



**ЮГОЗАПАДЕН УНИВЕРСИТЕТ „НЕОФИТ РИЛСКИ“
ТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ**

Катедра „Комуникационна и компютърна техника и технологии“
2700 Благоевград, ул. Иван Михайлов 66; www.swu.bg

Манол Стефанов Аврамов

**Изследване на антенни структури за захранване на
възли в безжични персонални мрежи**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на образователната и научна степен

"ДОКТОР"

Област:

5. Технически науки

Професионално направление

5.3. Комуникационна и компютърна техника

Докторска програма:

Компютърни системи комплекси и мрежи

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Николай Тодоров Атанасов

Благоевград, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Комуникационна и компютърна техника и технологии“ към Технически факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“ на редовно заседание, проведено на 29.01.2025 год.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.04.2025 год. от 10:00 часа в зала 1339, учебен корпус 1 на Югозападен университет „Неофит Рилски“ на открито заседание на научното жури, определено със заповед №498/04.03.2025 год. на Ректора на Югозападен университет „Неофит Рилски“ в състав:

1. доц. д-р инж. Иван Динков Иванов - ЮЗУ „Неофит Рилски“
2. доц. д-р инж. Иван Иванов Недялков – ЮЗУ „Неофит Рилски“;
3. проф. д-р инж. Илия Георгиев Илиев – Технически университет – София
4. доц. д-р инж. Агата Христова Манолова – Технически университет – София
5. доц. д-р инж. Камелия Симеонова Николова – Технически университет – София

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Иван Динков Иванов – вътрешен член
2. проф. д-р инж. Илия Георгиев Илиев – външен член

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Технически факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“, учебен корпус 1, кабинет № 1604.

Дисертантът е докторант в задочна форма на обучение в катедра „Комуникационни и компютърна техника и технологии“ на Технически факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“.

Автор: маг. Манол Стефанов Аврамов

Заглавие: Изследване на антенни структури за захранване на възли в безжични персонални мрежи

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Безжичните технологии са от ключово значение за успеха на цифровата трансформация и за развитието на индустрията, интелигентните градове, модерното образование и т.н. Днес, чрез прилагането на различни безжични технологии като Long-Term Evolution (LTE), 5G, Wireless Fidelity (WiFi), ZigBee, LoRa, Bluetooth, Low Power Wide Area Network (6LoWPAN), милиарди хора са свързани помежду си и с интернет, така че те да могат да се възползват от предимствата на цифровата икономика. Свидетели сме на прилагането на безжичните технологии в почти всеки сектор – от банкиране и селско стопанство до транспорт и здравеопазване.

Прогнозите показват, че до 2025 г. в световен мащаб ще бъдат свързани около 75 милиарда устройства, които ще обменят информация помежду си. Този огромен брой безжични устройства от своя страна ще доведе до драстично увеличаване на потреблението на енергия. Поради тази причина, въпросът, как да се осигури захранване на устройствата в безжични мрежи от алтернативни източници на енергия, става все по-актуален и належащ за решаване, поради което е предмет на изследванията в настоящия дисертационен труд.

В дисертационния труд са представени алгоритми за проектиране и резултати от изследване на антенни структури за приемане и преобразуване на електромагнитните полета от изкуствени източници (антени на базови станции в клетъчни мрежи, безжични устройства и т.н.), и възможностите за използването им за захранване на възли в безжични персонални мрежи.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се разработят нови методологии за проектиране и за характеризирание на ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи. За постигане на поставената цел въз основа на направения литературен обзор и проведения анализ е необходимо да бъдат решени следните задачи:

1. Да се разработи методология за проектиране на ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи.
2. Да се апробира предложената методология, като се проектират и изследват антенни структури за ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи.
3. Да се разработи методология, която позволява да се осъществи оценка на отделните елементи на ректената, възпроизводимост и повтаряемост на резултатите от измерване.
4. Да се апробира предложената методология.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА

ОБЗОР НА БЕЗЖИЧНИТЕ ПЕРСОНАЛНИ МРЕЖИ И ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА СЪБИРАНЕ НА ЕНЕРГИЯ ОТ АЛТЕРНАТИВНИ ИЗТОЧНИЦИ ЗА ЗАХРАНВАНЕ НА ВЪЗЛИ В БЕЗЖИЧНИ ПЕРСОНАЛНИ МРЕЖИ

1.1 Безжични персонални мрежи

В подраздел 1.1 на дисертационния труд е направен кратък преглед на стандартите за безжични персонални мрежи, като са разгледани специфични особености във връзка с проектирането и изследването на антенни структури за приемане и преобразуване на електромагнитните полета от изкуствени източници и възможностите за използването им за захранване на възли в безжични персонални мрежи.

Представени са някои от основните топологии при изграждане на безжична свързаност по стандартите IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 и IEEE 802.15.6 [13-15].

1.2 Технологии за събиране (извличане) на енергия от алтернативни източници

В подраздел 1.2 на дисертационния труд е представена класификация на възобновяемите източници на енергия. Разгледани са предимствата и недостигите на предложените до момента алтернативни източници на захранване и възможностите за приложението им в безжични мрежи. Установено е, че слънчевата, топлинната и вятърната енергия са възобновяеми източници, но имат ограничения при използването в безжични персонални мрежи. Слънчевата енергия зависи от наличието на светлина, а фотоволтаичните системи са с големи размери. Топлинната енергия може също да се разглежда като алтернативен източник, като основния недостатък на разработените към момента термогенератори (TEG) за приложение в безжични персонални мрежи е ограничена ефективност (8,1% – 23,3%), поради малката температурна разлика. Вятърната енергия е екологична и бързо развиваща се, но е неприложима за малки устройства. Основният проблем при тези технологии е, че захранващите модули са с по-големи размери от комуникационните възли, което ги прави непрактични за безжични персонални мрежи.

1.3 Антенни структури (ректени) за захранване на устройства с малка консумация

Бързият темп на развитие на безжичните технологии през последните две десетилетия е свързан с увеличаване на броя на изкуствените източници на ЕМП. Това мотивира идеята за разработване на технология за приемане и преобразуване на радиочестотна енергия от околната среда в електрическа енергия. Технологията е известна с термина energy harvesting.

В тази връзка много изследователски усилия са насочени към разработване на

различни решения позволяващи приемане и преобразуване на ЕМПта, създавани от различните изкуствени източници в околната среда и използването им за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи с малка мощност.

Двата ключови елемента в една цялостна система за събиране на радиочестотна енергия са антената и изправителната верига, известна още като ректена (rectenna). Ефективността на преобразуване на всяка система за събиране на радиочестотна енергия зависи от ефективността на антената и ефективността на изправителната верига.

В литературата към настоящия момент са представени няколко вида антенни структури за преобразуване на мощността от ЕМП и използването ѝ като източник на захранване на устройства с малка консумация. Представите видове включват – планарни монополни антени [45-48], изработени върху конвенционални подложки (виж. фиг. 1.3.-5), предназначени за лицензирани [45,47,48] и нелицензирани [48] честотни обхвати. Друг тип антенни структури, които са предложени за energy harvesting са планарни диполи [49-58], които също са изработени върху конвенционални подложки, такива като FR-4 [49], Rogers RT/Duroid 5880 [51, 56] и др. Микролентовите антени [57-70], наричани още печатни антени и масиви от микролентови антени [71] също са изследвани като възможни решения, тъй като те се характеризират с проста конструкция и ниска цена за производство, особено, използвайки конвенционални подложки като Rogers 3003 [65], Rogers 4003C.[70], както е показано на фиг. 1.3-7. Поради широката честотна лента, спиралните антени [72-74], също са изследвани за приложени в energy harvesting.

Анализът показва, че повечето от авторите се фокусират върху разработването на антени с една работна честотна лента като възможно решение за приемане и преобразуване на ЕМП. По-голямата част от предложените до този момент антенни структури са разработени върху конвенционални подложки [53-55, 58, 64, 65, 67-70, 76, 78-80, 82, 86, 89, 94-97, 100-103], които са твърди и могат да бъдат с големи диелектрични загуби, което не позволява интегриране на ректената в комуникационни възли с малка консумация, предназначени за безжични персонални мрежи. Следователно е необходимо разработването на нови ректени, позволяващи лесно вграждане на комуникационните възли. Освен това, изборът на материали за елементи на антената оказва значително влияние върху нейните параметри и характеристики, такива като ефективност, ширина на честотната лента, коефициент на усилване и т.н. Освен това за различните нива на входна радиочестотна/микровълнова мощност се предлагат различни подходи при проектирането на изправителните вериги.

1.4 Методи за изследване на антенни структури за приемане на ЕМПта от изкуствени източници

В подраздел 1.4 на дисертационния труд са разгледани предложените до настоящия момент методите за измерване на параметрите и характеристиките на ректени.

1.5 Обобщение на първа глава

Направен е кратък преглед на стандартите за безжични персонални мрежи, като са разгледани специфични особености във връзка с проектирането и изследването на антенните структури за приемане и преобразуване на електромагнитните полета от изкуствени източници и възможностите за използването им за захранване на възли в безжични персонални мрежи. Представена е класификация на възобновяемите източници на енергия и са разгледани възможностите за приложението им в безжичните персонални мрежи. Определени са представените към настоящия момент видове антенни структури за преобразуване на мощността от ЕМП и използването и като източник на захранване на устройства с малка консумация.

1.6. Изводи и приноси към първа глава

Изводи

Въз основа на литературното проучване, могат да се направят следните основни изводи:

1. Като възможно решение за приемане и преобразуване на мощността от ЕМП и използването ѝ като източник на захранване на устройства с малка консумация са представени антенни структури с една работна честотна лента, с няколко работни честотни ленти, както и широколентови решения;
2. По-голямата част от предложените до този момент антенни структури са разработени върху конвенционални подложки, които са твърди, което не позволява интегрирането им в комуникационни възли с малка консумация, предназначени за безжични персонални мрежи;
3. Няма представен подход за синтезиране на токоизправителната верига;
4. Съществуват различни подходи при проектирането на антенната структура и нейното характеризиране.

Приноси към първа глава

Разгледани са специфични особености на стандартите за безжични персонални мрежи във връзка с проектирането и изследването на антенни структури за приемане и преобразуване на електромагнитните полета от изкуствени източници и възможностите за използването им за захранване на възли в безжични персонални мрежи. Определени са представените към настоящия момент видове ректени и методите за тяхното проектиране и характеризиране.

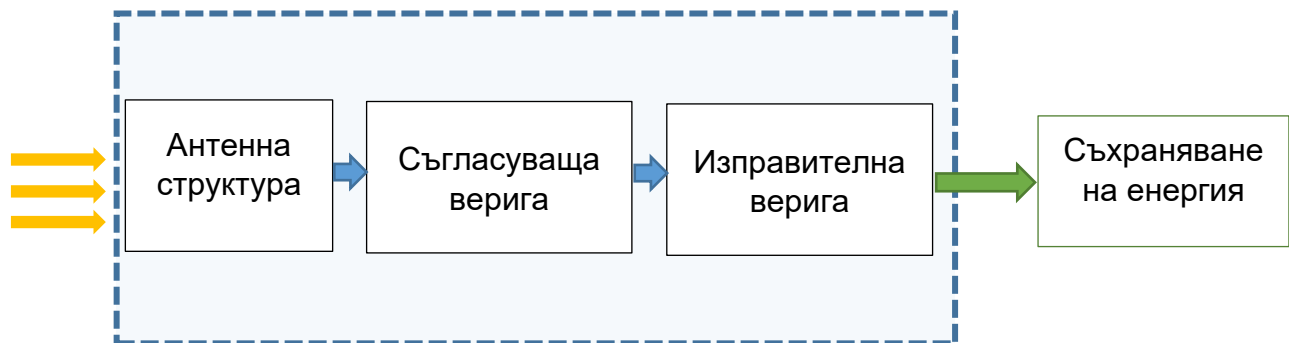
ВТОРА ГЛАВА

МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА АНТЕННА СТРУКТУРА (РЕКТЕНА) ЗА ПРИЕМАНЕ НА РАДИОЧЕСТОТНА ЕНЕРГИЯ ОТ ОКОЛНАТА СРЕДА

В настоящата глава на дисертационния труд са решени следните поставени задачи:

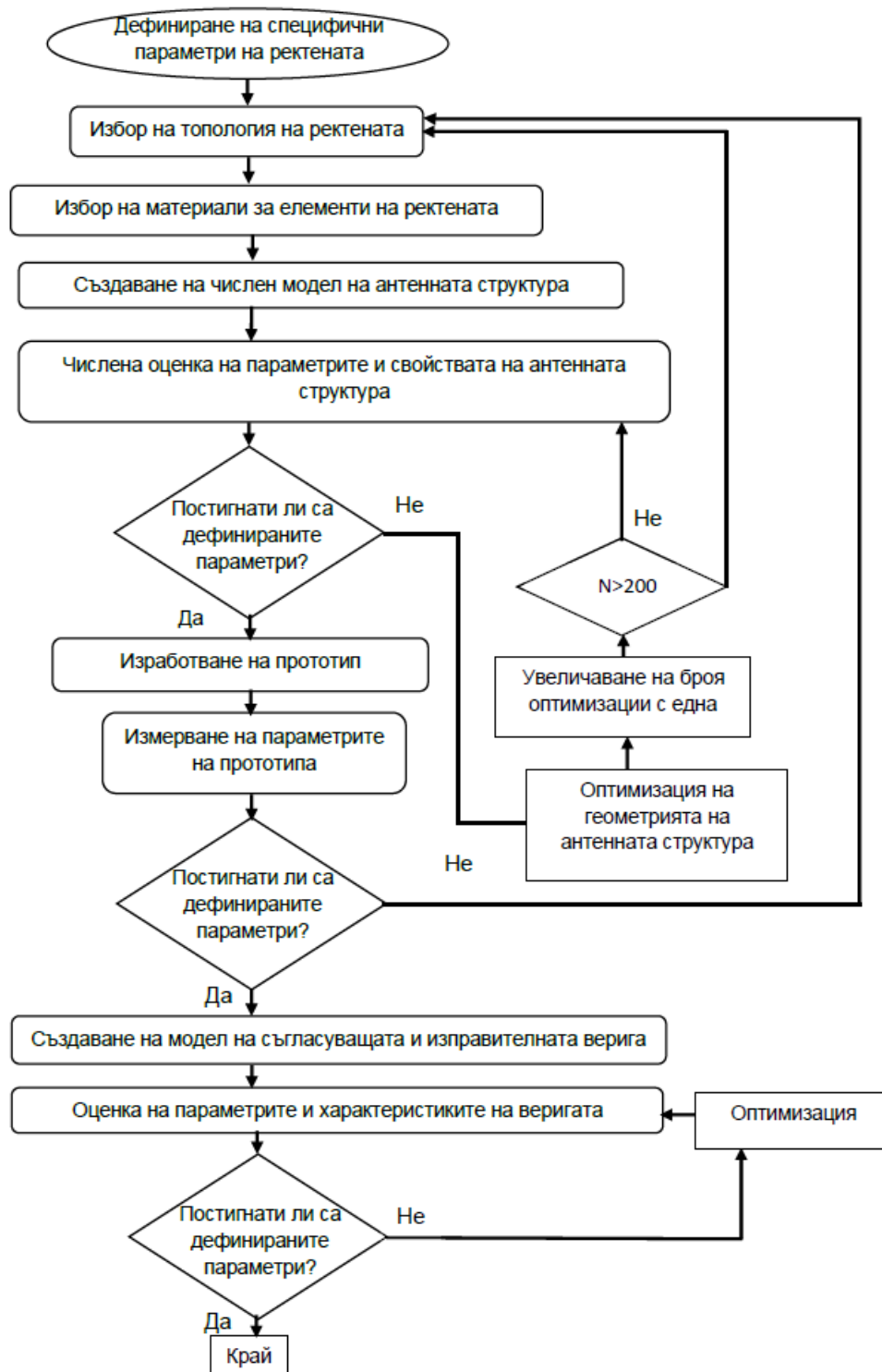
1. Да се разработи методология за проектиране на ректени.
2. Да се оцени плътността на потока на мощност и/или интензитета на електрическото поле, създавано от изкуствени източници в различни среди.

На фиг. 2.1 е представена обобщената блокова схема на антенна структура (ректена) за приемане на радиочестотна енергия от околната среда. Както може да се види от фигурата, ректената има три основни елемента: (1) антенна структура, предназначена за приемане и преобразуване на ЕМП от изкуствени източници; (2) съгласуваща верига, за осигуряване на максимално предаване на мощност между антената и изправителната верига, чрез съгласуване по импеданс; (3) изправителна верига, предназначена за преобразуване на входния променливо токов сигнал в използваем постоянен ток, който се предава към елемент за съхраняване.



Фиг. 2.1 Обобщената блокова схема на ректена

В изпълнение на поставените задачи, в тази глава е разработена и представена методология за физическо проектиране на ректени, приложими за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи. Методологията е демонстрирана чрез алгоритъм, представен на фиг. 2.2.



Фиг. 2.2 Методология за проектиране на ректена представена чрез алгоритъм.

Както може да се види от фиг. 2.2, процесът на проектиране стартира с дефиниране на специфичните параметри на ректената. Параметрите включват, честотен обхват или

работна честотна лента, ефективност, поляризация, диаграма на насочено действие, тип на съгласуващата и изправителната вериги. За дефиниране на стойности на всеки от параметрите на ректената е необходимо да се определи, какво ще бъде нейното предназначение – например за комуникационен възел, работещ в персонална мрежа, изградена по стандарт IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 или IEEE 802.15.6. След това трябва да се определи местоположението на комуникационния възел, например поставен в свободното пространство, или върху тялото на човек, или вграден в аксесоар, като например раница, чанта, ключодържател и т.н. След това се преминава към избор на топология (геометрия на елементите) на ректената и на материала за подложката/подложките. Както беше споменато в анализа на литературните източници, могат да се използват много различни топологии на ректени и материали за подложки. След оптимизиране на антенната структура се преминава към създаване на модел на съгласуващата и изправителната верига. След като параметрите и на трите елемента на ректената са оптимизирани се преминава към тестване на моделите.

Преди да се дефинират параметрите на ректената е необходимо да се идентифицира честотен обхват или честотни обхвати, което е свързано с определяне на плътността на потока на мощност и/или интензитета на електрическото поле.

2.1 Оценка на плътността на потока на мощност и/или интензитета на електрическото поле, създавано от изкуствени източници

В подраздел 2.1 на дисертационния труд са представени резултати от проведени измервания на интензитета на електрическото поле в градска зона, подходяща за развитие на „интелигентно градско земеделие“, тъй като се намира в жилищен квартал, в непосредствена близост до жилищни и офис сгради и в същото време осигурява пространство за отглеждане на култури или за разходка и отдих. Измерванията са проведени в гр. София, ул. „Филип Кутев“ 2, в Учебно-експериментална база – Драгалевци на Софийския университет „Св. Климент Охридски“. Резултатите са представени в авторски труд [A1].

За провеждане на измерванията е приложен методът на широколентово измерване, който е избран в съответствие с европейските стандарти EN 50413:2019 (Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)) [125] и EN IEC 62311:2020, Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) [126]. Прилагането на този метод позволява да се оцени интензитета на електрическото поле в широка честотна лента, осреднен за определен интервал от време. Методът не се прилага за честоти под 100 kHz.

За постигане на повторямост и сравнимост на представените резултати е предложена следната методология за провеждане на измерванията: (1) избор на местоположения (точки) за провеждане на измерванията; (2) определяне на интервала от време, за който ще се извършва осредняването на интензитета на електрическото поле; (3) избор на височина, над земната повърхност, на която ще се разполага измервателното оборудване; (4) запис на GPS координатите на всяка точка.

Резултатите от проведените измервания, представени върху Google карта за всяка от избраните 9 точки (местоположения) на измерване в градската зона Учебно-експериментална база – Драгалевци на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ са изобразени на фиг. 2.1-3.

2.2 Избор на елементи на ректена за захранване на възли с малка консумация в безжични персонални мрежи

2.2.1 Дефиниране на специфични изисквания

В настоящия подраздел са разгледани специфичните изисквания към елементите на ректени предназначени за захранване на възли с малка консумация в безжични персонални мрежи, които са в таблица 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Специфични изисквания към ректена за захранване на възли с малка консумация в безжични персонални мрежи

Специфични изисквания	
Електрически	Непроменени параметри и характеристики на антенния елемент на ректената върху или близо до човешко тяло. Мощност след изправителната верига достатъчна за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи в режим на понижена консумация (минимум 0,03 mW). Насочена диаграма на насочено действие.
Механични	Ниско профилни Леки Гъвкави

В дисертационния труд е избрано ректените да работят в честотната лента от 2400 MHz до 2480 MHz, тъй като е най-широко използвана за изграждане на безжични локални и персонални мрежи. Освен това, в литературния обзор беше установено, че в тази честотна лента излъчват най-много безжични устройства.

2.2.2 Избор на антенна топология

В дисертационния труд са избрани три топологии, монопол, дипол и микролентова антена. Тези антенни структури са изследвани за приложението им като елементи на ректена за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи.

2.2.3 Избор на топология на изправителната верига

Анализът на представените в първа глава на настоящия дисертационен труд изправителни вериги показва, че към настоящия момент най-широко използвана е топологията с един изправителен диод (полувълнов изправител), поради което тя е избрана като начална топология за изправителната верига.

2.3 Обобщение на втора глава

Във втора глава на дисертационния труд са представени обобщената блокова схема на ректена, разработената методология за проектиране на ректени, приложими за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи, демонстрирана чрез алгоритъм. Представени са резултати от проведени измервания на интензитета на електрическото поле в градска среда, оповестени в авторска публикация [A1]. Избрани са топологии на

елементите за решаване на поставените задачи в следващите глави на дисертационния труд.

2.4. Изводи и приноси към втора глава

Изводи

В резултат на решаване на поставените задачи могат да бъдат направени следните основни изводи: Разработената методология за проектиране на ректени позволява да се отчетат специфичните особености при комуникационните възли, работещи в персонални мрежи, изградени по стандарти IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 или IEEE 802.15.6, демонстрирана чрез алгоритъм. Предложена е постановка за оценка на интензитета на електрическото поле от изкуствени източници, чрез която се постига повторяемост и сравнимост на резултати от измерване. Представени са резултати от проведените измервания и са сравнени с тези на други автори.

Приноси към втора глава

1. Разработена е методология за проектиране на ректени, демонстрирана чрез алгоритъм, която позволява да се отчетат специфичните особености при комуникационните възли, работещи в персонални мрежи, изградени по стандарти IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 или IEEE 802.15.6.

2. Предложена е постановка за оценка на интензитета на електрическото поле от изкуствени източници в градска среда, позволяваща повторяемост и сравнимост на резултатите от измерване. Постановката е апробирана и резултатите от измерванията са представени.

2.5 Списък на авторските публикации към втора глава

A1. М. Аврамов, Оценка на интензитета на електрическото поле създавано от изкуствени източници, XXXIII Международна научна конференция за млади учени, 3 и 4 октомври 2024 г., Благоевград, България.

ТРЕТА ГЛАВА

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕКТЕНИ ЗА ЗАХРАНВАНЕ НА КОМУНИКАЦИОННИ ВЪЗЛИ В БЕЗЖИЧНИ ПЕРСОНАЛНИ МРЕЖИ

В настоящата глава на дисертационния труд е решена следната поставена задача:

1. Да се проектират и изследват антенни структури за ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи.

Проектирането на ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи е осъществено чрез предложената във втора глава на дисертационния труд методология.

3.1 Проектиране на антенни структури за ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи

3.1.1 Проектиране на микролентова печатна антена като антенна структура на ректена за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи

Въз основа на проведения подробен анализ в първа глава на дисертационния труд, който показва, че повечето съществуващи ректени са изработени върху конвенционални

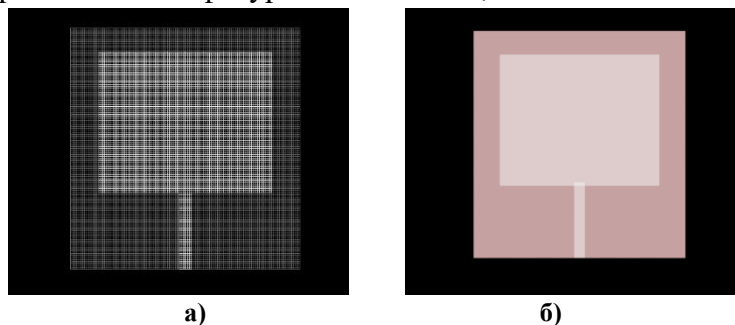
твърди подложки и имат големи размери, което не позволява интегрирането им в малки, преносими комуникационни устройства беше формулирана следната задача: Разработване на гъвкава антенна структура с кръгова поляризация за приемане на радиочестотна енергия от източници в 2,40 GHz – 2,48 GHz честотен обхват (Industrial, Scientific, and Medical - ISM), която също осигурява висока ефективност на излъчване и е подходяща за интегриране в малки, преносими комуникационни възли, които могат да се вграждат в аксесоари, като например „умна“ раница.

За определяне на специфичните параметри първо беше дефинирано приложението на ректената, след което бяха определени специфичните параметри на антенната структура, представени в таблица 3.1-1.

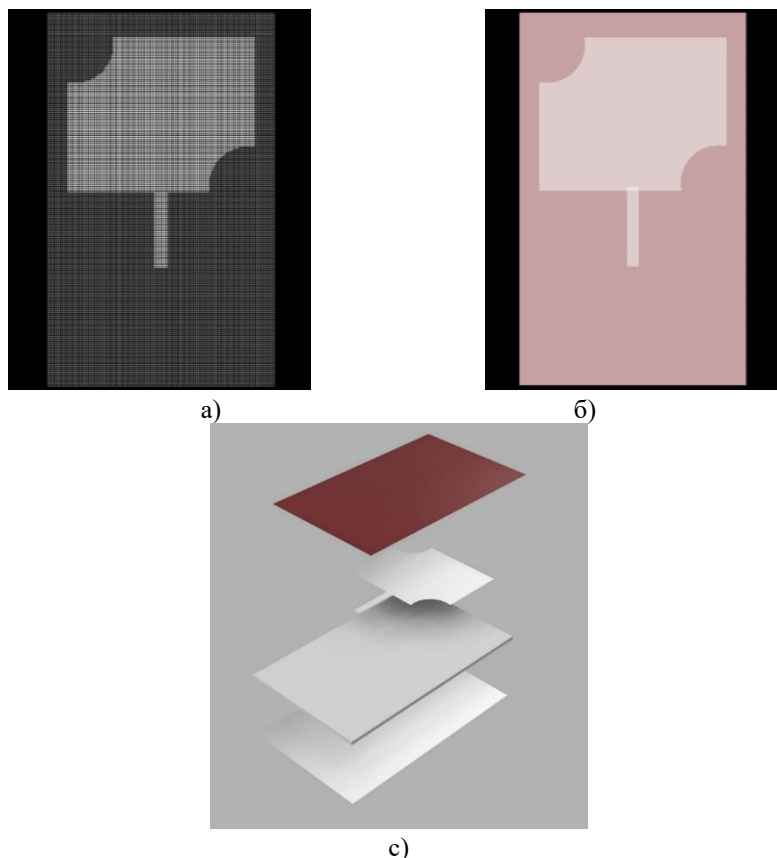
Таблица 3.1.1-1. Специфични входни параметри за процеса на проектиране на ректената

Специфични параметри	Желани стойности
Честотна лента (GHz)	2,4–2,48 GHz ISM
$ S_{11} $ в работната честотна лента (dB)	≤ -10
Обща ефективност (%)	≥ 70
Системна ефективност (%)	≥ 60
Коефициент на усилване (dBi)	≥ 4
Поляризация	кръгова

На следващия етап е създаден числен модел, като за целта е разработен първоначален проект. За подложка на антенната структура е избран гъвкав композитен материал на базата на естествен каучук (Natural Rubber - NR) и пълнител TiO_2 (NR- TiO_2). След вулканизацията подложката има дебелина от 1,6 mm, реалната част на относителна диелектрична проницаемост 2,878 и тангенс на ъгъла на диелектричните загуби 0,0087 при 2,565 GHz, измерен чрез резонансния метод на малките смущения. Разработени са два числени модела, представени на фигури 3.1-1 и 3.1-2, съответно.

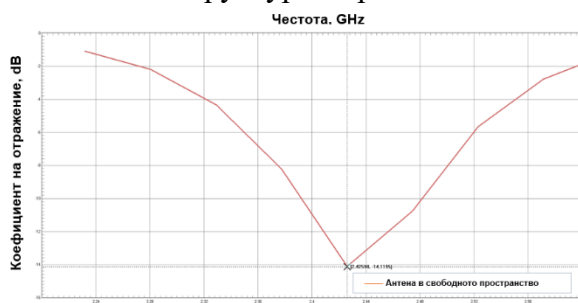


Фиг. 3.1-1 Числен модел на правоъгълна микрорентова антенна структура.

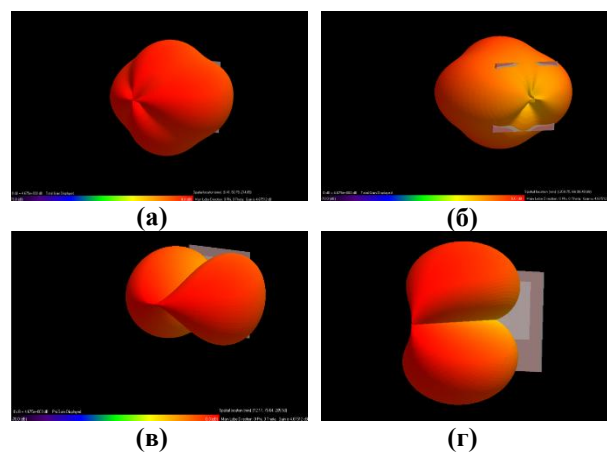


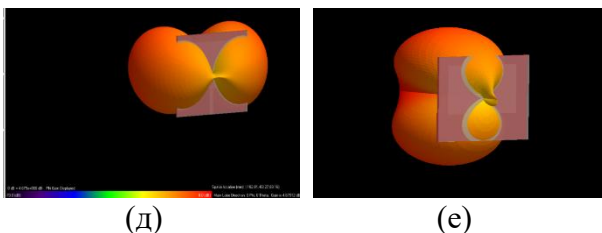
Фиг. 3.1-2 Числен модел на модифицирана правоъгълна микрентова антенна структура: а) излъчващ елемент; б) излъчващ елемент върху текстилна подложка и в) разширен изглед на елементите на антената.

Съгласно предложената методология, на следващия етап е осъществен числен анализ и оптимизиране на параметрите и характеристиките на разработваните нови антенни структури. След проведените числени симулации на фиг. 3.1-3 – 3.1-7 са представени параметрите и характеристиките на оптимизираните числени модели на разработените нови антенни структури за ректени.

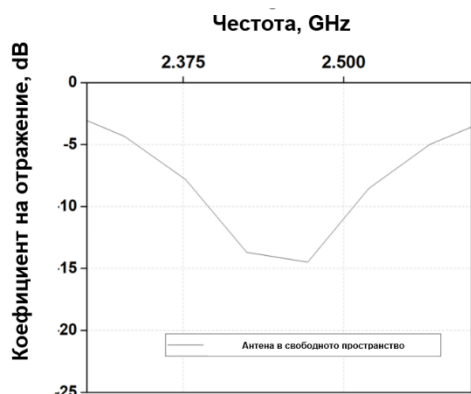


Фиг. 3.1-3 Коефициент на отражение от входа на правоъгълна микрентова антенна структура.

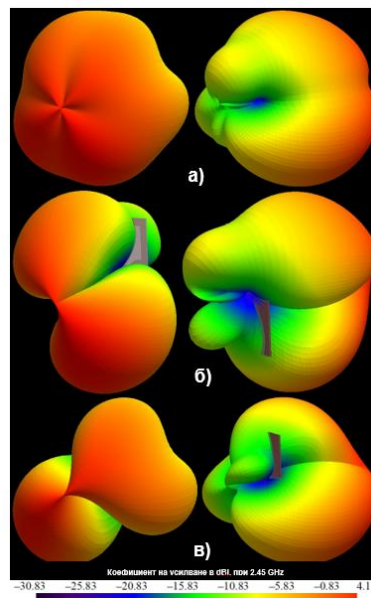




Фиг. 3.1-4

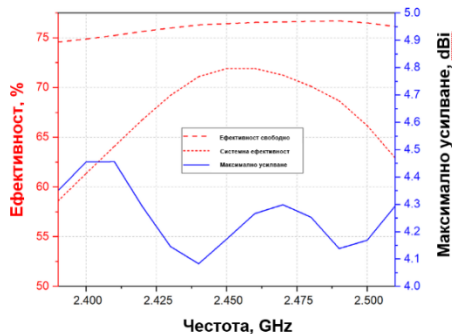


Фиг. 3.1-5 Коефициент на отражение от входа на модифицирана правоъгълна микролентова антенна структура.



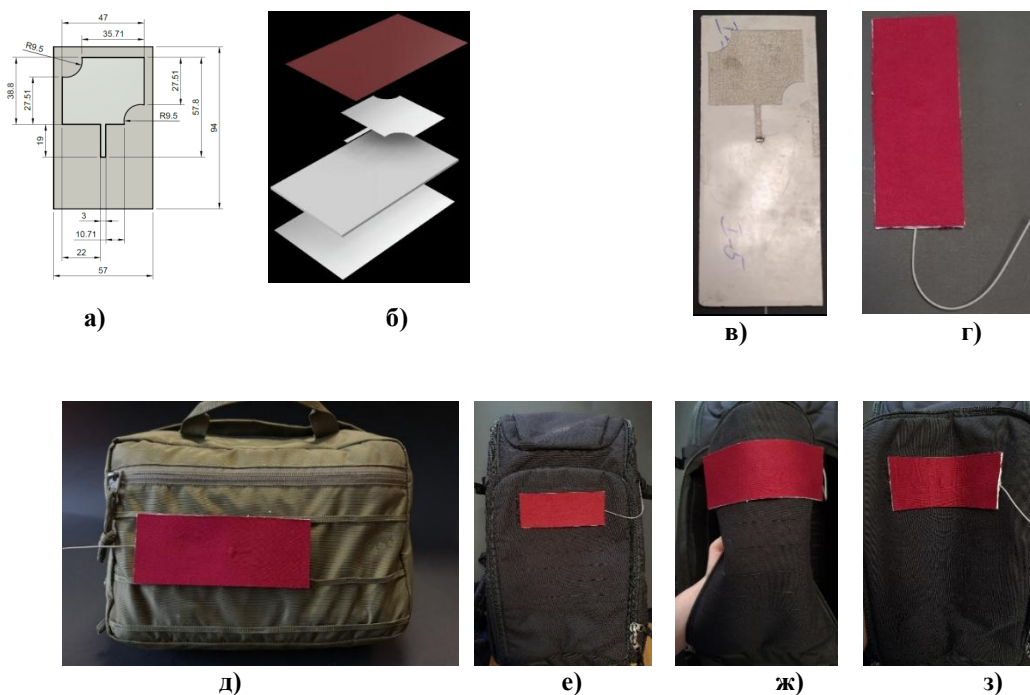
Фиг. 3.1-6

На фиг. 3.1-7 са представени резултатите от проведените числени симулации за определяне на ефективността на излъчване (прекъсната червена линия), системната ефективност (пунктирна червена линия) и максималното усилване (плътна синя линия) на модифицираната patch антенa в честотния обхват 2,39 GHz – 2,51 GHz.



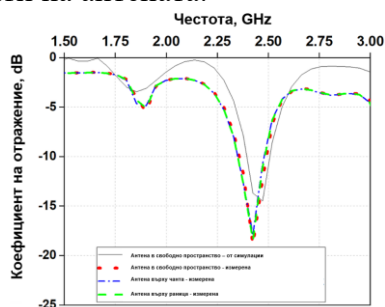
Фиг. 3.1-7 Коефициент на усилване и ефективност на оптимизираната модифицирана правоъгълна микролентова антенна структура [A2].

Сравняването на резултатите при честота 2,45 GHz показва, че след оптимизацията правоъгълната patch антенa е настроена да работи в честотната лента от 2,39 GHz до 2,48 GHz, с максимален коефициент на усилване от 4.68 dBi, пълна ефективност 74,13%, и системна ефективност от 58,33%. Модифицираната patch антенa е настроена да работи в честотната лента от 2,39 GHz до 2,51 GHz, с максимален коефициент на усилване от 4,17 dBi, пълна ефективност от 75,25%, и системната ефективност от 72,48%.



Фиг. 3.1-8

На фигура 3.1-11 са сравнение резултатите от числените изследвания с тези от измерванията. Може да се види, че разработената антенна структура с гъвкава подложка е съгласувана в желания честотен обхват от 2,39 до 2,51 GHz (симулирани S-параметри) и от 2,35 до 2,50 GHz (измерени S-параметри). Както може да се види от фигура 3.1-11, няма разлика в измерения коефициент на отражение от входа на антената, когато прототипа е в свободното пространство и прикрепен към различни обекти (чанта и раница, както е показано на фигура 3.1-8). Тези резултати се дължат на факта, че антената има голяма екранираща равнина. Резултатите също показват незначително изместване на резонансната честота на измерения коефициент на отражение от входа в сравнение с резултатите от числените изследвания. Това несъответствие, най-вероятно се дължи на лепилото, с което са закрепени отделните елементи на антената.



Фиг. 3.1-11

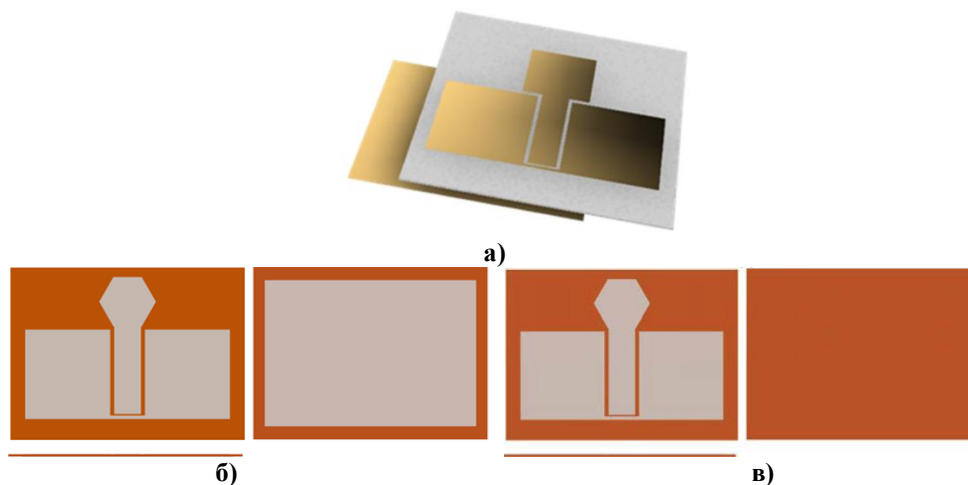
Анализът на резултатите показва, че са постигнати желаните (дефинирани в началото) параметри и характеристики и не са необходими последващи оптимизации.

Резултатите от проектирането, оптимизирането и експерименталното изследване са представени в авторска публикация [A2].

3.1.2 Проектиране на монополна антенна структура на ректена за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи

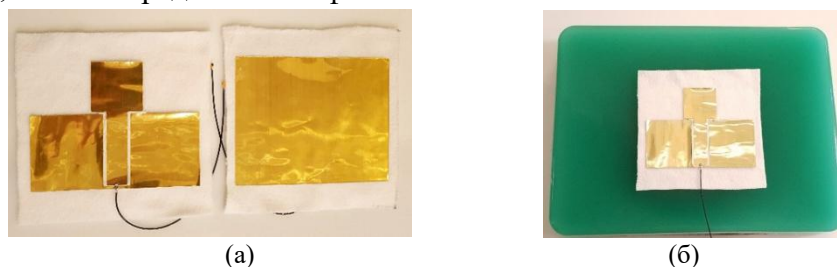
При разработването е дефинирана следната задача: Разработване на антена за приемане на радиочестотна енергия от източници в 2,40 GHz – 2,48 GHz честотен обхват (ISM) с висока ефективност на излъчване, подходяща за ректена на комуникационни възли в безжични персонални мрежи по стандарт IEEE 802.15.6.

На фигури 3.1.2-1 са представени създадените числени модели на печатна монополна антена.



Фиг. 3.1.2-1 Числен модел на: а) правоъгълен монопол - разширен изглед на елементите на антената; б) шестоъгълен монопол с рефелектор и г) шестоъгълен монопол без рефелектор [A3].

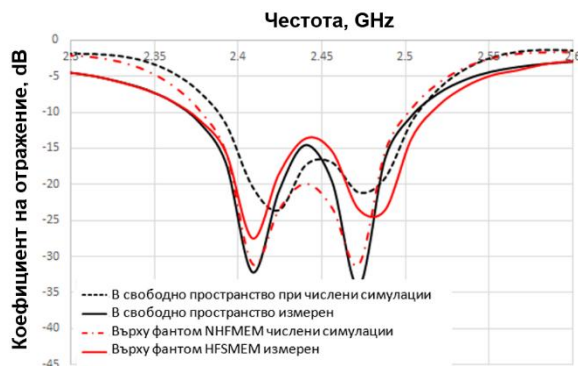
За да се осигурят стабилни и добре контролирани условия за оценка на параметрите и характеристиките на монополните антенни структури (S-параметър, ефективност на излъчване, усилване и т.н), включително и въздействието на човешкото тяло, тъй като ректените са предназначени за безжични персонални мрежи по стандарт IEEE 802.15.6, е разработен хомогенен плосък полутвърд мускулен еквивалентен фантом (HFSMEP) с размери 265 mm (x), 50 mm (y) и 350 mm (z). Съгласно представения във втора глава алгоритъм на следващия етап е изработен прототип на крайната оптимизирана структура на антената, който е представен на фиг. 3.1.2-2.



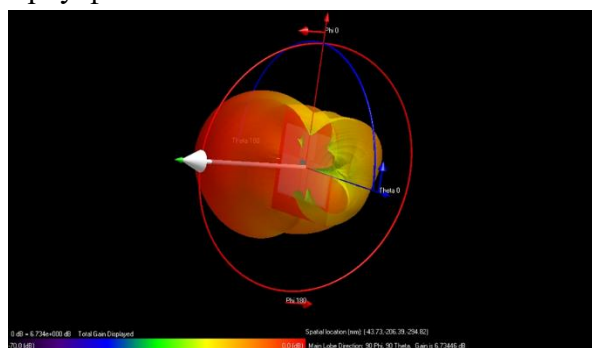
Фиг. 3.1.2-2 Прототип на правоъгълен монопол: (а) в свободното пространство и (б) върху хомогенен фантом.

Резултатите показват, че антената е добре съгласувана в цялата ISM 2,45 GHz лента, като се наблюдава много добро съответствие между числените и експерименталните данни. Измерената стойност на $|S_{11}|$ в свободното пространство е $-32,0$ dB при резонансна честота 2,41 GHz, докато при симулациите е постигната стойност от $-23,6$ dB

при резонансна честота 2,42 GHz. От резултатите на фигура 3.1.2-3 може да се види, че при числените симулации, когато антената е разположена върху фантом има малко по-тясна честотна лента от тази на прототипа, измерен върху фантом.



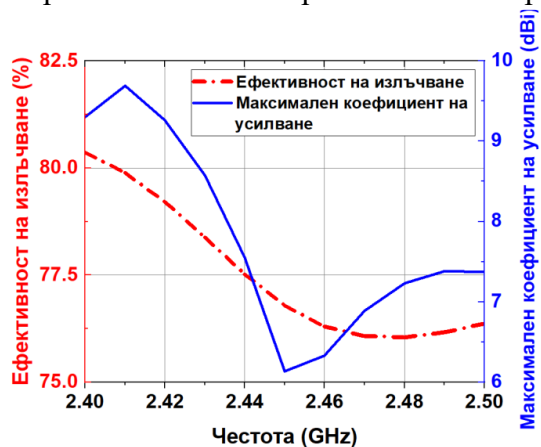
Фиг. 3.1.2-3



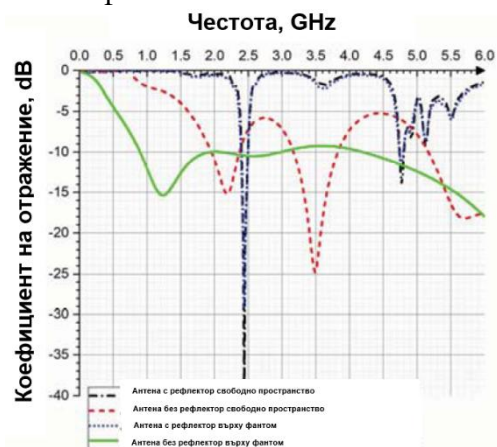
Фиг. 3.1.2-4

На фиг. 3.1.2-5 са представени резултатите за коефициента на усилване и ефективността на излъчване на антенната конфигурация - правоъгълен монопол с рефлектор върху подложка от полар. Както може да се види в цялата честотна лента на интерес антената поддържа голяма ефективност, която се изменя между 75% и 80%. Коефициентът на усилване на антената също е голям в целия ISM 2,45 GHz обхват, като се изменя от 6,1 dBi до 9.5 dBi.

За да се покаже предимството от използването на рефлектор, на фигура 3.1.2-6 са сравнени резултатите за коефициента на отражение от входа на шестоъгълен монопол с и без рефлектор върху подложка от полар, за два случая - когато антената е в свободното пространство и когато е разположена върху хомогенен фантом.



Фиг. 3.1.2-5



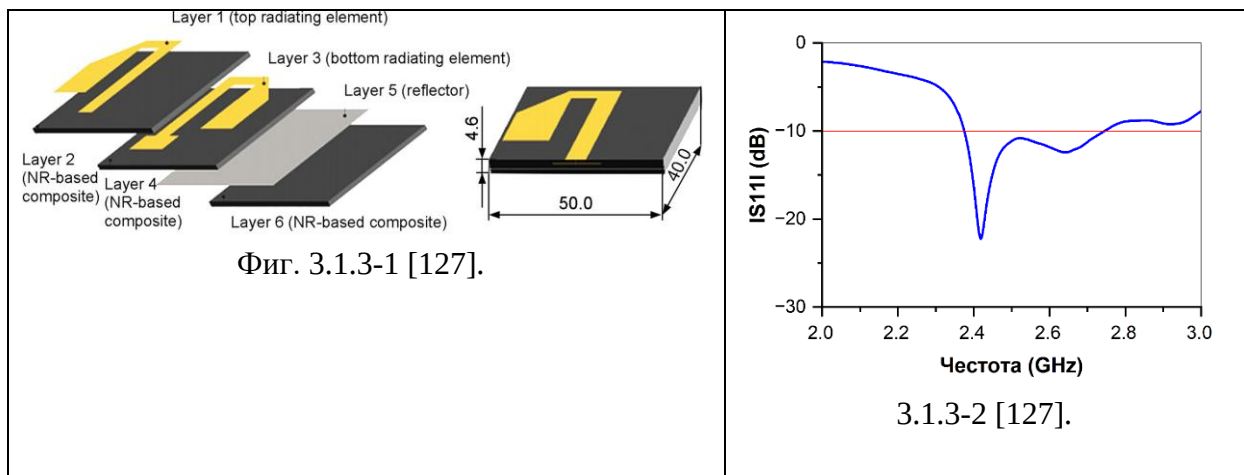
Фиг. 3.1.2-6

Анализът на резултатите показва, че са постигнати желаните (дефинирани в началото) параметри и характеристики и не са необходими последващи оптимизации на монополната правоъгълна антена.

3.1.3 Многослойна диполна антена като антенна структура на ректена за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи

За сравнение на резултатите от проектираните антенни структури е избран дипол,

изработен върху три-слойна полимерна подложка, представен в [127] и показан на фиг. 3.1.3.-1.



Фиг. 3.1.3-2 Измерен коефициент на отражение на дипол с три-слойна полимерна подложка

Както се вижда от фигурата, дипола има широка честотна лента, която покрива ISM 2,45 GHz обхвата.

3.2 Проектиране на съгласуващата и изправителната верига

В дисертационния труд е избрано елементите на съгласуващата и изправителната верига да бъдат със съсредоточени параметри за печатен (повърхностен) монтаж (SMD, surface-mount device), върху основата на микролентова линия с характеристичен импеданс 50Ω .

Изборът на елементи за съгласуващата и изправителната верига с SMD монтаж е породен на първо място от компактността на SMD компонентите, които са значително по-малки в сравнение с елементите за конвенционален монтаж или елементите с разпределени параметри. Избрана е микролентова линия с характеристичен импеданс 50Ω , тъй като това позволява изработените прототипи да бъдат свързани към измервателни уреди (векторен анализатор на вериги) и оборудване (микровълнов генератор, ватметър и т.н.), използвани при измерване на параметрите и характеристиките на елементите на една ректена. Изборът на този импеданс също така осигурява оптимално предаване на мощността, при свързване на веригата към антената и намаляване на загубите, което е много важно за цялостната ефективността на една ректена.

За ламинат на печатната платка е избран материал FR-4 (стъклотекстолитен композит), двустранно фолиран с дебелина на изолационния слой 0,5 мм. Този композитен материал е избран, тъй като е леснодостъпен и с ниска себестойност в сравнение със специализираните високочестотни материали (например Rogers). Определени са електромагнитните параметри на композитния материал чрез метода на малките смущения.

На следващия етап е проектирана микролентовата линия за желания честотен обхват от 2,4 GHz до 2,5 GHz. За целите на проектирането и изследването е избрана средната честота от 2,45 GHz, на обхвата за която е изчислена ширината на проводника на

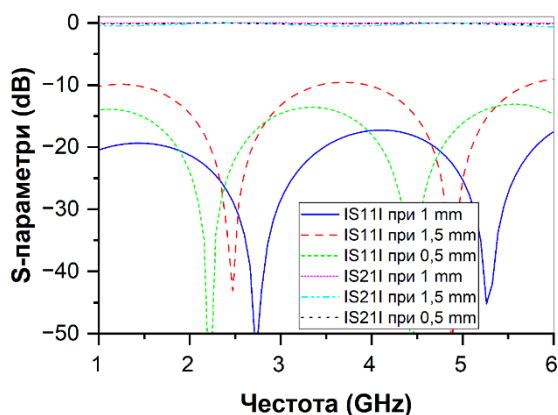
микролентовата линия. Изчисленията са извършени с помощта на софтуерния продукт TRL (Transmission Line), част от Serenade 8.7 на ANSOFT. Входните параметри, използвани за определяне на ширината на проводника, са представени в таблица 3.2-1.

След изчисленията са определени ширината на проводника 1,061 mm и дължината на микролентовата линия 35,5 mm.

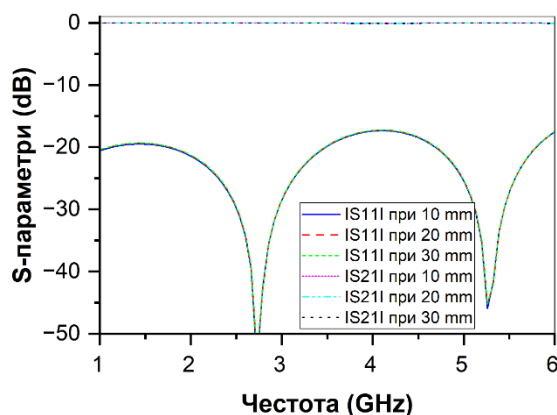
След това, чрез софтуерния продукт xFDTD 7.63 на Remcom е осъществен параметричен анализ, при който е определено влиянието на всеки от параметрите. Проведени са числени симулации при три ширини на проводника на микролентовата линия 0,5 mm, 1,0 mm и 1,5 mm. Резултатите за коефициента на отражение от входа на линията и коефициента на предаване между входа и изхода на линията за трите ширини на проводника на микролентовата линия са представени на фиг. 3.2-1. Също са проведени числени симулации за определяне на крайните размери на ширината на подложката на микролентова линия, а именно при ширина 10 mm, 20 mm и 30 mm. На фиг. 3.2-2 са представени резултатите за коефициента на отражение и коефициента на предаване на микролентова линия при три ширини на подложката на линията, а именно 10 mm, 20 mm и 30 mm. Както се вижда от фигурата, ширината на подложката не оказва влияние нито върху коефициента на отражение от входа на линията, нито върху коефициентът на предаване. Тези резултати дават основание да се изработи микролентова линия с възможно най-малка ширина на подложката 10 mm, дължина 35,5 mm и ширина на проводника 1 mm.

На следващия етап беше разработен прототип на микролентовата линия с така определените размери и в двата края бяха запоени SMA конектори, осигуряващи възможността за измерване на коефициента на отражение и коефициента на предаване с анализатор на електрически вериги.

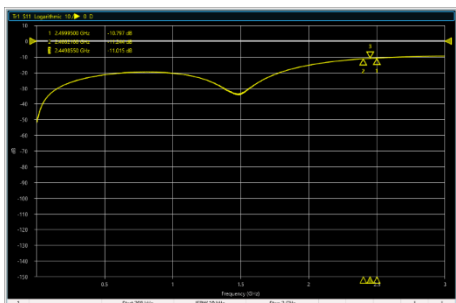
Резултатите от измерване на коефициентите на отражение и коефициента на предаване са представени на фигури 3.2-3 и 3.2-4. Коефициентът на отражение от входа на микролентовата линия е измерен при поставен товар от 50 Ω на изхода на линията. Снимка на изработения прототип при поставен товар от 50 Ω на изхода на линията е представена на фиг. 3.2.-5.



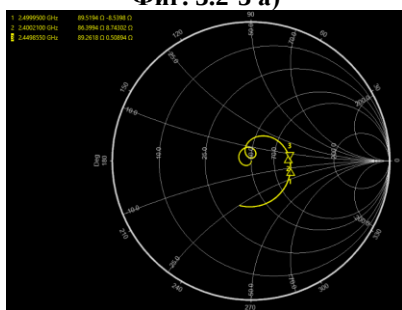
Фиг. 3.2-1



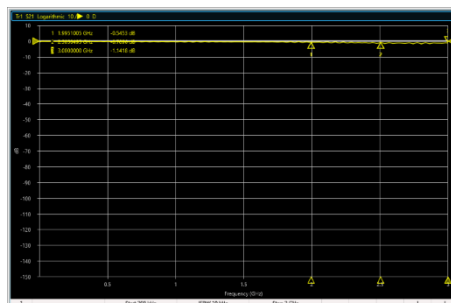
Фиг. 3.2-2



Фиг. 3.2-3 а)



Фиг. 3.2-3 б)



Фиг. 3.2-4

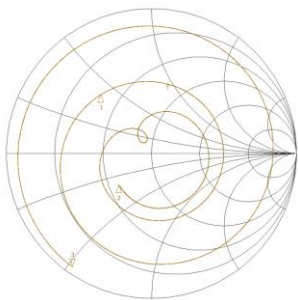


Фиг. 3.2-5

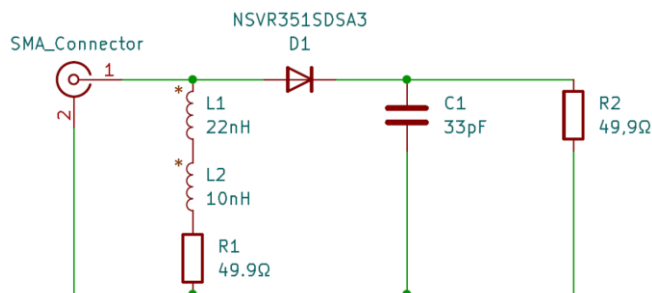
На следващия етап от проектирането на изправителната верига са проведени изследвания за избор на изправителен диод, като са анализирани параметрите и характеристиките на девет Шотки диода, посочени в таблица 3.2-2. След съпоставяне на напрежението в права посока върху диода, минималният ток в права посока и вътрешният капацитет на диода, представени в техническите спецификации от производителите на диодите, са избрани за изследване три от Шотки диодите, които са посочени в таблица 3.2.-3.

За всеки от избраните диоди от таблица 3.2-3 са извършени измервания на коефициента на отражение от входа на диода с свързано към изхода му товарно съпротивление от $49,9 \Omega$ към маса в честотната лента на интерес от 2,4 GHz до 2,5 GHz.

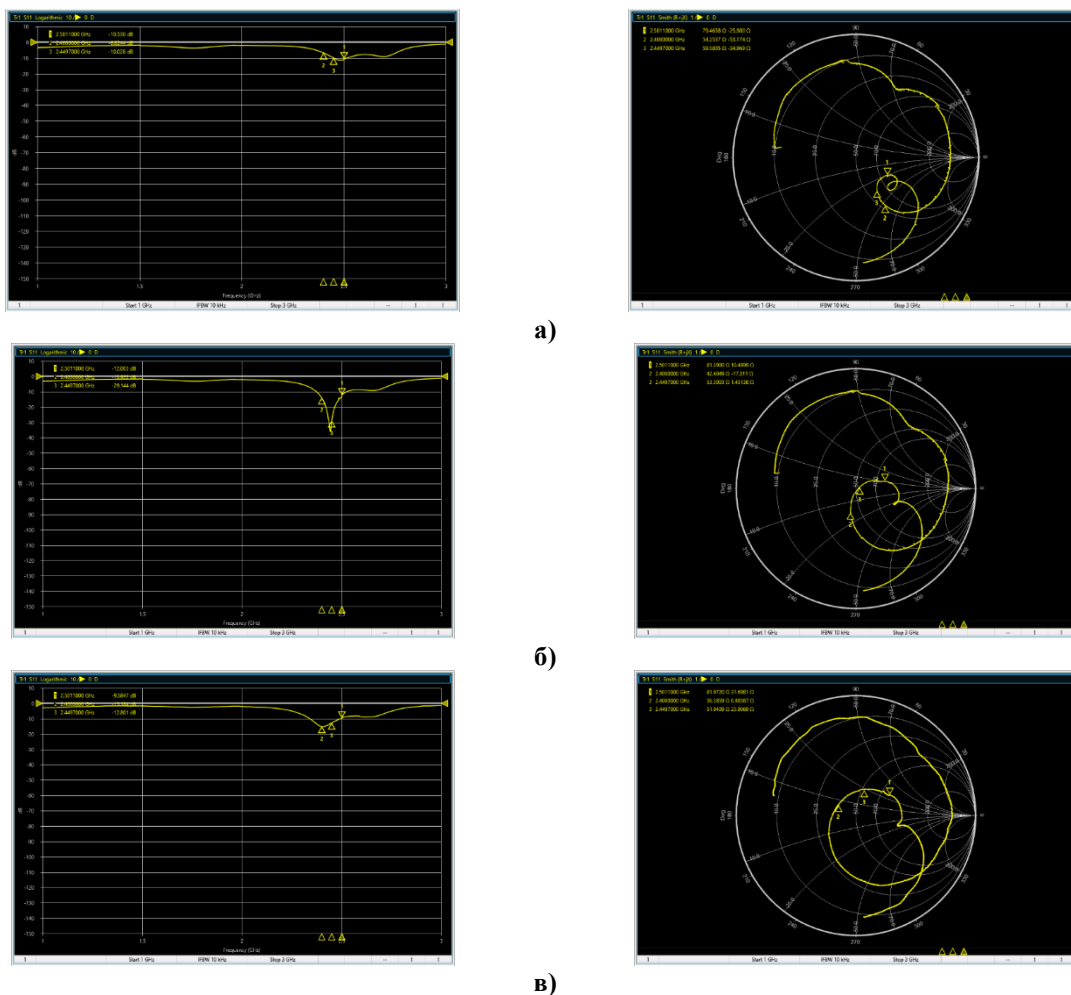
Чрез анализатор на електрически вериги са извършени измервания на трите вида Шотки диоди, посочени в таблица 3.2-3 и резултатите за коефициента на отражение от входа на веригата са представени на фигури 3.2-6, 3.2-7 и 3.2-8. Измерванията са извършени при изходна мощност от анализатора на електрически вериги -5 dBm. От получените резултати за два от диодите NSVR351SDSA3 (фигура 3.2-6) и 1SS315 (фигура 3.2-8) се наблюдава приблизително еднакви стойности на коефициента на отражение в честотния обхват от 0,5 GHz до 6 GHz. За Шотки диода BAT15-04R (фигура 3.2-7) се наблюдава много по-лошо съгласуване в посочената честотна лента.

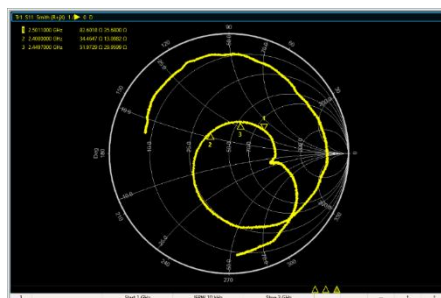
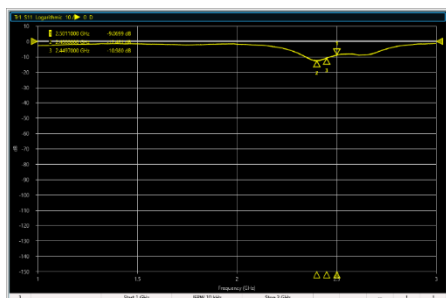


12 също се вижда, че коефициентът на отражение от входа на веригата зависи и от постъпващата мощност. Наблюдава се изместване на съгласуването от ниски към високи честоти с увеличаване на постъпващата на входа мощност. Това може да бъде обяснено с началната част на нелинейната волт-амперна характеристика на диода, което довежда до промяна на вътрешното съпротивление и капацитет на диода. На фигура 3.2-12 са представени коефициента на отражение в логаритмичен мащаб и диаграмите на Смит, чрез които може да бъде оценено изменението на входния импеданс на веригата във функция от честотата и нивото на постъпващата мощност.

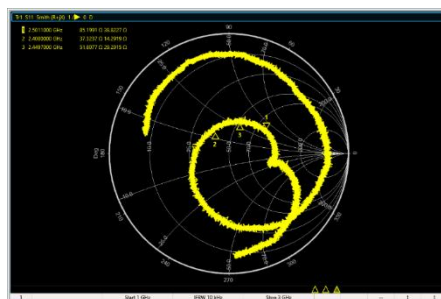
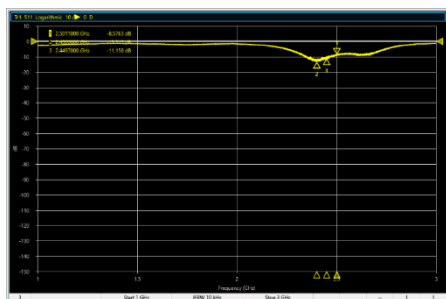


Фиг. 3.2-11 Електрическа схема на съгласуващата и изправителната верига

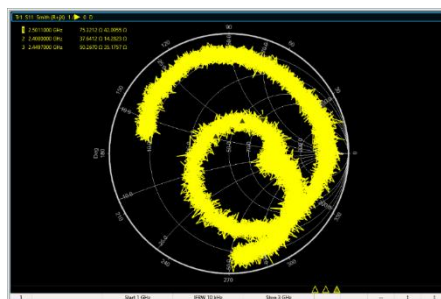
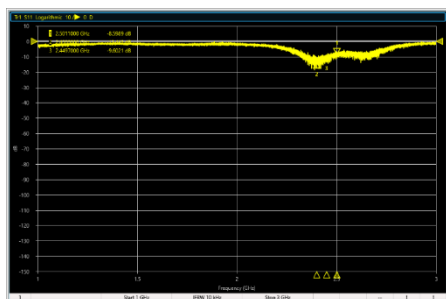




г)



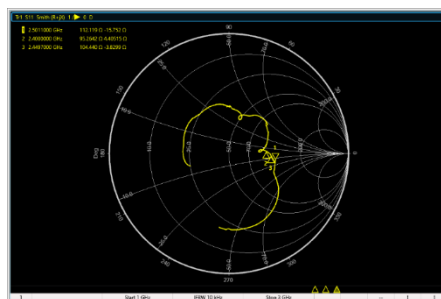
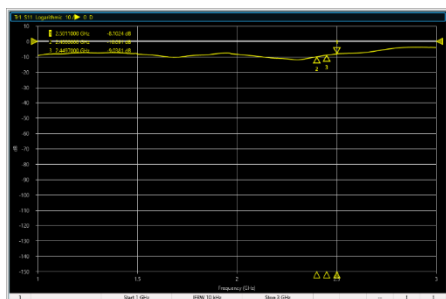
д)



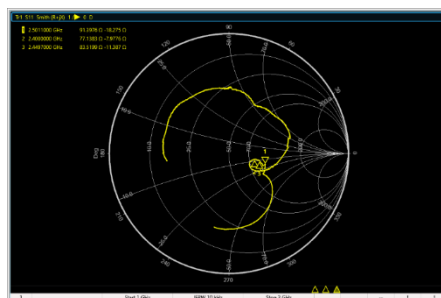
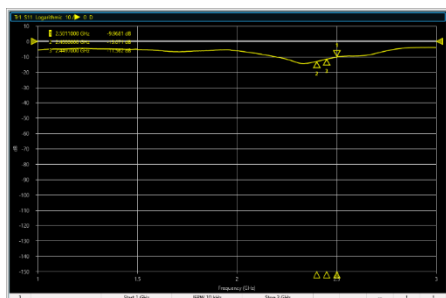
е)

Фиг. 3.2-12

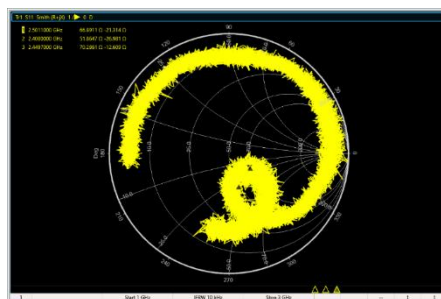
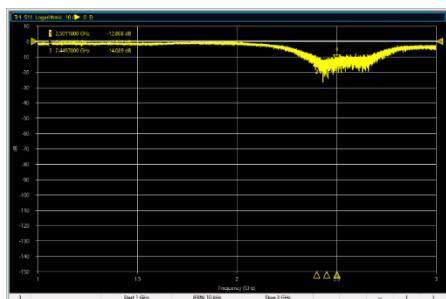
Опитно са определени местоположенията и ориентацията на запоевите проводниците с цел най-малко повлияване на коефициента на отражение и запазване на стойностите му по-малки или равни на -10 dB в желаната честотна лента. Извършени са измервания на коефициента на отражение и резултатите са представени на фиг. 3.2-13 за три нива на мощността, постъпваща от анализатора на електрически вериги, а именно при 10 dBm, 0 dBm и -40 dBm.



а)



б)



в)

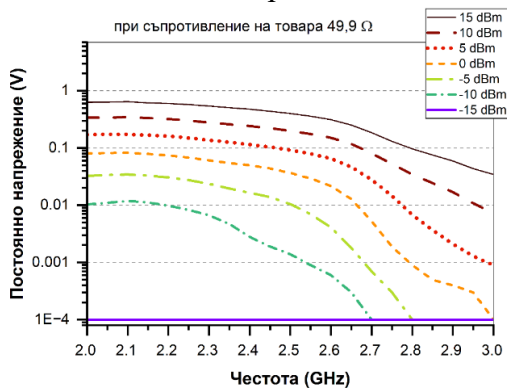
Фиг. 3.2-13

На следващия етап са проведени измервания за оценка на работата на съгласуващата и изправителната верига. Снимка на опитната постановка е показана на фигура 3.2-14

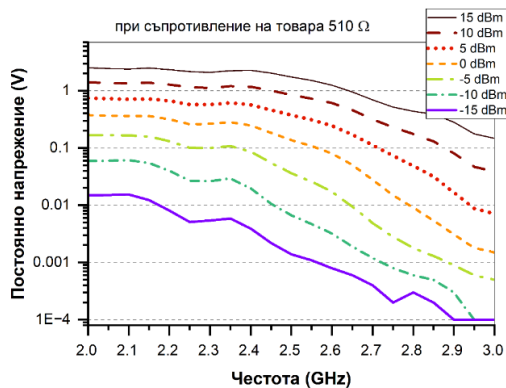


Фиг. 3.2-14.

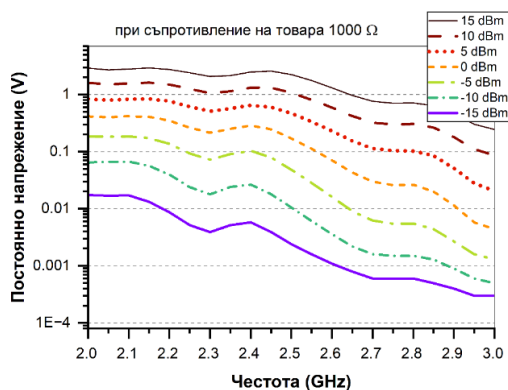
От представените резултати на фигура 3.2-15 се наблюдава, че с увеличаване на честотата, напрежението върху товарния резистор намалява. Освен това с увеличаване стойността на товарния резистор се увеличава постоянното напрежение. Най-голямата стойност на измереното напрежение е около 4 V, при товарно съпротивление 4990 Ω и падаща на входа на веригата мощност 15 dBm.



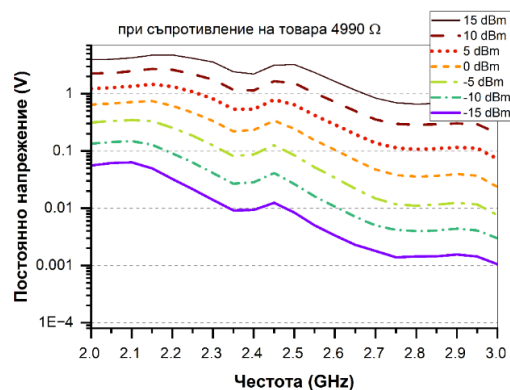
а)



б)



в)



г)

Фиг. 3.2-15

3.3 Обобщение на трета глава

В трета глава на дисертационния труд е осъществено проектиране на три антенни структури за ректени въз основа на предложена методология, представена във втора глава. Разработени са числени модели и прототипи на всяка от отделните антенни структури. Изследвани са параметрите на антенните структури в избрания честотен обхват. Проектирана е съгласуваща и изправителна верига с малки размери със съсредоточени параметри. Изработен е прототип, и са проведени изследвания в широк честотен обхват от 2 GHz до 3 GHz със стъпка от 0,05 GHz, за четири товарни съпротивления 49,9 Ω , 510 Ω , 1000 Ω и 4990 Ω и изменение на изходната мощност от -15 dBm до +15 dBm, със стъпка на нарастване 5 dB.

3.4 Изводи и приноси към трета глава

В резултат от проведените изследвания могат да бъдат направени следните основни изводи: Проектирани са две антенни структури върху гъвкави подложки за ректени въз основа на предложена методология, представена във втора глава. Първата антенна структура е модифицирана правоъгълна микролентова (patch) антена, с кръгова поляризация за приемане на радиочестотна мощност от източници в 2,40 GHz – 2,48 GHz честотен обхват (ISM 2,45 GHz), която демонстрира висока ефективност, повече от 70% и е подходяща за интегриране в малки, преносими комуникационни възли, които могат да се вграждат в аксесоари, като например „умна“ раница, приложими за безжични персонални мрежи по стандарт IEEE 802.15.1. Изработен и изследван е прототип на антенната структура. Втората антенна структура е правоъгълна монополна антена за приемане на радиочестотна мощност от източници в 2,40 GHz – 2,48 GHz честотен обхват (ISM), която също демонстрира висока ефективност повече от 75% и е подходяща за ректена на комуникационни възли в безжични персонални мрежи по стандарт IEEE 802.15.6. Изработен и изследван е прототип на антенната структура. И при двете антенни структури се наблюдава много добро съвпадение на числените и експерименталните резултати. Проектирани са съгласуваща и изправителна вериги с малки размери със съсредоточени параметри. Изработен е прототип, и са проведени изследвания в широк честотен обхват от 2 GHz до 3 GHz със стъпка от 0,05 GHz, за четири товарни съпротивления 49,9 Ω , 510 Ω ,

1000 Ω и 4990 Ω и изменение на изходната мощност от -15 dBm до +15 dBm. Резултатите от проведените изследвания са представени в авторски публикации А2 и А3. За сравнение е избрана и изследвана антенна структура базирана на дипол върху трислойна полимерна подложка.

Приноси към трета глава

1. Въз основа на предложена методология, представена във втора глава, са проектирани две нови антенни структури върху гъвкави подложки за ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи.
2. Първата предложена антенна структура е базирана на модифицирана правоъгълна микролентова (patch) антена с кръгова поляризация, предназначена за приемане на радиочестотна мощност от източници в 2,40 GHz – 2,48 GHz честотен обхват (ISM 2,45 GHz), с висока ефективност, повече от 70% и е подходяща за интегриране в малки, преносими комуникационни възли, които могат да се вграждат в аксесоари, като например „умна“ раница, приложими за безжични персонални мрежи по стандарт IEEE 802.15.1.
3. Втората предложената правоъгълна монополна антена структура е с вертикална поляризация, предназначена за приемане на радиочестотна мощност от източници в 2,40 GHz – 2,48 GHz честотен обхват (ISM), която също осигурява висока ефективност, повече от 75% и е подходяща за ректена на комуникационни възли в безжични персонални мрежи по стандарт IEEE 802.15.6.
4. Изработени и изследвани са прототипи на двете антенни структури.
5. Проектирани са съгласуваща и изправителна вериги с малки размери със съсредоточени параметри. Изработен е прототип, и са проведени изследвания в широк честотен обхват.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА АНТЕННИ СТРУКТУРИ НА РЕКТЕНИ ЗА ЗАХРАНВАНЕ НА КОМУНИКАЦИОННИ ВЪЗЛИ В БЕЗЖИЧНИ ПЕРСОНАЛНИ МРЕЖИ

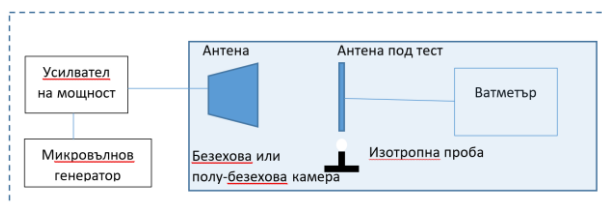
В настоящата глава на дисертационния труд е решена следната поставена задача:

1. Да се разработи методология, която позволява да се осъществи оценка на отделните елементи на ректената, възпроизводимост и повторимост на резултатите от измерване.

В настоящата глава е представена разработената методология, която позволява да се осъществи оценка на отделните елементи на ректената и в същото време позволява възпроизводимост и повторимост на резултатите.

4.1 Методология за характеризирание на антенни структури на ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи

За провеждане на измерванията е предложена постановката, представена на фиг. 4.1-1.



Фиг. 4.1-1

Дефинирана е процедура за провеждане на измерване.

4.2 Апробиране на предложената методология

Разработените в трета глава на дисертационния труд прототипи на антенни структури на ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи са характеризирани чрез предложената методология. Снимки на опитната постановка при провеждане на измерванията са представени на фигури от 4.1-2 до 4.1-4, съответно. Резултатите от измерванията са представени на фигури 4.1-5 до 4.1-11. Преди провеждане на измерванията е определен интензитетът на електрическото поле в мястото на разполагане на тестваната антена като функция от изходното ниво на генератора. За определяне на интензитета е използвана изотропна сонда, а резултатите са представени на фиг. 4.1-5.



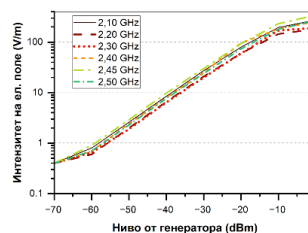
Фиг. 4.1-2



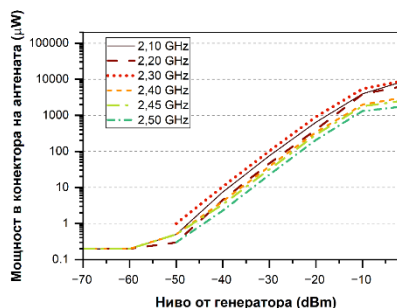
Фиг. 4.1-3



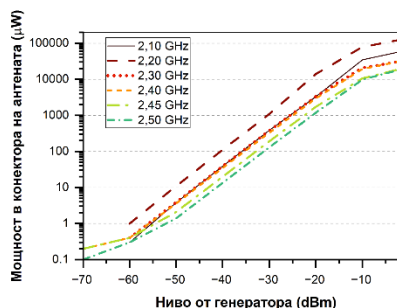
Фиг. 4.1-4



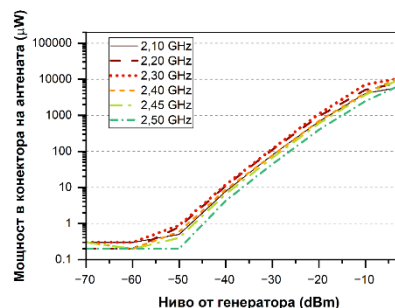
Фиг. 4.1-5



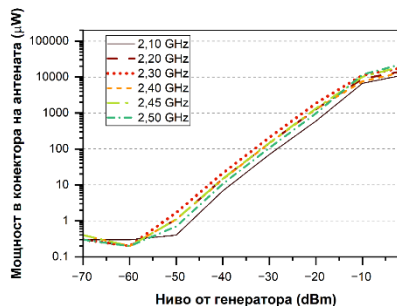
Фиг. 4.1-6



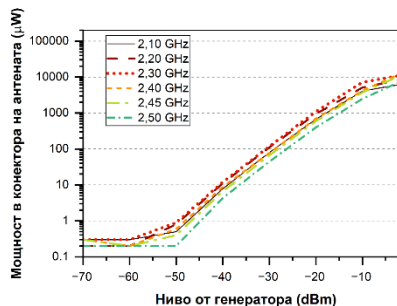
Фиг. 4.1-7



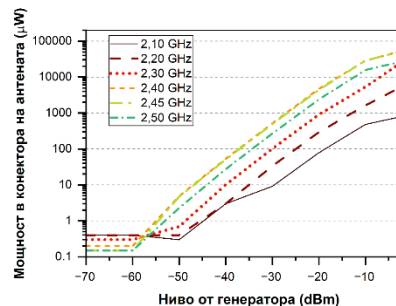
Фиг. 4.1-8



Фиг. 4.1-9



Фиг. 4.1-10



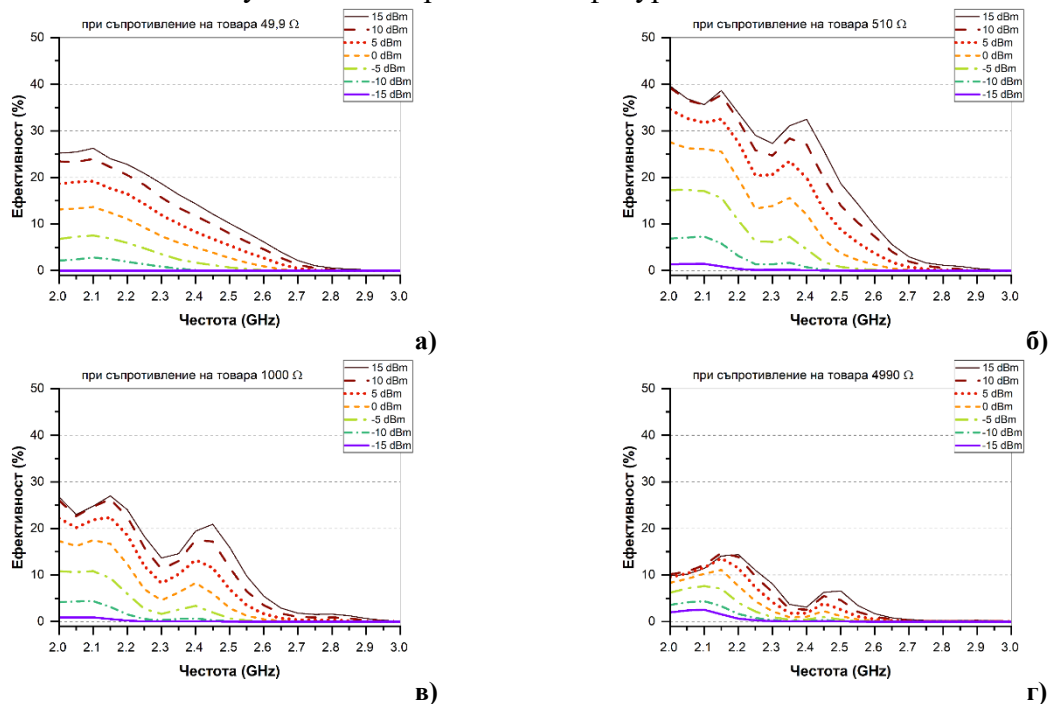
Фиг. 4.1-11

4.3 Методология за характеризиране на съгласуващата и изправителната верига на ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи

Въз основа на проведенния литературен обзор, ефективността на преобразуване (η) беше определена като основен параметър на съгласуващата и изправителната верига. В раздела са представени опитна постановка и процедура за провеждане на измервания за оценка на ефективността на преобразуване.

4.4 Апробиране на предложената методология

Чрез предложената методология са проведени измервания с изработения прототип и е оценена ефективността на преобразуване на изправителната и съгласуващата верига в честотния обхват от 2 GHz до 3 GHz при изменение на изходната мощност от -15 dBm до +15 dBm със стъпка на изменение 5 dB за четири товарни съпротивления 49,9 Ω , 510 Ω , 1000 Ω и 4990 Ω . Резултатите са представени фигура 4.3-2.



Фиг. 4.3-2

От резултатите може да се заключи, че за предложената и изработена изправителна и съгласуваща верига, максимална ефективност на преобразуване от 40% се постига при

товарно съпротивление $510\ \Omega$ за честота $2,00\ \text{GHz}$, при изходно ниво на генератора повече от $10\ \text{dBm}$. В желаната честотна лента $2,40\ \text{GHz} - 2,50\ \text{GHz}$ за оптимално предаване и преобразуване на мощност най-подходящо е товарно съпротивление $510\ \Omega$. При съпротивления $49,9\ \Omega$ и $1000\ \Omega$ ефективността достига приблизително 27%, докато при съпротивление $4990\ \Omega$ се наблюдават най-малките стойности на ефективността на преобразуване.

4.3 Изводи и приноси към четвърта глава

В резултат от проведените изследвания могат да бъдат направени следните основни изводи: Представена е методология, която позволява да се осъществи оценка на основни параметри и характеристики на отделните елементи на ректената, която позволява възпроизводимост и повторимост на резултатите. Методологията е апробирана чрез изследване на основните параметри на три антенни структури върху гъвкави подложки, както и на съгласуващата и изправителната вериги на ректената. Получени са следните резултати: За първата антенна структура, която е модифицирана правоъгълна микролентова (patch) антена, с кръгова поляризация е установено, че при вертикална и хоризонтална поляризация на опорната антена, максималната приета мощност е между $7\ \text{mW}$ и $20\ \text{mW}$ за всички честоти и ниво от генератора $0\ \text{dBm}$. За втората антенна структура, която е правоъгълна монополна антена е установено, че при вертикална поляризация на опорната антена, максималната приета мощност е $130\ \text{mW}$ при честота $2,2\ \text{GHz}$ и ниво от генератора $0\ \text{dBm}$. Освен това при хоризонтална поляризация на опорната антена, максималната приета мощност е $10\ \text{mW}$ при същото ниво и честота от генератора. За третата антена, която е диполна антена е установено, че при вертикална поляризация на опорната антена максималната приета мощност е $60\ \text{mW}$ при честота $2,45\ \text{GHz}$ и ниво от генератора $0\ \text{dBm}$. При хоризонтална поляризация на опорната антена максималната приета мощност е $10\ \text{mW}$ при всички честоти и ниво от генератора $0\ \text{dBm}$. Изследвани са съгласуващата и изправителната вериги на ректената. Експериментално е установено, че в желаната честотна лента $2,40\ \text{GHz} - 2,50\ \text{GHz}$ за оптимално предаване и преобразуване на мощност най-подходящо е товарно съпротивление от $510\ \Omega$, при което е постигната ефективност на преобразуване от 22 % до 32 % в посочената лента. При това товарно съпротивление е постигната максимална ефективност на преобразуване от 40% за честота $2,0\ \text{GHz}$. Част от резултатите са представени в авторска публикация [A2].

Приноси към четвърта глава

1. Предложена е методология, която позволява да се осъществи оценка на отделните елементи на ректената, възпроизводимост и повторимост на резултатите от измерване.
2. Въз основа на предложената методология са характеризирани предложените две нови антенни структури върху гъвкави подложки за ректени за захранване на комуникационни възли в безжични персонални мрежи и една диполна антена върху трислойна подложка, както и предложените съгласуваща и токоизправителна вериги.
3. За първата антенна структура, която е модифицирана правоъгълна микролентова (patch) антена, с кръгова поляризация е установено, че при вертикална и хоризонтална

поляризация на опорната излъчваща антена максималната приета мощност между 7 mW и 20 mW за всички честоти и ниво от генератора 0 dBm.

4. За втората антенна структура, която е правоъгълна монополна антена е установено, че при вертикална поляризация на опорната излъчваща антена, максималната приета мощност, измерена на изхода на конектора е 130 mW при честота 2,2 GHz и ниво от генератора 0 dBm. Освен това при хоризонтална поляризация на опорната антена, максималната приета мощност е 10 mW при честота 2,2 GHz и ниво от генератора 0 dBm монополната антена е с вертикална поляризация.

5. За прототипа на диполната антена е установено, че при вертикална поляризация на опорната антена, максималната приета мощност е 60 mW при честота 2,45 GHz и ниво от генератора 0 dBm. При хоризонтална поляризация на опорната антена, максималната приета мощност, измерена на входа на конектора е от 7 mW до 10 mW при всички честоти и ниво от генератора 0 dBm.

6. Изследвани са съгласуващата и изправителната вериги на ректената. Експериментално е установено, че в желаната честотна лента 2,40 GHz – 2,50 GHz за оптимално предаване и преобразуване на мощност най-подходящо е товарно съпротивление със стойност 510 Ω с ефективност на преобразуване от 22 % до 32 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящия дисертационен труд е посветен на актуална тематика свързана с решаване на въпроса как да се осигури захранване на устройствата в безжични персонални мрежи от алтернативни източници на енергия, породен от големия брой безжични устройства, използвани в почти всеки сектор – от банкиране и земеделие до транспорт и здравеопазване. В работата са разгледани специфичните особености на стандартите за безжични персонални мрежи във връзка с проектирането и изследването на антенни структури за приемане и преобразуване на електромагнитните полета от изкуствени източници и възможностите за използването им за захранване на възли в безжични персонални мрежи. Разработената методология за проектиране на ректени позволява да се отчетат специфичните особености при комуникационните възли, работещи в персонални мрежи, изградени по стандарти IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 или IEEE 802.15.6, демонстрирана чрез алгоритъм. Предложена е постановка за оценка на интензитета на електрическото поле от изкуствени източници, чрез която се постига повторяемост и сравнимост на резултати от измерване. Представени са резултати от проведени измервания и са сравнени с тези на други автори. Проектирани са две антенни структури върху гъвкави подложки. Въз основа на предложена методология, представена във втора глава са изследвани три антенни структури за приложение като ректени. Представена е методология, която позволява да се осъществи оценка на основни параметри на отделни елементи на една ректена, възпроизводимост и повторимост на резултатите. Проектирани и изследвани са съгласуваща и изправителна вериги за ректената за захранване на възли в безжични персонални мрежи.

СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

A1. М. Аврамов, Оценка на интензитета на електрическото поле създавано от изкуствени източници, XXXIII Международна научна конференция за млади учени, 3 и 4 октомври 2024 г., Благоевград, България.

A2. G. Atanasova, B. Atanasov, N. Atanasov, M. Avramov, N. Hristov and N. Dishovsky, "A Circular Polarized Flexible Antenna for Energy Harvesting from Sources in 2.4 GHz ISM Band," 2023 14th National Conference with International Participation "Electronica 2023", June 1 - 2, 2023, Sofia, Bulgaria.

A3. G. Atanasova, N. Atanasov, A. Stefanov, S. Andonova, M. Avramov and M. Kateva, "Comparison of Computed Specific Absorption Rate Induced in a Homogeneous Human Body Phantom Using a Wearable Textile Antenna for Biomedical Applications," 2019 27th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 94-97, doi: 10.1109/TELECOM48729.2019.8994882.

A4. N. Atanasov, G. Atanasova, B. Atanasov, M. Avramov and N. Hristov, "Numerical and Experimental Evaluation of a Textile Wearable Antenna for On-body Communications," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874421.

ЦИТИРАНИЯ НА ПУБЛИКАЦИИТЕ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД по SCOPUS

1. Авторска публикация [A3] G. Atanasova, N. Atanasov, A. Stefanov, S. Andonova, M. Avramov and M. Kateva, "Comparison of Computed Specific Absorption Rate Induced in a Homogeneous Human Body Phantom Using a Wearable Textile Antenna for Biomedical Applications," 2019 27th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 94-97, doi: 10.1109/TELECOM48729.2019.8994882, Цитирана в 4 публикации.

2. Авторска публикация [A4] N. Atanasov, G. Atanasova, B. Atanasov, M. Avramov and N. Hristov, "Numerical and Experimental Evaluation of a Textile Wearable Antenna for On-body Communications," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874421, Цитирана в 1 публикация.

УЧАСТИЕ В НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ПРОЕКТИ ВЪВ ВРЪЗКА С РАБОТАТА ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Научно изследователски проект по договор КП-06-Н27/11 от 11.12.2022 на тема „Антенни технологии за носими върху тялото на човека устройства в бъдещите комуникационни мрежи“, с ръководител на научния колектив доц. д-р инж. Николай Тодоров Атанасов, по Конкурс за финансиране на фундаментални научни изследвания, 2018 г. към Фонд „Научни изследвания“.

2. Научно изследователски проект по договор КП-06-Н57/11 от 16.11.2021 на тема „Антенни структури за нови източници на захранване в безжични мрежи от следващо поколение“, с ръководител на научния колектив доц. д-р инж. Габриела Лъчезарова Атанасова, по Конкурс за финансиране на фундаментални научни изследвания, 2021 г. към Фонд „Научни изследвания“.

South-West University "Neofit Rilski"
Faculty of Engineering

Manol Stefanov Avramov, MSc

Research of Antenna Structures for Powering Nodes in Wireless Personal Area Networks

ABSTRACT

of the PhD Thesis

The present PhD thesis is dedicated to a current topic related to addressing the question of how to power devices in wireless personal networks using alternative energy sources. This topic is driven by the large number of wireless devices used in almost every sector—from banking and agriculture to transportation and healthcare. The work examines the specific characteristics of wireless personal network standards about the design and investigation of antenna structures for receiving and converting electromagnetic fields from artificial sources and the possibilities of using them to power nodes in wireless personal networks.

The developed rectenna design methodology considers the specific features of communication nodes operating in personal networks based on the IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4, or IEEE 802.15.6 standards, demonstrated through an algorithm. A framework for assessing the intensity of the electric field from artificial sources is proposed, which ensures the repeatability and comparability of measurement results. Measurement results are presented and compared with those of other authors.

Two antenna structures on flexible substrates have been designed. Based on the proposed methodology presented in the second chapter, three antenna structures for application as rectennas have been investigated. A methodology is presented that enables the assessment of key parameters of individual elements of a rectenna, as well as the reproducibility and repeatability of the results. Matching and rectifying circuits for the rectenna, intended to power nodes in wireless personal networks, have been designed and investigated.