



ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“



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

физ. инж. Светослав Генчев Хаджигенчев

СИСТЕМА ЗА ТЕЛЕМЕТРИЯ НА ГЕОЕЛЕКТРИЧНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ В СЕИЗМОГЕННИ ЗОНИ

АВТОРЕФЕРАТ

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

Област на висше образование: 5.Технически науки

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. Слави Ясенов Любомиров

Пловдив, 2023 г.

Дисертационният труд е с обем 166 страници, включително 86 фигури, 5 таблици, оформени в увод, 4 глави, общи изводи, научно-приложни и приложни приноси, списък с използваните термини и съкращения, списък с публикациите на автора. Списъкът на цитираната литература включва 105 източника.

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 катедрен съвет на катедра „Електроника, комуникации и информационни технологии“ при Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“ на 15.12.2023 г., протокол № 58/15.12.2023г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 06.03.2024 г. от 11:00 часа в зала “БИЛ 15”, ул. „Костаки Пеев“ 21, на Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“ на заседание на научно жури.

Материалите по защитата на докторанта са на разположение на интересувалите се в канцеларията на Физико-технологичния факултет при Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“, ул. Костаки Пеев 21, ет. 4, каб. 1.

Научно жури: проф. д-р инж. Димитър Михайлов Токмаков
 доц. д-р инж. Даниела Антонова Шехова
 проф. д-р инж. Недялко Тодоров Катранджиев
 доц. д-р инж. Борислав Христов Миленков
 доц. д-р Веселин Геров Начев

Автор: *физ. инж. Светослав Генчев Хаджигенчев*

Заглавие: **СИСТЕМА ЗА ТЕЛЕМЕТРИЯ НА ГЕОЕЛЕКТРИЧНО
СЪПРОТИВЛЕНИЕ В СЕИЗМОГЕННИ ЗОНИ**

Тираж: 30 бр.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Темата на настоящия дисертационен труд е свързана с изследванията в областта на прогнозиране на земетресения и по-конкретно с мониторинга на един от утвърдилите се прогностични ефекти - промяната на електрическото съпротивление на земната кора в процеса на подготовка на земетресенията.

Физическите процеси, протичащи във фокална област преди и по време на земетресение, се проявяват в различни физични явления, които могат да бъдат наблюдавани и измерени на земната повърхност. Те включват промени в скоростите на сеизмичните вълни, земното магнитно поле, земното електрическо съпротивление и електротелуричните потенциали, нивото на подземните води, концентрацията на радон в хидротермалните кладенци и т.н.

В някои страни, през годините, особено внимание е отделяно на теренните регистрации на тези явления във връзка с подготовката на земетресенията. Едновременно с това, при възможност, са извършвани лабораторни измервания и са изградени теоретични модели на наблюдаваните явления. Общата цел на тези изследвания е да бъде изградена последователна теория (модел) за процеса на подготовка и реализация на земетресенията, която би могла да обясни наблюдаваните явления и да представлява основа за прогнозирането им.

За съжаление тази цел още не е постигната.

Една от причините е недостатъчният обем данни - липса или рядко разположени станции за мониторинг, не покриващи основните разломни структури. Освен това, в съответствие със закона на Гутенберг - Рихтер, по-силните земетресения ($M > 5$), от които се интересуваме се случват по-рядко, т.е. необходими са дългогодишни наблюдения с надеждна апаратура в сеизмогенните зони.

От гледна точка на новия модел на тектонските плочи, територията на България принадлежи към южните части на Евразийската плоча. Геодинамиката на региона се определя основно от субдукцията на Африканската плоча в зоната на Егейската арка и колизията на Арабската плоча с Евразийската. В сеизмологичен аспект тя е част от Алпо-Хималайския сеизмичен пояс и е подложена на въздействието както на местни, така и на земетресения в съседните държави. Само през първите 30 години на ХХ-ти век в България са се реализирали четири земетресения с магнитуд $M \geq 7$.

Въпреки това, работата по наблюдение и анализ на аномалиите на геофизичните полета, предхождащи земетресенията остава на заден план. Липсват системни изследвания в тази насока. Няма изградени зони за наблюдение на предвестници - полигони. Отчитайки актуалността и значимостта на проблема, пораждащ необходимост от търсене на нови методи и подходи за извършване на задълбочени полеви изследвания с натрупване и обработка на данни, вниманието ни се насочи към използването на съвременни средства за реализация на система за телеметрия на геоелектрическо съпротивление в сеизмогенни зони.

Усъвършенстването на инструменталните мрежи, свързани със съвременни комуникационни мрежи, са необходими условия за успешното развитие на измерванията за сеизмична защита и прогнозиране на земетресенията.

Цел на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се разработи система за телеметрия на геоелектрично съпротивление и други предвестници на земетресения в сеизмогенни зони.

Задачи за постигане на целта:

1. Да се **проучат резултатите** от изследванията на промените на геоелектричното съпротивление и съществуващите методи и средства за измерването му, извършвани с цел установяване на връзката им със земетресенията.

2. Да се избере подходящ метод и да се **проектира апаратура** за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление. Симулационно да се изследва работата на основните блокове с интегрирани среди за проектиране и анализ. Да се разработи метод за калибровка и проверка на апаратурата. Да се изследва влиянието на шумовете върху резултатите от измерванията.

3. Да се извърши **хардуерна реализация** на апаратура за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление. Да се разработи управляващ измерванията софтуер и монтира апаратурата в полеви условия.

4. Да се реализира **система за предаване, обработка и визуализация на данни** от геоелектрични и други измервания. Да се разработи програма за първоначална обработка на получените данни.

Използвани методи и средства на изследване:

Изследвани и систематизирани са съществуващите методи, техники и средства в областта на регистрирането на измененията на геоелектрическо съпротивление във връзка с подготовката на земетресения. Анализирани са възможните източници на шум и начините за редуцирането им.

Внедряване и практическа приложимост

Проектирана, реализирана и монтирана е апаратура за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление. Показани са получените данни от регистрацията на геоелектрическото съпротивление и метеорологичните параметри за осем месечен период. Софтуерно е осъществена възможност за регистрация, предаване, обработка, съхранение и визуализация на получаваните данни в облачна платформа.

Публикации по темата

Самостоятелни: 3 броя в СУБ - Пловдив, 1 брой в СУБ - Смолян.

В съавторство с научния ръководител: 1 брой на Национална научна конференция с международно участие - Смолян.

Обем и структура на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 166 страници, включващи 86 фигури и 5 таблици, оформени в увод, 4 глави, общи изводи, научно-приложни приноси, списък с използваните термини и съкращения, списък с публикациите на автора и списък с използваната литература.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЛИТЕРАТУРНИЯ ОБЗОР ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1.1. Класификации на предвестниците на земетресения и място на вариациите на привидното геоелектрично съпротивление в тях

По своето естество вариациите на привидното електрическо съпротивление се определят към геофизичните електрически предвестници, заедно с вертикалния електрически градиент на атмосферата, геопотенциалите, естествените електромагнитни полета и др. По отношение на времето на проявява, те са в групата на средносрочните предвестници от тип В (без връзка на времето на предвестника с магнитуда на земетресението).

1.2. Българският опит в мониторинга и прогнозирането на земетресенията

В този параграф са разгледани опитно-методичните работи по наблюдение на предвестници на земетресения, проведени в България:

- Измервания на концентрацията на радон във водите на Софийската минерална баня;
- Измервания на земни електрически потенциали на сеизмична обсерватория „Витоша“ и сеизмична станция „Крупник“. Получени са интересни резултати, които ще бъдат изложени по-долу;
- Измерване на концентрацията на хелий в сондаж близо до Симитли. Не са наблюдавани никакви предхождащи аномалии, но е установена известна косеизмична корелация;
- Екстензиометрични прибори пак там. Подкрепят предходните измервания;
- Радон в сеизмична станция „Крупник“. Не е открита корелация между концентрацията на радон и земетресенията;
- Радон в три български пещери – „Бачо Киро“, „Съева дупка“ и „Лепеница“. Наблюдаваните микроекстензии и радонови емисии в пещерите и връзката им със сеизмичността не са достатъчни на сегашния етап на изследване, за да се говори за прогнозиране на земетресения;
- Геомагнитни измервания в Панагюрище и София;
- Привидно електрическо съпротивление в района на НАО „Рожен“ и в м. „Тасладжа“, близо до гр. Стражица. Измерванията са извършени от автора.

1.3. Неоднозначност на предвестниците

Прогнозирането на земетресение трябва да даде отговор на три въпроса – кога, къде и с каква сила ще се реализира бъдещото земетресение, т.е. информация за неговото време, място и магнитуд. Нито един предвестник не може надеждно да предскаже земетресение. Понякога аномалията съществува, но няма земетресение и обратно. Това явление се нарича „неоднозначност на предвестниците“. Затова, след многогодишни наблюдения в даден регион се подбират и следят набор от най-информативните предвестници. За тази цел се строят т.н. „полигони“.

1.4. Природа на земното електросъпротивление и неговите аномалии

Разгледани са факторите, определящи проводимостта на земната кора и промените на електрическото ѝ съпротивление преди счупване на скалите при компресия в лабораторни експерименти.

1.5. Методи за измерване на геоелектричното съпротивление

Описани и сравнени са основните методи за измерване на привидното съпротивление с изкуствен източник на ток – на Wenner, Schlumberger и Dipole-Dipole.

1.6. Шумове и методи за намаляване на тяхното влияние.

Разгледани са факторите, които могат да повлияят измерваните стойности на привидното съпротивление чрез описаните в предния параграф методи и начините за тяхното редуциране:

- Поляризация на приемните електроди
- Телурични токове
- Наличие на близки проводници
- Токови утечки
- Индукция на ток в измервателните кабели
- Наличие на индустриалните (блуждаещи) токове
- Сезонни вариации на геоелектричното съпротивление

1.7. Апаратура за измерване на геоелектричното съпротивление

Описани са основните изисквания към апаратурата. Разгледани предимствата и недостатъците на съществуващите решения за измерване на привидното съпротивление.

1.8. Някои резултати от наблюдения на вариации на привидното съпротивление в процеса на подготовка на земетресения

Показани са криви на изменения на привидното съпротивление при наблюденията му в района на Гарм, Република Таджикистан на бившия СССР, в района на разлома Сан Андреас в САЩ, в Япония и Китай.

1.8.5 Наблюдения в България

Регистрация на аномалии на земното (привидно) електросъпротивление предхождащи земетресенията в България са провеждани от автора със собствено конструирана апаратура през 1984-1985г. близо до сеизмичната станция в НАО “Рожен” и след земетресенията в района на гр. Стражица през 1987г.

- *1984-1985г., Национална астрономическа обсерватория „Рожен“*



Фиг. 1.23. Вариации на привидното съпротивление, регистрирани от автора в района на НАО „Рожен“

Авторът предполага, че наблюдаваните вариации на привидното съпротивление са свързани със сеизмичната активност. Те могат да бъдат предизвикани от подготовката на сравнително далечни земетресения - с епицентър до около 250-300 km от мястото на регистрацията на съпротивлението. Промените са с непрекъснато намаляване на съпротивлението и започват да се случват от няколко часа до малко повече от денонощие преди основния удар. Амплитудите на вариациите са от 10 до 30% - фиг. 1.23.

- 1987г., м. „Тасладжа“, гр. Стражица



Фиг. 1.24. Вариации на привидното съпротивление, регистрирани от автора в м. „Тасладжа“ близо до гр. Стражица

В този случай, промяната е от тип „бухта“ („залив“) с непрекъснато намаляване на съпротивлението, което според повечето проучвания е преобладаващия модел. Изменението на средните дневни стойности е -14.4%, а времето на предварение е около 4 седмици - фиг. 1.24. С червени малки точки над графиката са означени по-слаби земетресения, за магнитуда на които няма данни. На вторичната вертикална ос са показани епицентралните разстояния до станция Стражица (STZ).

Предполага се, че наблюдаваните промени на привидното съпротивление са свързани със сеизмичната активност защото:

- Наблюдаваната аномалия (~14.4%) на привидното съпротивление е 7 пъти по-голяма от стандартната девиация (~2%) преди началото ѝ и следователно е статистически значима.
- Моментът на минимума на аномалията съвпада с момента на земетресението.
- Моделът на аномалията при по-голямото земетресение е подобен на моделът на аномалиите при по-слабите земетресения.

ГЛАВА II. ПРОЕКТИРАНЕ НА АПАРАТУРА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ВАРИАЦИИТЕ НА ГЕОЕЛЕКТРИЧЕСКОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ

В глава втора от дисертационния труд е проектирана апаратура за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление. За реализацията ѝ е избрана симетрична схема на Schlumberger, притежаваща следните предимства:

- дълбочината на изследване е по-голяма в сравнение със схемата на Wenner;
- притежава голяма защитеност от блуждаещи промишлени и телурични токове;
- по-малки изисквания към мощността на захранващия източник в сравнение с дипол -диполните схеми;
- удобна е за разполагане в планински райони.

2.1 Електроди и проводници

2.1.1. Избор на вида на електродите

За намаляване на разликата в напреженията на поляризация, за приемни бяха избрани месингови, а за захранващи – по-евтините инковски електроди. За последните, ефектът от електродните потенциали е без значение.

2.1.2. Избор на разстояния между електродите

Изборът на разстоянията между електродите е тясно свързан с дълбочината на проучване. Постигането на по-големи дълбочини на изследване (ефективни дълбочини на сондиране, на проникване на токовите линии) е необходимо поради следните предположения:

- Измененията в електрическото съпротивление на скалите породени от сеизмогенни източници са по-големи на по-големи дълбочини.
- Измененията в електрическото съпротивление на скалите породени от смущаващи източници (температура, валежи, атмосферно налягане и др.) са по-малки на по-големи дълбочини. Дълбочината на изследване трябва да бъде по-голяма от дълбочината на проникване на сезонните колебания на привидното съпротивление.

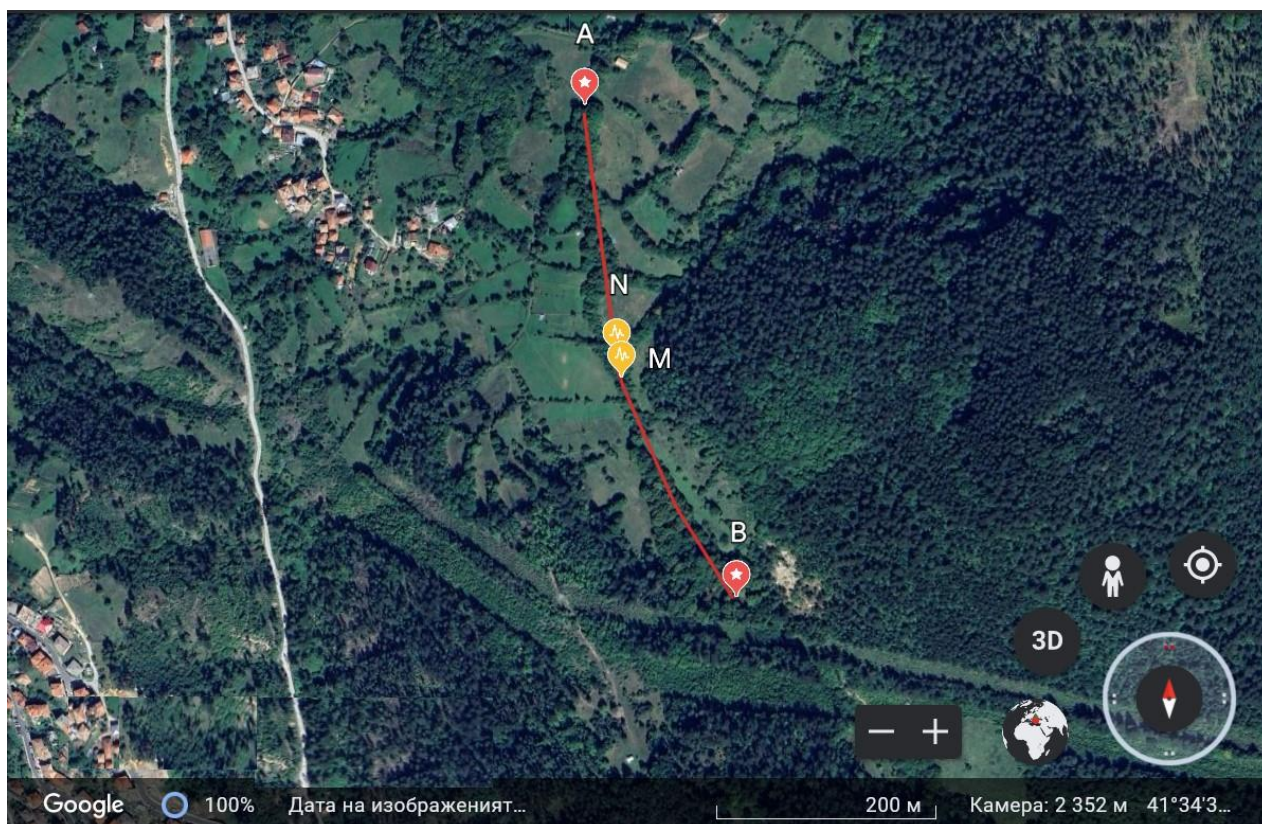
За увеличаване на дълбочината на изследване е необходимо увеличаване на

разстоянието между захранващите електроди А и В. Това обаче води до намаляване на полезната потенциална разлика в приемните електроди М и N и намаляване на отношението сигнал/шум. За да не става това е необходимо да се увеличи силата на тока в захранващата линия, т.е. да се използва по-мощен източник, по-дебели проводници и акумулатори с по-голям капацитет. Всичко това води до повишаване на себестойността на установката.

Друг ограничаващ фактор за увеличаване на разстоянието между захранващите електроди, респ. дълбочината на проникване е топографията на местността. Намирането на подходящо място за разполагане на установката може да се окаже труден за решаване проблем, особено в планинските райони. Там е трудно да се намери сравнително праволинеен участък с по-голямо разстояние, освен по протежение на деретата. Тази установка има и едно предимство – захранващите електроди са поставени във водонаситена среда и нямат нужда от поливане при засушаване. Приемните електроди се поставят малко извън самото дърво, за да се избегне шунтирането на сигнала при обилни валежи.

Вземайки предвид всички тези фактори, релефа на терена и натрупания до сега опит, дължината на разстоянието между електродите А и В е избрано на 520 m, а това между електродите М и N - 21.7 m. Геометричният коефициент на установката (формула (3)) се получава равен на 9770.

Проводниците към електродите са от кабел тип ЛПК-79 (Лек Полеви Кабел) с паралелно свързани 2 жила от оплетени медни и стоманени нишки ($2 \times 0.35 \text{ mm}^2$).

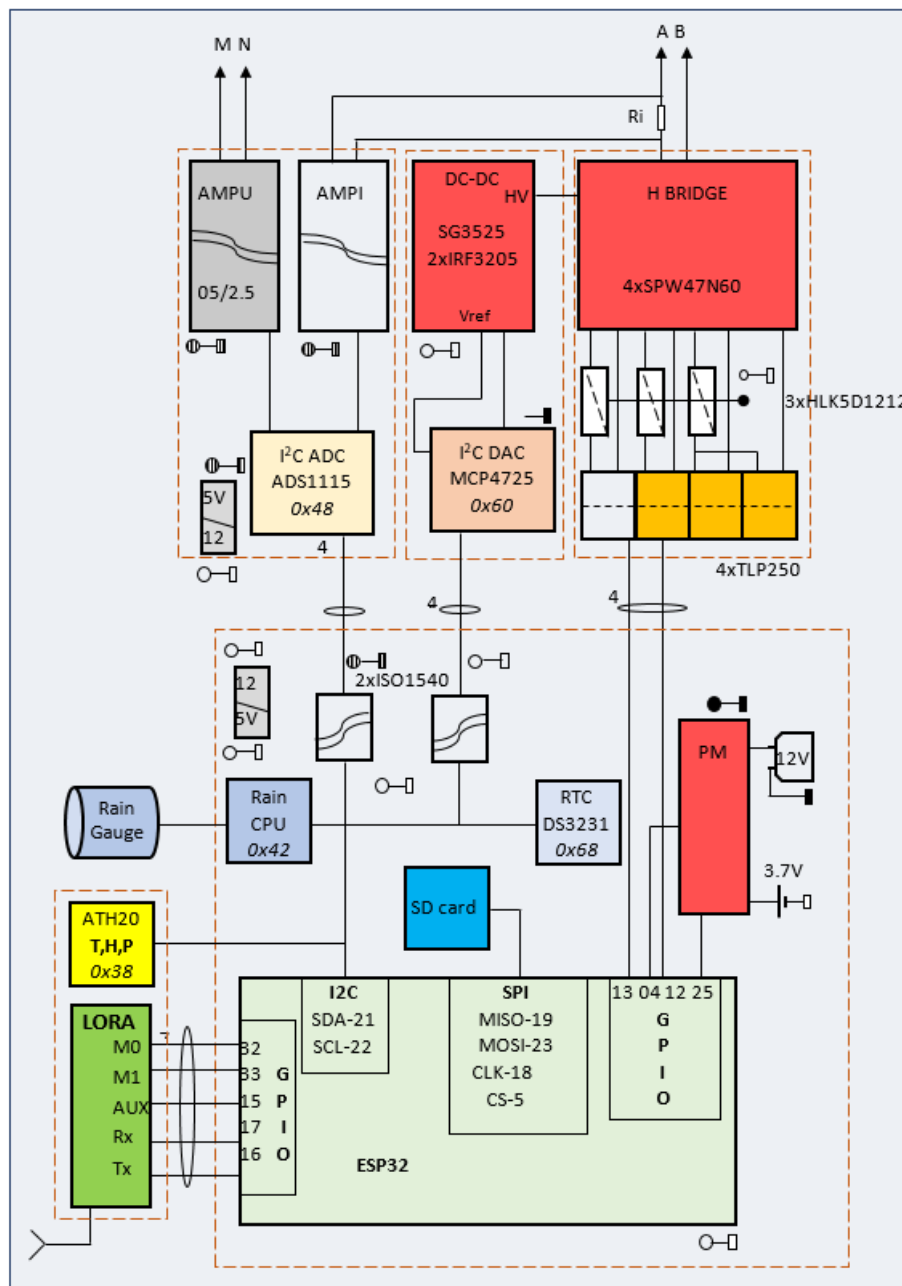


Фиг. 2.1. Избор на място за разполагане на установката

На фиг. 2.1 е показано географското разположение на установката в землището на с. Дунево, обл. Смолян. Мястото се намира в една от сравнително слабите сеизмични зони у нас - Родопската сеизмична зона.

2.2 Блокова схема на полевата част

На фиг. 2.2 е представена блокова схема на полевата част на проектираната апаратура, включваща следните блокове: ESP32 - централен процесорен модул, RTC - часовник за реално време SD card - SD карта, AMPU - усилвател на канала за измерване на напрежение, AMPI - усилвател на канала за измерване на ток, H BRIDGE - X мост, DC-DC - управляем инвертор, I²C ADC, I²C DAC - АЦП и ЦАП на I²C шина, LORA - модул за LoRa модулация, PM - модул за управление на захранването, TLP250 - оптоизолатори, ISO1540 - изолатори на I²C шина, HLK5D1212 - изолирани DC-DC преобразуватели, Rain CPU - процесор за измерване на валежи, Rain Gauge - съд за валежи, ATH20 – модул за измерване на метеорологични параметри, Ri – съпротивление за измерване на тока.



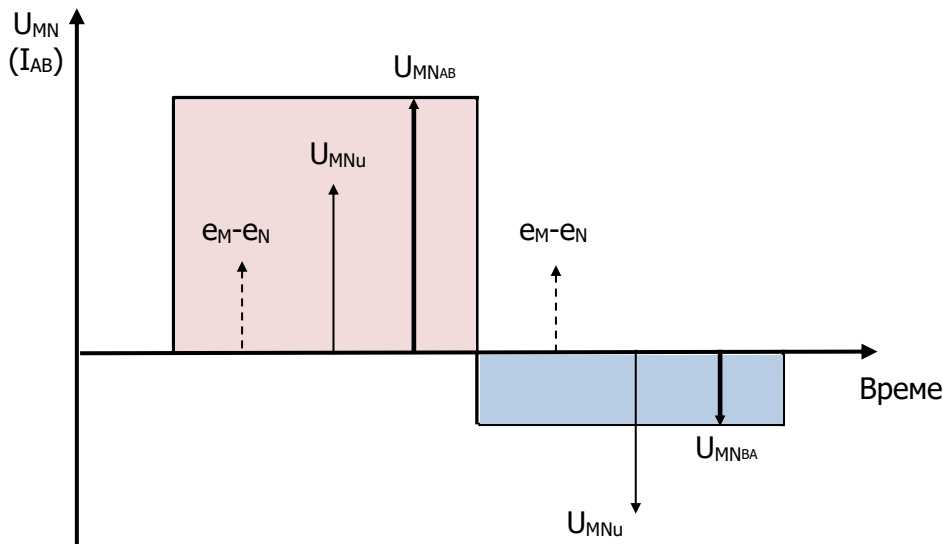
Фиг. 2.2. Блокова схема

2.3 Източник на ток в захранващата линия

Източникът на ток в захранващата линия се състои от DC-DC преобразувател и схема за реверсиране на тока в захранващата линия, управлявани от микропроцесорния модул и схема за оптично разделяне.

DC-DC преобразувателят представлява изолиран PUSH-PULL инвертор на напрежение, управляван от ШИМ регулатор SG3525. Коефициентът на запълване на импулсите на изходите му, а от там и на тока в захранващата линия, се променя чрез регулиране на напрежението на извод 2 на SG3525 (неинвертиращия вход на усилвателя на разлика). Това напрежение се задава от 12 битов I²C цифрово-аналогов преобразувател MCP4725 (I²C DAC), управляван от микропроцесорния модул с помощта на изолирана с ISO1540 I²C шина.

За елиминиране на смущаващите постоянноточкови компоненти на входния сигнал (основно от разликата в поляризацията на електродите), измерванията на амплитудата на входния сигнал се извършва в права и обратна посока на тока в захранващите електроди - фиг. 2.3.



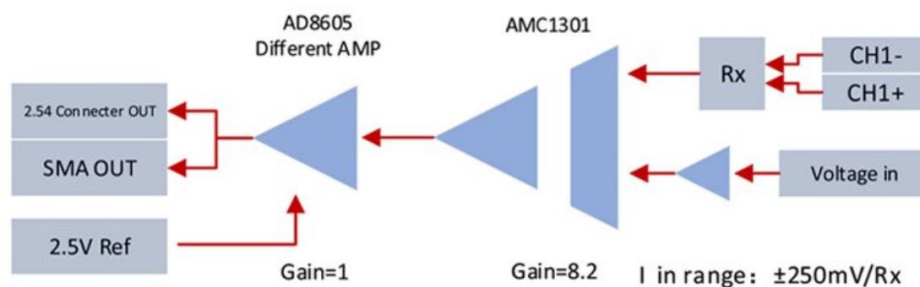
Фиг.2.3. Елиминиране на разликата от поляризацията на електродите

За постигане на тази цел се използва H - мост (H - bridge) с полеви транзистори, захранван от инвертора и управляван от импулсни поредици, генерирани от микропроцесорния модул. Управляващите сигнали са разделени от микропроцесорния блок чрез оптрони с формиратели на управляващи сигнали за гейта на полевите транзистори, тип TLP250.

2.4 Усилвател за измерване на тока в захранващата линия

Усилвателят на сигнала за измерване на силата на тока в захранващите електроди А и В (АМРІ) е модул с изолиращ усилвател АМС1301 на Texas Instruments, специално проектиран за измерване на ток и усилване $G=8.2$ - фиг.2.5.

Изходният сигнал на модула е отместен на +2.5V, което позволява дигитализацията му чрез еднополярен аналогово-цифров преобразувател, при промяна на посоката на тока в захранващата линия.



Фиг. 2.5. Усилвател за измерване на тока в захранващата линия

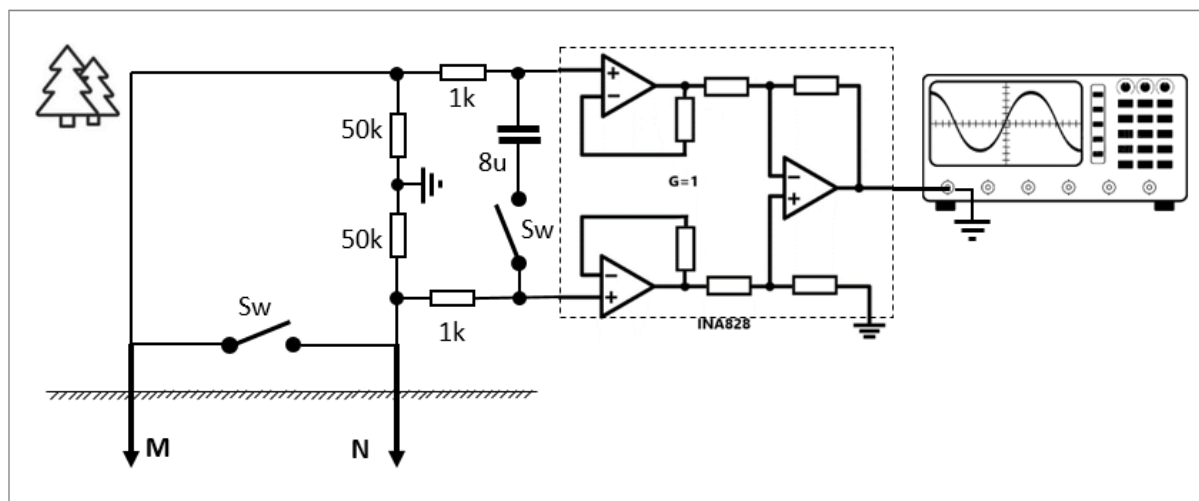
Датчикът на ток е жичен резистор със съпротивление 0.2Ω , $2W$, 0.1% .

2.5 Усилвател на напрежение в приемната линия

Изборът на усилвател на напрежение между приемните електроди М и N има важно значение за стабилността и точността на получаваните данни. Тази значимост се определя от природата на входния сигнал – слаб полезен сигнал на фона на сравними и/или в пъти по-големи смущаващи сигнали.

2.5.1 Оценка на вида и амплитудите на смущаващите сигнали

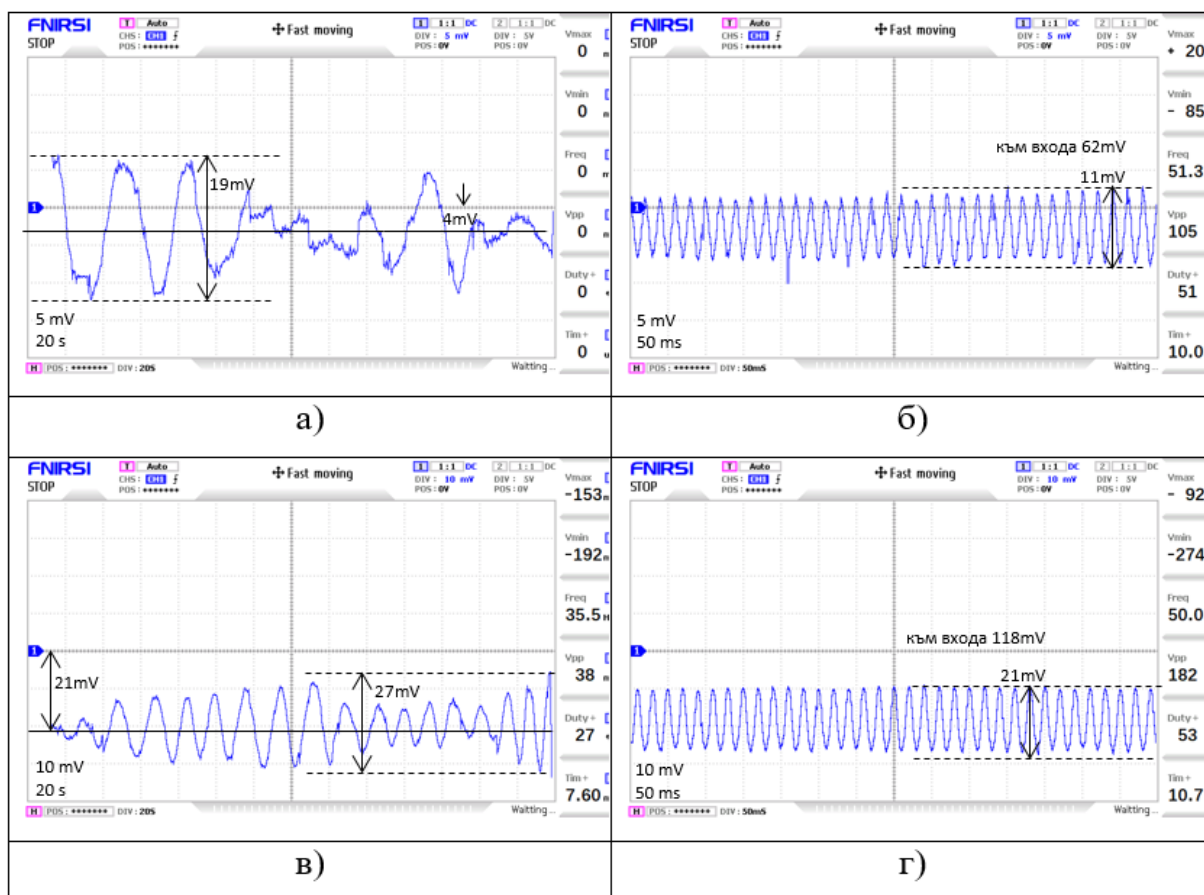
Измерването на постояннотоковата и променливотоковата компоненти на смущаващите сигнали без ток в захранващата линия (АВ), е извършено с помощта на схемата, показана на фиг. 2.6.



Фиг. 2.6. Схема за измерване на смущаващите сигнали без ток в захранващата линия

Осцилограмите, записани на изхода на инструменталния усилвател INA828 с усилване $G=1$ са показани на фиг. 2.7 (а) и (б) - за електроди от месинг и (в) и (г) – за електроди от неръждаема стомана. С цел по-добър анализ на структурата на входните сигнали, развивките на съответните записи отляво и отдясно са различни. Записите, представени на фиг. 2.7 (а) и (в) са с развивка 20 s и показват дълговременните изменения на входния сигнал, докато записите от на фиг. 2.7 (б) и (г) са с развивка 50 ms и показват по-високочестотните смущаващи компоненти. Входните защитни резистори ($1k\Omega$) заедно с кондензатора ($8\mu F$) образуват филтър за ниска честота със

честота на среза около 20 Hz. Отслабването на сигнали с честота 50 Hz на такъв филтър е 15dB (5.62 пъти).



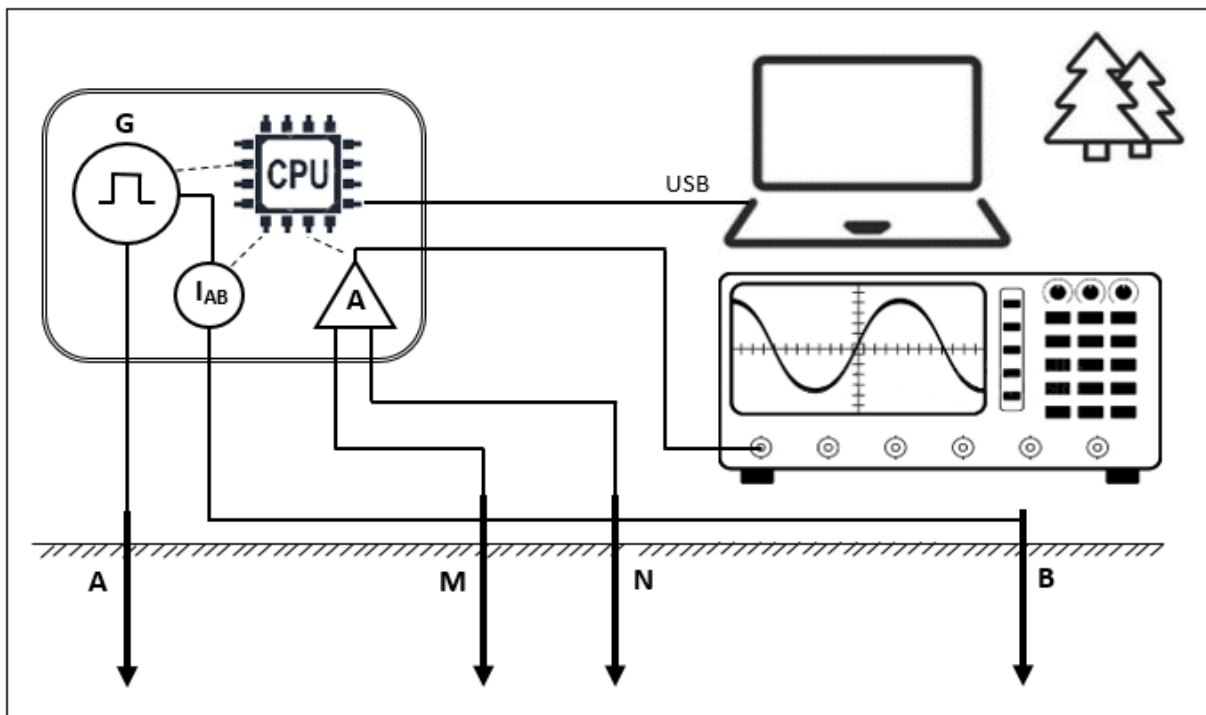
Фиг.2.7. Осцилограми на смущаващите сигнали за електроди от месинг а) и б) и електроди от неръждаема стомана в) и г)

Анализът на осцилограмите, представени на фиг. 2.7, дават основание да се направят следните изводи:

- И при двата вида електроди, върху очакваната постояннотокова компонента в резултат на поляризацията на електродите, е насложена друга, свръхнискофректна компонента с честота 15 – 30mHz ($T = 66-33s$) и променяща се амплитуда до 20-30 mV_{p-p} - фиг. 2.7 а) и в). Този честотен диапазон е типичен за телуричните токове, обусловени от геомагнитни бури, затова тези свръхнискофректни колебания са най-вероятно причинени от тях. За времето на измерване (~ 5 - 6 s) те могат да се приемат като смущаващ постояннотоков източник;
- Постояннотоковата компонента в резултат на разликите в поляризацията на електродите е около 4mV за месингови електроди и около 20 mV за тези от неръждаема стомана (5 пъти по-голяма);
- Смущаващата променливотокова компонента с промишлена честота 50Hz, фиг. 2.7(б) и (г), е с променлива амплитуда – от 5 mV_{p-p} до 120 mV_{p-p} (приведена към входа, т.е. с отчитане отслабването от входния RC филтър) и е причинена от минаващия наблизко електропровод с високо напрежение.

2.5.2 Оценка на амплитудата на полезния сигнал

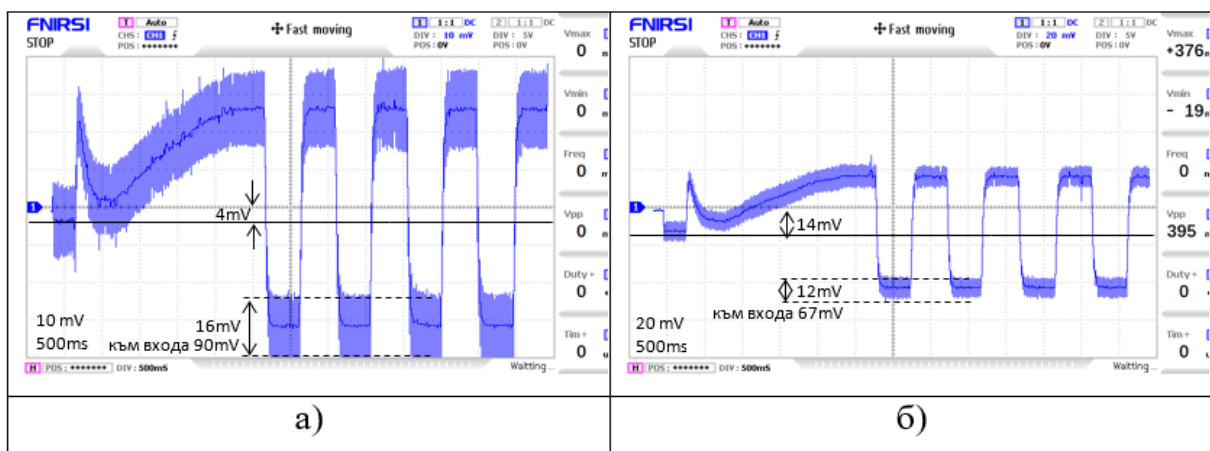
Измерванията за извършване на оценка на амплитудата на полезния сигнал е проведено при работещ генератор на импулси с променящ се поляритет, с помощта на измервателната установка, показана на фиг. 2.8.



Фиг. 2.8. Схема за оценка на амплитудата на полезния сигнал

Чрез USB интерфейса на преносим компютър се програмират параметрите на импулсите – продължителност и целева сила на тока (I_{aim}) в захранващата линия. По същия интерфейс се получават стойностите на тока в захранващата линия А-В и напрежението между приемните електроди М-Н.

Осцилограмите на изхода на усилвателя са представени на фиг. 2.9 (а) за месингови и (б) за електроди от неръждаема стомана.



Фиг. 2.9. Осцилограми на полезния сигнал за електроди от месинг а) и електроди от неръждаема стомана б)

Осцилограмите, представени на фиг. 2.9, дават основание да се направят следните изводи:

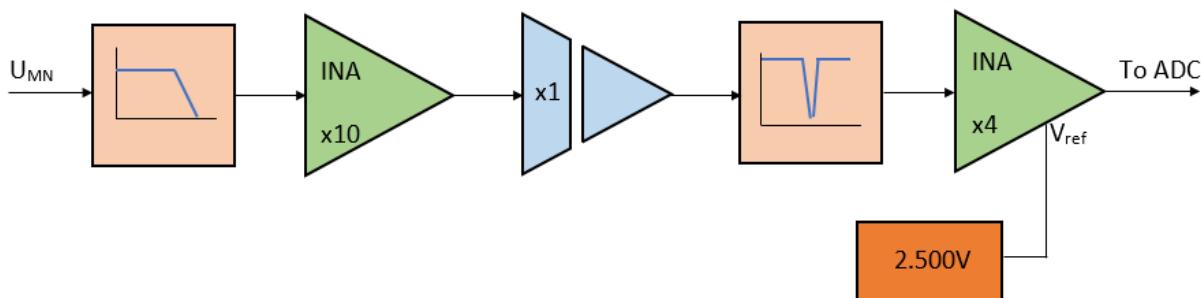
- За дадената установка при сила на тока 0.5A се получава около 15mV полезен сигнал и при двата вида електроди;
- Постояннотоковата компонента в резултат на разликите в поляризацията на електродите е същата, както и без сигнал в захранващите електроди;
- След направени многократни записи и сравнения на изходния сигнал на усилвателя, през случайни периоди от време в диапазона от 10 до 30s стана ясно, че както при месинговите (фиг. 2.9 а), така и при стоманените електроди (фиг. 2.9 б), постояннотоковото отместване не се променя във времето, т.е. на осцилограмите при наличие на сигнал не се наблюдава ефектът от телуричните токове. Това означава, че те могат да се представят като източник с високо вътрешно съпротивление, включен успоредно на източника на полезния сигнал.

Следователно, за структурата на входния сигнал в приемника може да се обобщи:

1. Полезният сигнал е с амплитуда 15mV (при 500mA ток в захранващата линия);
2. Постояннотоковото отместване е 4mV при месингови и 20mV при стоманени електроди в резултат от поляризацията на електродите.
3. Променливотоковата компонента (50Hz) е с променлива амплитуда (от $10\text{mV}_{\text{p-p}}$ до $120\text{mV}_{\text{p-p}}$) в резултат на промишлени смущения.
4. Смуцаващият сигнал от телурични токове е пренебрежимо малък. Но дори и да се появи някакво смущаващо напрежение от него, то няма да се отрази върху измерената стойност на U_{MN} , тъй като периодът му е много по-голям от времето между две последователни измервания (при промяна на посоката на тока в захранващата линия).

2.5.3 Проектиране на усилвателя

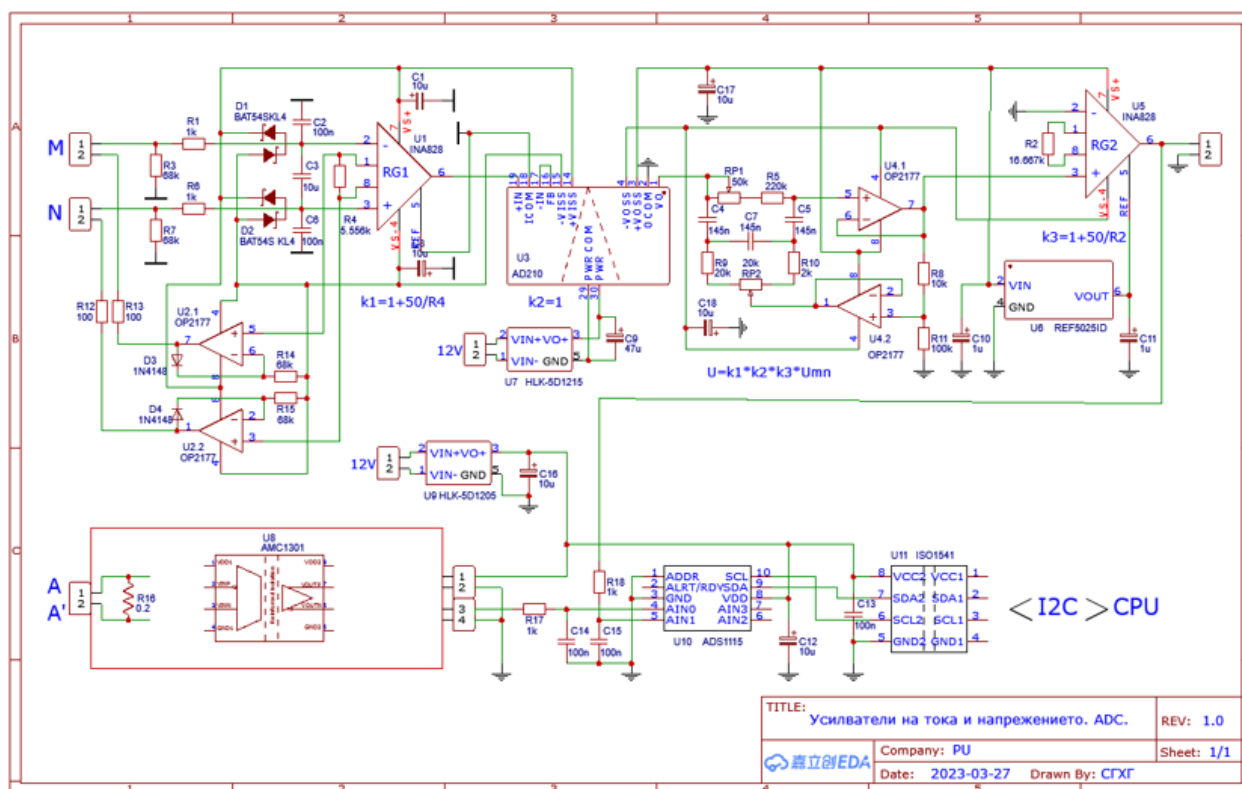
След отчитане на параметрите на всички смущаващи сигнали, необходимостта от обработване на биполярни полезни сигнали и удобството при работа с аналогово-цифров преобразувател с еднополярно захранване, се синтезира структурната схема на усилвателя на напрежение в приемните електроди, представена на фиг. 2.12.



Фиг. 2.12. Структурна схема на усилвателя на напрежение в приемните електроди

Схемата съдържа следните блокове: пасивен входен филтър за ниска честота, инструментален усилвател с коефициент на усилване 10, изолиращ усилвател с коефициент на усилване 1, активен режекторен филтър на 50 Hz, втори усилвател, с коефициент на усилване 4 с отместване на нивото на +2.500V.

Принципната схема на хардуерната реализация на усилвателя, заедно с усилвателя за измерване на тока в захранващите електроди, аналогово-цифровия преобразувател и изолирания I2C интерфейс към централния процесор са представени на (фиг. 2.13).

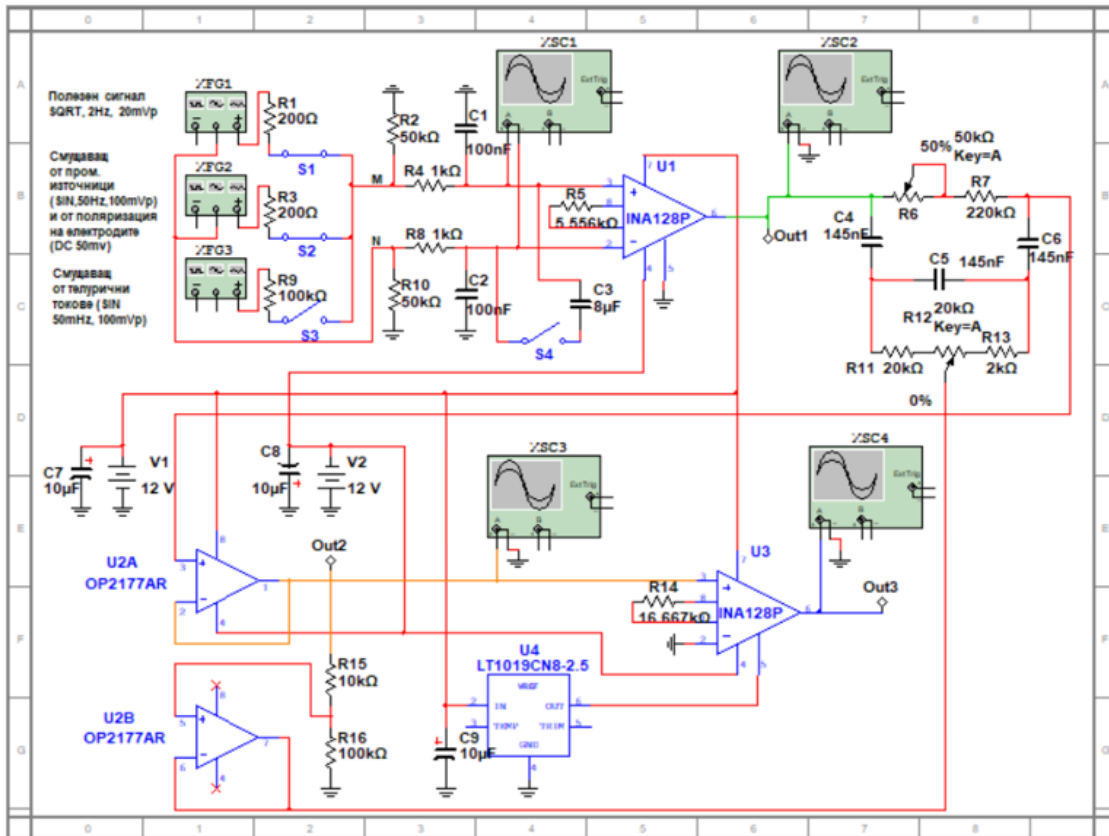


Фиг.2.13. Принципна схема на усилвателите за измерване на напрежение и ток, ADC и I2C интерфейс към централния процесор

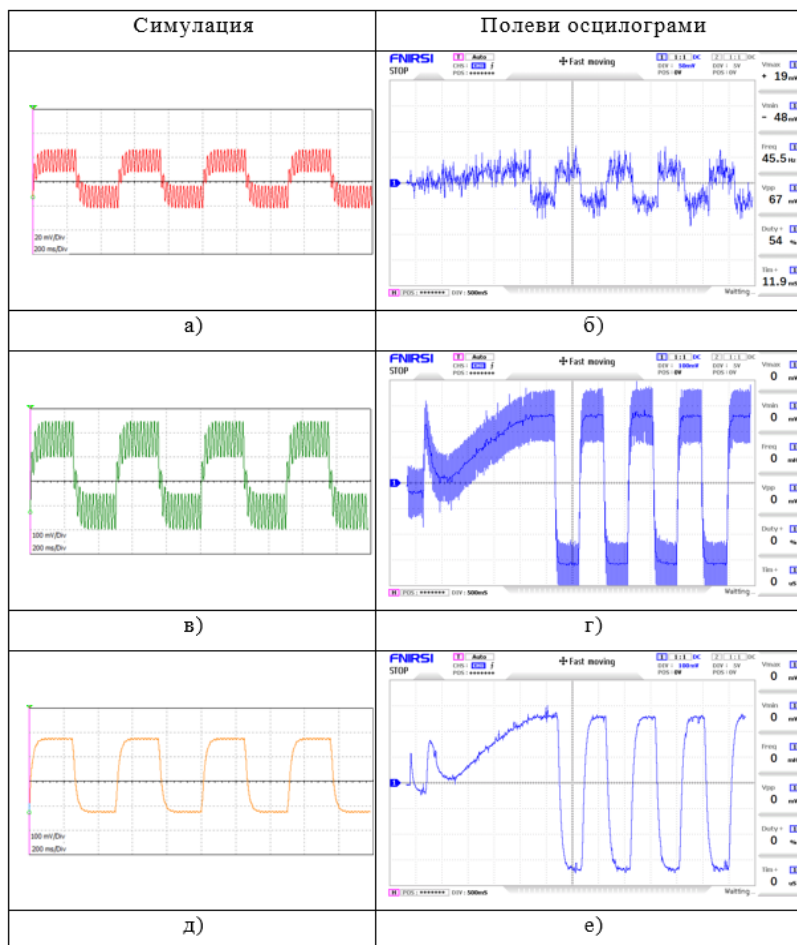
2.5.4 Симулация на схемата

За симулиране на работата на усилвателя е създадена и изследвана симулационна схема на усилвател на напрежение в приемната линия в средата на Multisim – фиг. 2.16. На нея чрез XFG1 се симулира полезният входен сигнал, с XGF2 – смущаващият сигнал от промишлени източници и от разликата в поляризацията на електродите, а с XGF3 - смущаващият сигнал от телуричните токове. Симулационно е оптимизирана стойността на филтриращия кондензатор C_3 , определящ времето за установяване на стабилни стойности на напрежението в приемните електроди.

На фиг.2.19 паралелно са показани осцилограмите от симулацията (от ляво) и заснетите в реални условия (от дясно), както следва: (а) и (б) -на входа на инструменталния усилвател, (в) и (г) - на неговия изход (преди активния режекторен филтър) и (д) и (е) - на изхода на режекторния филтър, преди последното усилване и отместване на нивото.

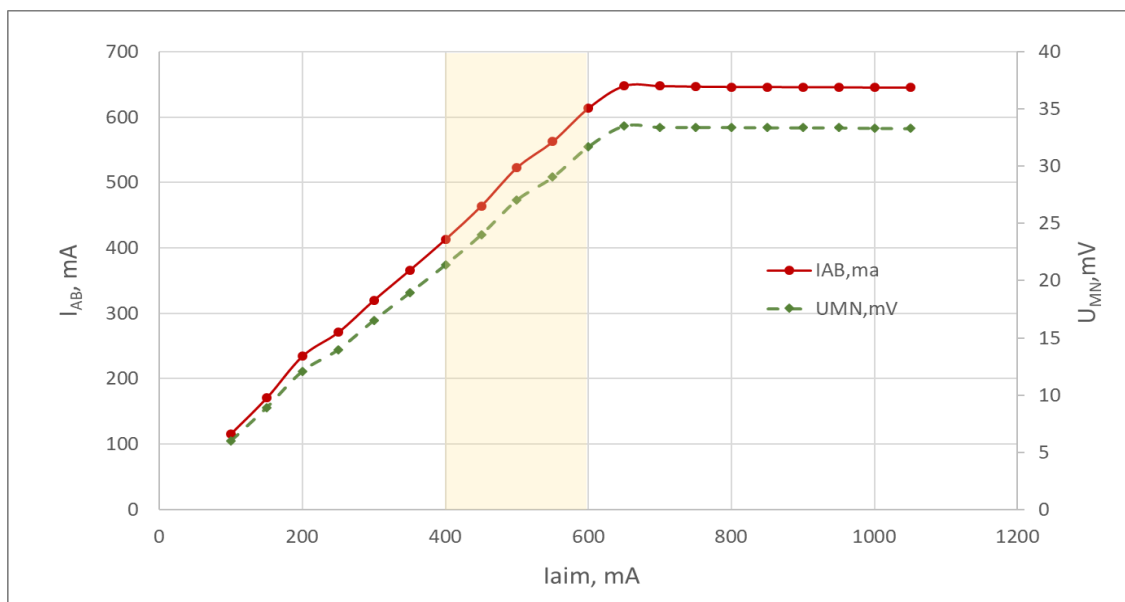


Фиг. 2.16. Симуляционна схема на усилвател на напрежение в приемната линия



Фиг. 2.19. Сравнение на получените от симулацията - (а), (в) и (д) и полево заснети - (б), (г) и (е) осцилограми

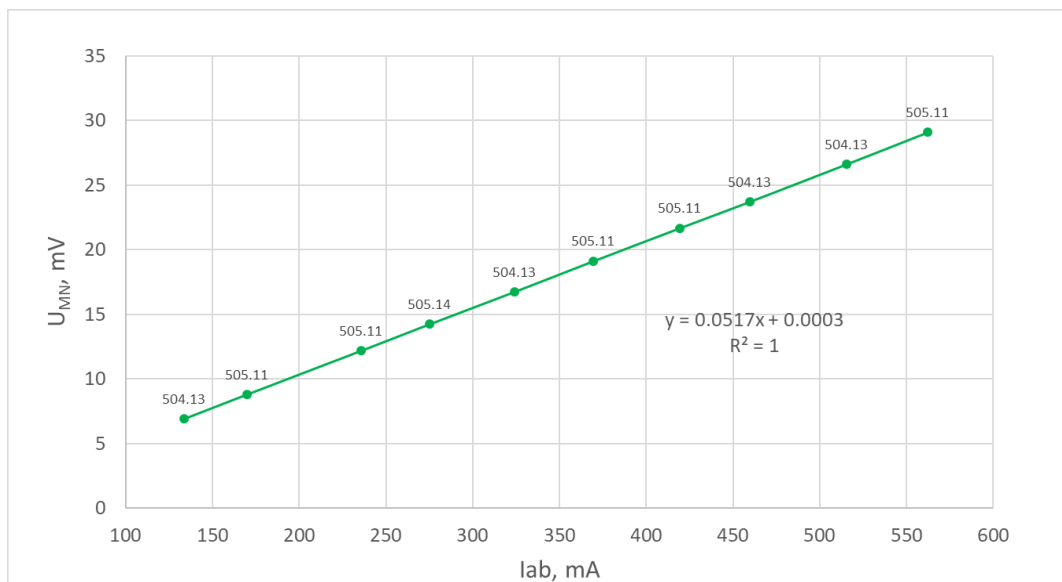
За определяне на работния диапазон от токове, на реализирания преобразувател на напрежение (DC-DC инвертор), за избраното място на поставяне на електродите, е съставена тестова програма, за измерване на U_{MN} при различни стойности на силата на тока в захранващите електроди. Резултатите от измерванията са показани на фиг. 2.20. На хоризонталната ос са нанесени стойностите на целевия ток I_{aim} , на лявата вертикална ос – стойностите на достигнатия ток I_{AB} , а на дясната вертикална ос – стойностите на полезния сигнал в приемните електроди.



Фиг. 2.20. Определяне на работния диапазон от токове

От графиките се вижда че, на даденото място, при конкретната геометрия на установката ($AM=BN=520m$, и $MN=21.7m$) и токове от 100 до 650mA в захранващата линия, амплитудата на полезния сигнал е от 5 mVp до 35 mVp. Вижда се, че максималната мощност на преобразувателя на напрежение (определена на около 110W в лабораторията) е недостатъчна за постигане на работен ток над 650 mA.

Измененията на привидното съпротивление, за които се предполага, че са свързани с подготовката на земетресения, наблюдавани от автора и други автори и описани в т. 1.8 на I глава, са в диапазона 3% до 30%. Следователно, целеви работен ток (I_{aim}) около 500 mA би бил подходящ избор за тази установка – достатъчно голям за да генерира забележим полезен сигнал и достатъчно по-малък от максималния ток на инвертора за дадената установка. На фиг. 2.21 е показана зависимостта на измереното напрежение в приемните електроди от тока в захранващите. От доброто съвпадение на експерименталните точки и регресионната права можем да направим извода за добрата точност на измерванията – средноквадратичното отклонение на измерваното съпротивление (показано в етикетите над точките) е от порядъка на 0.1%.



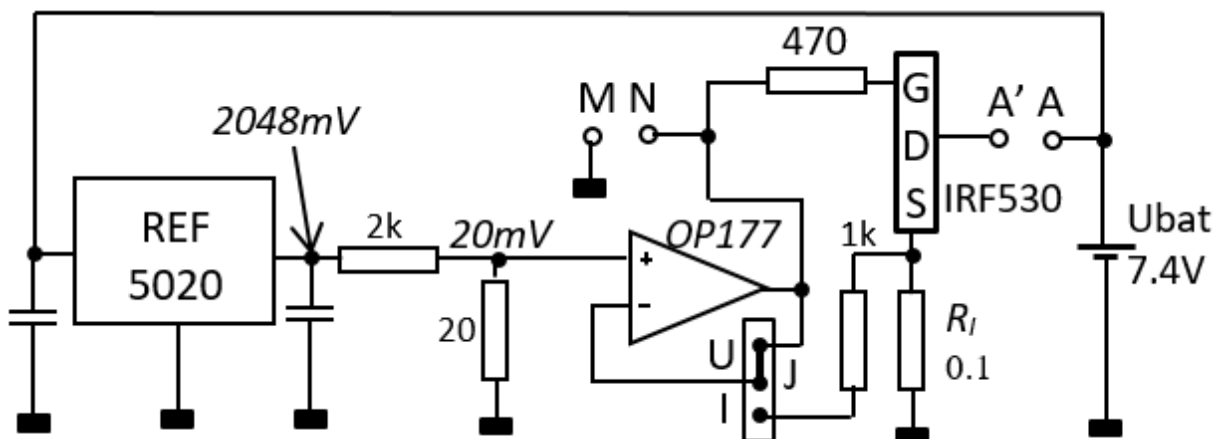
Фиг. 2.21. Зависимост на измереното напрежение в приемните електроди от тока в хранващите

2.6 Аналогово-цифров преобразувател

В този раздел е обоснована необходимостта от използване на външен (за микропроцесора) ADC. Избран е подходящ (ADS1115 на Texas Instruments) и е оценена неговата грешка чрез метода на най-лошия случай (worst-case method) – 0.02%.

2.7 Калибровка, проверка и оценка на грешката

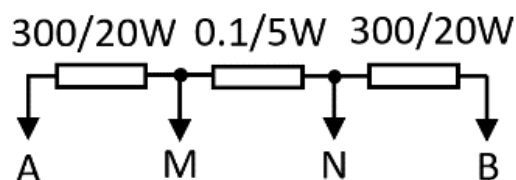
За извършване на калибровка по напрежение и ток е разработена следната принципна схема - фиг. 2.23.



Фиг.2.23. Схема за калибровка по напрежение и ток

Режимът на работа - калибровка по напрежение или ток се избира с помощта на джъмпера J.

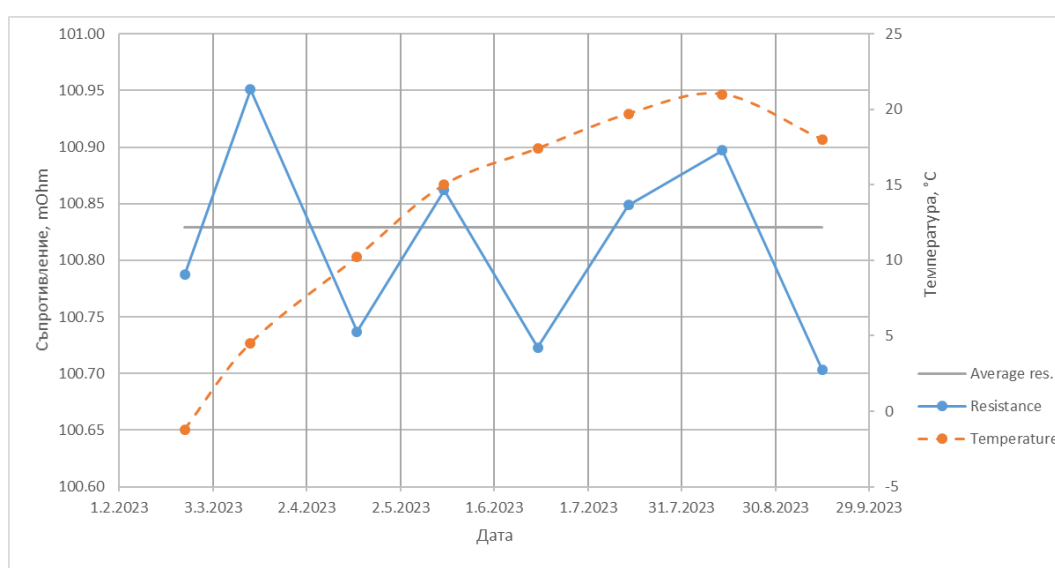
За извършване на проверка на работата на измерителя в полеви условия е създадена следната пасивна схема - фиг. 2.24. Тук R_{AM} и R_{BN} са мощни съпротивления съставени от две последователно свързани съпротивления по 150 Ω /10W, а еталонното съпротивление R_{MN} е също жично, $0.100\Omega \pm 0.1\%$, тип СП-5 и температурен коефициент $50.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.



Фиг. 2.24. Схема за проверка на работата и дълговременната стабилност

За оценка на грешката от измерването на геоелектрическото съпротивление се използват относителните неопределености от отделните измервания на напрежението и тока, както и тази на калибратора. Така, за относителната неопределеност на измерителя на привидното съпротивление се получава стойността 0.374%.

Дълговременната стабилност на апаратурата е илюстрирана на фиг. 2.25. На нея са показани получените стойности на еталонното съпротивление от схемата за проверка ($100\text{m}\Omega$) през около 15 дни през периода на измерване.



Фиг. 2.25. Проверка на дълговременната стабилност

От нея се вижда, че измерванията на еталонното съпротивление от схемата за проверка се различават във времето в рамките на стандартна девиация от $0.1\text{m}\Omega$, т.е. 0.1%, което е в рамките на температурната нестабилност на това съпротивление $50 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ в рамките на температурен диапазон от 20°C .

2.8 Измерване на метеорологични параметри

Измерването на температурата и влажността на въздуха както и на атмосферно налягане става чрез модул АНТ20 +ВМР280. Модулът е монтиран в PVC тръба с диаметър 26mm, заедно с антената и LoRa модула и е свързан по I2C шина с централния процесор.

За измерване на количеството на валежите се използва сензор за валеж с преобръщаща се кофа (tipping bucket rain gauge), модел WH-SP-RG на MISOL. За измерване на броя на преобръщанията е разработена схема на базата на отделен 8 битов AVR микроконтролер работещ в спящ режим и излизаш от него чрез прекъсване при получаване на импулс от сензора за валеж или при поискване на данни за броя на импулсите (количеството на валежите) по I2C шина от централния процесор.

2.9 Управление на измерванията

Процесът на измерване и регистрация на данните от измерванията се управлява от микропроцесорен модул с ESP32. С цел икономия на енергия неизползваните му модули са забранени програмно, премахнати са двата светодиода и е заменен регулаторът на напрежение AM1117 с AP7361 (с по-малкия ток на покой и пад на напрежение между входа и изхода, което позволява захранването на модула в “спящ” режим от 3.7V акумулатор.

Към микропроцесорния модул е добавен модул за реално време на базата на DS3231, подсигурен от Li-Ion батерия и управляван от ESP32 по I2C шина.

Освен предаване чрез LORA модула, данните се записват и в SD карта чрез добавения SD Card модул, управляван от ESP32 по SPI шина.

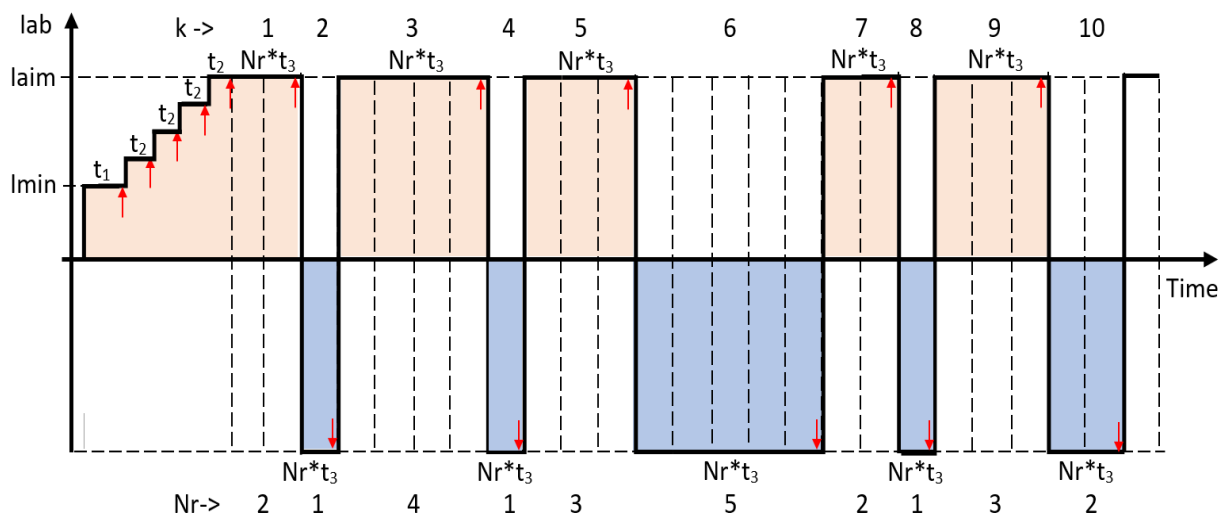
2.10 Захранващи блокове, акумулатори, слънчев панел

В този параграф се разглежда схемата за управление на захранването на отделните модули.

ГЛАВА III. СОФТУЕРНО УПРАВЛЕНИЕ И ПРАКТИЧЕСКА РЕАЛИЗАЦИЯ НА АПАРАТУРА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ВАРИАЦИИТЕ НА ГЕОЕЛЕКТРИЧЕСКОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ

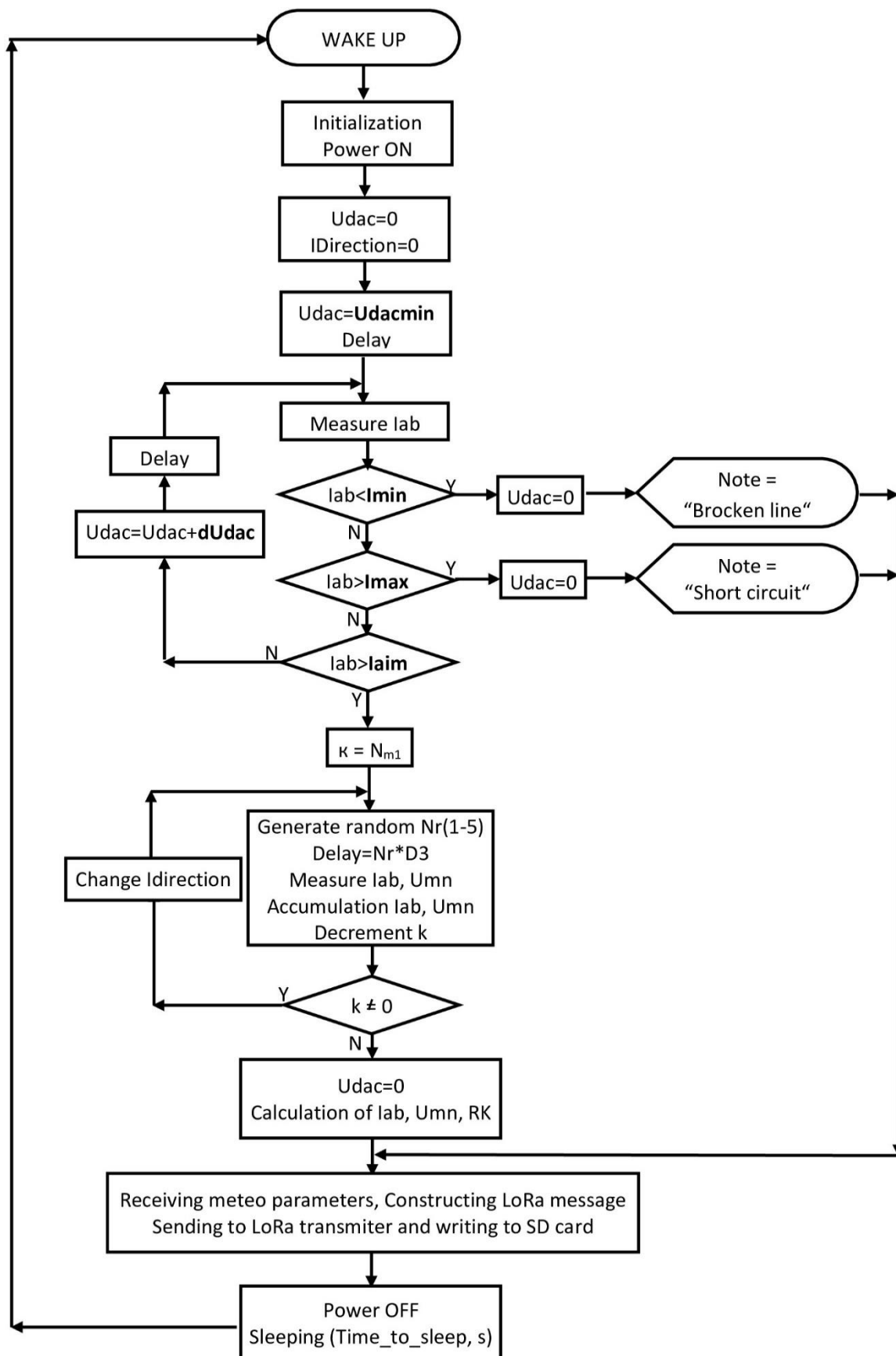
3.1 Алгоритъм на работа на програмата за управление на измерванията

На фиг.3.3 са показани измененията на посоката и стойността на силата на тока в захранващите електроди във времето, заедно с времезакъсненията и моментите на измерванията (посочени със стрелки).



Фиг. 3.3. Времедиаграми на измерванията

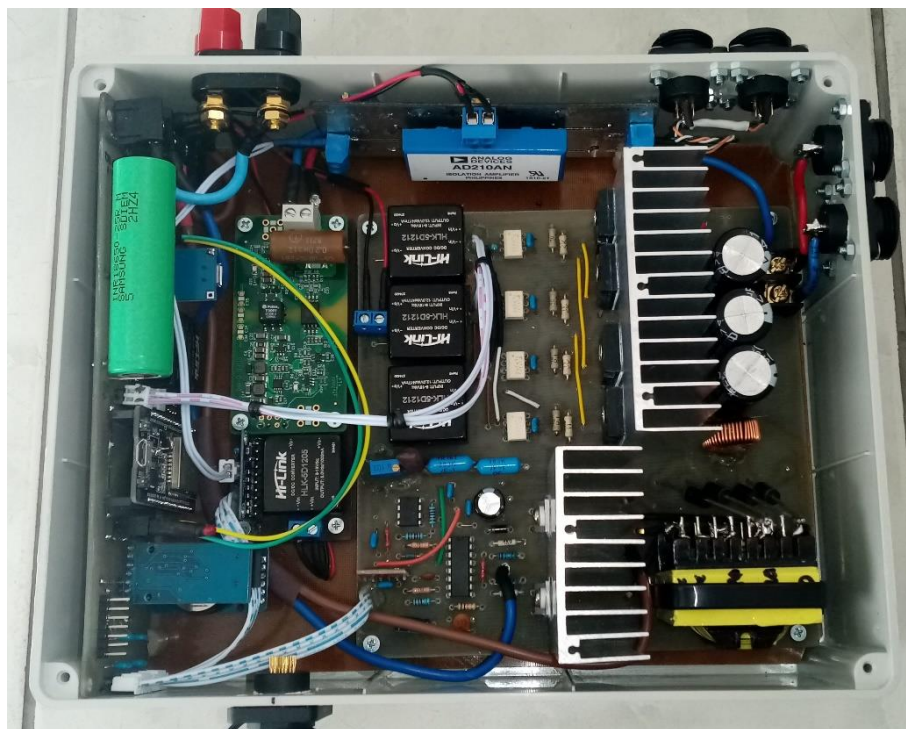
Освен това, в този параграф е описан и алгоритъмът на работа на програмата за управление на измерванията – фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Алгоритъм на работа на програмата за управление на измерванията

3.2 Практическа реализация

Показани са разработените платки на отделните модули, вътрешния вид на устройството – фиг. 3.6., външния вид на електродите – фиг. 3.11., снимки на местността и от настройката на апаратурата – фиг. 3.12 .



Фиг. 3.6. Вътрешен вид на устройството



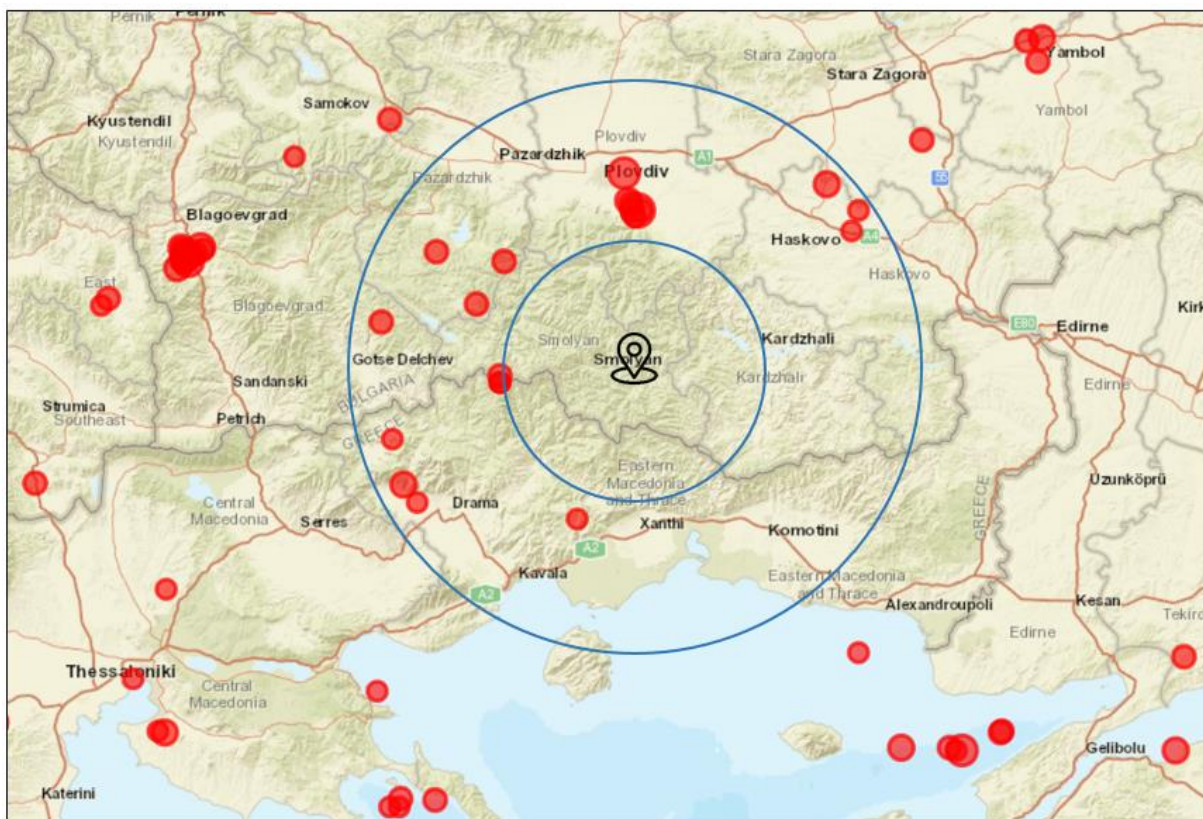
Фиг. 3.11. Монтиран захранващ електрод



Фиг. 3.12. *Настройка на апаратурата*

3.3 Резултати от наблюденията

В този параграф са показани данните за земетръсната активност в района за периода на наблюдение (от 22.02 до 31.10.2023г.), по данни на EMSC – фиг.3.14.

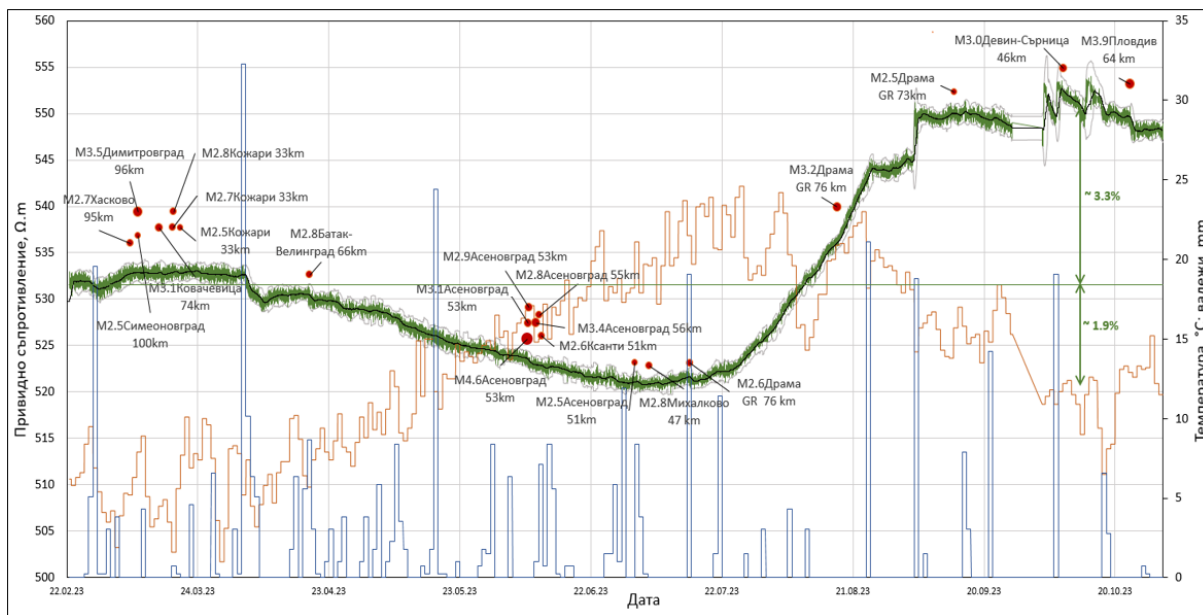


Фиг.3.14. *Реализирани земетресения в периода на наблюдение*

За периода на наблюдение са станали 21 земетресения с магнитуд $M \geq 2.5$ и епицентрални разстояния под 100км.

На фиг. 3.15 са показани регистрираните изменения на привидното съпротивление, температурата и валежите за този период.

Най-близките земетресения до мястото на наблюдение са 3, в района на с. Кожари, на около 33 км и магнитуди между 2.5-2.8. Най-силното земетресение през периода е около гр. Асеновград ($M = 4.6$), на 53km от мястото на регистрацията.



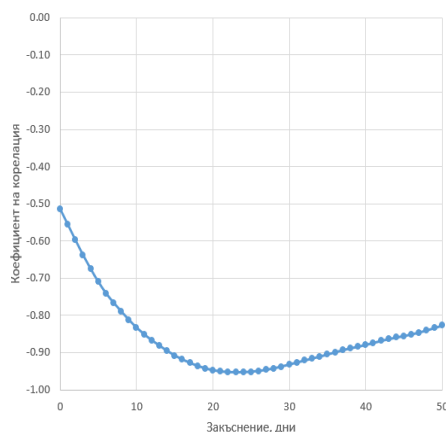
Фиг. 3.15. Промени на геоелектричното съпротивление, температурата и валежите през периода на наблюдение

От тази графика можем да направим следните изводи:

1. Измененията на привидното съпротивление от началото на периода на наблюдение са от - 2 до +3% и най-вероятно са свързани със сезонните му изменения, а те със промените на температурата и валежите.

2. Предположението, че очакваните изменения, предхождащи земетресенията са по-големи, както и недостатъчният обем данни не позволява да се направи връзка между измененията на привидното съпротивление и сеизмичната активност.

За да се проучи влиянието на температурата и валежите бяха изчислени корелационните коефициенти между среднодневните стойности на привидното съпротивление и температурата със закъснение от 0 до 50 дни. Корелационните коефициенти са отрицателни, като екстремума (-0.954) е при закъснение от 22 дни - фиг.3.17.

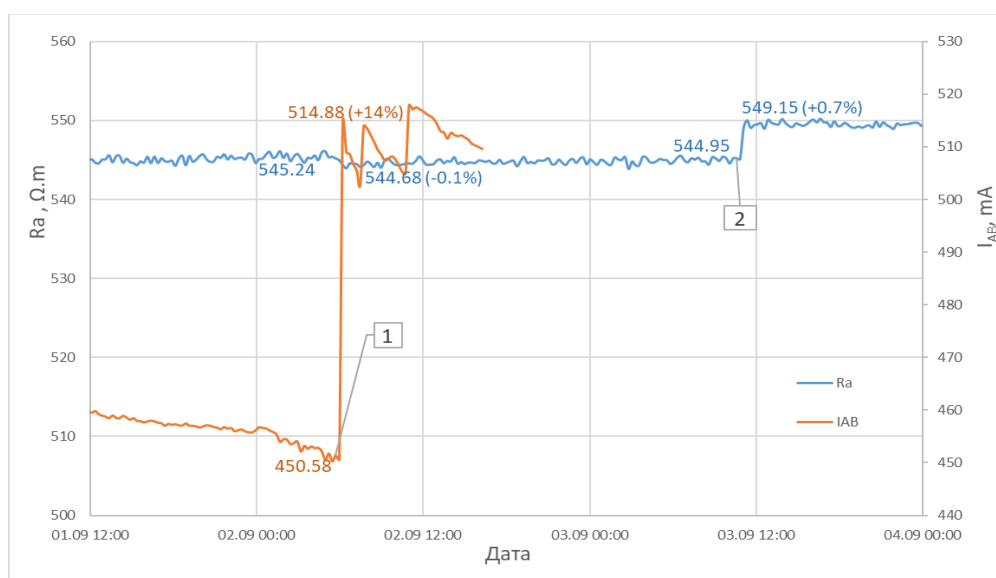


Фиг. 3.17. Определяне на екстремума на крос-корелационните коефициенти между привидното съпротивление и температурата

Не се наблюдава корелация на привидното съпротивление с количеството на валежите - корелационните коефициенти са под 0.15.

Сравнително дългото лятно засушаване (22.07 - 24.08) създаде условия за изследване влиянието на влажността на почвата около електродите върху получаваните резултати.

Овлажняването на почвата около захранващите електроди доведе до намаляване на привидното съпротивление R_a с 0.1%, което е в рамките на грешката от измерването - фиг. 3.18 (момент 1). Овлажняването на почвата около приемните електроди обаче, доведе скокообразно увеличаване на привидното съпротивление с 0.7% (момент 2), което е сравнително високо. Това потвърди необходимостта от периодично водонасищане на почвата около електродите (приемни и захранващи) през летните засушавания за нормализиране на контактното им съпротивление.



Фиг. 3.18. Влияние на намаляването на контактното съпротивление на захранващите (момент 1) и на приемните (момент 2) електроди

ГЛАВА IV. ПРЕДАВАНЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ДАННИТЕ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА

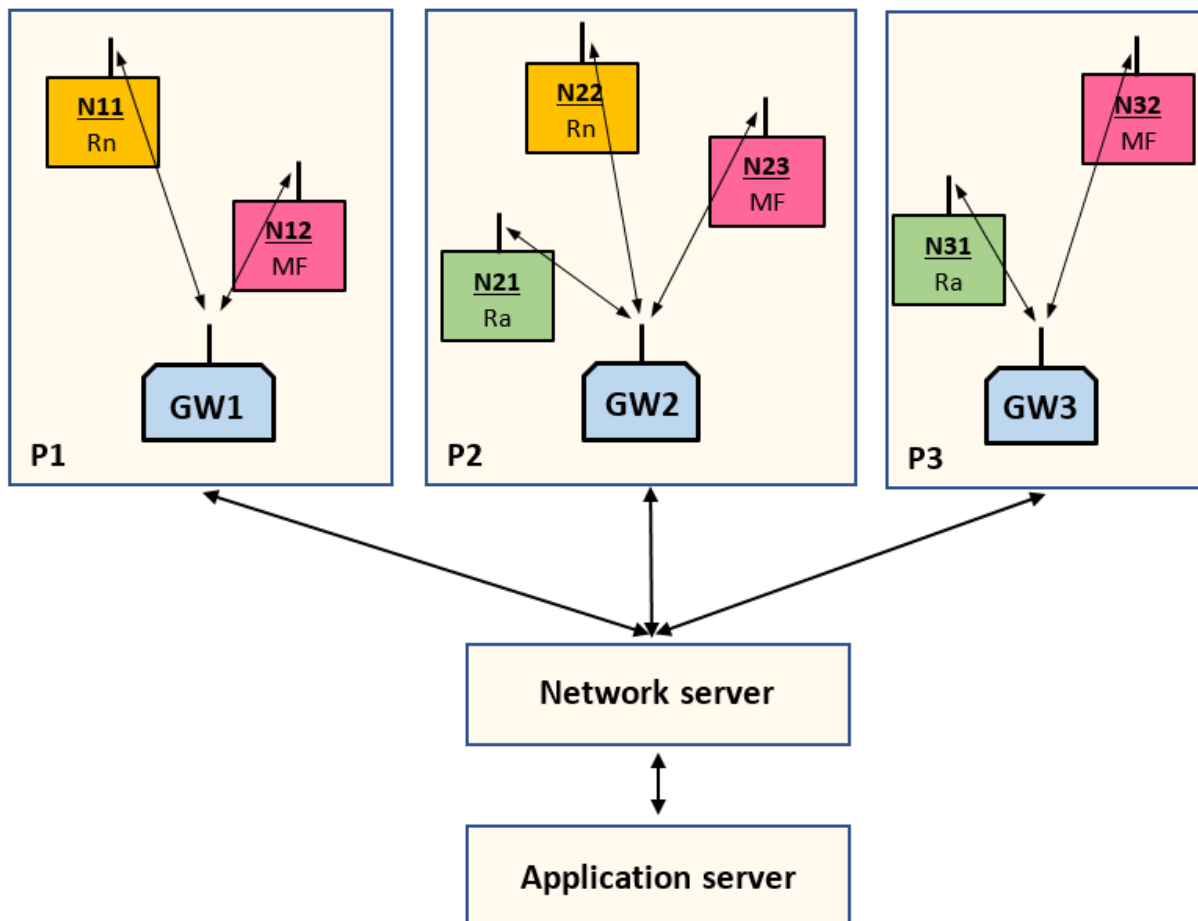
4.1 Въведение

При проектирането на системата за предаване и визуализация на данни бяха дискутирани два подхода – създаване на LoRaWAN мрежа и използване на IoT платформа Thingspeak.

4.2 Преглед на протокола LoRaWAN

В този параграф са разгледани мрежовата архитектура на протокола, LoRa модулацията, използвана във физическия слой, структурата на пакета в него, класовете крайни устройства, механизмите за осигуряване на надеждна комуникация и за присъединяване на крайните устройства към мрежата както и LoRaWAN сървърите.

На фиг. 4.6. е показан общ план на LoRaWAN система за получаване на данни от полигони за наблюдение на предвестници на земетресения.



Фиг. 4.6. *Общ план на LoRaWAN система за получаване на данни от три полигона за наблюдение на предвестници на земетресения*

Тук с P1, P2 и P3 са означени полигоните, с GW1, GW2 и GW3 – концентраторите за съответния полигон, с N11-N32 са отделните възли, към които са включени сензорите, напр. за радон (Rn), магнитни полета (MF), Ra (привидно съпротивление и метеорологични параметри). Ако в рамките на някой полигон разстоянието между даден възел и концентратора е голямо, могат да се поставят допълнителни репитер или концентратор.

4.3 Преглед на платформата ThingSpeak

Разгледани са общите характеристики, методите за четене и запис на данни в каналите, за осигуряване на сигурността, приложенията за обработка на данни и взаимодействията между тях, както и ограниченията на безплатния лиценз за некомерсиална употреба.

4.4 Избор и реализация на концепция за предаване, обработка, визуализация и съхранение на данните

Като вземе предвид, че:

- Проектирането на LoRaWAN мрежа трябва да бъде съобразено с конкретната конфигурация на крайните устройства и топологията на терена;
- Наличието към момента на само едно крайно устройство – това за измерване на геоелектрическото съпротивление;
- Трудоемкостта при разработката и поддържането на собствени LoRa сървъри;

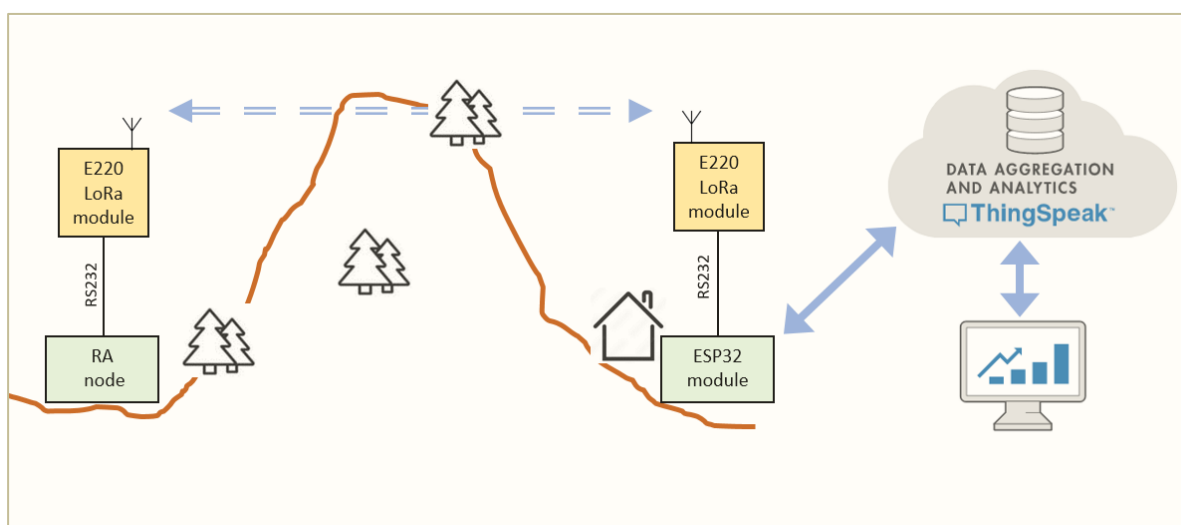
- Високата цена на LoRa концентраторите и ненадеждността при използването на популярни LoRa сървъри,

за изпълнение на поставените задачи, при избора на система за регистриране, обработка и визуализация на данните беше проектиран междинен вариант - използване на LoRa модулация за предаване на данните от крайното устройство до обикновен микроконтролер, който формира и изпраща пакетите с данни в Thingspeak канали.

Това решение има следните предимства:

- позволява натрупване, обработка и визуализация на данни от измерванията на геоелектричното съпротивление без настройка на LoRa и Application сървъри;
- позволява стартиране на автоматичен IoT анализ, базиран на събития или графици;
- скоростта на получаване на данните позволява използването на безплатен лиценз;
- цената на микроконтролера е значително по-ниска в сравнение с тази на LoRa концентратор;
- използването на LoRa комуникационен модул в крайните устройства ще улесни един бъдещ преход към LoRaWAN при нарастване на техния брой и закупуването на LoRa концентратор.

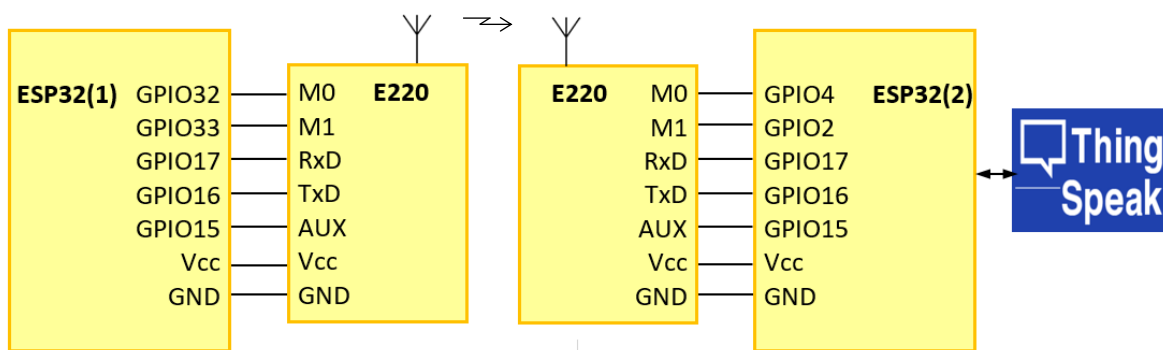
Предложената схема за получаване, обработка и визуализация на данни е показана на фиг. 4.8.



Фиг. 4.8. *Схема на приетата концепция за предаване, обработка и визуализация на данни от апаратурата за измерване на привидно съпротивление*

По нататък е аргументиран изборът на LoRa трансивър E220 на Ebyte. Описани са неговите предимства и режими на работа.

Схемата на свързване на двата LoRa модула, към микроконтролера на крайното устройство - ESP32(1) и към комуникаращото с Thingspeak устройство - ESP32(2) е показана на фиг. 4.10.



Фиг. 4.10. Схема на свързване на LoRa модулите към микроконтролерите

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата дисертация е свързана с изследванията за прогнозиране на земетресения и по-специално с регистрацията на един от утвърдилите се прогностични ефекти – промяната на електрическото съпротивление на земната кора в процеса на подготовка на земетресенията.

В глава първа от дисертационния труд е подчертана актуалността на проблема за получаването на данни за поведението на земното електросъпротивление преди и по време на земетресения. Извършено е проучване на натрупания опит в регистрирането на измененията на геоелектрическо съпротивление във връзка с подготовката на земетресения.

Разгледани са съществуващите методи и апаратура за измерването му. Анализирани са възможните източници на шум и начините за редуцирането им. Направен е анализ на резултатите от наблюденията на вариации на привидното съпротивление в процеса на подготовка на земетресения.

В края на първа глава са формулирани целта и задачите на дисертационния труд.

В глава втора от дисертационния труд е проектирана апаратура за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление.

Определена е природата на смущаващите сигнали. Оценени са техните амплитуди, спрямо амплитудата на полезния сигнал при конкретната геометрия на установката и мощност на източника на ток в захранващата линия.

Извършено е симулационно изследване на усилвателя на напрежение в приемната линия при различни амплитуди на смущаващи сигнали и при различни стойности на входния филтриращ кондензатор в средата на Multisim. Симулирани са АЧХ на усилвателния тракт.

Приложени и анализирани са симулационните и реално получените осцилограми на сигналите преди и след усилването им.

Проектирани и реализирани са модули за калибровка и проверка. Направена е оценка на грешката от измерванията на геоелектричното съпротивление.

Проектиран е отделен модул за измерване на метеорологични параметри.

Апаратурата за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление е реализирана следвайки последните иновативни постижения на получаването, обработката, предаването и регистрацията на сензорни данни.

В **трета глава** от дисертационния труд се описва хардуерната реализация на апаратурата за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление и измерване на метеорологични параметри. Показани първите резултати от работата ѝ.

Апаратурата е монтирана в землището на с. Дунево, обл. Смолян.

Обяснен е алгоритъмът на работа на програмата на микроконтролера, управляващ измерванията. Показани са фрагменти от софтуерния код.

Данните се предават с помощта на LoRa модул към базова станция.

Показани са получените данни от регистрацията на геоелектрическото съпротивление и метеорологичните параметри за седем месечен период заедно с реализираните земетресения с магнитуд по-голям от 2.5 и епицентрални разстояния до 100км от установката. Описан е алгоритъм за премахване на отклоненията и изглаждане на суровите данни.

Извършена е крос-корелация с температурата и количеството на валежите.

Изследвано е влиянието на засушаването върху контактното съпротивление на електродите, а от там и върху величината на работния ток и измерваното геоелектрично съпротивление.

Обемът на получените данни е недостатъчен за извеждането на връзка между вариациите на геоелектричното съпротивление с реализираните земетресения през периода на наблюдение.

В **глава четвърта** от дисертационния труд са разгледани два възможни варианта на реализация на предаването, съхранението и визуализацията на получаваните данни от апаратурата за измерване на геоелектрическото съпротивление. Обоснован е изборът на един от тях, като вторият, като по скъп и трудоемък е отложен за реализиране след нарастване на броя на наблюдаваните предвестници и обединяването им в полигони.

Избрани са и са програмирани подходящи модули за прехвърляне на данните от полевата част на апаратурата до канал на Thingspeak – облачна платформа с възможност за съхранение, обработка и визуализация на получаваните данни.

Написана е MATLAB програма за обработка на данните, която работи автоматично.

Написан е и HTML код на WEB страница за визуализация на данните от станцията в реално време. Страницата е качена на безплатен WEB домейн.

Възможността за прогнозиране на земетресенията има важно социално и стопанско значение. Изводът, който се налага е че, прогнозата на земетресенията трябва да бъде краткосрочна, базирана на наблюдавани физически явления. Според някои автори, основната причина за липсата на успех в другите страни освен нееднозначността на прекурсорите е и съсредоточаването на по-голямата част от финансовите и човешки ресурси в укрепване на сеизмографските мрежи, които обикновено не са ефективни за откриване на прекурсори, тъй като много от тях не са сеизмични.

Районът около и в България е силно засегнат от земетресения и други геодинамични бедствия. Въпреки това в нашата страна липсва Национален проект за прогнозиране на земетресения.

Усъвършенстването на инструменталните мрежи, свързани със съвременни комуникационни мрежи, са необходими условия за успешното развитие на района и измерванията за сеизмична защита и прогнозиране. Решение на тази задача е

създаване на широко сътрудничество между учените от региона на балканските страни за сеизмологични, строително - структурни, превантивни и прогнозни изследвания. Развитието на сеизмологията, земетръсното инженерство, защитата и превенцията на хората са правителствена задача и държавните институции трябва да подкрепят изследванията чрез финансиране от различни източници и създаване на условия за провеждането им.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

1. Изследвани и систематизирани са съществуващите методи, техники и средства в областта на регистрирането на измененията на геоелектричното съпротивление във връзка с подготовката на земетресения.

2. Анализирани са възможните източници на шум, начините за редуцирането им и резултатите от наблюденията на вариации на привидното съпротивление в процеса на подготовка на земетресения.

3. Показана и анализирана е регистрираната от автора аномалия при измерване на привидното съпротивление в района на гр. Стражица, след разрушителното земетресение от 07.12.1986г. ($M=5.7$). Предполага се, че наблюдаваната аномалия (~14%), предхождаща най-големия (за периода на наблюдение) афтершок, този от 11.05.1987г. ($M=3.6$), е свързана със сеизмичната активност.

4. Изследвано е влиянието на засушаването върху контактното съпротивление на електродите, респ. на стойността на работния ток и измерваното геоелектрично съпротивление. Извършена е крос-корелация с температурата и количеството на валежите.

Приложни приноси:

1. Проектирана и хардуерно е реализирана апаратура за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление и на метеорологични параметри. Монтирана е в землището на с. Дунево, обл. Смолян.

2. Реализирани са модули за калибровка и проверка на апаратурата за измерване на вариациите на геоелектрическото съпротивление. Направена е оценка на грешката от измерванията.

3. Представени са получени данни от регистрацията на геоелектрическото съпротивление и метеорологичните параметри за осем месечен период, заедно със записани земетресения с магнитуд по-голям от 2.5 по скалата на Рихтер и епицентрални разстояния до 100 км. Описан е алгоритъм за премахване на отклоненията и изглаждане на „суровите“ данни.

4. Софтуерно е осъществена възможност за регистрация, предаване, обработка, съхранение и визуализация на получаваните сензорни данни в облачна платформа. Създадена е програма в средата на MATLAB за обработка на данните от станцията и тяхната визуализация в реално време.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Светослав Хаджигенчев, Слави Любомиров. Апаратура за измерване на вариации на земно електросъпротивление. Сборник с доклади от Национална научна конференция с международно участие „Образование, наука, общество“, гр. Смолян, 3 – 4 ноември 2022, Университетско издателство „Паисий Хилендарски“, стр. 1092-1107, ISBN 978-619-7663-43-3 (online), 2022.

2. Светослав Хаджигенчев. Регистриране на промени в земното електросъпротивление в района на сеизмична станция „Рожен“ (RZN), Южна България. Трета национална научна конференция “Човекът и Вселената”, Съюз на учените в България – Смолян, 25–26 ноември 2021, Научни трудове на Съюза на учените в България – Смолян. Том 3, част 3, ISSN:1314-9490 (online), стр.631-636, 2022;

3. Светослав Хаджигенчев. Промени на привидното съпротивление в района на Стражица след земетресенията през 1986г. Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив. Серия В. Техника и технологии. Том XX, ISSN 1311-9419 (Print); ISSN 2534-9384 (Online), стр. 31-35, 2022.

4. Светослав Хаджигенчев. Система за непрекъснат мониторинг на шум в околна среда. Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив. Серия В. Техника и технологии. Том XX, ISSN 1311-9419 (Print); ISSN 2534-9384 (Online), стр.24-30, 2022.

5. Светослав Хаджигенчев. Камера за калибриране на радон монитори. Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив. Серия В. Техника и технологии. Том XIX, ISSN: 1311-9419 (Print); ISSN 2534-9384 (Online), стр. 66-72, 2021.