».

В предлагаемой измерительной методике исследуемые образцы биоматериалов помещают между двумя прозрачными для КВЧ-волн стенками цилиндрического контейнера значение высоты k которого должно быть соизмеримо с глубиной проникновения поля в объём среды l и определяться как: $k \approx l(8)$.

Схема измерительной установки «на проход» представлена на рис. 14, где контейнер с биологическим образцом помещается между (излучающей (ИА) и приемной (ПА)) рупорными антеннами.

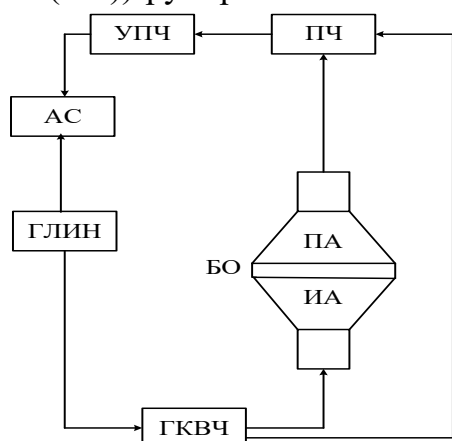


Рисунок 14 – Схема измерительной установки «на проход».

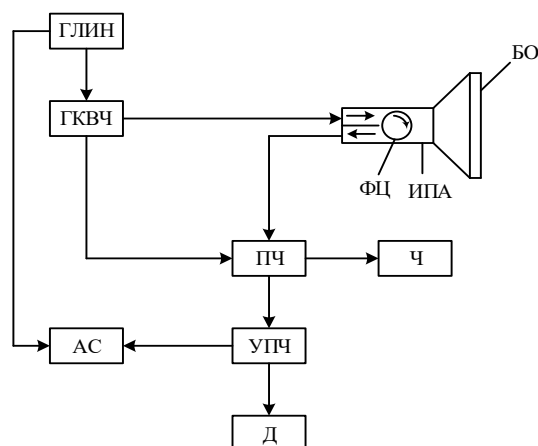


Рисунок 15 – Схема измерительной установки «на отражение».

Антенна ИА является излучателем КВЧ-волн от генератора (ГКВЧ), который также является и гетеродинным источником для преобразователя частоты (ПЧ) (например, синхронного или асинхронного детектора). После этого преобразованный сигнал поступает на усилитель промежуточных частот (УПЧ). Перестройка частоты ГКВЧ осуществляется электрически с помощью

низкочастотного генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) обеспечивающего девиацию частоты $\pm 10...20$ %. ГЛИН является также полосовым гетеродином анализатора спектра (АС) (детекторного модуля). Предложенный метод регистрации проницаемости среды позволил выявить метаболические частоты сигналов с правой или левой поляризациями при использовании волноводов круглого сечения с диэлектрическими вставками.

Установка «на отражение» (рис. 15) работает следующим образом. КВЧ-излучение от генератора (ГКВЧ), перестраиваемого генератором линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН), обеспечивающим формирование ЛЧМ-сигнала, который, как и в предыдущем случае, используется в качестве генератора качающейся частоты (ГКЧ) в анализаторе спектра (АС), поступает в излучательно-приемную антенну (ИПА) волноводного исполнения.

На выходе антенны установлен контейнер с исследуемой биосредой (биообъектом) (БО). Указанная антенна конструктивно разделена на два волноводных тракта для падающей и отражённой волн с расположенным внутри ферритовым циркулятором (ФЦ), направляющим отражённую волну в соответствующий тракт для передачи в преобразователь частоты (ПЧ) (смеситель).

В ПЧ происходит смешение гетеродинных частот от ГКВЧ и отражённых от объекта в соответствующем поддиапазоне. Смеситель может работать в режиме синхронного или асинхронного детектирования. Избирательный контроль частоты осуществляется при помощи частотомера (измерителя частоты) (Ч).

Таким образом, после усиления ПЧ усилителем (УПЧ) и контроля уровня напряжения автосмещения детектором (Д), на анализаторе спектра регистрируются дискретные значения метаболических частот, на которых произошли изменения проводимости среды и имели место отражённые или поглощённые ей волны.

Для проведения эксперимента использовали суспензии клеток дрожжей (*Candida albicans*) различной плотности, подготовленные по стандарту МакФарланда (мутность раствора определяет количество микроорганизмов в единице объема). Суспензии культивировали на твердой питательной среде для подсчета живых клеток. Высота «микроцилиндра» (толщина слоя) облучаемой суспензии равна 0,78 мм. Это значение вполне удовлетворяет результатам экспериментов и расчетам главы 3, откуда вытекает, что практически весь объём суспензии клеток подвергался воздействию КВЧ-излучения, что свидетельствует о правильности выбора методики проведения эксперимента.

Из результатов серии проведенных экспериментов воздействия слабых КВЧ-полей диапазона длин волн 3 – 5 мм на выживаемость клеточных суспензий различной плотности прокариотических микроорганизмов *Candida albicans* (табл. 1), были определены частоты полей, воздействия которых вызывало как снижение выживаемости, так и стимуляцию их роста.

Для выяснения природы эффекта роста колоний *Candida albicans* с ростом частоты f (при неизменной мощности КВЧ-облучения ($P \leq 5$ мВт/см²) с хаотической поляризацией) необходимо обратить внимание на то, что указанный рост происходил при увеличении объёмной электрической проводимости среды.

Таблица 1 – Реакции микроорганизмов *Candida albicans* после воздействия ЭМИ в различных режимах частотной обработки и концентрации облучаемых клеток.

Режимы обработки (частота; плотность мощности)	Выживаемость клеток в % относительно соответствующего контроля		
	концентрация $5 \cdot 10^1$ КоЕ/мл	концентрация $5 \cdot 10^2$ КоЕ/мл	концентрация $5 \cdot 10^3$ КоЕ/мл
Контроль	100,0	100,0	100,0
38,02 ГГц (1,1мВт/см ²)	27,4	100,0	100,0
40,54 ГГц (1,2мВт/см ²)	90,0	100,0	100,0
42,25 ГГц (0,4мВт/см ²)	160,1	242	104
45,04 ГГц (1,2мВт/см ²)	155,0	121	125
48,00 ГГц (0,6мВт/см ²)	129,9	121	148

Эти эксперименты были ранее проведены на прокариотических (*Escherichia coli*) микроорганизмах. На рис. 16 приведена иллюстрация экспериментальных результатов роста колоний палочковидных бактерий *Escherichia coli* (в процентах к контрольному образцу) в зависимости от начальной концентрации суспензии при разных частотах облучения КВЧ-полями. Важной особенностью является то, что эти результаты имеют устойчивую повторяемость и не зависят от плотности КВЧ мощности, (0,4 – 1,2 мВт/см²), что подтверждает справедливость основных особенностей воздействия миллиметрового излучения на биосреды, упомянутые в первой главе диссертации.

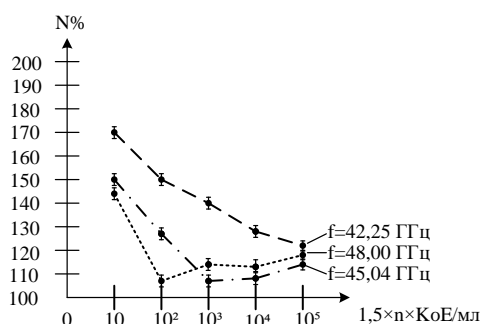


Рисунок 16 – Экспериментальные результаты поведения колоний *Escherichia coli* (в процентах к контрольному образцу) в зависимости от начальной концентрации суспензии при разных частотах облучения КВЧ полями.

В конце четвёртой главы предложена установка для эффективного исследования воздействия КВЧ-волн на биообъекты, позволяющая учитывать низкочастотные объёмно-резонансные свойства среды.

При исследованиях биосред по методам, предложенным выше полагалось, что основным критерием для обоснования выбора количества исследуемого образца среды является выполнение условия проникновения волн на глубину l всего его объёма (8). Выполнение этого условия обеспечивает полное и равномерное взаимодействие КВЧ ЭМП со всеми частицами (в том числе и киральнозависимыми). При этом должно также выполняться неравенство:

$$\frac{\varepsilon}{\mu} < \xi_c \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}\right), \quad (10)$$

где ξ_c – относительная проводимость киральной среды (киральная адмиттанс).

Это важный фактор, который позволяет судить о достоверности и чистоте условий проведения эксперимента.

На практике объем контейнера с исследуемым биоматериалом представляет собой резонансную систему, имеющую собственную резонансную частоту или набор таких частот, находящихся в диапазоне дозвуковых и звуковых частот, что определяется физическими размерами всей системы. Учёт объёмно-резонансных свойств указанной системы позволит осуществить более эффективное взаимодействие исследуемого образца с миллиметровыми волнами.

В работе предложена блок-схема установки для исследования воздействия на биосреду КВЧ-волн. Её основная особенность заключается в том, что КВЧ-воздействие осуществляется в виде модулированных импульсов, частота которых совпадает с собственной объёмно-резонансной частотой контейнера с образцом биосреды.

Подробная рабочая блок-схема исследовательского КВЧ-комплекса для воздействия на биообъекты, позволяющего учитывать объёмно-резонансные свойства среды представлена на рис. 17.

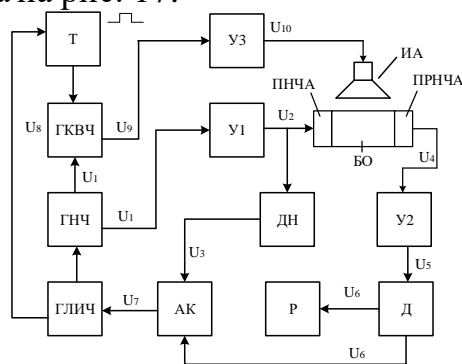


Рисунок 17 – Блок-схема КВЧ-комплекса

Биообъект (биосреда) (БО) помещается в контейнер между передающей (ПНЧА) и приемной (ПРНЧА) антеннами, назначение которых состоит в передаче сканирующих НЧ сигналов, генерируемых ГНЧ в полосе, обеспечиваемой диапазоном генератора с линейно изменяющейся частотой (ГЛИЧ). Эти антенны конструктивно можно изготовить в виде металлизированных пластин, напылённых на боковую поверхность герметичного контейнера в верхней части которого размещена излучающая КВЧ-антенна (ИА) (рис. 17). Приём отклика на этот НЧ сигнал регистрируется при помощи детектора (Д). Усилители У1 и У2 обеспечивают необходимый уровень мощности излучаемого и принятого сигналов. Аналоговый компаратор (АК) производит обработку принятого сигнала, на один из его входов подаётся опорное напряжения через делитель напряжения (ДН), а на второй вход напряжение отклика от Д (уровень этого отклика на резонансной частоте показывает регистратор (Р)). Разностный сигнал из АК запускает ГЛИЧ, когда на входе АК появляется обнаруженное напряжение отклика. Запускающее ГЛИЧ напряжение является результатом взаимодействия этого напряжения отклика с опорным напряжением. Сигнал с выявленной частотой, после запуска ГЛИЧ, поступает в модулятор ГКВЧ для последующего формирования воздействующего импульсно-модулированного КВЧ-сигнала. В это же время на таймер (Т) поступает сигнал, устанавливающий старт времени экспозиции на биообъект. После этого пакеты КВЧ-излучения поступают на

усилитель УЗ для обеспечения необходимого уровня мощности и воздействуют на биообъект, помещённый в контейнер.

Подробно принцип работы рассмотренной установки изложен в четвёртой главе диссертации, где получено, что в случае временно-импульсной модуляции напряжение имеет вид:

$$U_9(t) = U_{m8} \frac{\Delta\tau_m \tau \omega}{T} = U_{m8} \Delta\tau_m \tau \omega \Omega_6, \quad (11)$$

где τ – длительность модулирующих импульсов, $\Delta\tau_m$ – максимальная девиация частоты модулирующих импульсов, $T = \frac{1}{\Omega_6}$ – период следования модулирующих импульсов ($T \geq 2\Delta\tau_m + \tau$), и после прохождения УЗ с коэффициентом усиления K_3 имеет вид:

$$U_{10}(t) = K_3 U_9(t). \quad (12)$$

Напряжение U_{10} с помощью излучающей антенны (ИА) воздействует на исследуемый биообъект, помещённый в контейнер.

Таким образом, использование низкочастотной импульсной модуляции КВЧ-волн на объёмно-резонансных частотах контейнера с биологической средой позволяет расширить диапазон исследований влияния КВЧ-воздействий на такие биообъекты

В заключении сформулированы основные итоги работы:

1. В результате проведённых исследований проанализированы эффекты и электрофизические особенности различных биологических структур, проявляющие себя в условиях взаимодействия с низкоинтенсивными КВЧ-полями и объясняющие возможности регуляции процессов жизнедеятельности.

2. На основании проведённого анализа характера взаимодействия КВЧ ЭМИ с БО, проявляющими себя как структуры, имеющие резонансные свойства, и учёта степени концентрации жидкой фазы в них, предложен ряд макромоделей клеточных структур, способных описать вышеперечисленные свойства. Предложена обобщенная модель эритроцита, полученная на основании его усреднённых электрофизических параметров, которая показала соответствие резонансной частоты АЧХ и одной из известных терапевтических частот, используемых в медицинской практике.

3. Выполнено усовершенствование установки для выявления частот, на которых происходит структуризация водных слоев биологических тканей при КВЧ-воздействии.

4. В работе предложены методы учёта естественных киральных свойств биологических структур для оценки изменения их проводимости в КВЧ-полях. На основе предложенной общей трёхмерной модели киральной среды показано, что водосодержащие биосреды, могут обладать киральными свойствами, которые должны быть учтены при расчетах проводимости.

5. Предложены прямые динамические методы измерения проводимости по методу «на проход» и «на отражение» и структурные схемы установок, реализующие их на практике.

6. При облучении КВЧ-волнами образцов колоний дрожжей *Candida albicans* были экспериментально выявлены терапевтические частоты и

обнаружено, что воздействие на этих частотах могут вызвать как рост до 160 %, так и угнетение их численности до 30 %. Полученные результаты демонстрируют перспективы использования КВЧ-воздействия для изучения влияния на жизнедеятельность БО различного уровня организации.

8. Предложена установка для исследования воздействия КВЧ-волн на биообъекты, учитывающая собственные низкочастотные объёмно-резонансные свойства среды, находящейся в специально разработанном контейнере, что расширяет её исследовательские возможности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Малышев И.В., Паршина Н.В. Применение методов компьютерного анализа электрических цепей к расчетам резонансных частот биологических структур // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – № 3. – С. 70-73.

2. Малышев И.В., Паршина Н.В., Червяков Г.Г. Метод определения проводимости киральнозависимых биологических сред в крайне высокочастотных полях // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 7. – С. 705-708.

3. Малышев И.В., Паршина Н.В., Червяков Г.Г. Распространение ЭМВ в биизотропных средах с равномерным распределением концентрации дисперсных частиц // Специальная техника. – 2015. – № 1. – С. 41-43.

4. Малышев И. В., Паршина Н. В. Методы выявления метаболических частот биологических объектов в СВЧ и КВЧ диапазонах // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2015. – № 2. – С. 65-68.

5. Малышев И.В., Паршина Н.В. Установка для многочастотного электромагнитного терапевтического (МЧЭМРТ) воздействия // Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – № 9 (170). – С. 190-199.

6. Малышев И.В., Паршина Н.В. Установка для эффективного исследования воздействия КВЧ-волн на биообъекты, учитывающая низкочастотные объёмно-резонансные свойства среды // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 8, № 12. – С. 122-124.

Публикации по теме диссертации в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS:

7. Malyshev I., Chervyakov G., Parshina N. A method for determining the admittance of chiral-dependent biological media in extremely high-frequency fields // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2015. – V. 60, – P. 747-750.

Публикации по теме диссертации в других изданиях:

8. Малышев И.В., Паршина Н.В. Макромоделирование частотных свойств элементов биологических структур // Актуальные проблемы науки: сб. науч. тр. по мат-лам междунар. науч.-практ. конф. 30 мая 2011г. – Тамбов: Изд-во ТРОО Бизнес-Наука-Общество, 2011. – Ч. 3. – С. 80-82.

9. Малышев И.В., Кротов В.И., Паршина Н.В. Применение методов компьютерного анализа электрических цепей к макромоделированию резонансных свойств биологических структур // Наука и образование на рубеже тысячелетия: сб. научно-исследовательских работ. Вып. 1. – М.: Училиствуз, 2011. – С. 170-180.

10. Малышев И.В., Паршина Н.В. Наноструктурный подход к водосодержащим биологическим средам при КВЧ – воздействии // Труды междунауч.-тех. конф. «Нанотехнологии – 2012», 25-29 июня 2012. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 139-140.

11. Паршина Н.В., Комбици Д.Г. Радиометрические многочастотные преобразования в устройствах выявления собственных биологически активных частот живых организмов // Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» («КРЭС-2012»): сб. материалов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – Т. 2., – С. 20

12. Гуров И.М., Малышев И.В., Паршина Н.В. Метод расчёта проводимости киральных дисперсных структур в электромагнитных полях // Образование и наука: современное состояние и перспективы развития: сб. науч. трудов по материалам международной научно-практ. конф.-ии 28.02.2013. – Тамбов: Изд-во ТРОО Бизнес-Наука-Общество, 2013. – Ч. 7 – С. 41-42.

13. Паршина Н.В., Кадетов И.М., Гордеев А.В. Устройство для регистрации метаболической активности биологических структур в КВЧ-полях // Фестиваль Недели науки Юга России: материалы Региональной студенческой конференции: в 3 т. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 548-551

14. Паршина Н.В. Исследования возможности управления процессами клеточного метаболизма биологических структур на установках СВЧ и КВЧ диапазонов // X Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. – С. 116-117.

15. Червяков Г.Г., Паршина Н.В. Сушка и микронизация зерна // Наука и образование на рубеже тысячелетий: сб. науч.-исслед. работ. – М.: Учлитвуз, 2014. – С. 151-158.

16. Малышев И.В., Паршина Н.В. Степени киральности водосодержащих дисперсных сред с различной концентрацией микро- и наноразмерных частиц // NanoTech-2015: сборник докладов молодежной научной конференции 21-25. 09. 2015. – Таганрог: Изд. ЮФУ, 2015. – С. 122-124.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично автору принадлежат: в [1, 7, 8] – анализ макромоделей биологических структур; [2-6, 11, 14] – проведение расчётов и обработка полученных результатов; [7, 9, 10, 12, 15, 16] – разработка базовых узлов радиометрических комплексов; [4, 15] – сравнение и анализ теоретических и экспериментальных результатов.

**Формат 60 × 84^{1/16}. Бумага офсетная Печать ризография.
Заказ № 85 Тираж 100 экз.**

**Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией в г. Таганроге
отдела полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ**

ГСП 17А, г. Таганрог, 28, Энгельса, 1 тел. (8634)371717