



ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“



ФИЗИКО – ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОНИКА, КОМУНИКАЦИИ И
ИНФОРМАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ“

маг. инж. Станислав Митков Асенов

ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА БЕЗЖИЧНИ
СЕНЗОРНИ ВЪЗЛИ С НИСКА КОНСУМАЦИЯ НА ЕНЕРГИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
“ДОКТОР”

Професионално направление:

5.3. „Комуникационна и компютърна техника“

Докторска програма:

„Автоматизация на области от нематериалната сфера
(медицина, просвета, наука, административна дейност и др.)“

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Димитър Михайлов Токмаков

Рецензенти:

доц. д-р инж. Слави Ясенов Любомиров
доц. д-р инж. Радослава Николова Габрова

Пловдив, 2021 г.

Дисертационният труд е с обем 165 страници , включително 96 фигури, 26 таблици, оформени в увод, 4 глави, общи изводи, научно-приложни приноси, списък с използваните термини и съкращения, списък с публикациите на автора. Списъкът на цитираната литература включва 165 заглавия, всички на латиница.

Означенията на формулите, фигурите и таблиците в автореферата съвпадат с тези в дисертационния труд.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширения катедрен съвет на катедра „ЕЛЕКТРОНИКА, КОМУНИКАЦИИ И ИНФОРМАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ“ при ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“ на 30.06.2021 г., Протокол № 31.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 24.09.2021 г. от 11:00 часа в зала “КОМПАС” на ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“ на заседание на научно жури.

Материалите по защитата на докторанта са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Физико-технологичния факултет при ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“, стая 212

Научно жури: проф. д-р Тодор Стоянов Джамийков
 проф. д-р Недялко Тодоров Катранджиев
 доц. д-р Слави Ясенов Любомиров
 доц. д-р Радослава Николова Габрова
 доц. д-р Николай Атанасов Шопов

Автор: маг. инж. Станислав Митков Асенов

Заглавие: **ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА
БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ ВЪЗЛИ С НИСКА
КОНСУМАЦИЯ НА ЕНЕРГИЯ**

Тираж: 30 бр.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Темата на настоящия дисертационен труд се свързва с проектиране, изследване и оптимизиране на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия. Тя е конкретизирана върху методите и апаратните средства за оптимизиране на консумираната енергия от безжичните сензорни възли.

Отчитайки актуалността и значимостта на проблема, пораждащ необходимост от търсене на нови методи и подходи, свързани със задълбочени експериментални изследвания, вниманието се насочи към особеностите на захранването на безжичните сензорни възли и консумираната от тях енергия.

Безжичните сензорни мрежи (WSN) са изградени от голям брой крайни сензорни възли, които събират информация от външна среда със сензори, след това обработват информацията и комуникират с други съседни възли в мрежата. Обикновено безжичните сензорните възли работят с изчерпаеми батерии. Тъй като ръчната подмяна или презареждане на батериите не е лесна, желана или винаги възможна задача, консумацията на енергия става много важен въпрос в развитието на тези мрежи. Общата консумация на енергия на безжичните сензорни възли включва измерването, обработката на данни и радиопредаването.

При проектирането и внедряването на безжични сензорни мрежи има сложни проблеми, които трябва да бъдат решени в различни области на научните изследвания. Един от основните проблеми е да се осигури висока толерантност към повреда на безжичните сензорни възли. Прекъсването на мрежата е възможно поради откази на възли и комуникационни канали по няколко причини, като основна се явява ограниченият ресурс на захранването на възела.

Животът на безжичните сензорни възли е ограничен от живота на източника на захранване, който с изключително малки изключения е химическа батерия, и задачата за намаляване на консумацията на енергия става по-важна от всякога и ефективността на нейното решение пряко влияе върху по-нататъшното развитие на безжичните сензорни мрежи.

Едно от основните изисквания, което се поставя пред безжичните сензорни възли е тяхната автономност, която може да бъде изпълнена и удовлетворена чрез намаляване на консумацията на енергия на крайните възли.

През последните години се наблюдава стремеж да се постигне по-високо качество от гледна точка на доставки и услуги, които се предоставят от безжичните сензорни мрежи и възли. Това е предпоставка за разширяване и внедряване на допълнителни нискоенергийни крайни сензорни възли към мрежите.

Цялостното теоретично и практическо изследване, отразено в дисертационният труд е насочено към проектирането и реализирането на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия. Предложени са различни схемни решения и способности за намаляване на консумираната енергия от безжичните сензорни възли.

Цел на дисертационния труд:

Целта на дисертационния труд е да се проектират, изследват и оптимизират безжични сензорни възли чрез прилагане на нови подходи и технологични решения, водещи до намаляване на консумираната от тях енергия.

Задачи за постигане на целта:

1. Проучване на съществуващите методи и средства за минимизиране на енергопотреблението от безжичните сензорни възли.
2. Създаване и изследване на енергийно ефективен модел на LoRaWAN безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия.
3. Проектиране, изследване и оптимизиране на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия, хардуерно и софтуерно обезпечени, включващи в архитектурата си съвременни мощни и нискоенергийни микроконтролери.
4. Проектиране и изследване на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия с харвестърни системи и безбатерийни захранвания.

Използвани методи и средства на изследване:

Използваните методи за изследване са от научните области: теория на електронните - цифрови схеми смесени и микропроцесорна техника.

Внедряване и практическа приложимост

Разработени са иновативни схемни решения за намаляване на консумацията на енергия от безжичните сензорни възли и са реализирани безжични сензорни възли с безбатерийно захранване.

Публикации по темата

Основните резултати са публикувани в: 6 броя в сборник доклади на Национални конференции с международно участие „Електроника 2020”, „Електроника 2021”, СЕЕС, София; „ЕТ 2019“, „ЕТ 2020“, СЕЕС, Созопол; „ТЕЛЕКОМ 2020“, СЕЕС, София, 2 броя в сборници доклади на Международна конференция на младите учени, СУБ – Пловдив. Седем от публикациите са в съавторство с научния ръководител и една е самостоятелна.

Обем и структура на дисертационния труд

Дисертационният труд е с обем 165 страници, включително 96 фигури, 26 таблици, оформени в увод, 4 глави, общи изводи, научно-приложни приноси, списък с използваните термини и съкращения, списък с публикациите на автора. Списъкът на цитираната литература включва 165 заглавия, всички на латиница.

Означенията на формулите, фигурите и таблиците в автореферата съвпадат с тези в дисертационния труд.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. Литературен обзор по темата на дисертационния труд

В глава първа се представя за обсъждане проектирането, изследването и оптимизирането на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия. Представени са резултати от литературното проучване относно съществуващите технологии и съвременни методи за реализация на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия.

Представено е проучване на архитектурните особености на безжичните сензорни възли с ниска консумация на енергия.

Направен е сравнителен анализ на технологиите за предаване на данните от безжичните сензорни възли (LoRaWAN, Wi-Fi, Sigfox, BLE и други).

Представено е проучване на енергийните източници на захранване на безжичните сензорни възли.

Класифицирани са методите за енергийна ефективност на безжичните сензорни възли.

Резултати от литературното проучване по темата на дисертационния труд

От проведеното литературно проучване могат да бъдат дефинирани следните проблеми:

1. Необходимост от разработване на нови методи и технологични решения, водещи до намаляване на консумираната енергия от крайните възли.
2. Основен проблем е ограниченото захранване на възлите, което създава предпоставка за прекъсване или отпадане на безжичната мрежата, поради липса на захранване на възлите.
3. Основното изискване към безжичните сензорни възли е тяхната автономност, която може да бъде изпълнена чрез намаляване на консумацията на енергия на крайните възли.
4. Захранването с батерии се използва като източник на енергия за крайните сензорни възли, което противоречи на изискването за тяхната автономност. Системите за събиране на енергия предлагат алтернатива, въпреки че не може да се избегне изцяло проблема.

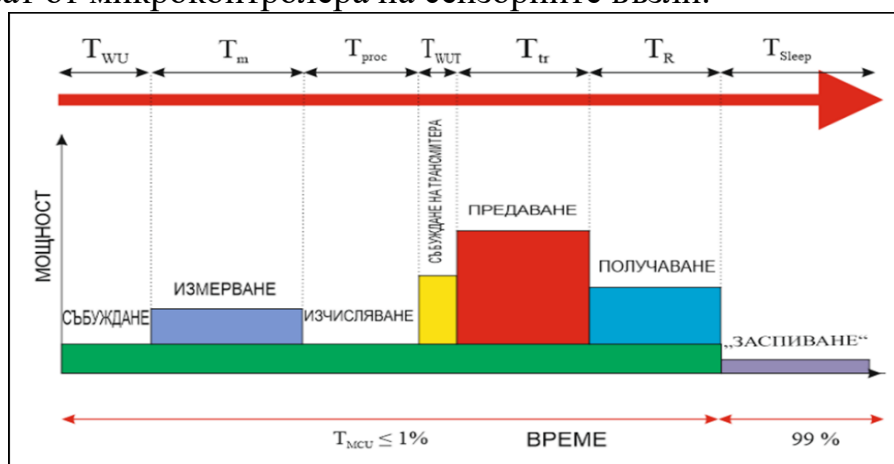
Обект на дисертационния труд са проектирани и изследвани безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия, а предмет на дисертационният труд е оптимизацията на енергийното потребление на безжичните сензорни възли.

Глава 2. Енергиен модел на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия

В тази глава от дисертационния труд е представен енергиен модел на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия. Акцентира се върху математическия апарат за определяне енергопотреблението от отделните компоненти на безжичните възли. Предложен е нов енерго ефективен протокол за безжични сензорни възли, редуциращ енергопотреблението от възлите. Извършен е анализ на енергийното потребление на сензорен възел с ниска консумация на енергия.

2.2. Енергиен модел

На фигура 2.2.1 е илюстрирана работната последователност на безжичен сензорен възел и позволява да се дефинират различните режими на работа, които се управляват от микроконтролера на сензорните възли.



Фиг. 2.2.1 Енергийни състояния и времеви интервали на сензорните възли.

Представеният енергиен модел определя различните режими на работа на комуникационния сензор. Подходът се състои в разглеждане на всички елементи, активни през определено време и неактивни за останалата част от времевия цикъл. През повечето време безжичният сензор е установен в ниско-енергиен режим. Консумираната енергия в този режим влияе на консумираната мощност на сензора. Всички периферни устройства се захранват с едно и също ниво на напрежение равно на 3.0V

2.3. Енергийно ефективен LoRaWAN протокол

Заклучава се, че сензорните възли, които измерват физическите величини в обкръжаващата ги среда (като температура, влажност, светлина и т.н.) много често изпращат едни и същи данни от своите измервания за определен период от време. Това се дължи на факта, че физичните величини се променят с много малки стойности в определени интервали от време. Това изпращане на същите измервателни стойности консумира твърде много енергия за изпращане на тези данни, което скъсява живота на батерията, а всъщност тези данни са ненужни.

Въз основа на тези заключения се предлага нов, по-енергийно ефективен протокол, имащ за цел да редуцира консумацията на енергия от сензорните възли.

2.3.1. Енергиен модел на протокола

Енергийният модел се основава на следния сценарий. Измерената стойност от сензора се обработва от микроконтролера и се изпраща от предавателя, след което се преминава в ниско енергиен режим. При следващото активиране, микроконтролерът прочита данните от сензора и ги обработва. Ако новата отчетена стойност е абсолютно еквивалентна на предишната, то предавателят не се включва и микроконтролерът отново преминава в ниско енергиен режим. В този сценарий общата енергия E_{total} на работния цикъл е:

$$E_{total} = E_{WU} + E_m + E_{proc} + E_{SLEEP}, \quad (2.33)$$

В допълнение към оптимизирането на консумираната енергия от сензорния възел, се предлага и метод за намаляване на данните, изпращани от сензора. Броят на изпратените битове е право пропорционален на консумираната енергия E_{tr} , а оттам и на E_{total} . За да се реализира намаляване на броя на изпратените битове, без да се променя значещата информация, се изпраща не новата измерена стойност, а само разликата от предишната, изразена като процентна разлика. Използвайки статистически инструменти за определяне на доверителния интервал и процентната промяна, може да се намали полезния товар и следователно общата консумация на енергия.

Изпраща се процентната разлика (Δ), която се изчислява по формула (2.34):

$$\Delta_i = [(X_i / X_{i-1}) - 1] \cdot 100, \quad (2.34)$$

Тогава уравнението за общата консумирана енергия E_{total} се представя чрез функция от Δ :

$$E_{total}(\Delta) = E_{sleep} + E_{wu} + E_m + E_{proc} + \mu \cdot (E_{wut} + E_{tr} + E_r), \quad (2.35)$$

$$\mu = \mu(\Delta) = \begin{cases} 0, & \Delta = 0; \\ 1, & \Delta \neq 0; \end{cases} \quad (2.36)$$

където $\Delta = 0$ означава, че няма разлика в последователните измерени стойности, а при $\Delta \neq 0$ означава, че е налична разлика и трябва да се осъществи изпращане на новата стойност.

2.3.2. Алгоритъмът на енергийно ефективния протокол

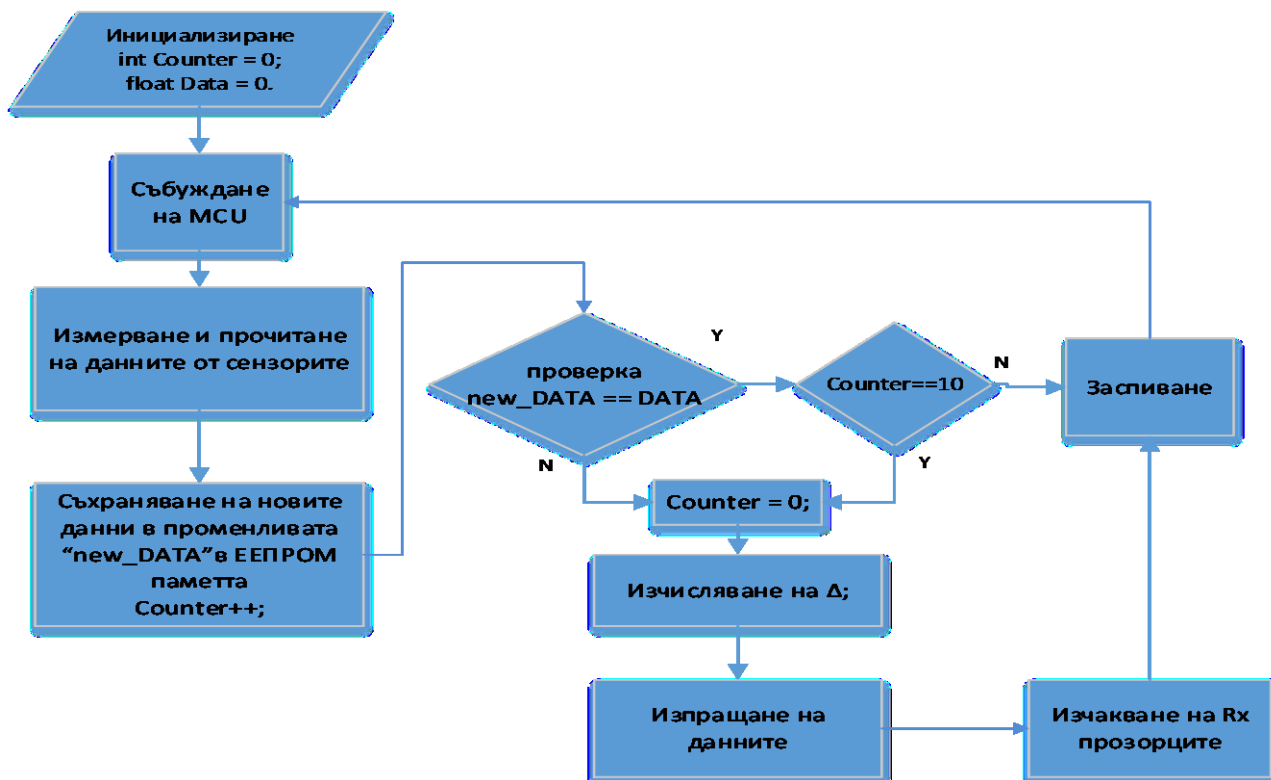
Алгоритъмът на действие на енергийно ефективния протокол е представен на фигура 2.3.1.

След инициализацията се преминава към събуждане на микроконтролера, като веднага след това се отчитат измерените стойности от сензора. Измерените данни се записват в променливата „new_data“, като същевременно се инкрементира броячът „counter“, за да се отчете първият цикъл.

Алгоритъмът продължава с проверка на това дали данните записани в променливите от сензора са еднакви. При първото изпълнение на цикъла данните не са еднакви, при което „data“ се приравнява на измерената от сензора стойност, броячът се нулира, тъй като ще се реализира изпращане на данните. Изчислява се процентното изменение, което се кодира със съответна стойност (число и буква А за положителна стойност или В за отрицателна). Данните се изпращат на приложния сървър, където се декодират. След приключване на предаването, сензорният възел изчаква двата Rx процореца за съобщения в посока надолу (DL). Изтичайки регламентираното време за съобщения, устройството се установява в ниско енергиен режим.

Когато определеното време за “сън” изтече, то микроконтролерът се събужда отново и започва изпълнението на последващия цикъл.

Ако при проверката на данните от предишното измерване и новоизмерените данни, не са открити разлики, то приемо-предавателя не се включва и не се предават никакви данни.



Фиг. 2.3.1. Алгоритъм на енергийно ефективния протокол

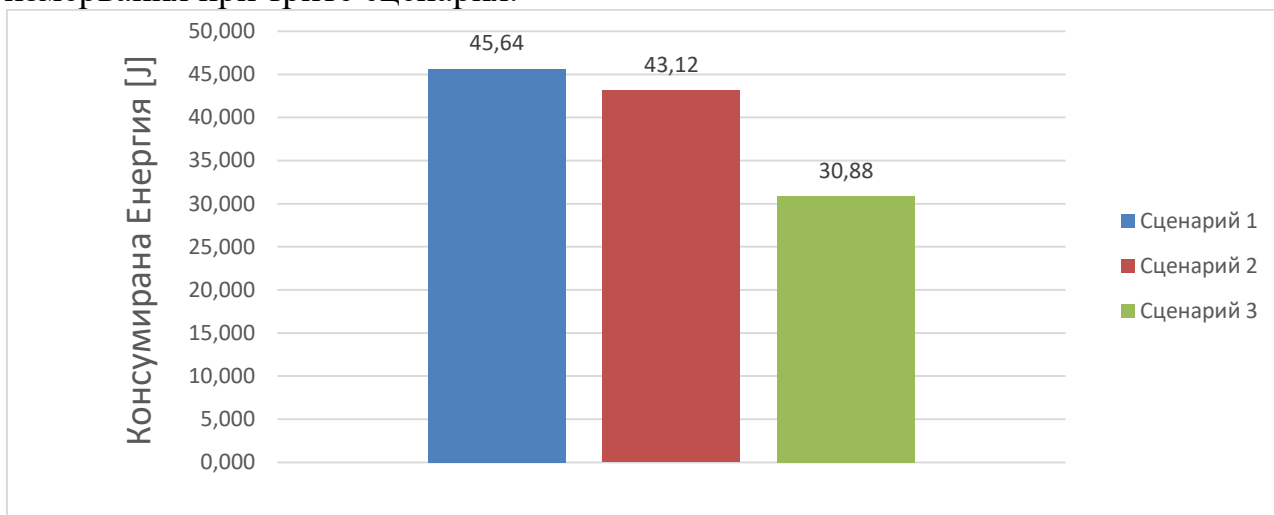
2.3.3. Експериментални резултати

За изготвяне на енергиен профил на представения алгоритъм, е проектиран и изготвен краен LoRaWAN безжичен сензорен възел, захранван от 3V батерии (2 x AA). Той е проектиран като сензорен възел от клас А. Измерени са текущата консумация и времето за изпълнение на различните енергийни състояния на сензорния възел - измерване, предаване, прослушване и заспиване на устройството. Експерименталните резултати и тестове са извършени чрез Siglent SDS 1052 DL+. Сензорният възел измерва осветеността в работна стая и изпраща данните към LoRaWAN маршрутизатора. Извършени са общо 300 измервания на осветеността в работното помещение.

Разработени са три сценария на работа на сензорния възел, за да се определи консумацията на енергия при всеки един от тях.

Първият сценарий използва конвенционалния алгоритъм на действие, без никакви оптимизации. Вторият сценарий използва метода на редуциране на битовите, изпращани от предавателя, като се изпраща само процентната разлика „Δ“. Третият сценарий използва енергийно подобрения алгоритъм, представен на фигура 2.3.1. Той използва както метода за намаляването на броя на изпратените битове, така и метода на изключване на предавателя при еднозначно измерени последователни стойности ($\Delta = 0$).

В представителната извадка от 300 измервания на осветеността се отчитат 87 измервания, при които предишните измерени стойности са същите като новоизмерените, следователно $\Delta = 0$. Диаграмата на фигура 2.3.4 обобщава резултатите от общата консумация на енергия на сензорния възел от всички 300 измервания при трите сценария.

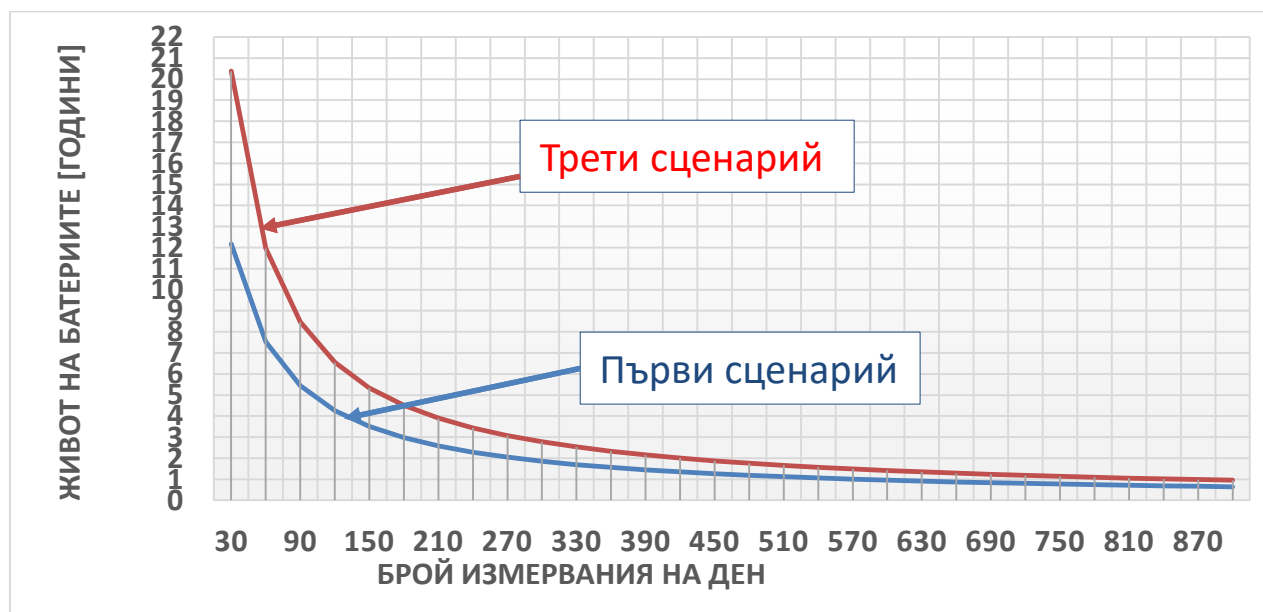


Фиг. 2.3.4. Резултати от общата консумация на енергия

Видно от диаграмата, при вторият сценарий общата консумирана енергия намалява с 5,5% за разлика от първия сценарий.

Разликата между първия и третия сценарий е значителна. Намалената консумация е 32%. Това значително намаляване на консумацията на енергия води и до значително увеличаване на живота на батерията на сензорния възел.

Животът на батерията на сензорния възел при различните сценарии на работа, както и в зависимост от честотата на измерванията, които се извършват за един ден е визуализиран на фигура 2.3.6.



Фиг. 2.3.6. Живот на батерията в зависимост от броя измервания извършвани на ден от сензорния възел при третия сценарий на действие.

2.4. Изводи

Потреблението на енергия е едно от най-ограничаващите изисквания за проектиране и реализиране на комуникационни безжични сензорни възли. Представен е оптимизиран енергиен модел на сензорни възли, използващи LoRa/LoRaWAN технологии. Този модел позволява анализ на различни режими и сценарии LoRaWAN устройства за конкретно приложение на Internet of Things, базирано на LoRaWAN клас А. Заключение се, че получаването на потвърждение за предаване, консумира енергия, която намалява живота на сензорния възел.

Разработеният модел позволява да се изследва въздействието на хардуера и избора на софтуер върху автономността на възела. Чрез цифрови резултати е показано, че консумираната енергия се променя с различни параметри на LoRa/LoRaWAN, като коефициент на разпространение, скорост на кодиране, размер на полезния товар и честотна лента. Оптимизирането на тези параметри е много важно за намаляване на консумацията на енергия на сензорния възел.

Работната честота на микроконтролера е важна за оптимизиране на живота на сензорния възел. Увеличаването на честотата на микроконтролера оказва влияние върху консумираната енергия, което намалява автономността на сензорния възел. Чрез използването на числови методи се доказва, че съществува компромис между обхвата на комуникация LoRaWAN, коефициента на разпространение и мощността на предаване.

Използвайки предложения и реализиран енергийно по-ефективен LoRaWAN алгоритъм, консумацията на енергия от сензорните възли, намалява значително. Това води до увеличаване на продължителността на живота на сензорния възел с няколко години.

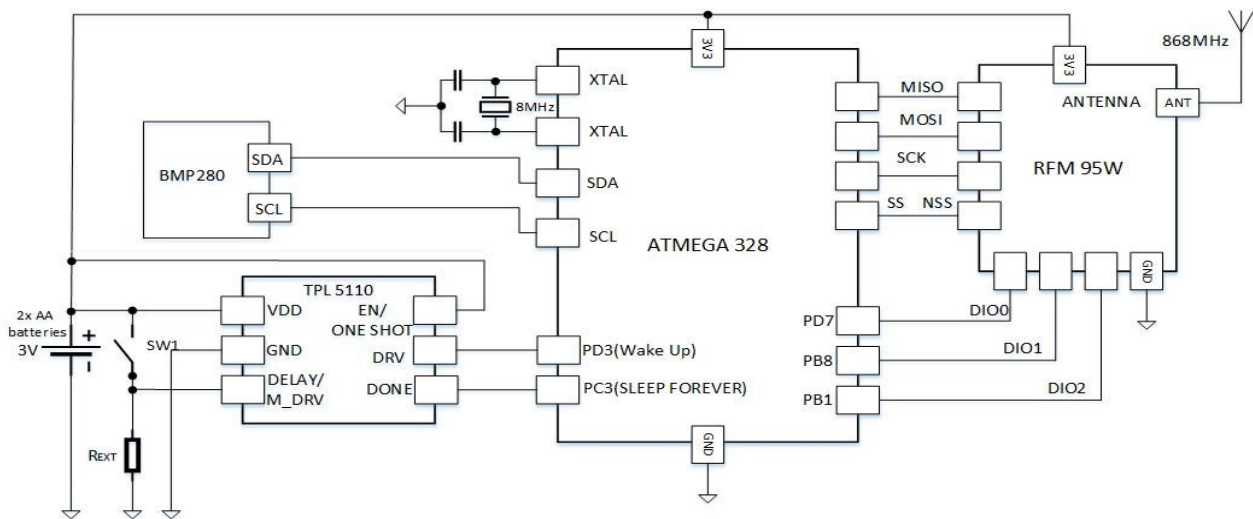
В бъдещи разработки енергийният модел може да се използва в алгоритми за управление на мощността за комуникация на сензори, захранван от източници за събиране на енергия.

Глава 3. Проектиране и изследване на безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия

В тази глава от дисертационния труд са представени проектирани и изследвани безжични сензорни възли с ниска консумация на енергия с различни решения, оптимизиращи консумацията на енергия от крайните възли.

3.2. Проектиране и изследване на безжичен сензорен възел с микроконтролер ATMEGA328, LoRaWAN трансивър и ултра ниска консумация на енергия

Архитектурата на сензорния възел е показана на фигура 3.2.4. Състои се от ATMEGA328 - 8-битов микроконтролер с ниска мощност, CMOS, базирани на AVR® подобрена RISC архитектура, RFM95W - приемо-предавател LoraWan. Приемо-предавателят LoraWan е свързан към микроконтролера чрез SPI шината и три входно-изходни извода.



Фиг. 3.2.4. Хардуерна архитектура на сензорен възел с ултра ниска консумация с LoraWan интерфейс

Консумирайки само 35 nA, TPL5110 намалява общия консумиран ток на системата по време на нискоенергийния режим на сензорния възел. Захранването от 3V на сензорния възел се осигурява от две батерии AA. Изборът на микроконтролера ATMEGA328 е направен поради възможността да се използва средата за разработка на Arduino IDE, за разработване на софтуер за сензорни възли с ниска мощност.

Нано таймерът TPL5110 се използва за събуждане на микроконтролера ATMEGA328 от режим на дълбок сън с ниска мощност чрез външно прекъсване, прикрепено към извод PD3 на микроконтролера. TPL5110 осигурява избираеми интервали от време от 100 ms до 7200s, регулируеми чрез външен резистор (R_{EXT}) между DELAY/M_DRV извода на TPL5110 и GND. Чрез ключа SW1 се осигурява възможност за принудително събуждане и изход от ниско-енергийния режим на микроконтролера ATMEGA328. Натискането на ключа SW1 води до генериране на сигнал на изводи DRV-PD3, който се задейства като външно прекъсване на микроконтролера. BMP280 е сензор за барометрично налягане. Четенето на данни се извършва чрез I2C комуникационен цифров интерфейс. Използването му в архитектурата на сензорния възел е продиктувано от ултра ниската му консумирана мощност.

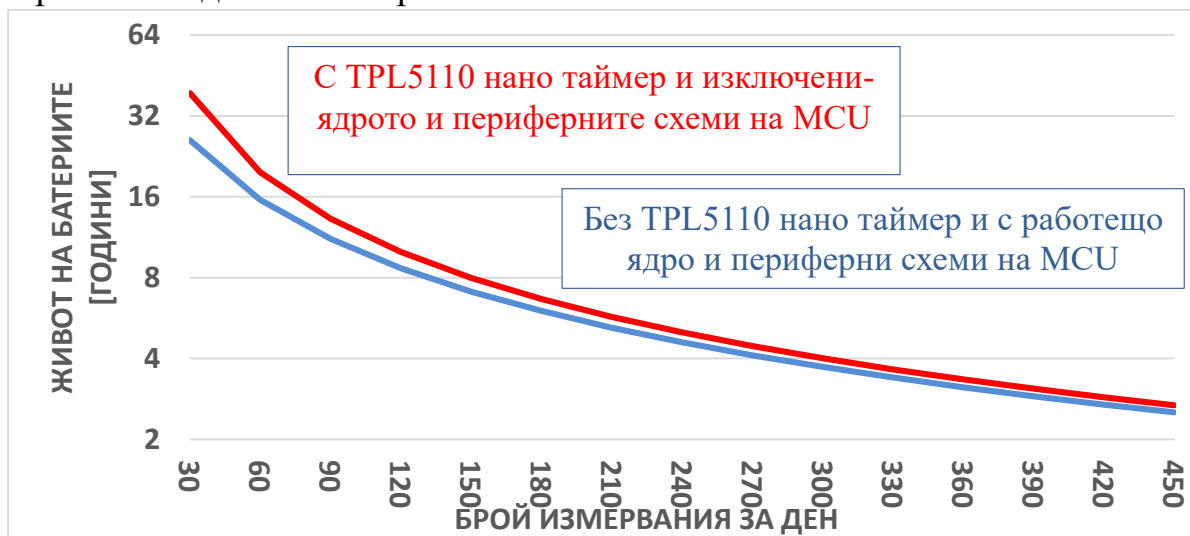
3.2.3. Експериментални резултати

Проведени са измервания на общия консумиран ток I_c на два сензорни възела в реален работен режим. Сензорните възли са разположен на разстояние от 800 м от LoraWan шлюза, който се намира на покрива на Пловдивски Университет „Паисий Хилендарски” в гр. Пловдив, България. Няма пряка видимост между сензорните възли и LoraWan шлюза. Разчита се само на отразени сигнали. Шлюзът е изграден с RAK831 Lora, базиран на концентраторна платка Semtech SX1301. Той е оборудван с 5dBi, 868MHz външна антена. Данните от него се препращат към сървърите за приложения на The Things Network, използвайки протокола Semtech UDP, където комуникацията в посока нагоре и комуникацията от тип връзки надолу се обменят във псевдо-JSON формат.

И двата сензорни възела са програмирани да изпълняват идентични задачи. Основната разлика между тях е наличието на външен нано таймер TPL5110 при

единият сензорен възел, който има за цел да събужда микроконтролера ATMEGA328. Сензорният възел, който не е оборудван с външен таймер, разчита основно на интегрирания таймер WDT.

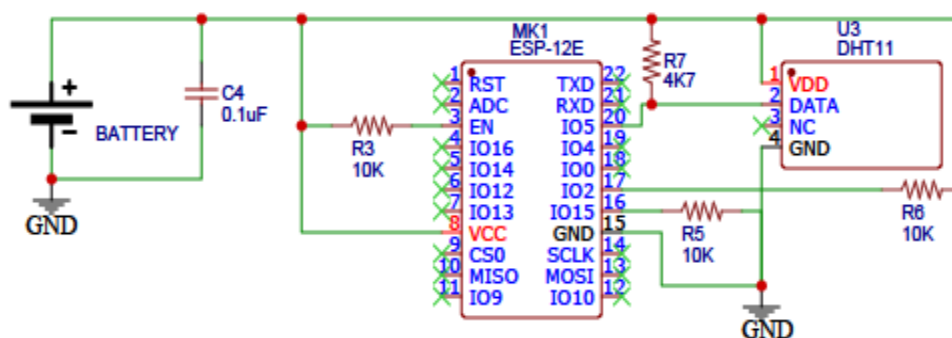
Въз основа на получените резултати от измерванията на двата възела са построени диаграмите, показани на следващите фигури. Те изразяват зависимостта на живота на батериите в години от броя на провежданите измервания на ден от сензорните възли.



Фиг. 3.2.12. Живот на батериите на двата сензорни възела в зависимост от броя измервания за ден

3.3. Проектиране и изследване на WI-FI сензорен възел с ниска консумация на енергия

На фигура 3.3.3 е показана принципната схема на реализирания Wi-Fi сензорен възел. Проектираният и реализиран безжичен WI-FI сензорен възел за измерване на температура и относителна влажност, използващ MQTT и Node-Red технологии за предаване и визуализация на измерваните данни, се реализира чрез „ESP EASY“ фърмуер, разработен специално за микроконтролери ESP 8266, който фърмуер оптимизира консумацията на енергия на безжичния сензорен възел.



Фиг.3.3.3. Принципна схема на сензорен възел с Wi-Fi интерфейс

3.3.4. Експериментални резултати получени от изследването на WI-FI сензорен възел с ниска консумация на енергия

За оценка на проектирания WI-FI сензорен възел с ниска консумация на енергия, са проведени измервания на общия консумиран ток (I_c) на два сензорни възела в реални работни режими. Единият сензорен възел е с имплементиран фърмуер ESP Easy, а другия е със стоковия фърмуер на NodeMCU.

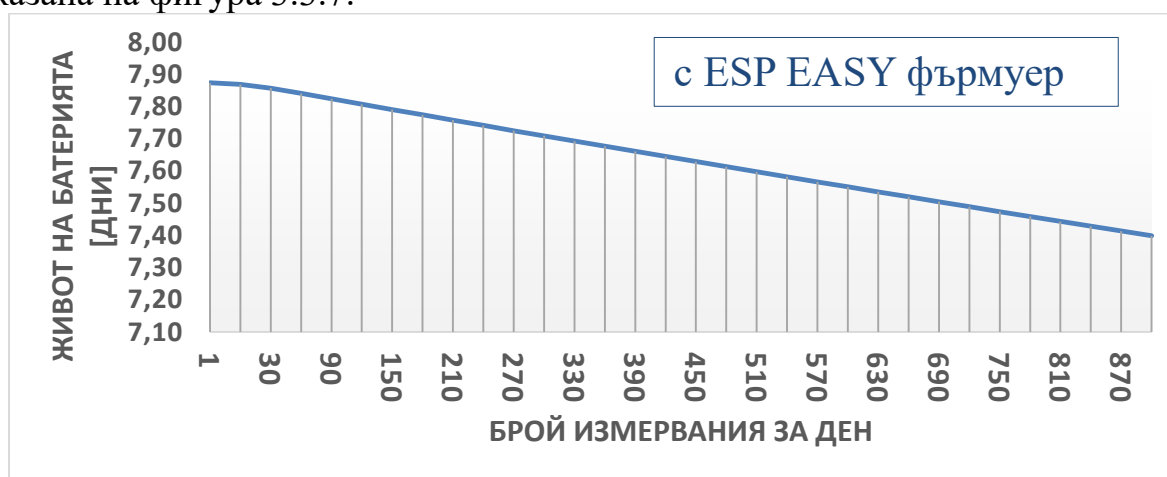
Измерването е осъществено чрез осцилоскоп Siglent SDS 1052 DL+ и чрез измерване на пада на напрежение върху еталонен шунт резистор със стойност 1Ω и с клас на точност 0,01%.

В таблица 3.3.1 са представени сравнението на резултатите от измерванията, направени за два сензорни възела на общия консумиран ток в различните енергийни състояния на възлите.

Таблица 3.3.1. Резултати от измерванията, направени за два сензорни възела

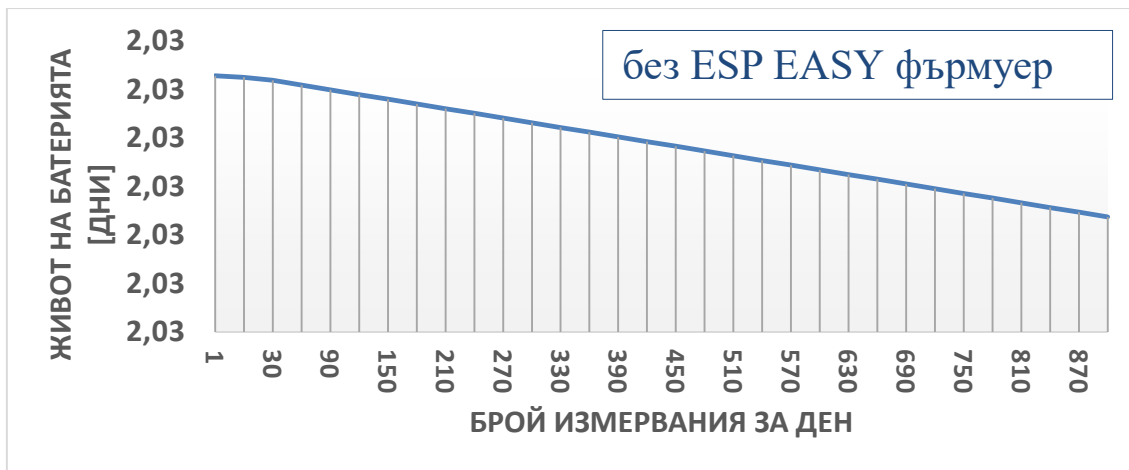
ESP 8266 сензорен възел с режим „дълбок сън“ и ESP Easy фърмуер		ESP 8266 сензорен възел, без режим на „дълбок сън“ и без ESP Easy фърмуер	
Консумация на ток I_c		Консумация на ток I_c	
Състояние на „дълбок сън“	18.6 mA	Активен режим без „дълбок сън“	72 mA
Измерване на данни и подготовка за изпращане	24.8 mA	Измерване на данни и подготовка за изпращане	28.5 mA
Изпращане на данните	177.6 mA	Изпращане на данните	198.8 mA

Въз основа на представените резултати и извършените изчисления относно консумираната енергия от първия сензорен възел е построена зависимостта на живота на батерията в дни от броя на измерванията, проведени за един ден, показана на фигура 3.3.7.



Фиг. 3.3.7. Живот на батерията в дни в зависимост от броя на измерванията за един ден за първия сензорен възел

Въз основа на представените резултати и извършените изчисления относно консумираната енергия от втория сензорен възел е построена зависимостта на живота на батерията в дни от броя на измерванията, проведени за един ден, показана на фигура 3.3.8.



Фиг. 3.3.8. Живот на батерията в дни в зависимост от броя на измерванията за един ден за втория сензорен възел

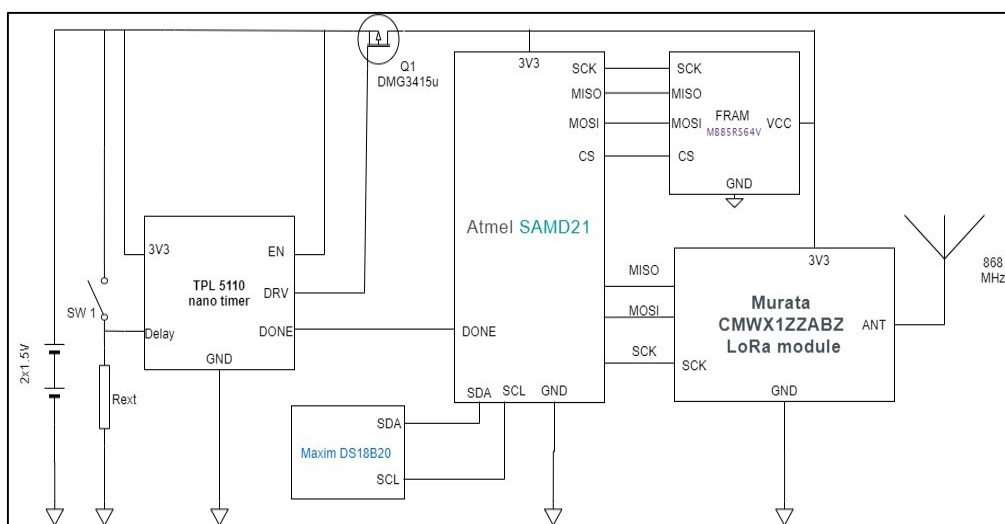
3.4. Проектиране и изследване на сензорен възел с ултра ниска консумация на енергия, с FRAM и нано таймер

3.4.2. Хардуерна архитектура на LoRaWAN сензорен възел с ултра ниска консумация на енергия, с FRAM памет и нано таймер

Представена е хардуерна реализация на краен сензорен възел с LoraWan интерфейс с ултра ниска консумация на енергия.

Крайният сензорен възел се захранва от батерии (2xAA 1,5V батерии), като се използва нано таймер за намаляване на общата консумацията на енергия от сензорния възел. Представеният безжичен сензорен възел, използва FRAM памет, която е предназначена за съхранение на NwkSKey и AppSKey, необходими на възела за предаване на данни от сензора към мрежата LoRaWAN.

Архитектурата на сензорния възел е показана на фигура 3.4.1.



Фиг. 3.4.1. Хардуерна архитектура на сензорен възел с ATMEL SAM D21 и LoraWan интерфейс

Състои се от микроконтролер ATMEL SAM D21 с ниска мощност, използващ 32-битовия процесор. Изборът на микроконтролера ATMEL SAM D21 е направен поради факта, че микроконтролерът разполага с два SPI комуникационни интерфейса, които са необходими за осъществяване на комуникация с LoRaWAN

Murata модема и с FRAM паметта. В допълнение към избора е и възможността да се използва средата за разработка Arduino IDE за разработване на софтуер за сензорни възли, както и за поддържаните режими на работа с ниска мощност.

Безжичната комуникация се осъществява от приемо-предавателя Murata CMWX1ZZABZ LoraWAN, който е свързан към микроконтролера чрез SPI интерфейса.

Важен компонент от архитектурата е FRAM паметта - MB85RS64V. Тъй като устройството е напълно изключено по време на заспиване, FRAM паметта се използва, за да съхранява LoRaWAN ключовете за сесия и броячите на кадрите.

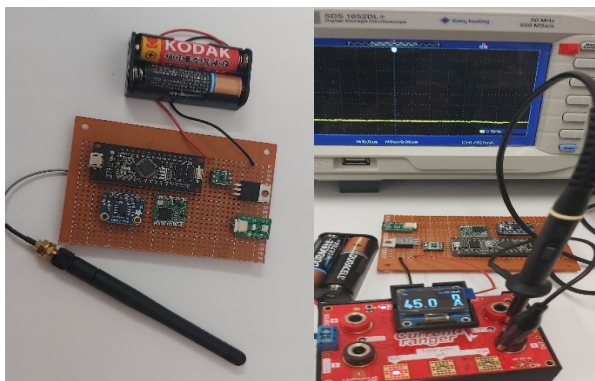
FRAM паметта е енерго независима памет и е в състояние да запазва данни, без да използва резервна батерия, за разлика както е необходимо за DRAM. Цифровият термометър DS18B20 се свързва директно към микроконтролера ATMEL SAM D21. TPL5110 нано таймерът е таймер с ниска мощност с вграден MOSFET драйвер. Консумирайки само 35 nA, TPL5110 може да активира захранващата линия и драстично да намали общия ток в готовност на системата по време на заспиване. Такива икономии на енергия позволяват използването на значително по-малки батерии за безжични сензорни приложения.

Захранването от 3V напрежение на сензорния възел се осигурява от две AA 1,5V батерии.

3.4.4. Експериментални резултати получени от изследването на сензорния възел

Сензорният възел е разположен на разстояние 100 м от шлюза LoraWan, който е позициониран на покрива на ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“ в гр. Пловдив. Осигурена е пряка видимост между сензорния възел и шлюза, който е реализиран с RAK831 Lora, базиран на концентратора Semtech SX1301. Шлюзът е оборудван с 5dBi, 868MHz външна антена.

Сензорният възел с ултра ниска консумация и с интерфейс LoraWan използва автентификация по въздух (OTAA) със сървърите The Things Network само за първия път при включване на сензорния възел или ако няма запазени данни във фероелектрическата памет с произволен достъп. След процедурата по присъединяване, NwkSKey и AppSKey се записват във FRAM паметта за бъдещо и последващо присъединяване към TTN сървърите като се използва AVR активиране. На следващата фигура е представен реализираният безжичен сензорен възел.



Фиг.3.4.6. Реализиран безжичен сензорен възел

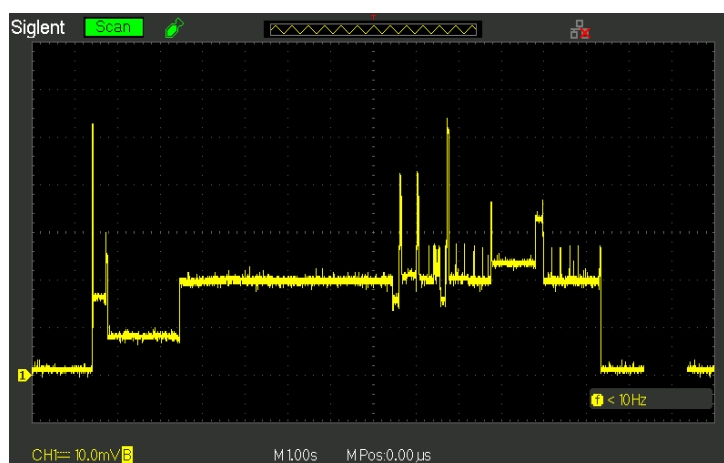
Резултатите от проведените измервания на общия консумиран ток от сензорния възел са обобщени в таблица 3.4.1.

Таблица 3.4.1. Резултати от измерванията на проектирания възел

LoRaWAN сензорен възел с микроконтролер ATMEL SAM D21 и FRAM		
Модулация: LORA, "SF9BW125", CR: "4/5", "rssi": -107dB, "snr": 11dB		
Състояние на сензорния възел	Времетраене	Ic
Таймериран TPL5110, изключен микроконтролер	5 min	45 nA
Измерване и обработка на прочетените от температурния сензор данни	4.3 sec	20.4 mA
Изпращане на данни	2 sec	25.6mA
Изчакване за съобщения в посока надолу, подготовка за режим заспиване	1.2 sec	20 mA

На фигура 3.4.7 е представена осцилограма от проведените експериментални измервания на консумацията на ток I_c , от сензорния възел в реален работен режим и с параметри Lora модулация "SF7BW125".

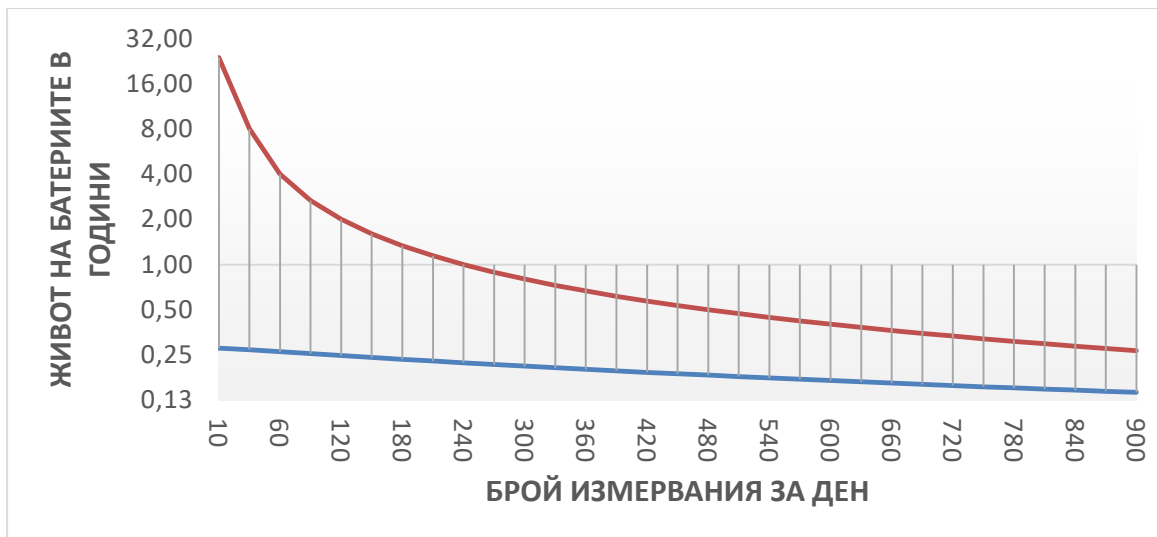
Продължителността на предаването е 2s с обща консумация на ток 25mA, с коефициент на разпространение 7, честотна лента 125KHz и скорост на кодиране 4/5.



Фиг. 3.4.7. Осцилограма на потреблението на ток I_c от LoRaWan възела в работен режим, при модулация Lora и "SF7BW125"

С цел да се онагледят и демонстрира ниската консумация на енергия от проектирания сензорен възел, се изследва и втори сензорен възел, който не използва нано таймер TPL5110 и FRAM памет за съхранение на активиционните ключове.

За онагледяване и анализиране на получените резултати за двата сензорни възела е построена графичната зависимост, представена на фигура 3.4.11. Тя дава основание да бъде направен следния извод: при сензорния възел използващ TPL5110 нано таймер и FRAM памет, с цел съхранение на данни, животът на батерията се увеличава драстично при честота на превежданите измервания от сензорния възел на ден от 1 до 120 измервания.



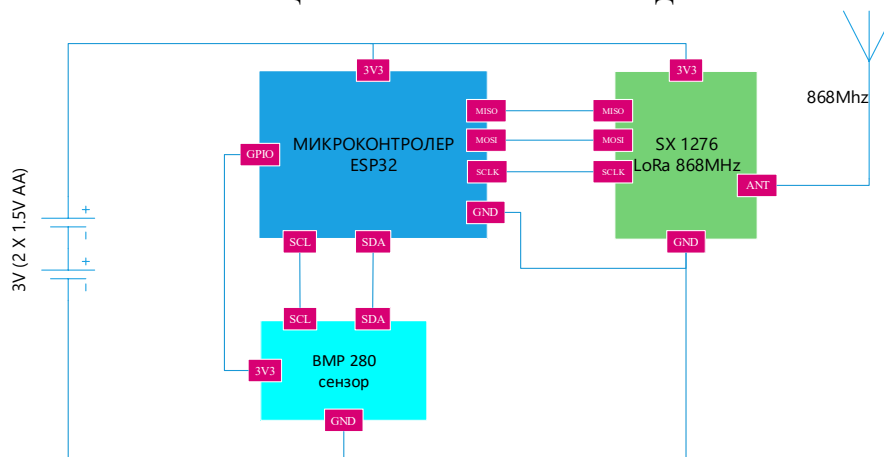
Фиг. 3.4.11. Сравнение на живота на батерията в дни в зависимост от броя на измерванията за един ден за двата сензорни възела

3.5. Проектиране и оптимизиране на консумацията на енергия на безжичен сензорен възел с LoraWan трансивър и ESP32

В тази част от дисертационния труд се представя метод за оптимизиране на консумацията на енергия на сензорен възел с LoraWAN интерфейс и с микроконтролер ESP32. Използването на Ultra-Low-Power (ULP) копроцесора, включен в структурата на микроконтролера ESP32, за извършване на измервания, вместо 32-битовия микропроцесор LX6 Xtensa®, се намалява консумацията на енергия от микроконтролера.

3.5.2. Хардуерна архитектура на безжичния сензорен възел

Проектираният LoRaWAN сензорен възел е от клас А. На фиг. 3.5.1. е представена хардуерната архитектура на проектирания сензорен възел с микроконтролер ESP32. Структурата на крайния сензорен възел е реализирана чрез използването на микроконтролер Espressif ESP32. Следващият компонент е BMP280. Друг компонент от хардуерната архитектура е приемо-предавателят SEMTECH SX1276, който се свързва към микроконтролера ESP32 чрез комуникационния интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface). SEMTECH SX1276 е приемо-предавател с ниска мощност и голям обсег на действие.

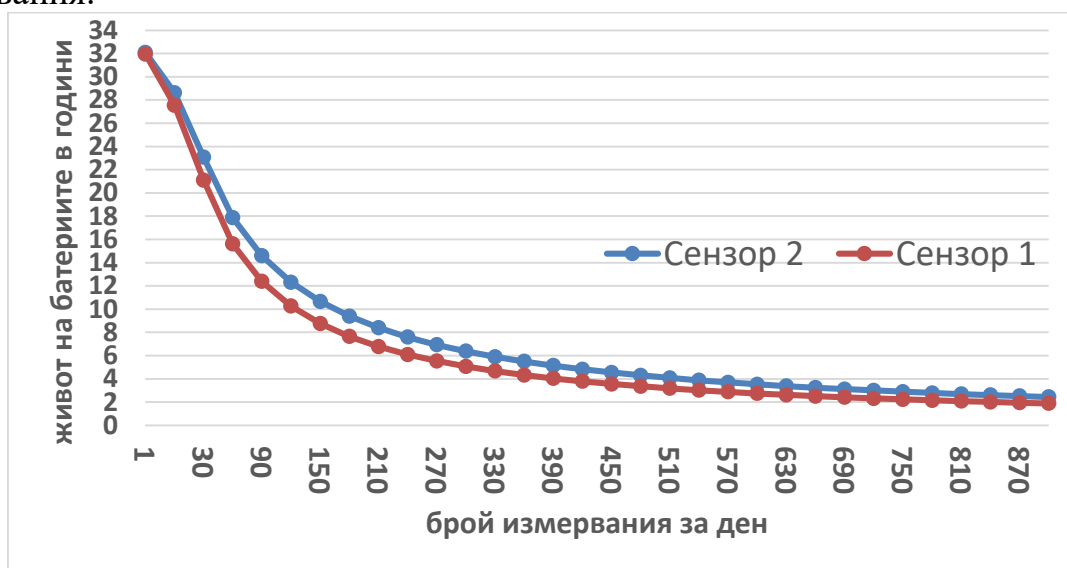


Фиг. 3.5.1. Хардуерна архитектура на безжичен сензорен възел с ESP32

3.5.4. Експериментални резултати

Реализирани са два идентични прототипа на безжични сензорни възли, използващи микроконтролера Espressif ESP32, предназначен за събиране и изпращане на данни от сензор за температура и барометрично налягане BMP280. Събраните данни се изпращат чрез трансивър LoRaWAN SX1276 до шлюза LoRaWAN. Шлюзът е изграден от RAK831 Lora, базиран на концентратора Semtech SX1301.

За онагледяване и анализиране на получените резултати за двата сензорни възела е построена графичната зависимост, представена на фигура 3.5.14. Тя дава основание да бъде направен следния извод: при сензорния възел използващ ULP копроцесора за четене на данните, енергийната консумация е с 22,9% по-малка от тази при сензорния възел, използващ 32-битовия микропроцесор LX6 Xtensa. Чувствителна е разликата при честота на измерванията на ден от 60 до 360 измервания.



Фиг. 3.5.14. Сравнение на живота на батериите в дни в зависимост от броя на измерванията за един ден за двата сензорни възела

3.6. Изводи

За всеки от представените безжични сензорни възли са извършени експериментални изследвания на конвенционалните им реализации и на оптимизираните им апаратни и програмни решения, с цел постигане на ниска консумация на енергия и удължаване живота на хранящите им батерии.

За обективна оценка на представените безжични сензорни възли се отчита енергийната им консумация и продължителността на живот на батерийното им храняване.

За проектираният LoRaWAN безжичен сензорен възел с микроконтролер ATMEGA328, резултатите от изследванията показват чувствителна разликата при малкия брой измервания на ден от сензорните възли. Предложеният сензорен възел, който използва нано таймера TPL 5110 може да достигне теоретичен живот на батериите до 128 години, докато при конвенционалния сензорен възел без нано таймер се достига живот на батериите до 64 години.

За Wi-Fi безжичния сензорен възел с микроконтролер ESP8266 с имплементирания фърмуер „ESP Easy“, резултатите от изследванията показват, че животът на батерията се увеличава с 300%, в сравнение с конвенционалния сензорен възел. Реализираният сензорен възел с фърмуер ESP Easy, със своите енергийни предимства измества приложението на конвенционалните сензорни възли.

За LoRaWAN безжичния сензорен възел с микроконтролер ATMEL SAMD21, с FRAM памет и TPL5110 нано таймер, резултатите от изследванията показват, че животът на батерията се увеличава драстично при честота на превежданите измервания от сензорния възел на ден от 1 до 120 измервания.

За LoRaWAN безжичен сензорен възел с микроконтролер ESP32, резултатите от изследванията показват, че при сензорния възел използващ ULP копроцесора за четене на данните, енергийната консумация е с 22,9% по-малка от тази при сензорния възел, използващ 32-битовия микропроцесор LX6 Xtensa. Чувствителна е разликата при честота на измерванията на ден от 60 до 360 измервания.

ГЛАВА 4. ОПТИМИЗИРАНЕ НА БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ ВЪЗЛИ С НИСКА КОНСУМАЦИЯ НА ЕНЕРГИЯ ЧРЕЗ ХАРВЕСТИРНИ СИСТЕМИ

В тази глава се представят подходи и методи за реализиране на безбатерийни безжични LoRaWAN сензорни възли с ниска консумация на енергия. Реализацията на безбатерийни безжични сензорни възли се основава на използването на харвестърни системи за събиране на енергия от околната среда и съхранението на тази енергия в суперкондензатори, които да заменят традиционните батерийни захранвания на крайните безжични сензорни възли.

Измерването и оптимизирането на текущото потребление и времето за изпълнение на различни задачи на IoT приложения е от решаващо значение за правилната работа на устройствата без батерии.

Основното предимство на реализираните в тази глава от дисертационния труд безжични сензорни възли е изключително ниска стойност на консумацията на енергия, която позволява използването на суперкондензатор и енергия за събиране на слънчева енергия за захранване на микроконтролера и сензорите. За захранване на безжичния сензорен възел е използвана интегрална схема за генериране и събиране на нано енергия LTC3588, соларен панел и суперкондензатор.

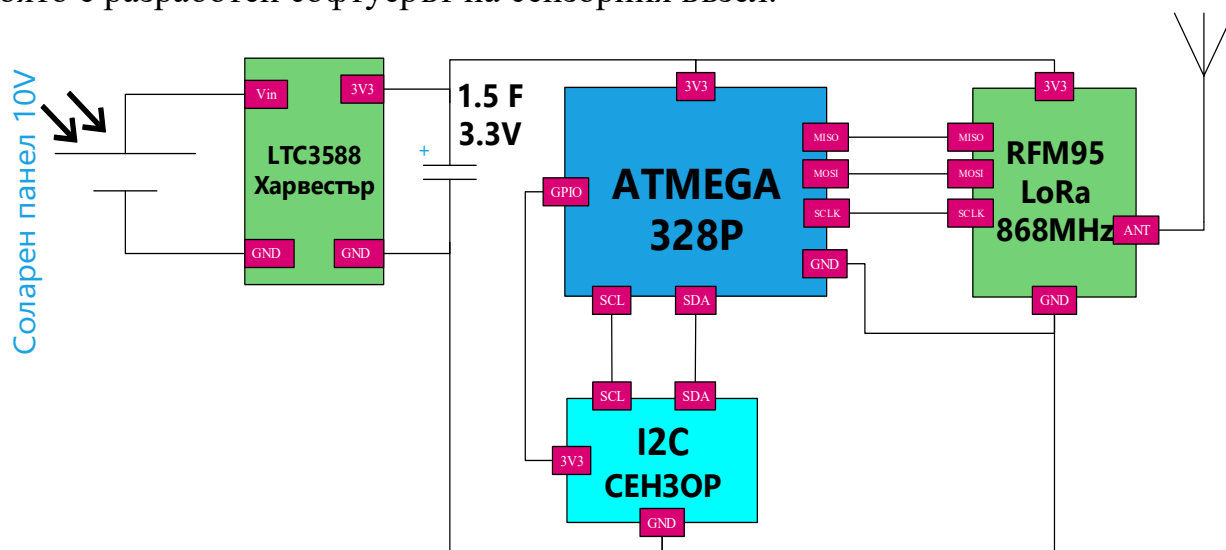
Създаден е модел на сензорен възел без батерии в средата на MATLAB/SIMULINK. Проведени са симулационни изследвания предлагащи оптимални подходи за избор на суперкондензатор за осигуряване на автономна работа на устройството.

4.1 Симулация и оптимизация на енергиен модел на LORAWAN сензорни възли без батерии

4.1.2. Архитектура на безжичен сензорен възел без батерия

За реализацията на енергиен профил на сензорен възел без батерии, е проектиран краен безжичен сензорен възел с LoRaWAN интерфейс, захранван от система за събиране на слънчева енергия. Архитектурата на сензорния възел е показана на фигура 4.1.2. Състои се от ATMEGA328P - микроконтролер с ниска

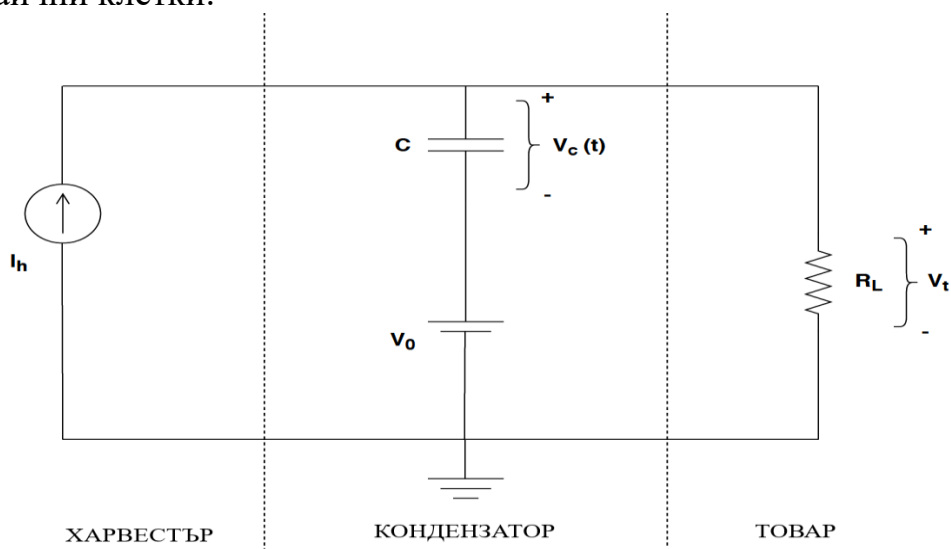
мощност и HOPE RFM95W - LoRaWAN трансивър. Събраната енергия се съхранява в суперкондензатор 3.6V, 1.5F; свързан към изхода на харвестъра. Използва се 10V слънчев панел за източник на енергия, свързан директно към харвестъра LTC3588. Изборът на микроконтролера ATMEGA328 е направен поради възможността да се използва средата за разработка на Arduino IDE, чрез която е разработен софтуерът на сензорния възел.



Фиг. 4.1.2. Архитектура на LoRaWAN сензорен възел без батерии

4.1.3. Теоретичен модел за устройство без батерии LoRaWAN

На фигура 4.1.3 е показан еквивалентен електрически модел на безбатериен краен възел, който разглежда трите основни части от сензорния възел: харвестър (източник на енергия), кондензатор (съхранение на енергия) и консуматора на енергия (т.е. MCU, радио и сензори). Отбелязва се, че използването на източник на ток е по-реалистично за популярните харвестъри за събиране на енергия, като фотоволтаични клетки.



Фиг.4.1.3. Еквивалентен електрически модел на безбатериен краен възел за IoT

Всички активни компоненти като сензори, радио или MCU консумират енергия от кондензатора. Всяко състояние на устройството, което комбинира специфични състояния на отделните компоненти на устройството, има

специфична консумация на ток и се моделира като съпротивление на натоварване R_L (в Ω). Съпротивлението на натоварването се моделира като функция $p(I_s)$ [Ω] и се изчислява чрез:

$$p(I_s) = \frac{V_{ref}}{I_s} \quad (4.1)$$

където:

I_s - е консумацията на ток за специфична комбинация от състояния на компонентите на устройството (напр. изключен сензор, активен MCU и радиопредавател);

V_{ref} - е еталонното напрежение, при което се получава I_s .

Функцията $v_t(V_0, t, I_s)$ връща като изходен резултат минималната стойност между напрежението на кондензатора (V_t) след t секунди, започвайки от напрежение V_0 , докато устройството консумира ток I_s и максимално допустимото работно напрежение E .

$$v_t(V_0, t, I_s) = \min(I_h \cdot p(I_s) \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{p(I_s)C}\right)}\right) + (V_0) \left(e^{\left(\frac{-t}{p(I_s)C}\right)}\right), E) \quad (4.2)$$

където I_h е токът, произведен от харвестъра в амperi, а C е капацитетът във фаради. Тази формула се използва, за да се определи дали устройството е в състояние успешно да изпълни конкретна задача, като провери дали V_i остава над минималното работно напрежение V_{min} . Ако напрежението на кондензатора падне под V_{min} , устройството не може да остане включено и ще се изключи, докато не събере достатъчно енергия, за да се включи отново.

Функцията $v_0(V_t, t, I_s)$ изчислява стартовото напрежение на кондензатора (V_0), като се има предвид крайното напрежение V_t , времето на транспирация t , а общата консумация на ток на устройството е I_s :

$$v_0(V_t, t, I_s) = \frac{V_t - I_h p(I_s) \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{p(I_s)C}\right)}\right)}{e^{\left(\frac{-t}{p(I_s)C}\right)}} \quad (4.3)$$

Времето, необходимо за получаване на ниво на напрежение V_t , започващо от първоначално напрежение V_0 и обща консумация на ток I_s , се моделира като функция $\tau(V_0, V_t, I_s)$ и може да бъде получено от уравнение (4.3), като се реши за време вместо напрежение, както следва:

$$\tau(V_0, V_t, I_s) = -p(I_s)C \ln\left(\frac{V_t - I_h \cdot p(I_s)}{V_0 - I_h \cdot p(I_s)}\right) \quad (4.4)$$

4.1.4. Подход за планиране задачите

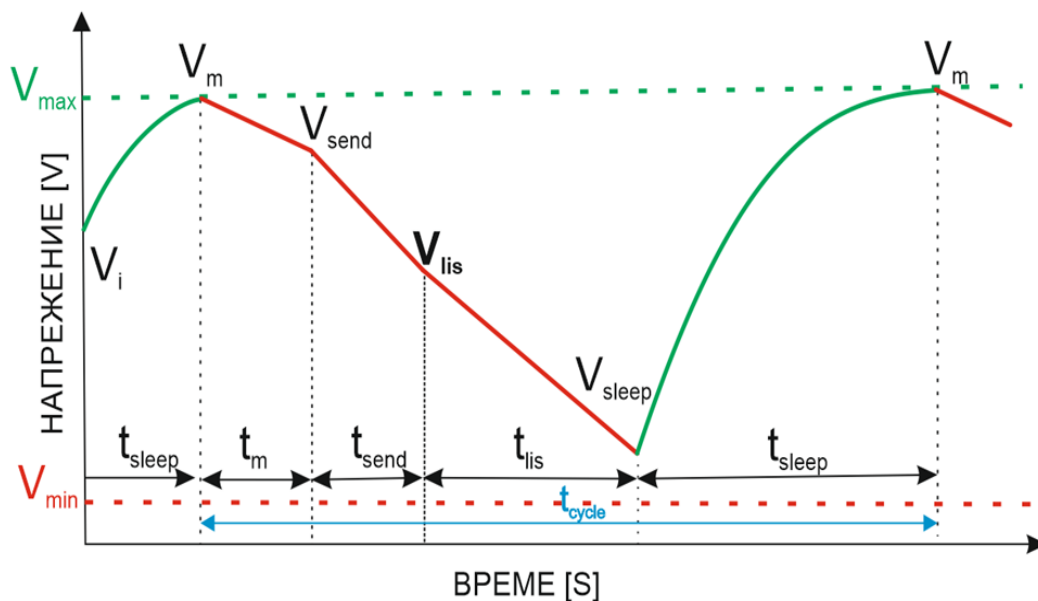
За ефективното използване на IoT устройства без батерии, приложенията, работещи на тях, трябва да могат да се справят правилно с прекъсванията си. За тази цел се представя подход за интелигентно планиране на задачите за приложения на IoT сензор без батерия, използващи LoRaWAN, въз основа на наличната и събрана енергия на устройството. Основният проблем на устройствата без батерии е тяхното периодично поведение и въз основа на това как да се планират задачите, за да се избегнат прекъсвания на захранването.

Използван е следния сценарий на действие от безбатерийния сензорен възел.

Микроконтролерът излиза от режим на дълбок сън, когато достигне напрежението на кондензатора V_m , необходимо за стартиране на измерването от сензора фигура 4.1.4. Той обработва данните и ги подготвя за изпращане чрез приемо-предавателя LoRaWan. Напрежението на кондензатора намалява до V_{send} . Предавателят LoRaWan се включва и изпраща данните към шлюза LoRaWAN и изчаква двата прозореца за съобщенията Rx в посока надолу. При напрежение V_{sleep} сензорът е настроен на нискоенергиен режим на дълбок сън (период, през който кондензаторът се зарежда).

В описания сценарий за действие се задават следните ограничения: максимално работно напрежение е 3.6V; минимално работно напрежение V_{min} е 2.8V. Това са оптималните гранични напрежения на кондензатора, между които сензорният възел функционира нормално.

За експериментите са дефинирани и анализирани два различни подхода за определяне на напреженията и изчисляване на стойността на кондензатора, необходима за осигуряване на нормална и непрекъсната работа на сензорния възел.



Фиг. 4.1.4. Диаграма на напреженията на кондензатора на сензорния възел без батерии

4.1.4.1. Подход 1

При този подход първо се определя времето, необходимо за пълно зареждане на кондензатора, t_{sleep} , използвайки уравнение (4.4), при начално напрежение V_{min} :

$$t_{sleep} = \tau (V_{min}, V_{max}, I_{sleep}), \quad (4.5)$$

където: V_{min} е минимално допустимото напрежение (2.8V), V_{max} е максималното работно напрежение (3.6V), а I_{sleep} е консумираният ток по време на нискоенергийния режим на дълбок сън.

След като кондензаторът е зареден до 3.6 V, то напрежението $V_m = 3.6V$. Когато се установи V_m , тогава V_{send} може да се изчисли, като се използва формула (4.2):

$$V_{send} = vt (V_m, t_m, I_m), \quad (4.6)$$

където: t_m е продължителността на времето за измерване, I_m е консумираният по време на измерването ток. Напрежението V_{lis} може да се изчисли по формулата (4.2):

$$V_{lis} = vt (V_{send}, t_{send}, I_{send}), \quad (4.7)$$

където: t_{send} е времето за изпращане на пакета, а I_{send} е консумираният ток по време на изпращането. V_{sleep} може да се изчисли с помощта на (4.2):

$$V_{sleep} = vt (V_{lis}, t_{lis}, I_{lis}), \quad (4.8)$$

където: t_{lis} е времето за изчакване на прозорците Rx и подготовката за сън, а I_{lis} е консумираният ток в този интервал.

Проблемът с оптимизацията при този подход е да се намери и изчисли кондензаторът, който може да бъде напълно зареден и може да запазва възела на сензора по време на задачите на сензора, а напрежението V_{sleep} да бъде по-голямо от 2.8V (V_{min}).

4.1.4.2. Подход 2

Ако се приеме, че минималното работно напрежение, при което сензорният възел е в работен режим, а именно 2,8 V, то тогава напрежението V_{sleep} може да се изчисли, като се приравни към минималния V_{min} и се добави аванс от 0,1V, за да се гарантира нормалното преминаване на сензорния възел от активен режим в нискоенергиен режим на дълбок сън, през който кондензаторът се зарежда. Знаейки V_{sleep} , може да се изчисли V_{lis} , като се използва:

$$V_{lis} = v0 (V_{sleep}, t_{lis}, I_{lis}), \quad (4.9)$$

където: t_{lis} е времето за изчакване на прозорците Rx и подготовка за сън, а I_{lis} е консумираният ток в този интервал. V_{send} се изчислява по формулата (4.3):

$$V_{send} = v0 (V_{lis}, t_{send}, I_{send}), \quad (4.10)$$

където: t_{send} е времето за изпращане на пакета, а I_{send} е консумираният ток по време на изпращането. V_m се изчислява:

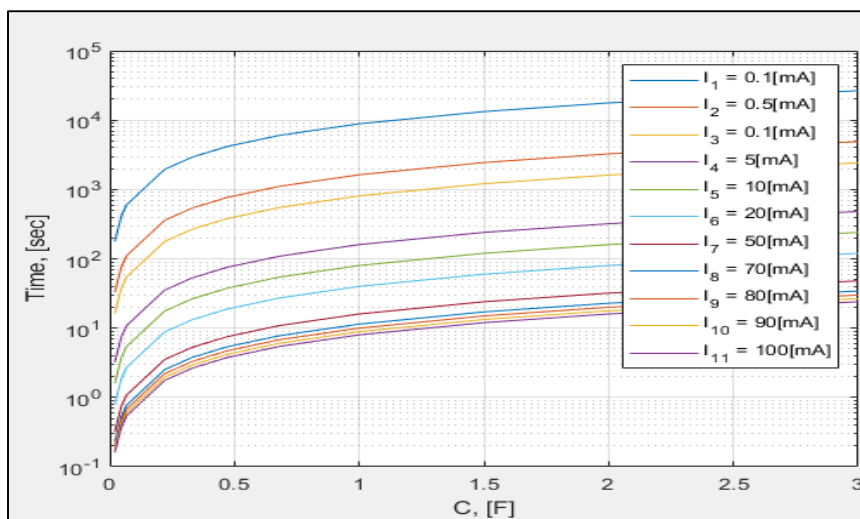
$$V_m = v0 (V_{send}, t_m, I_m), \quad (4.11)$$

където: t_m е продължителността на времето за измерване, а I_m е консумираният по време на измерването ток.

Проблемът с оптимизацията при този подход е да се намери и изчисли кондензаторът, който може да бъде напълно зареден и може да запазва сензорния възел по време на задачите на сензора, а напрежението V_m да е под или равно на 3.6V (V_{max}).

За определяне на необходимото време за зареждане на кондензатора са симулирани резултати за 11 стойности на кондензатори и различни стойности на харвестърния ток I_h .

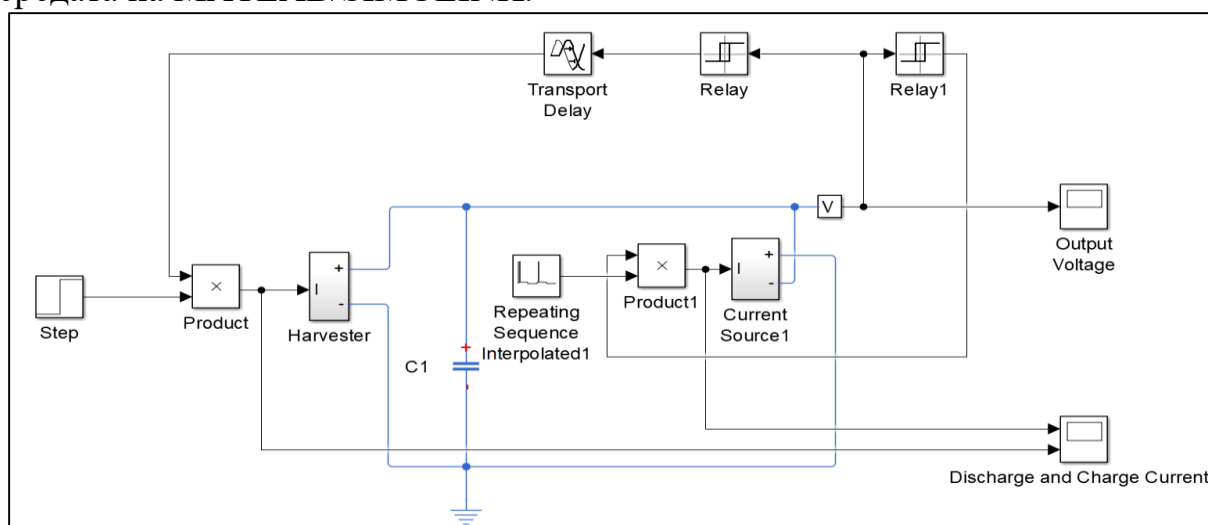
На база на получените резултати е построена диаграмата на фигура 4.1.5, показваща минималните времена, необходими за зареждане на кондензатори с различни стойности, в зависимост от тока на харвестъра I_h . Тези минимални времена са предпоставка за определяне на минималното време, в което сензорния възел трябва да е в нискоенергиен режим.



Фиг. 4.1.5. Времена на зареждане на кондензатори в зависимост от харвестърния ток

4.1.5. MATLAB SIMULINK модел на безбатериен сензорен възел

На фигура 4.1.6 е представен модел на безбатериен сензорен възел, разработен в средата на MATLAB/SIMULINK.



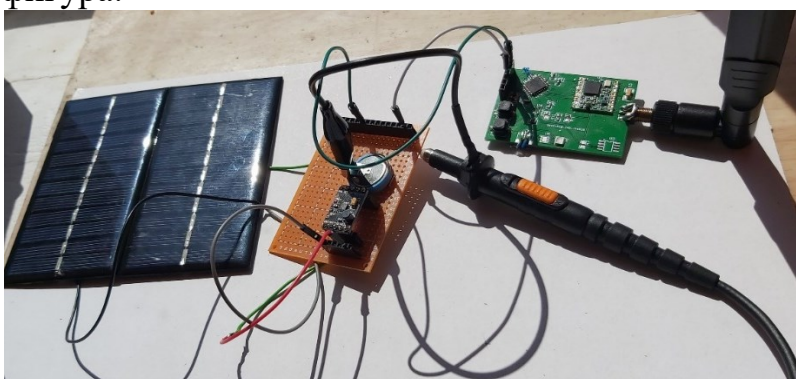
Фиг. 4.1.6. Модел на безбатериен сензорен възел в MATLAB

Моделът представя трите основни компонента на теоретичната еквивалентна електрическа верига на сензорен възел без батерии. Харвестърът е моделиран с източник на ток (Харвестър на фигура 4.1.3.) и може да се зададе и симулира количеството ток, генериран от харвестъра. Вторият функционален компонент е кондензаторът (C1 на фигура 4.1.3), който се използва за съхранение на енергия. Моделът позволява да се променят параметрите му, като капацитет и първоначално зареждане. Третата част е консуматорът (микроконтролер, радиопредавател, сензори и др.), който е представен като източник на ток (Товар на фигура 4.1.3), който също може да бъде симулиран чрез задаване на изчислените стойности за тока, консумиран от сензорния възел. Ключов момент в този модел е, че този източник е свързан в обратна посока към източника на ток на харвестъра и действа като товар с променливи токови стойности, точно както е в реалния случай.

Използвайки модела, можем да симулираме работата на сензорния възел без батерии, като променим генерирания от харвестъра ток, като по този начин се определят входните параметри от околната среда, капацитета на кондензатора и консумацията на ток от товара при различни коефициенти на разпространение и скорости на кодиране, време за спане и др.

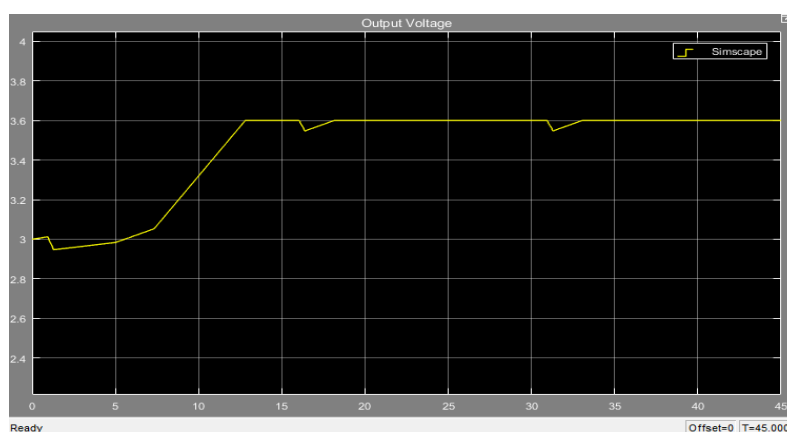
4.1.6. Експериментални резултати

За експерименталните изследвания, са измерени текущото потребление и времето за изпълнение на различните енергийни състояния на сензорния възел - измерване, предаване, слушане и заспиване на устройството. Експериментите и тестовите са извършени с помощта на Siglent SDS 1052 DL+. Експерименталните изследвания са проведени с реализирания безбатериен сензорен възел, показан на следващата фигура.



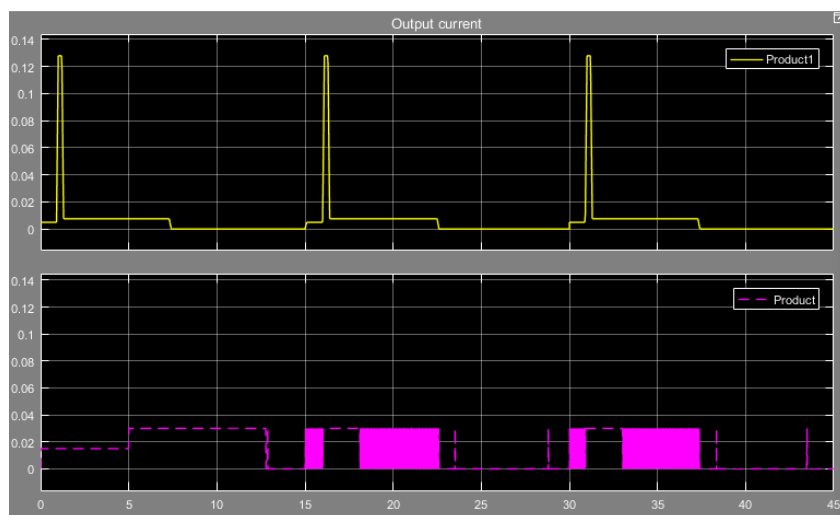
Фиг. 4.1.7. Реализиран безбатериен сензорен възел

Използвайки средата на MATLAB е моделирана работата на сензорния възел. На фигура 4.1.9 са представени резултатите от симулацията при зададен капацитет от 1,5F и първоначално напрежение от 3V.



Фиг. 4.1.9. Напрежение на кондензатора по време на работния процес, стартиран при 3V

На фигура 4.1.10 са показани графиката на тока, консумиран от сензорния възел, като стойностите се измерват от действително работещия сензорен блок, описан в предишните раздели, както и стойността на тока на харвестъра, който варира от 0,02 до 0,03A.



Фиг. 4.1.10. Графики на консумирания ток от сензорния възел и генерирания ток от харвестъра

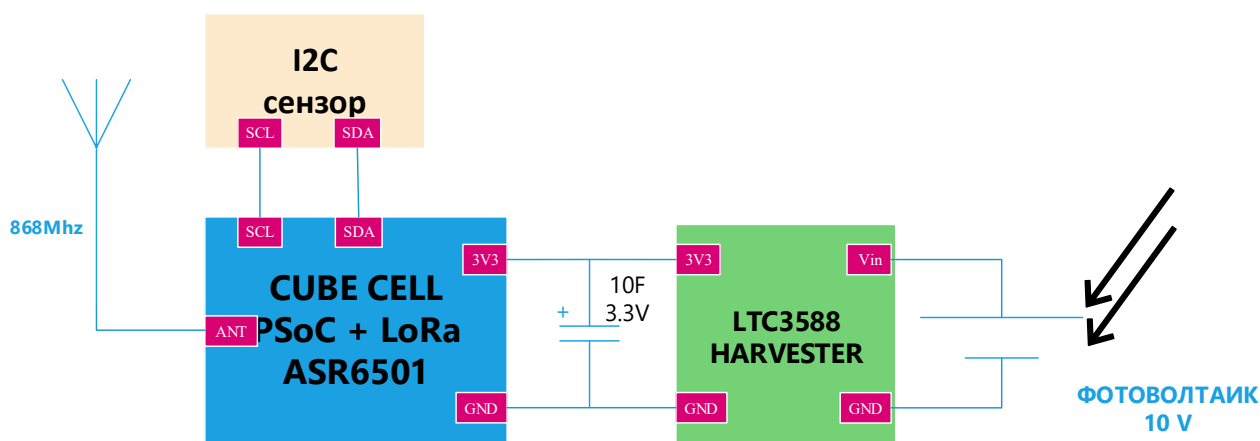
При генериран от харвестъра ток със стойност 0,03А, кондензатор с капацитет 1,5F захранва сензорния възел и в рамките на един цикъл на нискоенергиен режим на сензорния възел, харвестърът дозарежда кондензатора до стойността 3,6V. Това обстоятелство е изключително благоприятно за реализацията на напълно автономен сензорен възел без батерии.

4.2. Безбатериен безжичен LoRaWAN краен сензорен възел за IoT приложения

4.2.2. Архитектура на loRAWAN сензорен възел без батерии

В тази точка се описва дизайна и хардуерното изпълнение на безбатериен LoRaWAN безжичен сензорен възел с ниска консумация на ток и използване на суперкондензатор. Проектиран е сензорен възел от клас А, който работи в честотна лента от 868MHz. Той се захранва от 10V слънчев панел. Сензорният възел с ултра ниска консумация с интерфейс LoRaWAN използва въздушна автентификация (OTAA) със сървърите The Things Network, където след процедурата за присъединяване NwkSKey и AppSKey се генерират динамично и се обменят с крайния възел „по въздуха“. Това гарантира, че ключовете не могат да бъдат компрометирани преди активирането.

Архитектурата на сензорния възел е показана на фигура 4.2.1.



Фиг. 4.2.1. Архитектура на безбатериен LoRaWAN сензорен възел

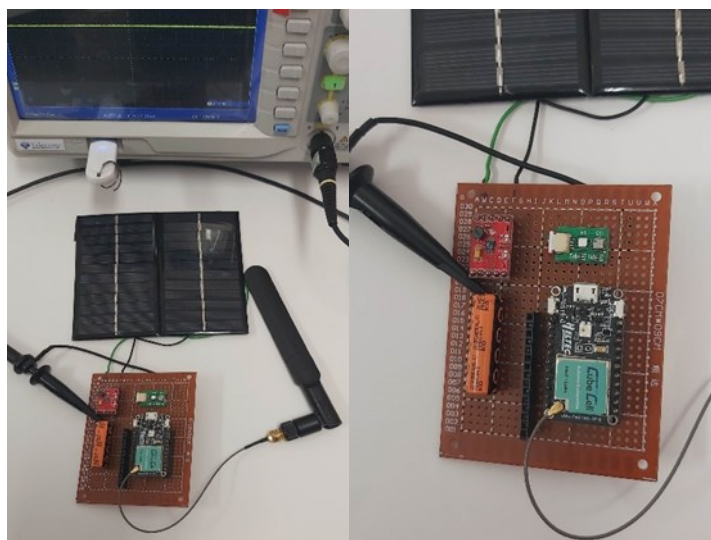
Модулът за безжична комуникация LoRa, проектиран от ASR6501, осигурява свръх голям обхват и свръхниска мощност. Изборът на микроконтролера ASR6051 се основава на факта, че може да се използва Arduino IDE за разработване на софтуер за реализирането на LoRaWAN крайни сензорни възли.

4.2.3. Входни параметри на изследването

Сензорният блок е разположен на разстояние от 100 метра от шлюза LoRaWAN. Шлюзът е изграден с платката RAK831. Антената на външния шлюз има параметри: 5dBi, 868MHz. Данните от шлюза се препращат към сървърите за приложения на TTN и след това изпратените данни от сензора са интегрирани в облачната услуга Cayenne LPP myDevices. Безжичният сензорен възел използва въздушно удостоверяване (OTAA) с TTN сървърите само при първото включване на сензорния възел. След процедурата за присъединяване NwkSKey и AppSKey се запазват и за бъдещо присъединяване към TTN сървърите използва ABP активиране.

4.2.4. Експериментални резултати

Експерименталните изследвания на безжичния сензорен възел са проведени с реализираното устройство показано на следващата фигура.

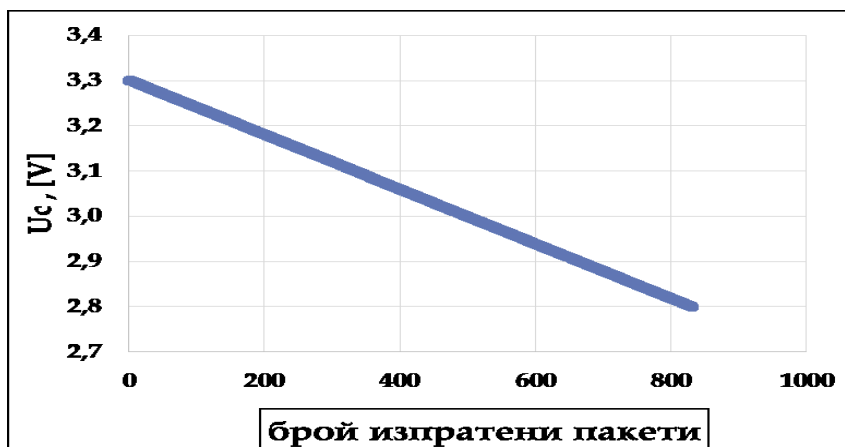


Фиг. 4.2.4. Реализиран безжичен сензорен възел

Измерени са броя на пакетите, които сензорния възел би могъл да изпрати с напълно зареден суперкондензатор, без наличието на слънчевия панел, както и при напрежение на кондензатора от 3,3V до 2,8V.

Продължителността на интервала от време, при което сензорният възел е в ултра нисък енергиен режим е 15s. Параметрите на радио връзката са модулация: LORA, SF:7, BW:125, CR: 4/5, RSSI: -32.00dBm, SNR: 8.00dB.

Резултатите от проведеното изследване са представени на фигура 4.2.6.

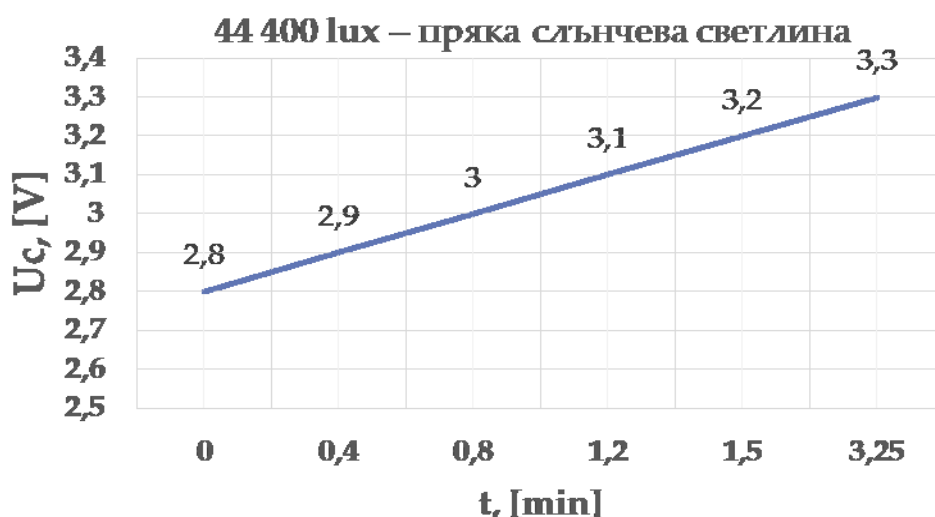


Фиг. 4.2.6. Диаграма на броя изпратените пакети, в зависимост от напрежението на кондензатора

Както е показано на диаграмата, сензорният възел реализира и успешно изпраща 830 пакета с данни към шлюза, използвайки само енергията съхранена в суперкондензатора.

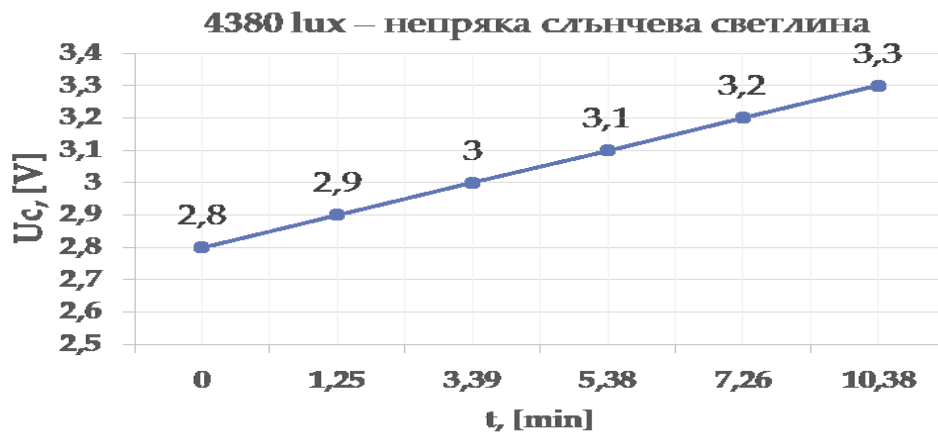
За да се осигури дългосрочната и автономна работа на безбатерийния сензорен възел, времето за зареждане на суперкондензатора от слънчевия панел е измерено при три различни стойности на осветеността – при пряка слънчева светлина (44400 lux), при непряка слънчева светлина (4380 lux) и при облачно време (1000 lux).

На фигура 4.2.7 са показани времевите интервали за зареждане на суперкондензатора при наличие на пряка слънчева светлина върху соларния панел, в работен режим на сензорния възел и при 15 секунден интервал в нискоенергиен режим на сензорния възел. Резултатът от изследването показва, че харвестърната система успява да зареди кондензатора от 2.8V до 3.3V за 3.25 минути.



Фиг. 4.2.7 Диаграма на зареждане на суперкондензатора при директна слънчева светлина

При непряка слънчева светлина, харвестърната система успява да зареди суперкондензатора от 2,8 до 3,3V за времето от 10,38 минути (фигура 4.2.8).



Фиг. 4.2.8. Диаграма на зареждане на суперкондензатора при непряка слънчева светлина

В облачно време със значително намалена осветеност на слънчевия панел, харвестърната система успява да зареди суперкондензатора от 2,8 до 3,3V за времето от 25,13 минути (фигура 4.2.9).



Фиг. 4.2.9. Диаграма на зареждане на суперкондензатора при облачно време

4.3. Изводи

В настоящата глава е разработен математически модел, който има приложимост за определяне на стойностите на капацитетите на кондензаторите в зависимост от големината на харвестърния ток. Предложени са подходи за математическо изчисляване на стойностите на кондензаторите, които са полезни при оптимизиране на времевия интервал на нискоенергийното състояние на сензорния възел.

Представен е симулационен модел на безбатериен сензорен възел, разработен в средата на MATLAB, с цел симулационно изследване на зависимостта на капацитета на кондензатора от големината на генерирания от харвестъра ток. Представени са таблично резултатите от симулационните изследвания и са визуализирани графично.

Разработени са и са изследвани два безбатерийни безжични LoRaWAN крайни сензорни възли за IoT приложения. Представени са таблично резултатите от проведените експериментални изследвания, които са графично визуализирани и анализирани.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведеното литературно проучване са дефинирани следните проблеми:

- Необходимост от разработване на нови методи и технологични решения, водещи до намаляване на консумираната енергия от крайните възли.
- Основен проблем е ограниченото захранване на възлите, което създава предпоставка за прекъсване или отпадане на безжичната мрежата, поради липса на захранване на възлите.
- Основното изискване към безжичните сензорни възли е тяхната автономност, която може да бъде изпълнена чрез намаляване на консумацията на енергия на крайните възли.
- Захранването с батерии се използва като източник на енергия за крайните сензорни възли, което противоречи на изискването за тяхната автономност.

Във втора глава от дисертационния труд е представен оптимизиран енергиен модел на сензорни възли, използващи LoRa/LoRaWAN технологии. Този модел позволява анализ на различни режими и сценарии за конкретни приложения в Internet of Things, базирани на LoRaWAN клас А крайни устройства. Извършена е оценка на енергийната консумация на безжичен LoRaWAN сензорен възел, чрез различни сценарии на действие.

Разработеният модел позволява да се изследва въздействието на хардуера и избора на софтуер върху автономността на възела. Чрез цифрови резултати е показано, че консумираната енергия се променя при различни параметри на LoRa/LoRaWAN, като коефициент на разпространение, скорост на кодиране, размер на полезния товар, честотна лента и работната честота на микроконтролера. Оптимизирането на тези параметри е важно за намаляване на консумацията на енергия на сензорния възел.

Използвайки предложения енергийно ефективен LoRaWAN протокол, консумацията на енергия от сензорните възли, намалява значително. Това води до увеличаване на продължителността на живота на сензорния възел с няколко години.

В бъдещи разработки енергийният модел може да се използва в алгоритми за управление на мощността за комуникация на сензори, захранвани от харвестърни системи за събиране на енергия от околната среда.

В трета глава от дисертационния труд са представени проектираните, реализираните и изследваните - LoRaWAN безжичен сензорен възел с микроконтролер ATMEGA328, Wi-Fi безжичен сензорен възел с микроконтролер ESP8266, LoRaWAN безжичен сензорен възел с микроконтролер ATMEL SAMD21, с FRAM памет и TPL5110 нано таймер, LoRaWAN безжичен сензорен възел с микроконтролер ESP32. За всеки от представените безжични сензорни възли са извършени експериментални изследвания на конвенционалните им реализации и на оптимизираните им апаратни и програмни решения, с цел постигане на ниска консумация на енергия и удължаване живота на захранващите им батерии. За обективна оценка на представените безжични сензорни възли се отчита енергийната им консумация и продължителността на живот на батерийното им захранване.

В глава четвърта е разработен математически модел, който има приложимост за определяне на стойностите на капацитетите на кондензаторите в зависимост от големината на харвестърния ток. Предложени са подходи за математическо изчисляване на стойностите на кондензаторите, които са полезни при оптимизиране на времевия интервал на нискоенергийното състояние на сензорния възел.

Представен е симулационен модел на безбатериен сензорен възел, разработен в средата на MATLAB, с цел симулационно изследване на зависимостта на капацитета на кондензатора от големината на генерирания от харвестъра ток. Представени са таблично резултатите от симулационните изследвания и са визуализирани графично.

Разработени са и са изследвани два безбатериен безжични LoRaWAN крайни сензорни възли за IoT приложения. Представени са таблично резултатите от проведените експериментални изследвания, които са графично визуализирани и анализирани.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научноприложни приноси:

1. Предложен е разработен и реализиран енергийно ефективен LoRaWAN протокол, чрез който консумираната енергия се редуцира с до 35% в сравнение с конвенционалния протокол.
2. Разработен е математически модел на енергийния жизнен цикъл на безбатериен безжичен сензорен възел. Предложени са подходи за математическо изчисляване на стойностите на кондензаторите, които са полезни при оптимизиране на времевия интервал на нискоенергийното състояние на сензорния възел.
3. Създаден е симулационен модел на безбатериен сензорен възел в средата на MATLAB.
4. Предложени са иновативни схемни решения за намляване на консумацията на енергия на LoraWan безжични сензорни възли в нискоенергиен режим - „дълбок сън” чрез използване на нано таймер и FRAM памет за запис на параметрите на LoraWan връзката по време на изключване на захранването на микроконтролера и радио-трансивъра.

Приложни приноси:

1. Определени са и са доказани параметрите, влияещи върху консумираната енергия от безжичните LoRaWAN сензорни възли.
2. Проектиран, разработен и изследван е сензорен възел с LoRaWAN интерфейс и с микроконтролер ATMEGA328 с ниска консумация на енергия.
3. Проектиран, разработен и изследван е клас А LoRaWAN сензорен възел с микроконтролер ATMEL SAM D21, TPL5110 нано таймер и FRAM памет, характеризиращ се с ултра ниска консумация на енергия.
4. Проектиран, разработен и изследван е Wi-Fi сензорен възел с микроконтролер ESP 8266MOD с ниска консумация на енергия.
5. Проектиран, разработен и изследван е LoraWAN безжичен сензорен възел с микроконтролер ESP32 с ултра ниска консумация на енергия.
6. Разработени са и са изследвани два безбатерийни безжични LoRaWAN крайни сензорни възли за IoT приложения.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. D. Tokmakov, S. Asenov and S. Dimitrov, "Research and development of ultra-low power LoraWan sensor node," 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878674.
2. S. M. Asenov and D. M. Tokmakov, "Development of Ultra-Low Power Sensor Node Using FRAM and Nano Timer," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305121.
3. S. M. Asenov and D. M. Tokmakov, "Power Optimization of LoRaWAN Wireless End Sensor Node," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET50336.2020.9238204.
4. S. Asenov and D. Tokmakov, "Battery Free Wireless LoRaWAN End Sensor Node for IoT Applications," 2020 28th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, 2020, pp. 121-124, doi: 10.1109/TELECOM50385.2020.9299539.
5. S. Asenov and D. Tokmakov, " Power Profile Simulation And Optimization of Battery-Less LoRaWAN Sensor Node," 2021 XII National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, (под печат)
6. S. M. Asenov and D. M. Tokmakov, "Enhancing Energy Efficiency of LoRaWAN Protocol," 2021 XII National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, (под печат)
7. Asenov S., Tokmakov D., (2020). RESEARCH AND OPTIMIZATION OF LOW POWER WIFI SENSOR NODE. НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА СЪЮЗА НА УЧЕНИТЕ В БЪЛГАРИЯ - ПЛОВДИВ СЕРИЯ В. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ, Т. XVIII, pp. 67-70, ISSN 1311-9419 (Print), ISSN 2534-9384 (Online)
8. Asenov S., (2021)., REVIEW OF LOW POWER WIRELESS SENSOR NODES. НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА СЪЮЗА НА УЧЕНИТЕ В БЪЛГАРИЯ - ПЛОВДИВ СЕРИЯ В. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ, Т. XIX, pp. 20-23, ISSN 1311 - 9419 (Print), ISSN 2534 - 9384 (Online).