

Назва роботи:
Електронний блок аналізу для металошукача
Шифр: **Металошукач**

2020

АНОТАЦІЯ

Метою роботи «Електронний блок аналізу для металошукача» є розробка блоку аналізу для металошукача, що складався б із мінімальної кількості функціональних вузлів, потребував мінімальну кількість налаштувань і міг давати коректну інформацію про наявність і тип металу в незалежності від завад, обумовлених навколишнім середовищем.

У роботі розглянуто базові принципи роботи металошукачів, фізичне підґрунтя їх роботи, проаналізовано фактори, що впливають на процес детектування, здійснено пошук існуючих патентних рішень. Розроблено структурну схему, що містить в собі всі необхідні блоки для функціонування пристрою: драйвер передавальної котушки, вхідний підсилювач, блоки для індикації результатів, стабілізатори напруги. Використовується АЦП вбудований в мікроконтролер, також всі обчислення, обробка і виведення результатів виконується в мікроконтролері. Спроектовано схему електричну принципову, виконано вибір елементної бази і проведено розрахунки схеми, що підтверджують її працездатність. Виконано проектування програмного забезпечення для блоку аналізу.

Основні наукові положення роботи апробовано на 2-х конференціях: XII міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка – 2019» (23-24 квітня 2019р.) і XVIII Всеукраїнській науковій конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка» (18 – 19 квітня 2019р), і опубліковано:

- у науковому журналі «Електронна і Акустична інженерія», том 2, №4 2019 р., с.22 - 27
- у збірнику тез XVIII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка» – КНУТД, 2019р., с 29-30

За матеріалами роботи було здійснено впровадження спроектованого пристрою на базі ТОВ «УНІВЕРСИТЕТ СЕДІКОММ».

Ключові слова: металошукач, дискримінація, фазовий детектор, зсув фаз, цифрова обробка сигналів.

ЗМІСТ

Вступ	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА ДИСКРИМИНАЦІЇ МЕТАЛІВ І ВИБІР ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПРИСТРОЮ	5
1.1 Аналіз принципу роботи металошукача	5
1.2 Аналіз існуючих типів металошукачів. Патентний пошук	8
Висновок до розділу	13
РОЗДІЛ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ	14
2.1 Розробка структурної схеми та принцип роботи модулю	14
2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази	18
2.3 Розробка і розрахунок схеми електричної принципової.....	20
Висновок до розділу	23
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	24
3.1 Загальний алгоритм обробки даних.....	24
3.2 Підтримка роботи з аналого-цифровим перетворювачем	26
3.3 Підтримка роботи з дисплеєм.....	27
Висновок до розділу	27
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	31
Додаток А. Схема електрична принципова	
Додаток Б. Алгоритм роботи програмного забезпечення	
Додаток В. Перелік елементів	

Вступ

Металошукач (металодетектор) – електронний пристрій, що дозволяє визначати наявність металевого предмету в полі його дії за рахунок провідності матеріалу. Пристрій може визначати наявність металу в будь-якому середовищі (грунт, вода, дерево, організм людини і т.д.). Завдяки таким властивостям, металошукачі знайшли своє застосування у археології, військовій справі, на пунктах пропуску і в любительських цілях.

У сучасному світі доводиться стикатися із великою кількістю різних металів, тому постає проблема вирішення одного типу металу від всіх інших. Така функція металошукачів називається дискримінація. Дискримінація металошукача (metal detector discrimination – англ.) – функція, що дозволяє розпізнавати помічені об’єкти по типу металу та класифікувати їх [1].

Сучасні високоточні металошукачі містять в собі велику кількість функціональних блоків, складні в налаштуванні й використанні, чутливі до завад, обумовлених навколишнім середовищем і відносяться до досить високого цінового діапазону.

Метою даної роботи є обрання принципу роботи пристрою шляхом дослідження наукових основ металодетектування і розробка блоку аналізу для металошукача, що складався б із мінімальної кількості функціональних вузлів, потребував мінімальну кількість налаштувань і міг давати коректну інформацію про наявність і тип металу в незалежності від завад, обумовлених навколишнім середовищем.

Для вирішення даного завдання розглянуто існуючі методи й підходи до побудови даних пристроїв. Можна стверджувати, що в наш час немає певного універсального пристрою, що мав би необхідний для звичайного користувача функціонал, був стійким до завад навколишнього середовища і при цьому був би зручним і простим у використанні і потрапляв би у конкурентно спроможний ціновий діапазон. Тому є актуальною проблема побудови власного пристрою з використанням базових підходів побудови апаратури даного типу, який відповідав би заявленим вимогам.

В ході виконання роботи планується вирішити задачі по вибору дієвого методу детектування металів, виконати схемотехнічне проектування, виконати конструкторсько-технологічні розрахунки електронного вузла, розробити алгоритм роботи програмної частини і вихідний код для металошукача.

Практична новизна. В роботі запропоновано архітектуру для блоку аналізу металошукача, що має можливість зчитувати отримані дані, проводити їх обробку і відображати результат вимірів. Суттєвим доповненням принципу роботи пристрою є надання можливості автоматичного проведення корекції вимірювальної шкали приладу з метою урахування особливостей навколишнього середовища. Реалізація електронної частини блоку на основі високопродуктивного і одночасно недорогого мікроконтролера серії STM32 з широким спектром вбудованих функціональних можливостей, по-перше, дозволила розширити функціональні можливості існуючих аналогічних пристроїв і розробити систему, яка будучи здатною детектувати й розрізняти метали, є простою в реалізації, налаштуванні й використанні, і, по-друге, сприяла зниженню апаратних витрат, що безумовно позитивно позначилося на надійності пристрою і його вартості.

Практичне значення. Пристрій призначений для функціонування з давачами з діапазоном робочих частот 4-16 кГц. Здатен здійснювати передачу на них керуючих сигналів, прийняття інформаційних сигналів, їх обробку та вивід на індикатори, забезпечувати розпізнавання металів за їх типом. Розробка націлена на використання у якості портативного приладу для пошуку чорних і кольорових металів, що знаходяться в ґрунті, у польових умовах. Результати роботи впроваджено у ТОВ «УНІВЕРСИТЕТ СЕДІКОММ».

У роботі досліджуються методи детектування й розрізнення металів, розглядаються засновані на них принципи роботи відповідних пристроїв, аналізуються їх недоліки і переваги та обирається принцип, який у найбільшій мірі сприяє досягненню поставленої цілі. Також в роботі наведено основні результати практичної реалізації наукових досліджень у реальному пристрої, а саме: рішення з схемотехнічного проектування (обґрунтований вибір елементної бази, схема електрична принципова і розрахунки, що підтверджують правильність цих рішень), а також рішення з програмного забезпечення (алгоритм і програма для мікроконтролера, що підтримує процеси зчитування і обробки даних металошукача і прийняття рішень з детектування і розпізнавання металів за їх типом).

Нажаль, через обмеження в обсязі робіт, що подаються на конкурс, в представлені матеріали, не увійшли виконані автором конструкторські рішення, що не сприяє формуванню уявлення про роботу, як цілком завершену науково-технічну розробку, якою вона в дійсності є.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА ДИСКРИМИНАЦІЇ МЕТАЛІВ І ВИБІР ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПРИСТРОЮ

Металошукач (металодетектор) – електронний пристрій, що дозволяє визначати наявність металевих предметів в полі його дії за рахунок провідності матеріалу. Пристрій може визначати наявність металу в будь-якому середовищі (грунт, вода, дерево, організм людини і т.д.). Завдяки таким властивостям, металошукачі знайшли своє застосування у археології, військовій справі, на пунктах пропуску і в любительських цілях.

Металошукач повинен вирішувати задачу селективного виявлення певних металевих або металовмісних об'єктів пошуку на тлі різних завад навколишнього середовища (наявність металовмісних мінералів у ґрунті, у користувача металошукача, радіохвиль і т.д.). Селективне виявлення - здатність встановити факт наявності об'єкта пошуку на тлі завад і не давати помилкових сигналів за відсутності об'єктів пошуку. Селективне виявлення може здійснюватися тільки при наявності у об'єктів пошуку характерних ознак. Під цими ознаками розуміються будь-які постійні їх властивості, які виявляються металошукачем.

1.1 Аналіз принципу роботи металошукача

Металошукачі можуть виявляти об'єкт пошуку за рахунок магнітного поля, яке генерують самі. Такі металошукачі працюють за принципом передачі магнітного поля і аналізу зворотного сигналу від металевої цілі і середовища. Вони зазвичай складаються із передавача, через який протікає змінний в часі електричний струм $I_{prim}(r)$. Передавач генерує магнітне поле $B_{prim}(r, t)$, що змінюється в часі і поширюється в напрямку металевого об'єкту і в інші напрямки. Змінне магнітне поле, що передається, призводить до виникнення електричних струмів $J_{eddy}(r, t)$ в металевих мішенях. Ці електричні струми мають природу вихрових струмів, які, у свою чергу, генерують вторинне магнітне поле $B_{sec}(r, t)$. Це магнітне поле відрізняється від переданого. Саме воно детектується приймачем, перетворюється в напругу або струм $S_{sec}(r, t)$ і далі обробляється необхідними блоками. Всі величини залежать від відстані до

об'єкта r . Весь процес умовно записаний формулою, а також схематично відображений на рисунку 1.1:

$$I_{prim}(t) \rightarrow B_{prim}(r, t) \rightarrow J_{eddy}(r, t) \rightarrow B_{sec}(r, t) \rightarrow S_{sec}(r, t) \quad (1.1)$$

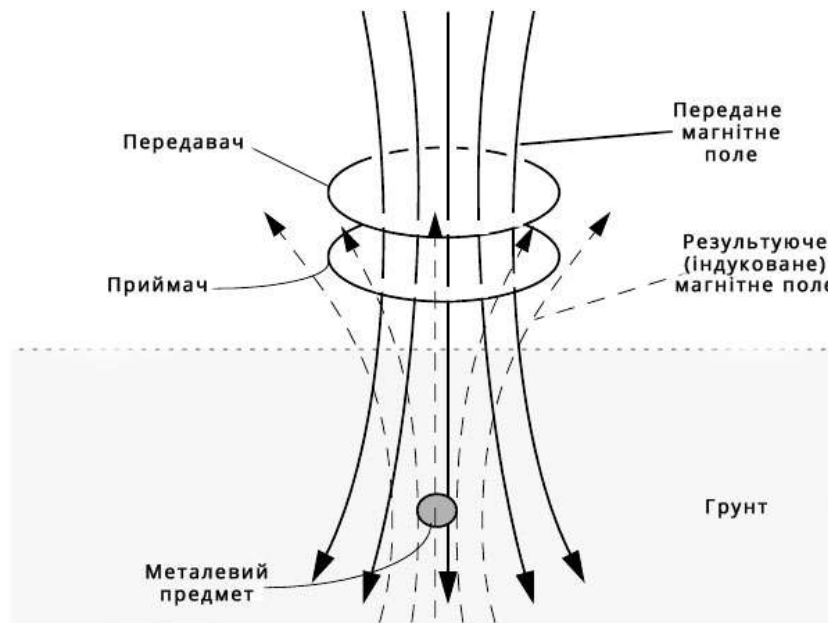


Рисунок 1.1 - Схематичне зображення переданого/результуючого магнітного поля

Результуюче магнітне поле змінне в часі і залежить від ряду факторів: відстань до об'єкта і його орієнтація у просторі, властивості об'єкта (його розмір, форма, провідність, магнітна проникність), наявність фонового сигналу (від ґрунту, інших джерел електромагнітного випромінювання) [2].

Результуюче поле обумовлене вихровими струмами [3], які індукуються переданим полем у провідних об'єктах ($J_{eddy}(r, t)$ у (1.1)). Метали з низькою провідністю, такі як деякі сплави сталі і нержавіюча сталь, в цілому більш важко виявити, тоді як реакція детектора збільшується для феромагнітних об'єктів через високе значення їх відносної магнітної проникності μ_r . Вихрові струми обумовлені змінними у часі магнітними полями і в основному визначаються законом індукції (Закон Фарадея). Вони циркулюють переважно на поверхні металевих об'єктів («скін-ефект» [4]). Як правило, великі об'єкти будуть генерувати більше вихрових струмів, але вдвічі товщий об'єкт не буде знайдений вдвічі глибше, бо поле дуже швидко затухає з відстанню. Густина вихрових струмів також зростає в об'єктах з більш високою провідністю. Скін-ефект вказує на те, що електромагнітне поле затухає в провідному середовищі пропорційно

$e^{-\frac{r}{\delta}}$, де r - відстань від поверхні, а δ - характерна глибина проникнення, товщина скін-шару [6]. Вихрові струми генерують магнітні поля, протилежні переданому (Закон Ленца). Товщина скін-шару δ залежить від частоти f , від магнітної проникності μ і провідності σ матеріалу наступним чином:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.2)$$

Наприклад, у випадку міді це призводить до глибини проникнення в матеріал на частотах $f_1 = 2$ кГц і $f_2 = 20$ кГц, відповідно 1,5 і 0,47 мм. Такі значення частоти вибрані для розрахунку виходячи із міркувань робочої частоти пристрою, що проектується.

Зміна магнітного поля в залежності від відстані

Для прикладу візьмемо котушку індуктивності радіусом R , через яку протікає струм I і яка має N витків. Тоді передане поле B_{prim} матиме наступну залежність від відстані d від котушки [5]:

$$B_{prim}(d) = \frac{N\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1.4)$$

де: N – кількість витків котушки;

μ_0 – магнітна стала ($\frac{\Gamma_H}{M}$);

I – сила струму, що протікає в котушці (А);

R - радіус котушки (м);

d – відстань від площини котушки до заданої точки (м).

Маємо, для трьох різних випадків, коли: 1) $d = 0$; 2) $d = 2R$; 3) $d \gg R$:

$$1) B_{prim}(0) = \frac{N\mu_0 I}{2R}; 2) B_{prim}(2R) \approx \frac{1}{11} B_{prim}(0); 3) B_{prim}(d) \approx \frac{\mu_0 N I \pi R^2}{2\pi d^3}; \quad (1.5)$$

Таким чином, поле зменшується з кубом відстані d від котушки при відстані від котушки набагато більше ніж її радіус. Фактична поведінка дальніх полів, насправді, не залежить від точної форми котушки, а лише від її дипольного моменту $M = N I \pi R^2$. Тому можна зробити висновок, що менші котушки забезпечують кращу чутливість (в ближньому полі) і просторову роздільну здатність, але не дозволяють детектувати об'єкти глибоко.

1.2 Аналіз існуючих типів металошукачів. Патентний пошук

Всі металошукачі можна умовно поділити на дві великі підгрупи: металошукачі, що отримують результат в часовій області; металошукачі що отримують результат в частотній області.

1.2.1.Металошукачі, що отримують результат в часовій області.

Патент US005576624A «Pulse induction time domain metal detector» [6]. Автор Bruce H. Candy, рік видання 1996. Принцип роботи, описаний в патенті, наступний: передаються короткі імпульсні сигнали через котушку. Вихрові струми індукуються в провідних об'єктах, що знаходяться в полі дії; результуюче магнітне поле матиме експоненціальний характер затухання; аналізуючи час цього затухання, можна визначити наявність металевих предметів або його відсутність. Час затухання вихрового струму залежить від провідності, магнітної проникності і розміру об'єкту.

Переваги даного типу металошукачів: відсутність високих вимог до конструкції котушок; відносна незалежність від малих переміщень; можливість довільного розташування приймальної і передавальної котушок (так як пряме проникнення випромінюваного сигналу в приймальню котушку і дія на неї зворотного сигналу рознесені в часі). Одна котушка може виконувати роль як приймальної, так і передавальної, проте в даному випадку набагато складніше буде розв'язувати високовольтні вихідні ланцюга генератора імпульсів струму і чутливі вхідні кола.

До принципового недоліку імпульсних металодетекторів слід віднести складність реалізації на практиці дискримінації об'єктів за типом металу, високі технічні вимоги до апаратури генерації і комутації імпульсів струму і напруги великої амплітуди, і погана завадостійкість. Тому даний тип металошукачів був відкинутий, через складність реалізації дискримінації об'єктів по типу металу, що є однією із основних вимог до пристрою, що проектується.

1.2.2.Металошукачі, що отримують результат в частотній області.

Даний тип металошукачів використовує той ефект, що металевий предмет, поміщений в гармонійне магнітне поле, сам стає джерелом змінного магнітного поля, що змінюється з тією ж частотою. Характерними ознаками об'єкта пошуку

є особливості його амплітудно-частотних (АЧХ) і фазочастотних (ФЧХ) характеристик. Тобто електрофізичні властивості матеріалу об'єкта пошуку, а також геометричні розміри призводять до того, що амплітуда і фазовий зсув сигналу, що генерується об'єктом пошуку, будуть мати виразні відмінності в залежності від матеріалу об'єкта. Також у даному типі металошукачів можна легко зменшувати вплив електромагнітних завад, небажаний сигнал від ґрунту, а також реагувати/не реагувати на певний тип металів.

Найбільш поширеними підходами реалізації металошукачів, що отримують результат в частотній області, є металошукачі основані на «биттях» (BFO – beat frequency oscillator - англ.) і металошукачі основані на балансі індукції між приймачем і передавачем.

1.2.2.1 Перший тип металошукачів BFO має принцип роботи, що полягає в реєстрації різниці частот від двох генераторів, один з яких є стабільним по частоті, а інший містить датчик - котушку індуктивності в своєму частото задаючому ланцюзі. Прилад налаштовується таким чином, щоб під час відсутності металу поблизу датчика частоти двох генераторів збігалися або були дуже близькі за значенням. Наявність металу поблизу датчика призводить до зміни його параметрів і, як наслідок, до зміни частоти відповідного генератора. Ця зміна дуже мала, однак зміна різниці частот двох генераторів вже істотна і може бути легко зареєстрована [7].

Патент US3467855 «Object Detector and Method for Distinguishing Between Objects Detected Including a Pair of Radio Oscillators» [8]. Автор Edwin Rance, рік видання 1969.

Переваги даного типу металошукачів: можливість реалізації лише з одною котушкою. Більш явних переваг в порівнянні з іншими типами немає. Саме тому такі металошукачі сьогодні майже не виробляються і не використовуються.

До недоліків можна віднести нестабільність роботи (пов'язана із можливістю зміни частоти генерації при зміні температури чи вологості повітря, що викликає появу хибних сигналів), складність реалізації дискримінації об'єктів, неможливість працювати з різними типами датчиків (тобто схема користувачем вручну налаштовується на конкретний датчик). Тому даний тип металошукачів в подальшому також не розглядатиметься.

1.2.2.2 Другий тип металошукачів, що працюють в частотній області, є заснований на принципі балансу індукції між передавачем і приймачем (ІВ – induction balance).

Для даного типу детекторів котушки часто розташовуються так, щоб мати якомога меншу взаємну індуктивність, коли немає об'єкта пошуку в області дії, щоб виокремити різницю між ситуацією коли предмет є і коли немає. Таким чином, положення котушок є дуже важливим.

Отриманий із приймача сигнал можна представити графічно (Рисунок 1.4) і описати формулою:

$$V_{sec}(t) = A_{sec} \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.6)$$

де: $V_{sec}(t)$ – вхідний сигнал;

$A_{sec}(t)$ – амплітуда сигналу у визначений момент часу t ;

ω – кутова швидкість вхідного сигналу в $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

t – момент часу; φ – зсув фази між переданим і отриманим сигналом.

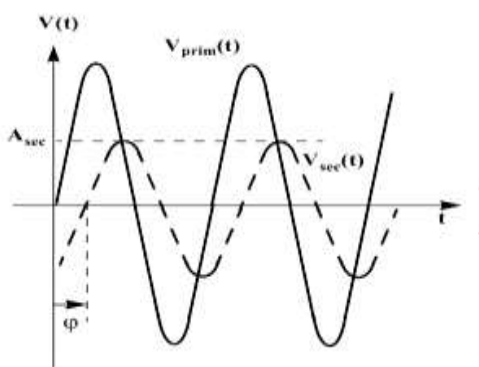


Рисунок 1.4 - Переданий V_{prim} та отриманий V_{sec} сигнали як функція від часу (A_{sec} – амплітуда отриманого сигналу, φ – зсув фаз)

Оскільки будь-який метал має властивості резистивності і властивості індуктивності, то отриманий сигнал від металу можна розкласти на дві складові [9]:

- квадратурна складова V_X – має ту ж саму форму сигналу, що й сигнал передачі, але в міру індуктивності цілі, отриманий сигнал зміщений в часі відносно переданого сигналу (різниця фаз).
- синфазна складова V_R – також має ту ж саму форму сигналу, що й переданий сигнал, але в міру резистивності цілі змінюється амплітуда отриманого сигналу.

В результаті отриманий сигнал можна записати:

$$V_{sec}(t) = A_{sec} \sin(\omega t + \varphi) = V_R \sin(\omega t) + V_X \cos(\omega t), \quad (1.7)$$

де $V_R = A_{sec} \cos(\varphi)$;

$V_X = A_{sec} \sin(\varphi)$.

Прийнятий сигнал V_{sec} можна зобразити як комплексне число:

$$V_{sec} = V_R + jV_X \quad (1.8)$$

Це можна графічно відобразити в полярній системі координат (Рисунок 1.5).

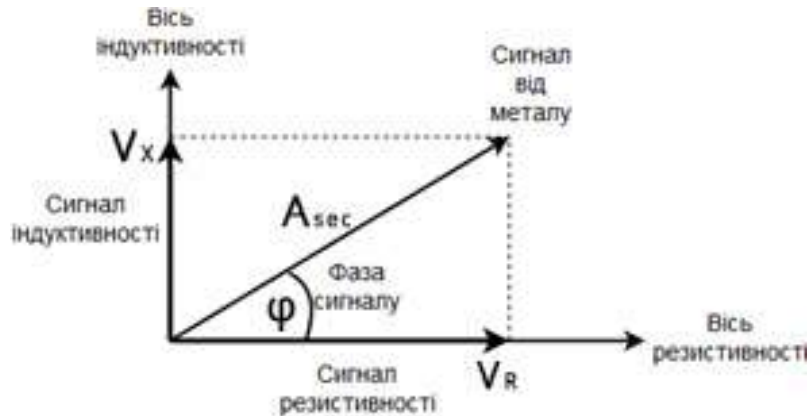


Рисунок 1.5 - Представлення отриманого сигналу в полярній системі координат
 Фазу сигналу, що розкладений на активну (R) і реактивну складові (X) знаходимо за формулою:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right), \quad (1.9)$$

де φ - фаза отриманого сигналу по відношенню до відправленого в $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Для того, щоб отримати фазу в градусах, скористаємося співвідношенням:

$$\varphi(\text{deg}) = \varphi * \frac{180}{\pi}; \quad (1.10)$$

Амплітуду отримуємо із формули:

$$A = \sqrt{X^2 + R^2}; \quad (1.11)$$

де: A – амплітуда у Вольтах.

Перевагами даного типу металошукачів є висока завадостійкість, обумовлена можливістю ефективної фільтрації в діапазонах частот, відмінних від робочих; можливість дискримінації об'єктів по типу металу залежності від зсуву фази між прийнятим і переданим сигналом; можливість нейтралізувати вплив ґрунту і підвищити чутливість до невеликих об'єктів. Недолік - необхідність особливої конструкції котушок.

1.2.2.3 В ході подальшого пошуку проаналізовано патент US4709213 «Metal Detector Having Digital Signal Processing» [10]. Автор Robert J.Podhrasky, рік видання 1997. В даному патенті пропонується використовувати засоби

цифрової обробки сигналів для проведення обрахунків, фільтрації, що дає підвищення швидкодії такого пристрою.

Дослідивши цей патент, було розглянуто його основну ідею, яку можна використати при проектуванні власного блоку аналізу.

Перевагами є: сучасність та актуальність методів керування (налаштування на ґрунт, інші джерела електромагнітного випромінювання); можливість застосування мікроконтролера (МК) для виконання обрахунків, що підвищує швидкодію пристрою вцілому; за рахунок зменшення кількості компонентів, підвищення надійності; спрощений та автоматизований метод налаштування.

Але при всьому цьому даний пристрій має наступні недоліки, які пропонується усунути у пристрої, який розробляється в даній роботі:

- розглянутий пристрій має окремий АЦП (аналого-цифровий перетворювач). У пристрої, що проектується, буде використано вбудований в МК АЦП, за рахунок чого можна спростити і здешевити конструкцію пристрою, підвищити надійність, збільшити точність отриманого результату;
- розглянутий пристрій може бути налаштований лише на одну котушку. У пристрої що проектується, передбачається можливість ручного або автоматичного налаштування на передавальну та приймальную котушки із можливістю зберегти налаштування у EEPROM (енерго-незалежній пам'яті), щоб після вимкнення живлення не проводити налаштування знову;
- у пристрої, що проектується, передбачається додати різні режими роботи (із дискримінацією чи без неї, різні способи індикації отриманого результату).

Висновок до розділу

У розділі розглянуто базові принципи роботи металошукачів, фізичне підґрунтя їх роботи, проаналізовано фактори, що впливають на процес детектування. Проаналізовано принцип роботи металошукачів, що отримують результат в часовій області і тих, що отримують в частотній області. Обрано металошукачі, що працюють в частотній області через більш простий механізм реалізації дискримінації об'єктів по типу металу. Проаналізовано за принципом роботи різні типи металошукачів, серед тих, що працюють в частотній області. Обрано металошукачі, що працюють на основі балансу індукції (ІВ – металошукачі).

В результаті аналізу готових рішень зроблено висновок, що вони мають недоліки такі, як складна схемотехніка, можливість працювати лише з одним типом приймальної й передавальної котушки. Тому прийнято рішення в ході проектування власного блоку аналізу розробити конструкцію, яка б мала можливість налаштування на конкретний тип котушки із можливістю запам'ятовування цих налаштувань в енерго-незалежній пам'яті, при цьому розширити функціональні можливості блоку, в порівнянні з аналогами – покращити схему підлаштування під ґрунт й інші джерела електромагнітного випромінювання, додати різні режими індикації отриманих результатів. При цьому використовувати прості схемотехнічні рішення, основні функції виконувати за допомогою мікроконтролера, який мав би необхідний набір вбудованих функціональних блоків та інтерфейсів. Це дасть можливість знизити собівартість пристрою і підвищити його надійність.

РОЗДІЛ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Розробка структурної схеми та принцип роботи модулю

З інформації, наведеної у розділі 1.2 обрано метод визначення зсуву фаз з використанням АЦП і обрахуванням ортогональних складових сигналу R і X .
Формули для обрахунку [11]:

$$R = \sum_{n=0}^{N-1} A_i[n] * \cos(2 * \pi * f_R * t[n]); \quad (2.1)$$

$$X = \sum_{n=0}^{N-1} A_i[n] * \sin(2 * \pi * f_R * t[n]); \quad (2.2)$$

де: $A_i[n]$ – вибірка вхідного сигналу;

f_R – частота сигналу, що передається(завідомо відома);

$t[n]$ – дискретний відлік часу, що відповідає вибірці вхідного сигналу.

Отримуємо R , як дійсну частину комплексного числа, а X – уявну частину.
Можна відобразити це в полярній системі координат (див. рисунок 1.5).

Вимірювання проводяться за допомогою АЦП. Для зменшення похибки вимірювань необхідно дискретизувати дані із великою частотою і квантувати з великою розрядністю. Виходячи з того, що для пошуку металу і його класифікації необхідно мати генератор сигналу, що передається, а також пристрій для виведення отриманих значень, доцільно використовувати мікроконтролер, який би містив у собі всі необхідні блоки (АЦП, генератор сигналів, блок обчислення, блок індикації). Для реалізації дослідного зразка необхідно мікроконтролер, який би містив в собі АЦП, необхідну кількість таймерів, володів великими обчислювальними можливостями.

Структурна схема блоку аналізу для металошукача наведена на рисунку 2.1. Блок складається з:

- мікроконтролера, в якому реалізовано генератор ШІМ-сигналу, використовується АЦП для зчитування даних, реалізовано блок фільтрації й обчислень, введення й виведення інформації, генератор звукової індикації;
- вхідного підсилювача;
- драйвера передавальної котушки;
- енергонезалежної пам'яті;
- підсилювача для звукового індикатора;

- дисплею для виведення інформації;
- звукового індикатора;
- стабілізаторів напруги для цифрової, аналогової частин схеми і драйвера для передавальної котушки;
- вимикач T1.

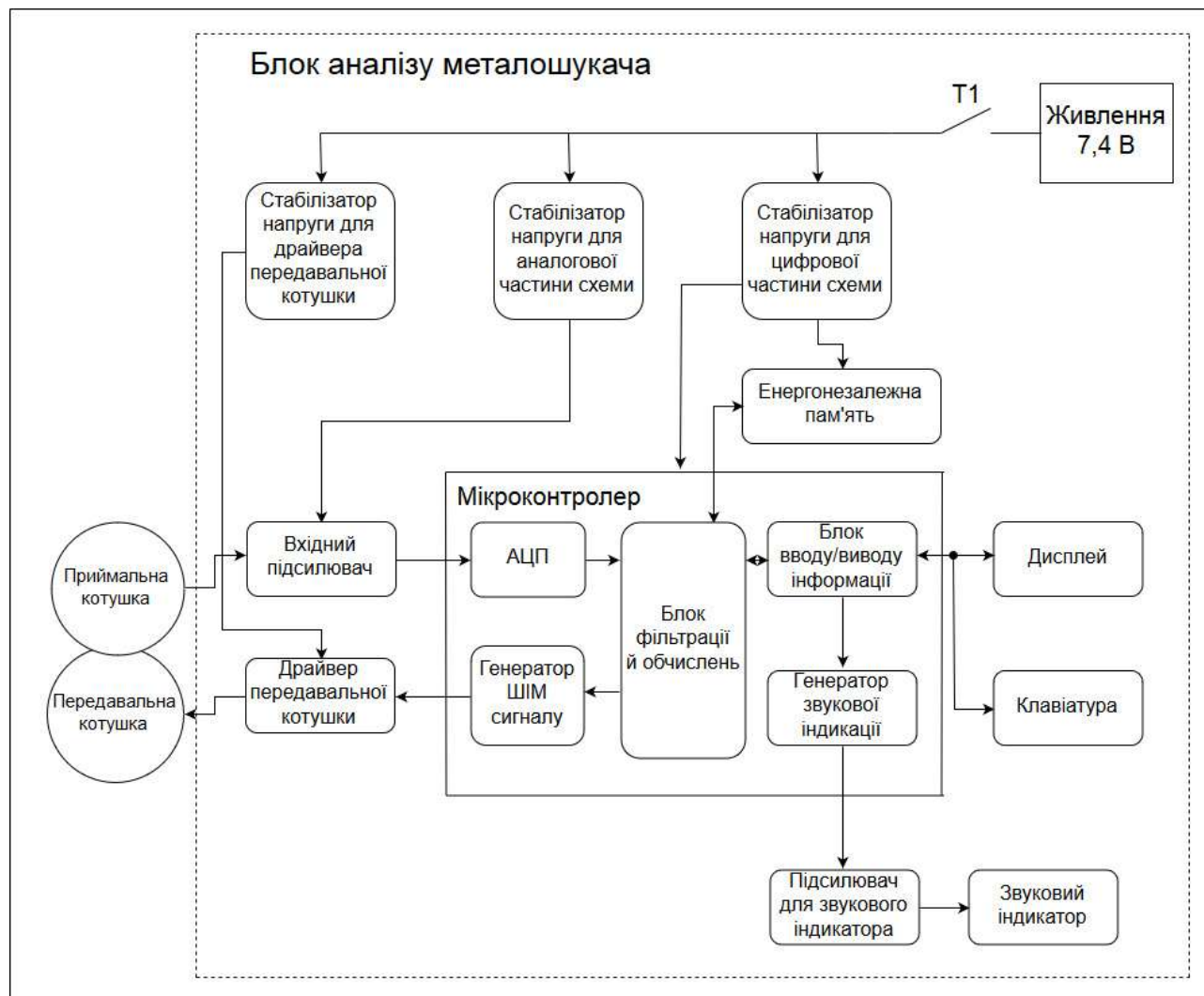


Рисунок 2.1 - Структурна схема блоку аналізу для металошукача

Розглянемо основні блоки схеми.

2.1.1. Генератор ШІМ-сигналу. Реалізований за допомогою вбудованого в мікроконтролер таймера. На виході отримуємо широтно-імпульсно модульований (ШІМ) сигнал, коефіцієнт заповнення якого можна змінювати. Доцільність такого рішення обумовлена тим, що основна інформація сигналу (тобто частота несучої, амплітуда) буде міститися на першій гармоніці ШІМ сигналу. Похибка, що з'являється в результаті більш високочастотних гармонік,

нехтовно мала в порівнянні із завадами, які генеруються навколишнім середовищем.

2.1.2. Драйвер передавальної котушки перетворює ШІМ сигнал у струм, необхідний для створення в котушці відносно сильного електромагнітного поля. Також даний драйвер виконує роль буфера для порту мікроконтролера, щоб не навантажувати його.

2.1.3. Вхідний підсилювач. Реалізований з використанням операційного підсилювача з частото залежним негативним зворотнім зв'язком, що розраховується для частоти сигналу, що передається. Такий підсилювач одночасно є смуговим фільтром, що дозволяє на початковій стадії не пропустити високочастотні завади у наступні блоки обробки.

2.1.4. АЦП. Використовується для зняття дискретних відліків сигналу, які в подальшому будуть відфільтровані й використані для обрахування фази й амплітуди отриманого сигналу. Кожен дискретний відлік зчитуються дані, які відправляються в блок фільтрації й обчислень.

2.1.5.Блок фільтрації й обчислень. Виконує необхідні розрахунки для знаходження фази й амплітуди сигналу (за формулами 1.9-1.11). Містить в собі на вході цифровий смуговий фільтр для відокремлення постійної складової із сигналу і зменшення високочастотних шумів у самому сигналі. Також в даному блоці враховуються калібрування і початкові налаштування для отримання коректних результатів.

2.1.6.Генератор звукової індикації. Необхідний для того, щоб крім візуального представлення результатів, виконувати звукову індикацію в залежності від отриманого значення зсуву фаз.

2.1.8.Дисплей. Є пристроєм візуалізації результатів. Відображає отримане значення різниці фаз між відправленим і отриманим сигналом, інформацію про струм в передавальній котушці і напругу живлення.

2.1.9.Звуковий індикатор. Реалізує функцію звукової індикації отриманих результатів і потребує підсилювача сигналу. Підсилювач необхідний для того,

щоб зменшити навантаження на порт мікроконтролера, а також для підсилення рівня сигналу.

2.1.10.Клавіатура. Необхідна для здійснення налаштування, калібрування, керування пристроєм.

2.1.11.Енергонезалежну пам'ять доцільно використовувати для запам'ятовування і збереження параметрів налаштування вимірювальної шкали пристрою між сеансами вимірювання і їх швидкого використання без повторного налаштування пристрою.

2.1.12.Окремі схемотехнічні і процедурні рішення.

Вибірку сигналів доцільно проводити 4 рази на період сигналу, що зчитується, оскільки це зменшує затрати на обчислення операцій множення, обрахунку синуса і косинуса в дискретний відлік часу. Таким чином відліки будуть збігатися з кутами 0, 90, 180, 270 градусів, тому значення \sin/\cos будуть 0, 1 і -1. Це дозволяє операцію множення замінити додаванням або відніманням, а також половину відліків виключити, оскільки вони множитимуться на нуль.

Синхронізація роботи АЦП відбувається сигналом, що передається, тобто фаза отриманого сигналу буде відкладатися від початку координат, відносно 0°.

2.1.13.Калібрування шкали вимірювань. Важливим є необхідність здійснення компенсації впливу природньо присутніх у ґрунті різних окислів металів на зсув фаз і амплітуду отриманого сигналу навіть при відсутності металевих предметів у досліджуваному ґрунті. Це виконується проведенням калібрування металошукача «по ґрунту», коли наперед відомо, що в ньому немає металу.

Також потрібно провести калібрування «по фериту». Це йде з того, що залізовмісні елементи мають більшу індуктивність, і як результат сигнал буде мати негативний зсув фази (від -90 до 0 градусів). А метали, що близькі до ідеальних провідників (срібло, золото) даватимуть позитивний зсув фаз від 0 до 90 градусів. Від фериту отримуємо найбільш негативний зсув фаз близький до -90 градусів, оскільки цей матеріал не має провідних властивостей, а містить

лише індуктивну складову. Приймаючи зсув фаз, який отримуємо від фериту, поміщеного в поле передавальної й приймальної котушки, за умовний нуль, як результат будемо мати, що залізовмісні метали даватимуть відносний зсув фаз від 0 до 90 градусів, а не залізовмісні – від 90 до 180 градусів.

2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази

Вибір елементної бази для пристрою, що проектується, здійснюється із міркувань забезпечити: необхідні електричні параметри із заданою точністю; коректну роботу пристрою в заданих кліматичних умовах; поліпшені масо-габаритні показники пристрою; достатню надійність пристрою і заданий термін працездатності.

Безпосередньо у проекті, що розроблено на основі результатів цієї роботи, кожне прийняте схемотехнічне рішення розглянуто більш досконально і підтверджено відповідними розрахунками. Зважаючи на обмеженість обсягу конкурсної роботи далі стисло приведено лише основні моменти з цього.

Схема містить пасивні компоненти, цифрові й аналогові мікросхеми, мікроконтролер.

2.2.1. Вибір мікроконтролера проводиться аналізуючи об'єм наявної флеш-пам'яті, оперативної пам'яті, швидкості виконання обчислень, наявності DSP-обчислювача і АЦП, наявності необхідних інтерфейсів, а також вартості й енергоспоживання. Для розгляду були вибрані найбільш популярні сімейства мікроконтролерів, представлених на ринку: ARM, AVR, PIC, 8051. Їх загальна порівняльна характеристика наведена в таблиці 2.1 [18, 19]. Як видно із порівняння, функціонал мікроконтролерів схожий. Але мікроконтролери із сімейства ARM мають переваги над іншими.

По-перше, висока тактова частота і спроможність виконувати більшість команд за один такт, дозволяють здійснювати обробку швидше. Також важливою характеристикою є наявність DSP-обчислювача, за допомогою якого можна виконувати арифметичні операції швидко й із заданою точністю.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика сімейств мікроконтролерів

Характеристика	Сімейство мікроконтролерів			
	8051	AVR	PIC	ARM
Розрядність системи	8 біт	8/32 біти	8/16/32 біти	32/64 біти
Система команд	CISC	RISC	RISC	RISC
Пам'ять	ROM, SRAM, FLASH	FLASH, SRAM	EEPROM, SRAM, FLASH	EEPROM, FLASH, SDRAM
Тактова частота	3,5-12 МГц	1-20 МГц	1-20 МГц	1-168 МГц
Тактів на інструкцію	12	1	4	1
Інтерфейси	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C, CAN, USB	UART, SPI, I2S, LIN, CAN, Ethernet, PIC	UART, I2C, I2S, SPI, CAN, LIN, Ethernet, USB, SAI, IrDA
DSP-обчислювач	-	-	-	+
АЦП	-	+	+	+
Енергоспоживання	Середнє	Низьке	Низьке	Низьке
Вартість	Низька	Середня	Середня	Низька

До того ж мікроконтролери даного сімейства мають низьке енергоспоживання й відносно низьку вартість. Серед мікроконтролерів сімейств ARM обрано мікроконтролер STM32F407VGT [12] від фірми STMicroelectronics.

2.2.2. Вибір мікросхем і пасивних елементів. Вибір мікросхем для реалізації аналогових схем підсилювачів проведено на основі порівняльного аналізу головними критеріями якого було обрано: струм споживання спокою – I_q ; смуга пропускання – BW ; T_{\min} , T_{\max} - максимально допустимі температури; коефіцієнт підсилення A_v ; діапазон вихідних напруг (при напрузі живлення 5 В) – V_{sw} ; вартість і позиція на ринку електронних приладів фірми-виробника.

Вибір пасивних елементів - резисторів, конденсаторів діодів, а також перемикачів, кварцового резонатора та дисплею проведено з міркувань

задоволення їх параметрів (номіналів, точності, стабільності, надійності, конструктивних особливостей і діапазонів робочих температур) вимогам, що виходять з виконуваних ними схемних функцій і умов експлуатації пристрою.

Перелік елементів до схеми наведений в додатку В.

2.3 Розробка і розрахунок схеми електричної принципової

В схемі необхідно передбачити наступні складові: елементи фільтрації і стабілізації напруги живлення, елементи скидання мікроконтролера в початковий стан, елементи фільтрації на виводах живлення мікросхем і елементи, що задають режими роботи підсилювачів, драйвери та інші складові схеми, які потребують певних робочих точок для коректної роботи.

У повному проекті пристрою здійснено доскональне обґрунтування, підтверджене необхідними розрахунками всіх основних блоків і вузлів схеми. За вже згаданих причин матеріали цього розділу конкурсної роботи відображають лише основні моменти і етапи здійсненого проектування пристрою.

2.3.1. Тактування і скидання мікроконтролера. У мікроконтролера є вбудований RC-генератор тактової частоти, але він має погану температурну стабільність частоти генерування (близько 1 % на кожні 25 °C зміни температури [12]), що є недопустимо, оскільки від частоти тактування залежить точність вимірів і часові затримки. Тому для тактування мікроконтролера застосовано зовнішній кварцовий резонатор на 8 МГц, частота якого для збільшення швидкості виконання обчислень і підтримки вбудованих інтерфейсів може підвищуватися за допомогою блоків ФАПЧ.

Після подачі живлення на схему, необхідно виконати її встановлення в початковий стан. Для цього на вхід скидання контролера NRST повинен подаватися і утримуватися протягом 1 мс сигнал низького рівня (не вище 2,09В) [12]. Процес скидання формується за допомогою RC-кола.

Напруга U_C , до якої зарядиться конденсатор за час t описується виразом:

$$U_C = U_m \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right], \quad (2.1)$$

де U_m – напруга, що прикладається до RC – кола ($U_m = 3,3$ В).

При обраних в схемі $R18=100$ кОм і $C13=100$ мкФ (див. додаток А) напруга на конденсаторі під кінець часу скидання 10 мс (тут обрано 10-кратний запас тривалості сигналу скидання) буде:

$$U_C = 3,3 * \left[1 - \exp \left(- \frac{10 * 10^{-3}}{100 * 10^3 * 100 * 10^{-9}} \right) \right] \approx 2,08 \text{ (В)}$$

Отже, протягом часу необхідного для скидання і встановлення мікроконтролера в початковий стан, напруга на вході NRST буде перебувати в стані активного рівня (сигналу скидання).

2.3.2.Перевірка вірності розрахунків моделюванням схеми. Результат розрахунків схеми скидання мікроконтролера перевірено у системі моделювання LTspice XVII. Результат представлений на рисунку 2.3.

Як видно з рисунку, сигнал від 0 до 2,09 В триває протягом більше 10 мілісекунд, отже підібрані номінали є правильними.

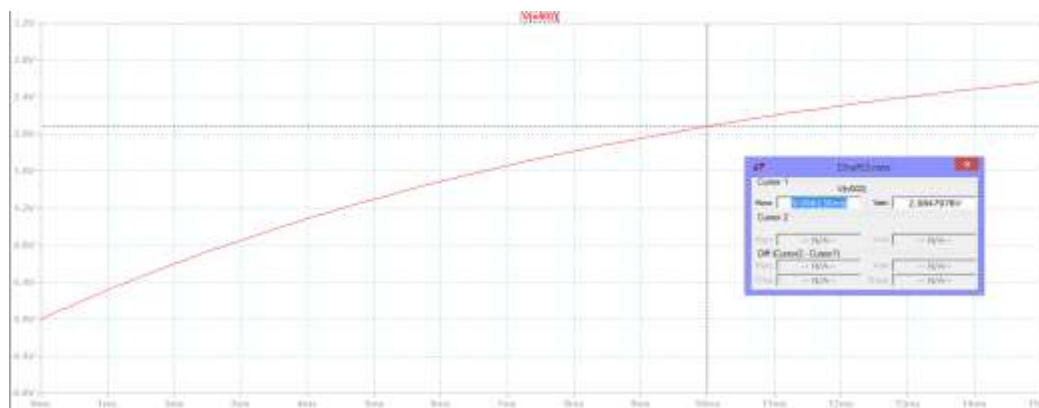


Рисунок 2.3 – Результат моделювання RC-кола у системі моделювання LTspice XVII

2.3.3.Драйвер передавальної котушки реалізований по напівмостовій схемі з використанням МОН-транзисторів.

Принцип роботи драйвера заключається в наступному: транзистор VT2 працює в режимі ключа і конвертує рівні напруги від 3,3 В до 5 В, оскільки на котушку передається сигнал амплітудою 5 В. Транзистор VT1 виконує роль повторювача напруги. Пари резистор R8 і діод VD4 і R9, VD5 застосовані для того, щоб виключити момент часу, коли через транзистори, що знаходяться у мікросхемі DA1, тече наскрізний струм, бо один із транзисторів ще не закритися, а інший вже почав процес відкриття. Таким чином ємність затвор-витік

транзисторів розряджається дуже швидко через діоди, а заражається через резистори повільніше, оскільки резистори обмежують струм заряду.

2.3.4. Моделювання роботи драйвера у середовищі LTspice XVII.

Результати зображені на рисунках 2.5-2.7.

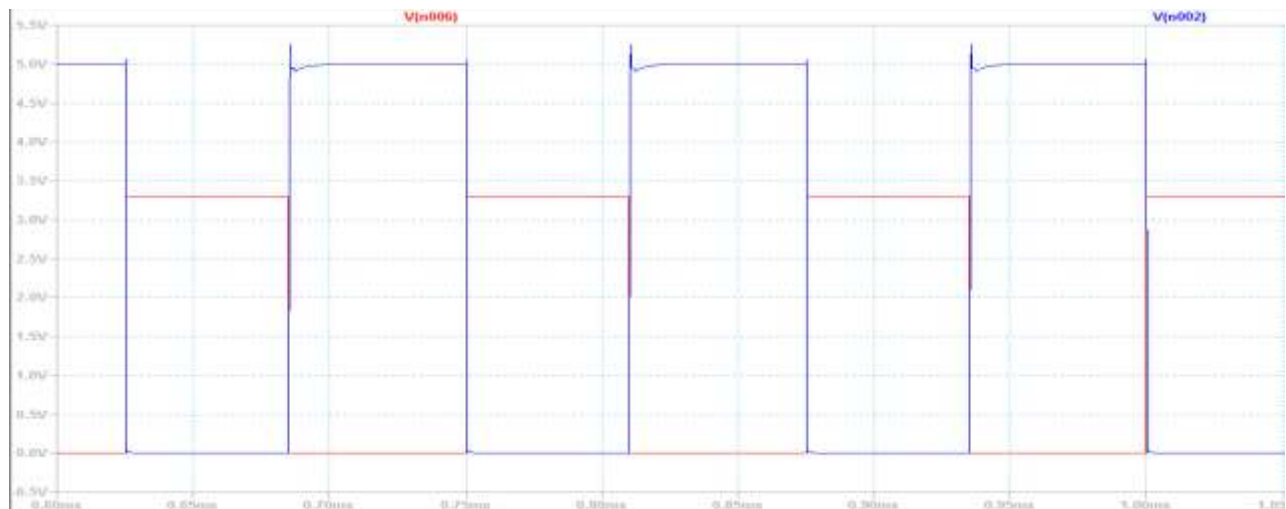


Рисунок 2.5 - Результат моделювання драйвера у системі моделювання LTspice XVII

На рисунку 2.5 сигнал $V(n006)$ – вхідний сигнал, а сигнал $V(n002)$ – сигнал на колекторі VT2. Бачимо конвертацію рівня напруги з 3,3 В до 5 В.

На рисунку 2.6 сигнал $V(n006)$ – вхідний сигнал, $V(n003)$ – сигнал на вході 4 мікросхеми DA1, $V(n008)$ – сигнал на вході 2 мікросхеми DA1. Можемо бачити, що між сигналом відкриття одного транзистора і закриттям другого транзистора є певна затримка, яка зменшує наскрізні струми.

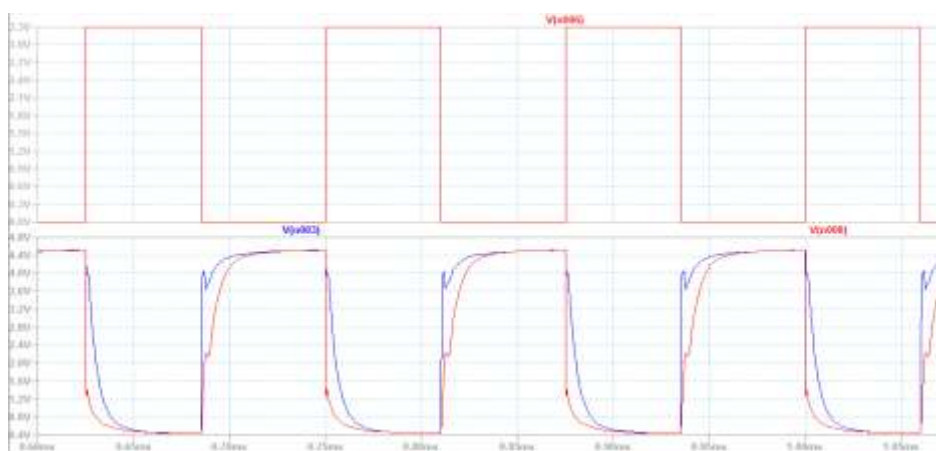


Рисунок 2.6 - Результат моделювання драйвера у системі моделювання LTspice XVII

На рисунку 2.7 можемо бачити, що сигнал з входу (V(n006)) майже без спотворень передається на вихід драйвера (V(n007)), що свідчить про коректну роботу самого драйвера і його проектування.

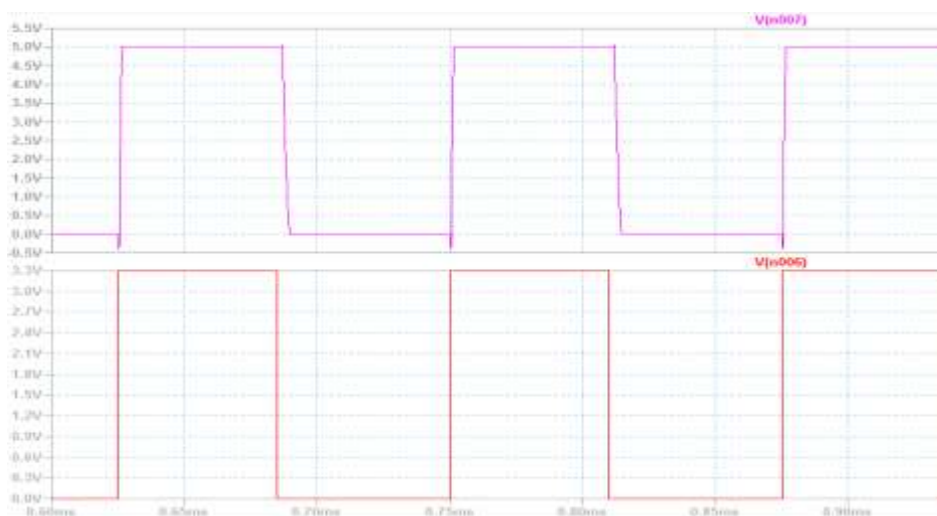


Рисунок 2.7- Результат моделювання драйвера у системі моделювання LTspice

XVII

Висновок до розділу

В даному розділі розроблена структурна і електрична принципова схеми пристрою. Структурна схема містить в собі всі необхідні блоки для функціонування пристрою: драйвер передавальної котушки, вхідний підсилювач, блоки для індикації результатів, стабілізатори напруги. Використовується АЦП вбудований в мікроконтролер. Також всі обчислення, обробка і формування даних для виведення результатів виконується в мікроконтролері.

При проектуванні принципової схеми окремі елементи схеми вибиралися згідно з рекомендаціями технічної документації для елементів. В блоках, де необхідно було виконати розрахунок, здійснено розрахунок номіналів резисторів і конденсаторів задля забезпечення правильного функціонування схеми, рівня вихідної напруги, коефіцієнтів підсилення. Для підтвердження розрахунків проведено моделювання окремих елементів схеми (коло скидання мікроконтролера, вхідний підсилювач, драйвер передавальної котушки) у системі моделювання LTspice XVII. Спроектowana схема електрична принципова повністю відповідає поставленим завданням і забезпечує коректне функціонування пристрою.

РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Загальний алгоритм обробки даних

Узагальнений алгоритм основної програми і обчислень наведений у додатку Б на рисунку Б.1.

Основна програма виконує опитування кнопок, якими обираються режими налаштування і роботи пристрою, і відображає отримані значення на дисплеї, а також виконує відповідну звукову індикацію.

Основні виміри й обробка отриманих даних проводяться в обробнику переривань від таймера.

Налаштування параметрів таймеру (періоду переривань) здійснено з урахуванням наступних міркувань. Діапазон робочих частот пристрою 4-16 кГц. Частоту вибірок для зчитування даних обрано рівно в 4 рази більшою частоти самого сигналу. Таке рішення обумовлено тим, що для детектування сигналу потрібно поточне значення сигналу помножити на значення \sin/\cos частоти, яку ми детектуємо. Відліки зроблені 4 рази на період будуть збігатися з кутами 0, 90, 180, 270 градусів і значення \sin/\cos у даних відліках будуть рівними 0, 1, -1 і 0. Таким чином половина операцій множення замінюється складанням, а половина виключається, так як рівна нулю. Переривання таймера запускає АЦП і отримує дані з нього раз за 4 періоди тактування передавача.

Для підвищення точності здійснюється усереднення сигналу з АЦП за 16 періодів частоти передавальної котушки (це 64 вибірки). Для накопичення значення дійсної і уявної частини сигналу використані змінні **Re**, **Im**. Для значення дійсної і уявної частини сигналу накопичене за 16 періодів використано змінні **re_value**, **im_value**.

Обробка сигналу кожен раз викликається різна. Для цього реалізовано кінцевий автомат, який збільшує швидкодію виконання обчислень.

Спрощений алгоритм роботи кінцевого автомата виглядає наступним чином: виконується власне зчитування сигналу у задані моменти часу і отримується значення дійсної **Re** й уявної **Im** частини сигналу; виконується обробка даних. Обробка даних складається з: обчислення амплітуди (квадратний

корінь з суми квадратів re_value , im_value); обчислення фази (арктангенс від частки im_value / re_value); фільтрації амплітуди за допомогою фільтра Бесселя другого порядку з частотою зрізу близько 5 Гц; детектування амплітуди і знаку відхилення сигналу в каналі амплітуди; детектування амплітуди і знаку відхилення сигналу в каналі фази; збереження даних про параметри імпульсу для відображення на дисплеї; керування звуком.

Детектування амплітуди і знаку відбувається порівнянням обчисленого поточного середнього сигналу з поточним відліком.

Вибір частоти зрізу фільтру здійснений виходячи з того, що за рахунок усереднення частота вибірки становить (при частоті передавача 8 кГц):

$$f_{\text{вибірки}} = \frac{8 \text{ кГц}}{16} = 500 \text{ Гц} \quad (3.1)$$

У формулі 3.1 число 16 – кількість періодів для усереднення значення. В результаті отримали частоту вибірок сигналу рівною 500 Гц, або період 2 мс. Якщо припустити, що відгук від цілі присутній протягом близько 200 вибірок, то ширина відгуку буде становити: $2 \text{ мс} * 200 \text{ вибірок} = 400 \text{ мс}$. Якщо це значення перевести в частоту, то отримаємо 2,5 Гц. Сигнал від цілі присутній близько півперіоду, а отже сумарний період сигналу від цілі становить 800 мс, або сигнал від цілі змінюється з частотою близько 5 Гц. Отже, розрахунок частоти зрізу фільтру вибраний правильно.

Для врахування впливу ґрунту на виміри, в меню налаштувань додана функція для калібрування по ґрунту. Алгоритм калібрування полягає в тому, що зчитується 10 вибірок сигналу з затримкою в 1 секунду. Далі знаходиться середнє арифметичне значення, яке запам'ятовується і враховується при подальших обрахунках фази і амплітуди сигналу шляхом додавання або віднімання від отриманих миттєвих значень в залежності від знаку усередненого значення відгуку від ґрунту.

Калібрування по фериту проводиться аналогічним чином.

Алгоритм виконання підпрограм налаштувань через меню налаштувань наведений у додатку Б на рисунках Б.2-Б.6.

3.2 Підтримка роботи аналого-цифрового перетворювача

У пристрої для отримання даних із вхідного підсилювача, а також для виміру струму, що протікає через котушку, буде використовуватися АЦП мікроконтролера [12].

3.2.1. Параметри налаштування АЦП. АЦП будемо використовувати в 12 бітному режимі інжектованого перетворення. Це значить, що дані можуть одночасно зчитуватися із 4-ох каналів або менше. Для цього в регістрі JSQR задається необхідна конфігурація бітів. Зчитані і перетворені дані будуть зберігатися в регістрах JDR4.1, звідки їх можна зчитувати після завершення перетворення АЦП. Коли перетворення завершується, генерується переривання, дозволене в регістрі керування. Перетворення даних в АЦП буде працювати лише при подачі необхідного сигналу, а не в постійному режимі.

Для оцифрування даних в регістрі SMPR1/SMPR2 для відповідних каналів [12] вибираємо час оцифровки 144 тактові цикли. Ще 12 тактів обов'язково будуть використані щоб отримати 12 біт значень в АЦП. Таким чином для отримання значень із АЦП необхідно 144+12 тактів процесора.

3.2.2.Обчислення величини струму за значенням, отриманим з АЦП. Величина струму визначається по падінню напруги на підібраному шунті, яке саме і вимірюється за допомогою АЦП. Оскільки будемо працювати з АЦП в режимі 12 бітної точності, то він може повернути $2^{12} = 4096$ різних значень.

Отже переведення отриманого значення з АЦП в напругу буде проводитися за наступною формулою:

$$U = A * \frac{3}{2^{12}}, \quad (3.2)$$

де: U – значення конвертоване із числового значення АЦП, В;
 A – число отримане з АЦП; 3 – максимально можлива напруга на вході АЦП.

Кінцева формула для розрахунку вимірюваного струму в шунті буде:

$$I_1 = A * \frac{3}{2^{12}} * \frac{1}{R_{ш}}, \quad (3.3)$$

де: $R_{ш}$ - опір шунта, на якому вимірюється падіння напруги.

Таким чином, щоб отримати значення струму на вході, ми повинні виміряти падіння напруги на шунті, числове значення на вході АЦП конвертувати в напругу, і останній крок – поділити падіння напруги на шунті на опір самого шунта, щоб знайти струм, що спричиняє це падіння напруги, який і буде струмом, який нам необхідно виміряти.

3.2.3.Послідовність налаштування АЦП наступна: 1) налаштовуємо піни порту на режим аналогового входу, як Push-pull, без підтяжок, з високою швидкістю тактування і вмикаємо тактування АЦП; 2) задаємо у регістрі SMPR кількість циклів, які АЦП буде чекати перед зчитуванням нового значення; 3) задаємо розрядність АЦП бітами RES_0 і RES_1 в регістрі CR1; 4) вмикаємо режим сканування (опитування декількох каналів); 5) виключаємо автоматичне перетворення (перетворення буде відбуватися по команді); 6) задаємо вирівнювання по правому краю; 7) задаємо кількість і номери каналів для опиту; 8) робимо ввімкнення АЦП; 9) дозволяємо переривання від АЦП по завершенню перетворень.

3.3 Підтримка роботи з дисплеєм

Знакосимвольний дисплей обладнаний контролером HD44780 [24].

Процедура ініціалізації дисплея в 4-х бітний режим, включення двох рядків з використанням символів розміром 5 на 8 точок буде виглядати так: 1) вивід RS = 0; 2) вивід E = 0; 3) виводимо старший напівбайт 0010 // Біт DL; 4) вивід E = 1; 5) затримка; 6) вивід E = 0; 7) затримка; 8) виводимо старший напівбайт 0010 // Біт DL; 9) вивід E = 1; 10) затримка; 11) вивід E = 0; 12) затримка; 13) виводимо молодший напівбайт 1000 // Біт N, Біт F; 14) вивід E = 1; 15) затримка; 16) вивід E = 0; 17) затримка; 18) установити біт D; 19) установити в 1 біт I/D; 20) очистити екран; 21) встановити курсор в нульову позицію.

Висновки до розділу

У даному розділі розглянуто загальний алгоритм отримання і обробки даних, принципи роботи і налаштування АЦП і дисплею, оскільки вони є ключовими елементами у функціонування пристрою.

ВИСНОВКИ

1. У роботі проведено аналіз методів виявлення присутності металевих предметів в різних середовищах і заснованих на них принципів роботи пристроїв (металошукачів), призначених для цього.

Виявлено, що більшість методів базується на властивості металевих предметів при їх потраплянні в змінне в часі і просторі магнітне поле (магнітний потік) генерувати вторинне «індуковане» магнітне поле, як результат дії так званих "вихрових струмів", що наводяться на їх поверхні. Ті ж чи інші способи виявлення розбіжностей між первинним («прямим», переданим) магнітним потоком, що створюється металошукачем, і індукованим («зворотним», результуючим) магнітним потоком, лежать у основи різних принципів роботи металошукачів. Сигналами, що відображають магнітні поля, і доступні для виміру, є струми у передавальній і приймальній котушках, що створюють основу металошукачів. В результаті аналізу виділено дві групи принципів роботи металошукачів – засновані на вимірювання часових розбіжностей прямого і зворотного сигналів, і на порівнянні їх частотних параметрів. Порівняння принципів роботи і заснованих на них типів металошукачів (включаючи аналіз відповідних патентів) проводилось, відповідно до поставленої мети - розробити пристрій, який мав би можливість селективного виявлення певних металевих або металовмісних об'єктів пошуку на тлі різних завад навколишнього середовища. Найбільш сприятливим цьому виявився тип металошукачів, що працюють у частотній області сигналів і застосовують принцип балансу індукції (ІВ). Саме цей принцип і обрано для реалізації у розробленому пристрої.

2. В результаті аналізу існуючих рішень, заснованих на обраному принципі, зроблено висновок, що вони мають недоліки такі, як складна схемотехніка, можливість працювати лише з одним типом приймальної й передавальної котушки. Тому в ході проектування власного блоку аналізу запропоновано системну архітектуру на основі сучасного мікроконтролера STM32F407VGT, і конструкцію, яка наділена можливістю налаштування на конкретний тип

катушки із запам'ятовуванням цих налаштувань в енерго-незалежній EEPROM пам'яті, має розширену функціональність, в порівнянні з аналогами, а саме - покращує схему підлаштування під ґрунт й інші джерела електромагнітного випромінювання. При цьому основні функції виконуються за допомогою мікроконтролера, що значно спростило схемотехнічні рішення і покращило експлуатаційні характеристики пристрою, зокрема його надійність і зручність користування.

3. При проектуванні схеми електричної принципової окремі елементи схеми вибиралися згідно з рекомендаціями технічної документації для елементів. В блоках, де необхідно було виконати розрахунок, здійснено необхідні розрахунки номіналів резисторів і конденсаторів задля забезпечення правильного функціонування схеми, рівня вихідної напруги, коефіцієнтів підсилення. Для підтвердження розрахунків проведено моделювання окремих елементів схеми (коло скидання мікроконтролера, вхідний підсилювач, драйвер передавальної катушки) у системі моделювання LTspice XVII. Показано, що спроектована схема повністю відповідає поставленим завданням і забезпечує коректне функціонування пристрою.

4. У третьому розділі роботи надано опис розробленого програмного забезпечення (ПЗ) для зчитування, обробки і візуалізації даних. При розробці ПЗ передбачено можливість налаштування роботи пристрою, розглянуто алгоритм зчитування і обробки даних, основні принципи налаштування і роботи із АЦП, вбудованим в мікроконтролер і дисплеєм, що виступає пристроєм індикації результатів. Спроектване програмне забезпечення реалізує алгоритм роботи пристрою в цілому і відповідає поставленим вимогам.

5. Роботу виконано в повному обсязі, здійснені розрахунки, а також проведені моделювання параметрів окремих блоків схеми і виконана автором перевірка працездатності програм на прототипі блоку аналізу підтверджують правильність прийнятих рішень і те, що спроектований пристрій задовольняє поставленим вимогам.

6. Основні наукові положення роботи апробовано на 2-х конференціях: XII міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка – 2019» (23-24 квітня 2019р.) і XVIII Всеукраїнській науковій конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка» (18 – 19 квітня 2019р), і опубліковано:

- у науковому журналі «Електронна і Акустична інженерія», том 2, №4 2019 р., с.22 - 27
- у збірнику тез XVIII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка» – КНУТД, 2019р., с 29-30

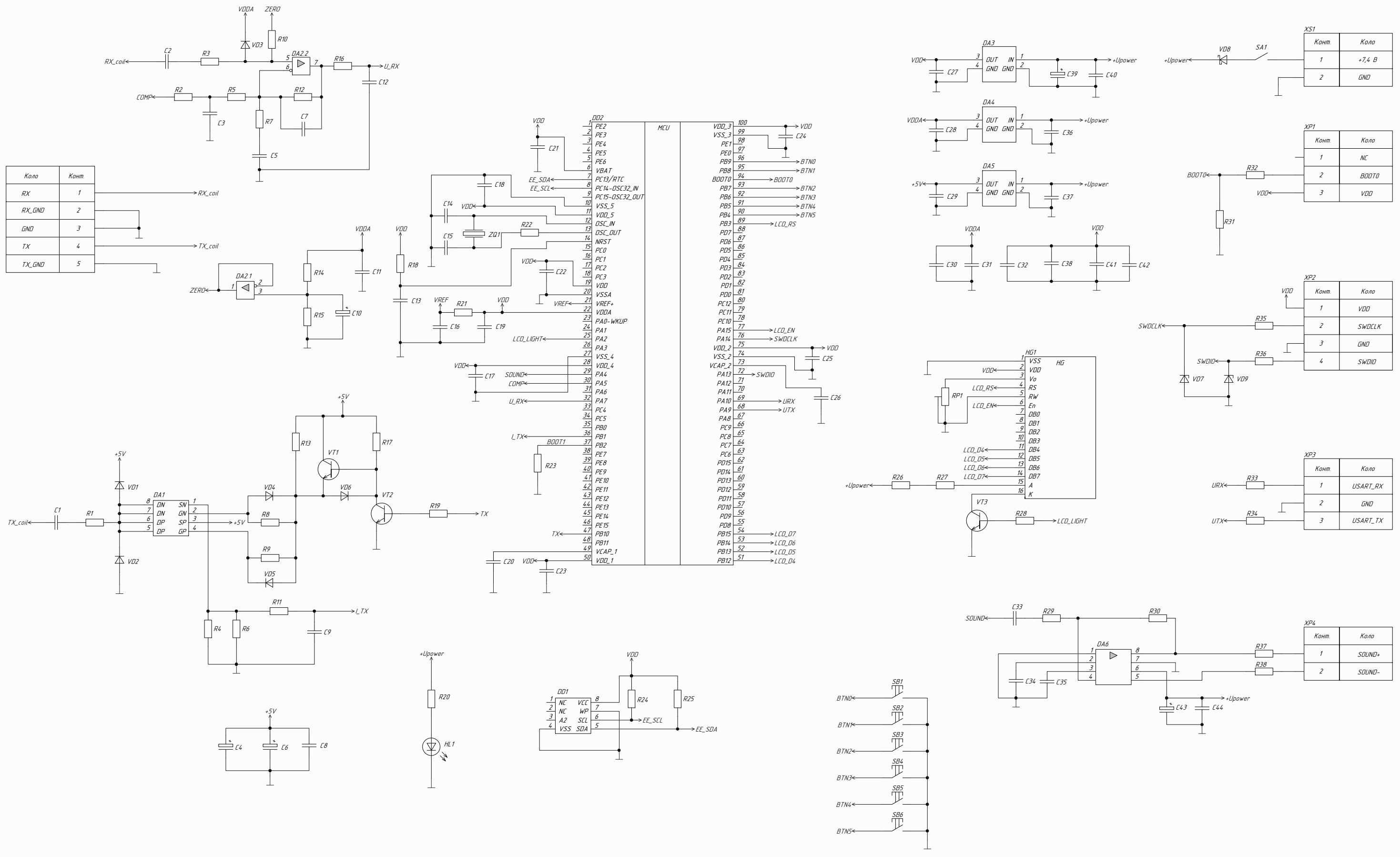
За матеріалами роботи було здійснено впровадження проектного пристрою на базі ТОВ «УНІВЕРСИТЕТ СЕДІКОММ».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дискриминация металлоискателя. Принцип дискриминации металлов. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2CX6M3V>.
2. R. H. Chesney, Y. Das, J. E. McFee, and M. R. Ito, “Identification of Metallic Spheroids by Classification of Their Electromagnetic Induction Response”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-6, no. 6, pp. 809-820, Nov. 1984.
3. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Часть 3. Теория электромагнитного поля. 5-е изд., перераб. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 232 с.
4. Скін-ефект. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2PXVdMK>
5. Изучение магнитного поля (закон Био-Савара-Лапласа). [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://studopedia.info/6-43354.html>
6. US005576624A «Pulse induction time domain metal detector». Bruce H. Candy, 1996. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2JgCDBw>
7. Щедрин А. И. Новые металлоискатели для поиска кладов и реликвий. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. - 176 с, ил. - (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1261). **ISBN 5-93517-112-0**
8. US3467855 «Object Detector and Method for Distinguishing Between Objects Detected Including a Pair of Radio Oscillators». Edwin Rance, 1969. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2E7TZMK>
9. Синфазная и квадратурная составляющие сигнала. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2T5yRjt>
10. US4709213 «Metal Detector Having Digital Signal Processing». Robert J.Podhrasky, 1997. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2YIzP9F>
11. Баженов В.Г., Богдан Г.А., Кравченко М.В., “ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ”. DOI: 10.18454/IRJ.2227-6017.

12. STM32F407VGT. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2lwKX1X> .
13. Operational amplifier NE5532. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2Z5v4RI> .
14. Operational amplifier AD8606. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2Ku9G4y> .
15. Operational amplifier MCP6022. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2IgnL31>.
17. Operational amplifier OPA2365. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2PrF3Ny>.
18. Operational amplifier MC34119. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2XjpJWC> .
19. Power MOSFET IRF7105. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/30Y1u2q> .
20. Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator LD1117. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2wAgZQg>.
21. Расчет емкости балластного конденсатора для бестрансформаторного блока питания. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://rcl-radio.ru/?p=35584>.
22. EEPROM Serial CAT24C08. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2MtrPIN>.
23. I2C Bus Pullup Resistor Calculation. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ti.com/lit/an/slva689/slva689.pdf> .
24. LCM-S01602DTR/M. Datasheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2MwV7Qy>.
25. Tim Green. Analog Engineer's Circuit Cookbook: Amplifiers [Электронный ресурс] / Tim Green, Pete Semig, Collin Wells // Texas Instruments. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ti.com/seclit/sl/slyy137a/slyy137a.pdf>.

Додаток А. Схема електрична принципова



Коло	Комм
RX	1
RX_GND	2
GND	3
TX	4
TX_GND	5

Коло	Комм
1	+7,4 В
2	GND

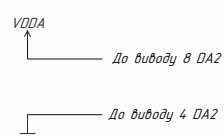
Коло	Комм
1	NC
2	BOOT0
3	VDD

Коло	Комм
1	VDD
2	SWDCLK
3	GND
4	SWDIO

Коло	Комм
1	USART_RX
2	GND
3	USART_TX

Коло	Комм
1	SOUND+
2	SOUND-

Конденсатори розмістити:
 C4, C6, C8 - поруч з VD1, R13, VT1, R17,
 C10, C11, C31 - поруч з DA2,
 C27, C39, C40 - поруч з DA3,
 C28, C30, C36 - поруч з DA4,
 C29, C37 - поруч з DA5,
 C43, C44 - поруч з DA6,
 C32, C38 - поруч з HG1,
 C41 - поруч з DD1,
 C16-C26 - поруч з DD2,
 C42 - поруч з XP2



ДК51.467746.001 Є3			
Електронний блок аналізу для металошукача			
Схема електрична принципова			
Зм.	Лист	№ докум.	Лист
Розроб.			
Перев.			
Накази:			
Замб.			
Масштаб		1:1	
Архив		1	

ДОДАТОК Б Алгоритм програмного забезпечення

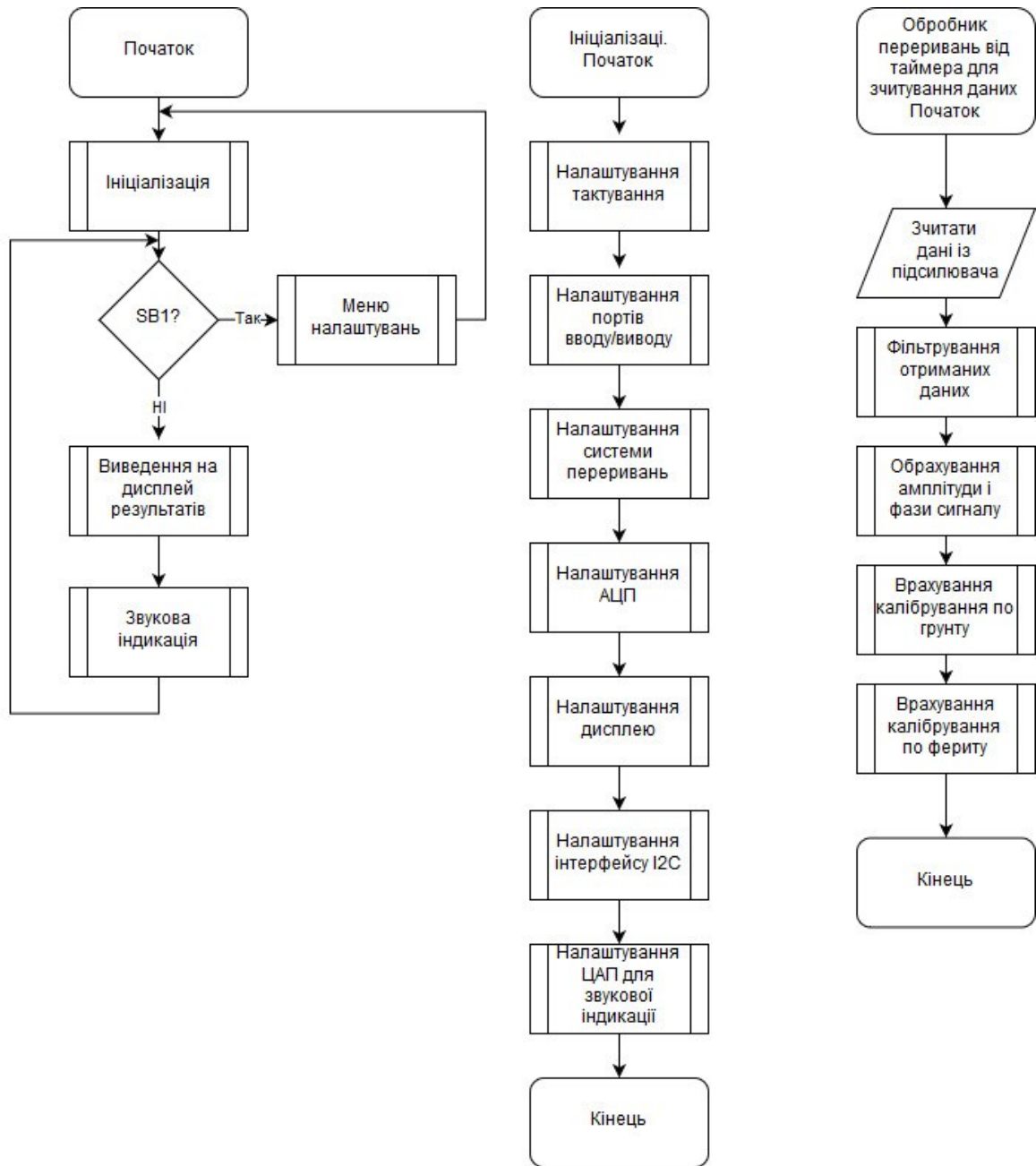


Рисунок Б.1 - Узагальнений алгоритм основної програми і обчислень

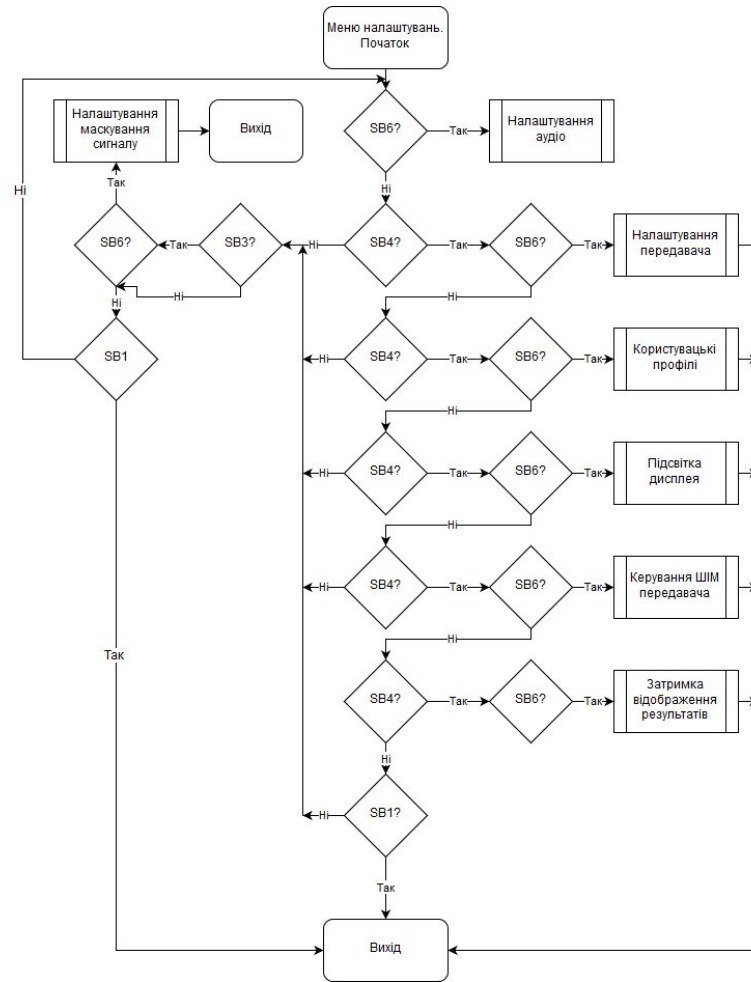


Рисунок Б.2 – Алгоритм функціонування меню налаштувань

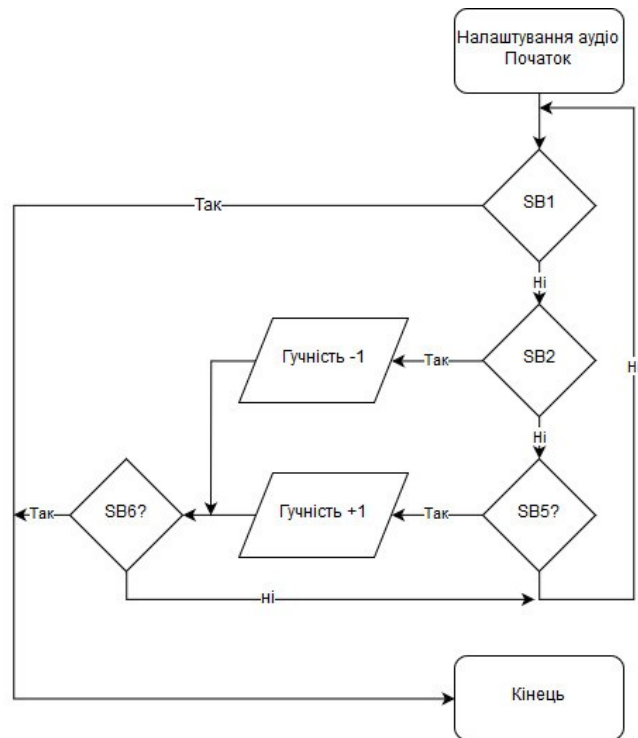


Рисунок Б.3 – Алгоритм налаштування звукової індикації

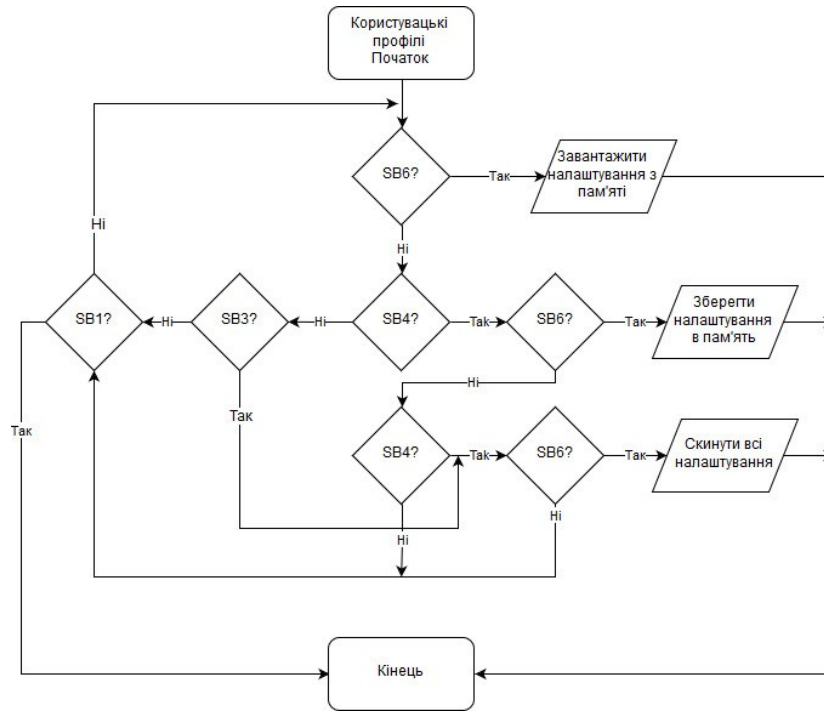


Рисунок Б.4 – Алгоритм збереження або завантаження попередніх налаштувань

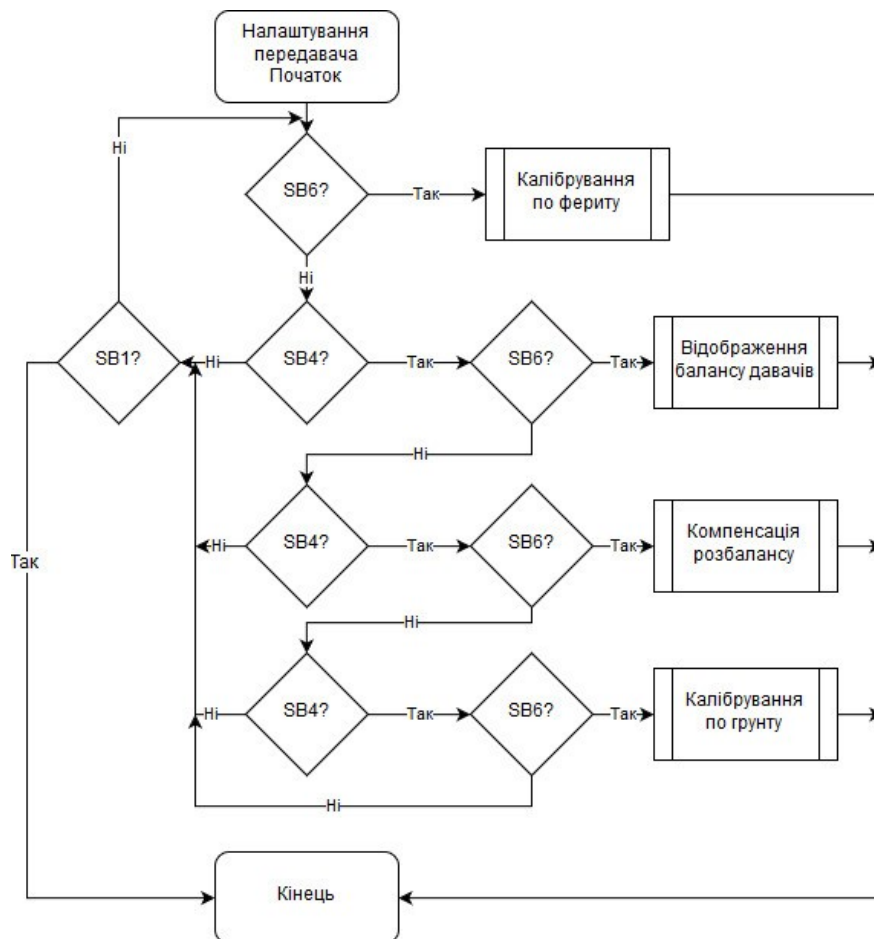


Рисунок Б.5 – Алгоритм налаштування передавача

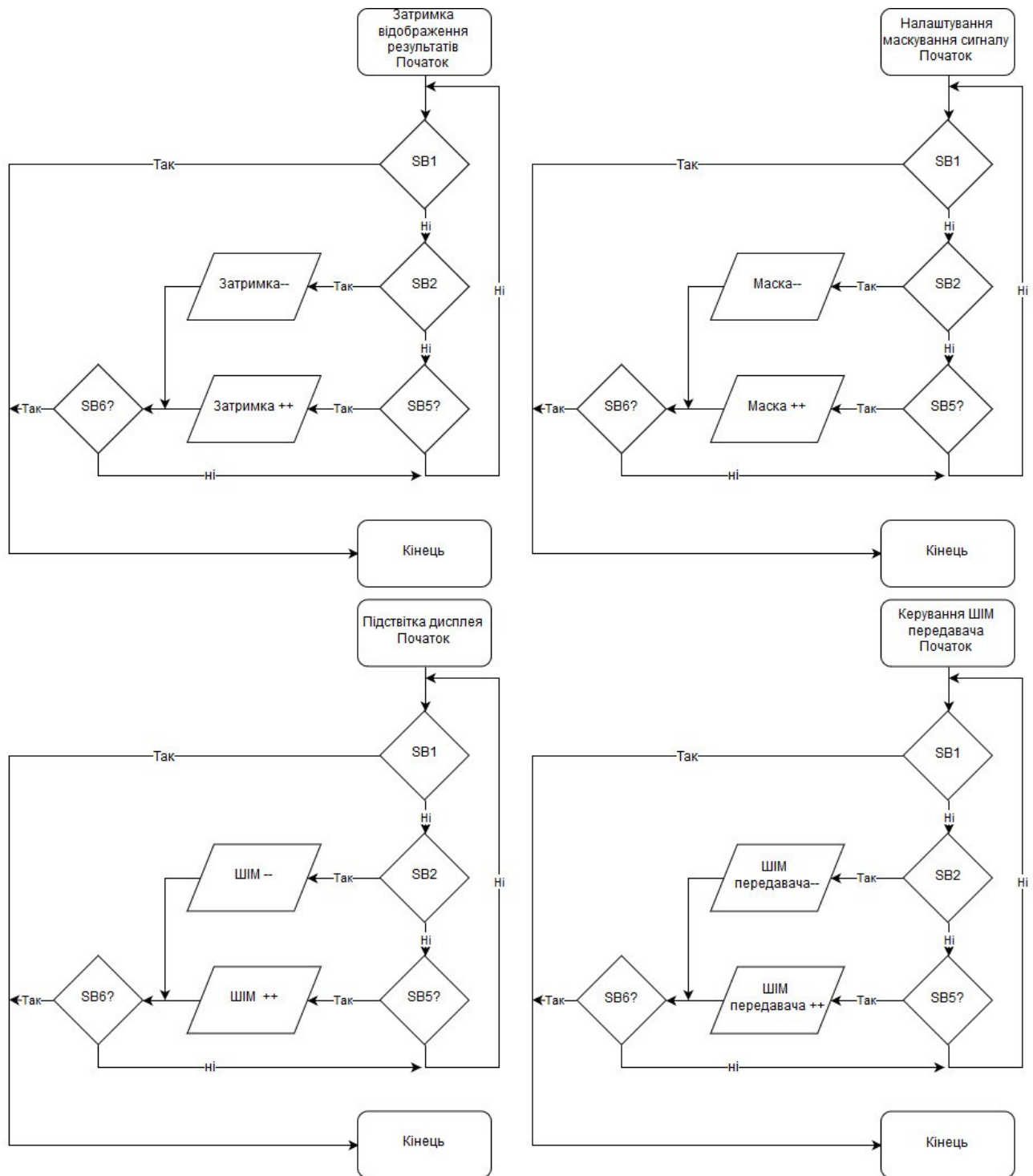


Рисунок Б.6 - Алгоритми налаштувань затримки відображення результатів на дисплеї, підсвічування дисплею, маскування сигналів, коефіцієнту заповнення ШИМ-сигналу передавача

Додаток В. Перелік елементів

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
C32	C0805 50 В 0.1 мкФ 5% X7R KEMET	1	
C33	C0805 25 В 10 мкФ 5% X7R KEMET	1	
C34	C0805 25 В 4.7 мкФ 5% X7R KEMET	1	
C35	C0805 50 В 1 мкФ 5% X7R KEMET	1	
C36-C38	C0805 50 В 0.1 мкФ 5% X7R KEMET	3	
C39	Radial, Cap - SMD 16 В 470 мкФ 20% 5000 Hrs @ 105°C Nichicon	1	
C40,C41	C0805 50 В 0.1 мкФ 5% X7R KEMET	2	
C42	C0805 50 В 1 мкФ 5% X7R KEMET	1	
C43	Radial, Cap - SMD 16 В 470 мкФ 20% 5000 Hrs @ 105°C Nichicon	1	
C44	C0805 50 В 0.1 мкФ 5% X7R KEMET	1	
	<u>Мікросхеми</u>		
DA1	IRF7105TRPBF Infineon Technologies	1	
DA2	MCP6022-E/SN Microchip	1	
DA3,DA4	LD1117S33CTR STMicroelectronics	2	
DA5	LD1117S50CTR STMicroelectronics	1	
DA6	MC34119D NXP USA Inc.	1	
DD1	CAT24C08WI-GT3 ON Semiconductor	1	
DD2	STM32F407VGT6 STMicroelectronics	1	
	<u>Пристрої індикації</u>		
HG1	LCM-S01602DTR/A Lumex Opto/Components Inc.	1	
HL1	SML-D12U1WT86 Rohm Semiconductor	1	
	<u>Резистори</u>		
R1	R1206 0.5 Вт 10 Ом 1% Susumu	1	
R2	R0805 0.25 Вт 2 кОм 1% YAGEO	1	
R3	R0805 0.25 Вт 100 Ом 1% YAGEO	1	
R4	R1206 0.5 Вт 1 Ом 1% Susumu	1	
R5	R0805 0.25 Вт 100 кОм 1% YAGEO	1	

Підп. та дата
Інв. № дубл.
Взам. інв. №
Підп. та дата
Інв. № подл.

Арк.

ДК51.467746.001 ПЕЗ

2

Зм. Арк. № докум. Підп. Дата

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
R6	R1206 0.5 Вт 1 Ом 1% Susumu	1	
R7	R0805 0.25 Вт 1.2 кОм 1% YAGEO	1	
R8,R9	R0805 0.25 Вт 1 кОм 1% YAGEO	2	
R10	R0805 0.25 Вт 2 кОм 1% YAGEO	1	
R11	R0805 0.25 Вт 10 кОм 1% YAGEO	1	
R12,R13	R0805 0.25 Вт 100 кОм 1% YAGEO	2	
R14,R15	R0805 0.25 Вт 10 кОм 1% YAGEO	2	
R16	R0805 0.25 Вт 2 кОм 1% YAGEO	1	
R17	R0805 0.25 Вт 10 кОм 1% YAGEO	1	
R18	R0805 0.25 Вт 100 кОм 1% YAGEO	1	
R19,R20	R0805 0.25 Вт 1 кОм 1% YAGEO	2	
R21	R0805 0.25 Вт 4.7 Ом 1% YAGEO	1	
R22	R0805 0.25 Вт 390 Ом 1% YAGEO	1	
R23	R0805 0.25 Вт 10 кОм 1% YAGEO	1	
R24,R25	R0805 0.25 Вт 4.7 кОм 1% YAGEO	2	
R26,R27	R0805 0.25 Вт 100 Ом 1% YAGEO	2	
R28,R29	R0805 0.25 Вт 1 кОм 1% YAGEO	2	
R30	R0805 0.25 Вт 3 кОм 1% YAGEO	1	
R31	R0805 0.25 Вт 10 кОм 1% YAGEO	1	
R32	R0805 0.25 Вт 1 кОм 1% YAGEO	1	
R33,R34	R0805 0.25 Вт 100 Ом 1% YAGEO	2	
R35,R36	R0805 0.25 Вт 51 Ом 1% YAGEO	2	
R37,R38	R0805 0.25 Вт 2 Ом 1% YAGEO	2	
	<u>Потенціометр</u>		
RP1	ST-4EB 0.25 Вт 10 кОм 20% Nidec Copal Electronics	1	
	<u>Перемикачі</u>		
SA1	G3B15AB-S-YC NKK Switches	1	
SB1-SB6	TL3301DF160QG E-Switch	6	

Підп. та дата
Ід. № дубл.
Взам. ід. №
Підп. та дата
Ід. № рабл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	DK51.467746.001 ПЕЗ	Арк.
						3

