

Власник документу:  
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:  
1004136078

Дата перевірки:  
19.06.2020 00:35:13 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
19.06.2020 00:57:18 EEST

ID користувача:  
90740

Назва документу: 2020-bachelor-EDD\_Yermakov\_Spektr\_fonohram\_fch

ID файлу: 1004148822 Кількість сторінок: 22 Кількість слів: 7859 Кількість символів: 56947 Розмір файлу: 108.53 KB

## 15.3% Схожість

Найбільша схожість: 5.81% з джерело бібліотеки. ID файлу: 5958284

10.3% Схожість з Інтернет джерелами

123

Page 24

13.4% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту

257

Page 25

## 0.42% Цитат

Цитати

1

Page 26

Вилучення переліку посилань вимкнено

## 0% Вилучень

Джерела менше, ніж 8 слів автоматично вилучено

Не знайдено жодного вилученого тексту з Інтернету

0% Вилученого тексту з Бібліотеки

15

Page 26

## Підміна символів

Не знайдено заміненних символів

Єрмакову Нікіті Дмитровичу

**Цифровий аналізатор спектра фонограм**  
**АНОТАЦІЯ**

Основною задачею даного дипломного проекту є створення конкурентно здатного у своїй категорії приладу цифровий аналізатор спектра фонограм, який за допомогою роботи апаратно-обчислювальної платформи Arduino Uno з мікроконтролером ATmega328 та бібліотек програмування IDE буде давати можливість за допомогою ШПФ перетворювати вхідний звуковий сигнал з мікрофону або через вхід навушників комп'ютера, телефона у двох значну амплітудо-частотну інформацію, яка після всіх операцій розбиття сигналу на окремі частотні складові, буде візуалізуватися на LCD екрані та відображати інтенсивність сигналу на різних частотах.

В дипломній роботі був проведений огляд науково-технічної літератури та статей на тему цифровий аналізатор спектру фонограм з використанням сучасної елементної бази. Продемонстровані аналоги, що мають популярність та актуальність на сьогоднішній день на ринку, приведені характеристики параметрів, оцінені їх позитивні сторони та їх недоліки, виходячи з яких виконано аналіз, щодо реалізації поставленої задачі.

Розроблено технічне завдання, сформульовані вимоги до пристрою з попереднім ознайомленням з аналогами приладу цифровий аналізатор спектра фонограм. Розроблено структурну схему роботи пристрою, функціональні схеми роботи системи, та електричну принципову схему. Описано роботу схем.

**Ключові слова:** цифровий аналізатор, апаратно-обчислювальна платформа, мікроконтролер, амплітудно-частотна інформація, інтенсивність сигналу

**ANNOTATION**

The main task of this diploma project is to create a competitive in its category device digital phonogram spectrum analyzer, which with the help of hardware and computing platform Arduino Uno with ATmega328 microcontroller and IDE programming libraries will allow using FFT to convert input or audio signal from headphones computer, phone in two significant amplitude-frequency information, which after all operations of splitting the signal into separate frequency components, will be visualized on the LCD screen and display the signal intensity at different frequencies

In the thesis a review of scientific and technical literature and articles on the topic of digital analyzer of the spectrum of phonograms using a modern element base was conducted. The analogues that are popular and relevant on the market today are demonstrated, the characteristics of the parameters are given, their positive aspects and their shortcomings are assessed, based on which the analysis of the task is performed.

The technical task is developed, the requirements to the device with preliminary acquaintance with analogues of the device the digital analyzer of a spectrum of phonograms are formulated. The structural scheme of operation of the

device, functional schemes of operation of the system, and the electric schematic scheme are developed. Describes the operation of circuits.

**Keywords:** digital analyzer, hardware and computing platform, microcontroller, amplitude-frequency information, signal intensity

## ВСТУП

На сьогоднішній день, музика займає важливе місце в житті багатьох людей на всій планеті. Хтось слухає музику для задоволення, хтось для знаходження натхнення, хтось для релаксації після тяжких робочих буднів, а хтось зосереджує все своє життя задля того, щоб цю музику створювати, та радувати всі вище перелічені групи людей. У наш технологічно - розвинутий час, є велика кількість різноманітних інструментів для створення музики. Починаючи від звичайної гітари, або піаніно, закінчуючи великими модульними синтезаторами, які подеколи можуть займати цілу кімнату. Але лише інструментів замало, тоді в допомогу музикантам, та звуко інженерам вступають прилади різного призначення. Наприклад еквалайзери, компресори, підсилювачі, фільтри, ревербератори, рекордери, аналізатори спектру та інші. Всі вони мають технічне призначення з точки зору допомоги людям, які пишуть музику, досягати найкращого по якості звуку, для запобігнення конфліктів між інструментами, для чіткого аналізу амплітудно частотних характеристик, для додавання якісних гармонік, або для додавання різного роду ефектів, які роблять композиції більш цілісними, чистими та приємними для слухача.

Метою даної дипломної роботи є розробка цифрового аналізатора спектра фонограм, що вирішує задачу перетворення сигналу фонограми у амплітудно-частотну характеристику з подальшим виведенням її на екран рідкокристалічного дисплея. Головною задачею є створення перш за все дешевого, та компактного приладу, зі зручним підключенням до телефону, або комп'ютеру за допомогою USB порту. Вироблений прилад повинен за допомогою апаратної обчислювальної платформи виконати перетворення звукового сигналу з часової області у частотну область та вивести отриману амплітудно-частотну інформацію на LCD дисплей. Важливо, що прилад має підтримувати робочий діапазон частот 20 Гц – 20000 Гц.

Аналізатори спектра звукового сигналу займають дуже важливе місце у роботі кожного звуко-інженера на студії, або у менш професійного, з не дорогим обладнанням домашнього музиканта. Виходячи із сучасних можливостей знаходження необхідної інформації в інтернеті, та можливостей сьогоднішніх комп'ютерів, особливою популярністю користуються велика кількість аналогів аналізаторів спектра звукового сигналу у вигляді програмного забезпечення на різні операційні системи. Але так як більшість цих програм зроблена задля масового споживання, вони несуть за собою похибки, та неточності у аналізі сигналу, а також, що не менш важливо інколи ціна таких програм подекуди зовсім не відповідає доцільності

Отже, більшість професіоналів продовжують використовувати аналізатори як окремі комплексні прилади, через їх більшу точність, надійність, та можливо навіть через елементарне естетичне задоволення.

## РОЗДІЛ 1 ОПИС ПРИСТРОЮ, ЙОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### 1.1 Призначення пристрою

Музичний сигнал – це сукупність звукових хвиль різних за частотою та довжиною.

Звукова хвиля ж являє собою по суті послідовний ряд ущільнень і розрядження середовища (найчастіше повітряного середовища в звичайних умовах) різної частоти. Природа звукових хвиль коливальна, що викликається і вироблена вібрацією будь-якого тіла. Утворення і поширення звукової хвилі можливо в трьох основних пружних середовищах: твердих, рідких та газоподібних. При утворенні звукової хвилі в одному з типів середовища неминуче виникають зміни в самому середовищі, наприклад, зміна тиску або щільності повітря, переміщення частинок повітряних мас і так далі.

Рис.1. Зображення звукової хвилі

Оскільки звукова хвиля має коливальну природу, то вона має таку характеристику, як частота. Частота вимірюється в герцах (в честь німецького фізика Генріха Рудольфа Герца), і позначає кількість коливань за період часу, що дорівнює одній секунді. Тобто наприклад, частота 20 Гц означає цикл в 20 коливань за одну секунду. Від частоти звуку залежить і суб'єктивне поняття його висоти. Чим більше звукових коливань відбувається за секунду, тим «вище» здається звучання. У звукової хвилі так само є ще одна найважливіша характеристика, що має назву - довжина хвилі. Довжиною хвилі прийнято вважати відстань, яке проходить звук певної частоти за період, що дорівнює одній секунді. Для прикладу, довжина хвилі найнижчого звуку в чутому діапазоні для людини частотою 20 Гц становить 16,5 метрів, а довжина хвилі найвищого звуку 20000 Гц складає 1,7 сантиметра.

Спектроаналізатор – це пристрій для вимірювання і відображення спектра сигналу, який представляє собою розподіл енергії сигналу по частотам.

Традиційно в цифрового звукозапису аудіодоріжка представляється у вигляді осцилограми, що зображує форму звукової хвилі, тобто її залежність амплітуди від часу. Таке уявлення досить наочно для досвідченого звукорежисера: осциллограма дозволяє побачити основні події та зміни в звуці, такі як зміни гучності, паузи між частинами твору і часто навіть окремі ноти в сольному записі інструменту. Але одночасне звучання декількох інструментів на осциллограмі "змішується" і візуальний аналіз сигналу стає нечітким. Проте, наші вуха без проблемно розрізняє окремі інструменти в невеликих ансамблях.

Коли складне звукове коливання виявляється на барабанній перетинці вуха, воно за допомогою серії слухових кісточок передається в орган, що називається равликом. Равликом є закручена в спіраль еластична трубочка.

Товщина і жорсткість равлика плавно змінюються від краю до центру спіралі. Складне коливання надходячи на край равлика, викликає відповідні коливання різних частин равлика. При цьому резонансна частота у кожній частині своя. Таким чином, за допомогою равлика відбувається розкладання складного звукового коливання на окремі частотні складові. До кожної частини равлика підходять окремі групи слухових нервів, що передають інформацію про коливання в головний мозок. В результаті до мозку надходить інформація про звук, що вже розкладений по частотах, і людина легко відрізняє високі частоти звуків від низьких (від 20 Гц до 20 кГц). Розкладання звуку на частоти допомагає розрізнити окремі інструменти в музикальному записі, що значно розширює можливості редагування.

За допомогою спектроаналізаторів можна вимірювати частоту, потужність, шум, спотворення, модуляцію спектра. Спектральний склад сигналу дуже важливий в системах з обмеженою по ширині смугою частот.

До основних параметрів цифрового аналізатору спектра відносяться:

- Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) — залежність амплітуди вихідного сигналу пристрою або системи передачі, підсилення або обробки сигналу від частоти вхідного сигналу сталої амплітуди.
- Діапазон частот — це частотний інтервал, в якому можливий спектральний аналіз. Діапазон в пристрої може бути розбитий на піддіапазони. Зазвичай в приладах передбачена можливість досліджувати сигнали не по всьому інтервалу, а тільки в конкретній його частині. Її називають смугою огляду. Такий підхід застосовується для того, щоб підвищити точність аналізу.
- Час аналізу. Визначає швидкість вимірювання. На нього впливає динамічна роздільна здатність і час, необхідний для отримання показань.
- Похибка по частоті. Показує з якою точністю пристрій визначає діапазон між спектральними складовими.
- Похибка по амплітуді. Залежить від інструментальної похибки аналізатора і сигнального спектра.

## 1.2 Огляд аналогів пристрою

Наразі існує велика кількість компаній виробників які займаються виготовленням аналогічних приладів, або програм-плагінів типу VST.

Virtual Studio Technology (віртуальна студійна технологія) — це стандарт плагінів програмних синтезаторів та звукових ефектів, створений німецькою фірмою Steinberg.

При наявності відповідних драйверів, які працюють зі звуковими картами, що підтримують протокол ASIO, VST-плагіни можуть використовуватися у реальному часі.

Існує три типи VST плагінів:

### VST інструменти:

- VST-плагіни, що генерують звук. Зазвичай, це віртуальні синтезатори або семплери. На сьогоднішній день існує багато VST-інструментів як безкоштовних, так і комерційних.

### VST ефекти:

- VST-плагіни, що здійснюють обробку звукового сигналу, наприклад ефекти хорус або реверберації. Інші плагіни використовуються для візуального відображення основних властивостей музичного сигналу без його редагування. Більшість плагінів дозволяють поєднувати декілька різних ефектів у певний ланцюг.

#### **VST MIDI ефекти:**

- VST-плагіни, що обробляють MIDI-повідомлення перед тим, як MIDI-дані потрапляють на апаратній пристрої або інші VST інструменти ; вони дозволяють транспонувати музику або генерувати красиві арпеджіо.

MIDI – це стандарт передачі інформації, що описує апаратний інтерфейс, який дозволяє з'єднувати окремі синтезатори різних виробників та описувати протоколи зв'язку для передавання даних від одного пристрою до наступного. MIDI-пристрої мають можливість взаємодіяти з різними програмами на комп'ютері.

Різні виробники мають різний підхід до проектування і виробництва такого типу приладів, або плагінів. Можна зробити справедливе порівняння приладів та плагінів один до одного, так як в наш час вони рівноважні за функціями, та знаходяться на одному музикальному ринку. Представлені виробниками продукти мають дуже відмінний функціонал, але їх основна задача в усіх випадках, візуалізація частотної характеристики сигналу для його подальшої оцінки

#### **TC Electronic Clarity M**

Першим з аналогів є дорогий та багатофункціональний прилад, вимірювач рівня аудіосигналу TC Electronic Clarity M.

Рис.2. Цифровий аналізатор TC Electronic Clarity M

TC Electronic Clarity M - професійний вимірювач звукового стерео сигналу для мікшування, мастерінга, постпродакшна або мовлення, виконаний у вигляді компактного кольорового LCD-дисплея. TC Electronic Clarity M надає повний набір прецизійних інструментів, необхідних для будь-якого аудіопродюсера. Досить підключити його до комп'ютера, і ви отримаєте миттєвий відгук. Він потрібен, щоб забезпечити оптимальні рішення для мікшування, мастерингу і пост-продакшну. Чіткий 7-дюймовий кольоровий дисплей легко читається при будь-яких умовах, а знаковий радіолокатор гучності TC Electronic, забезпечують якісне вимірювання всіх параметрів.

Засновані на плагінах інструменти моніторингу можуть перевантажувати вашу систему і вимагають багато часу для роботи з комп'ютером. Але Clarity M є автономним пристроєм. Його 7-дюймовий кольоровий дисплей з високою роздільною здатністю забезпечує відображення всієї інформації про мікс і мастеринг, дозволяючи DAW працювати за призначенням.

Ця система належить до досить недешевої цінової категорії і коштує 450-500\$ (станом на липень 2020 року)

Табл.1

Технічні характеристики цифрового аналізатора спектра з підтримкою DAW TC Electronic Clarity M Stereo

### Phonic PAA 3

Наступним аналогом є «аналізатор спектра Phonic PAA 3». PHONIC PAA3 це новий аналізатор спектру, який не має аналогів у такій цінній категорії, та працює в режимі реального часу.

Це невеликий за розмірами прилад, на якому є вбудований вимірювальний мікрофон. Його головною особливістю є звичайно наявність мікрофону, отже він здатен аналізувати сигнал, що надходить з навколишнього середовища, тобто працює з аналоговим сигналом. Ціна також не дешева. Такий прилад коштує 400\$ (станом на липень 2020 року)

Рис.3. Кишеньковий цифровий аналізатор спектру Phonic PAA 3

Табл. 2

Технічні характеристики цифрового аналізатора спектра Phonic PAA 3

### Real Time Audio Analyzer

Ще одним аналогом було вирішено обрати VST плагін Real Time Audio Analyzer, який можна застосувати у цифрових звукових робочих станціях (DAW), наприклад FL Studio, Reaper, Garage Band та інші. Виробник компанія Esser Audio. Ціна 30\$, що являє собою не дорожню цінову категорію.

Цей плагін, створений з метою проведення розширеного спектрального аналізу звукових сигналів.

Маловідома програма Real Time Audio Analyzer являє собою досить скромний спектроаналізатор з октавними смугами, призначений для знаходження проблематичних частотних зон і їх подальшого виправлення за допомогою еквайзера. Крім цього програма має вбудований аналізатор частот FFT (Швидкого Перетворення Фур'є) і осцилограф, що функціонує в режимі реального часу.

Зовнішній вигляд програми є всього лише одне робоче вікно, на якому присутні всі необхідні користувачу вкладки і налаштування. У програмі є опції зміни масштабу осей (максимальні і мінімальні значення, крок), а також колірної гама панелі інтерфейсу.

Рис.4. Середовище графічний інтерфейс Real Time Audio Analyzer.

Аналізатор октавних частотних інтервалів здатний показувати спектри на 1/12, 1/6, 1/3 і повнооктавному дозволі. Горизонтальна вісь представляє частоту, а вертикальна - амплітуду відповідної частоти, що вимірюється в децибелах. Для ліквідації випадкових помилок і поліпшення якісної складової спектрального аналізу пропонується на вибір кілька варіантів усереднення. Аналіз звукових сигналів може протікати в режимі тривалого спостереження без збереження даних або з їх записом в окремий блок.

Надалі можливо порівняння поточних результатів з попередньо записаними в пам'яті зразками. Спектроаналізатор (рівно, як і осцилограф) має широкі можливості з масштабування і оптимізації потрібної ділянки графіка.

Присутня можливість вибору джерела вхідного сигналу - лінійний вхід, внутрішній або зовнішній мікрофон. Особливо представлений вхід «стерео-мікс», підключений до виходу звукової плати і дозволяє проаналізувати

вихідні з комп'ютера сигнали. Виклик мікшера Windows дає можливість відрегулювати рівень вхідного сигналу.

- Цифровий аналізатор спектра TC Electronic Clarity M Stereo – це прилад сконструйований якісно та з повагою до покупця. В цьому приладі є багато різних функцій, за які доведеться дорого заплатити. Головною перевагою є можливість підключення аналізатора до DAW, великий дисплей, зручний інтерфейс та запам'ятовування характеристик кожного аналізу, що дає змогу проводити багато аналізів зразу.
- Аналізатор спектра Phonic PAA 3 є кишеньковим приладом, з мікрофоном, який дає можливість аналізувати звук, що надходить з навколишнього середовища. Це його цікава особливість.
- Програмне забезпечення Real Time Audio Analyzer, хороша альтернатива нашому приладу в цій категорії, але в она має свої недоліки з обмеженим функціоналом.

### 1.3 Формування технічного завдання

**Формування вимог до пристрою цифровий аналізатора спектра фонограм.**

Виходячи з власних побажань, та висновків, які були зроблені з аналогів цифрового аналізатора спектра сигналу, можна створити вимоги до пристрою та оформити технічне завдання.

#### Склад технічного завдання

1. **Найменування об'єкта, що розробляється :** Цифровий аналізатор спектру фонограм (ЦАСФ).
2. **Підстави для виконання :** завдання видане кафедрою «електронних приладів та систем» НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського».
3. **Термін виконання :** 17.05.20 - 16.06.20
4. **Мета розробки :** створення аналізатора спектра фонограм на основі власних побажань та аналогів попередніх років.
5. **Вимоги до функціоналу пристрою :**
  - 5.1 Перетворення звукового сигналу з часової у частотну область.
  - 5.2 Робота з аналоговими і цифровими сигналами.
  - 5.3 Можливість оновлення прошивки через зовнішнє підключення.
  - 5.4 Графічне виведення амплітудно частотної інформації на LCD екран.
  - 5.5 Можливість керування частотою дискретизації та діапазоном робочих частот.
6. **Технічні вимоги :**
  - 6.1 **Вимоги до основних характеристик приладу :**
    - 6.1.1 Діапазон робочих частот, робота в діапазоні частот (20 Гц – 20 кГц).
    - 6.1.2 Підтримка USB, та 2іс інтерфейсів.
    - 6.1.3 44,1; 48; 88,2; 96 кГц підтримка частот дискретизації.
    - 6.1.4 Можливість роботи як з цифровими, так із аналоговими сигналами.
    - 6.1.5 Живлення від AC/DC, або від батарейки, або комп'ютера (+7 В -+12 В).
    - 6.1.6 Оперативна пам'ять для обробки не менше 2 кБ.
    - 6.1.7 Можливість виводу інформації на LCD
    - 6.1.8 Можливість під'єднання мікрофону.



**6.1.9** 16 MIPS на 16 МГц 12-20 MIPS**6.2 Вимоги до конструктивних особливостей :**

Всі електричні частини пристрою повинні бути захищені в упаковку для захисту від навколишніх чинників, та фізичного впливу

**6.3 Вимоги до кліматичного виконання та експлуатації :**

Кліматичне виконання пристрою УХЛ2 (Експлуатація в умовах помірного та холодного клімату для апаратури під навісом чи в приміщенні, коливання температури якого не істотно відрізняються від таких, що діють на відкритому повітрі, з відсутністю прямого впливу сонячних променів та атмосферних опадів) згідно ГОСТ 15150

**6.4 Вимоги до технологічності**

Вимоги до технологічності за ГОСТ 14.201-83. Рівень технологічності повинен бути зосереджений на новітні технології. Всі комплектуючі вироби повинні проходити вхідний контроль на відповідність вимогам ТУ. Забезпечення технологічності конструкції виробу - це функція підготовки виробництва, яка несе за собою взаємозалежне рішення технологічних та конструкторських завдань, спрямованих на підвищення продуктивності праці, досягнення оптимальних матеріальних і трудових витрат та скорочення часу на виробництво, в тому числі і монтаж поза підприємства-виробника, технічний ремонт та обслуговування виробу.

**6.5 Вимоги до стандартизації та уніфікації :**

В конструкцію приладу повинні бути використані максимально уніфіковані та стандартні вузли та деталі.

- Коефіцієнт стандартизації, не менше 0.4
- Коефіцієнт уніфікації повинен бути, не менше 0.6

**6.6 Вимоги до складальних частин конструкції, сировини та експлуатаційних матеріалів :**

В конструкції повинні бути використані деталі та матеріали, що випускаються серійно в промислових масштабах і дозволені до застосування в РЕА загального призначення.

**6.7 Вимоги до електромагнітної сумісності до індустріальних радіо-завод :**

Пристрій повинен відповідати вимогам до електромагнітної сумісності до індустріальних радіо-завод згідно ГОСТ 22505-83.

**6.8 Вимоги до безпеки обслуговування :**

Прилад мусить задовольняти умовам безпеки за ГОСТ 12.2.006-87. Потрібно забезпечити відсутність гострих кромки конструкції, та наявність відкритих ділянок пристрою які знаходяться під струмом.

**1.4 Обґрунтування розробки пристрою на Arduino UNO**

Технологічний прогрес крокує з кожним роком все далі і далі, несучи за собою удосконалення в усіх областях електроніки. Отже, для створення сучасного приладу, який би виконував всі задані вимоги, та відповідав всім новітнім технологіям, необхідно провести порівняння та дослідження вже існуючих на сьогоднішній день найпопулярніших мікроконтролерів.

Для реалізації аналізатора спектра фонограм, який повинен виконувати наведені в попередніх розділах задачі, необхідно вибрати мікроконтролер,

який буде виконувати роль обчислювального блоку системи та реалізувати необхідні параметри середовища, виконуючи усі необхідні функції з обробки вхідної інформації та керування системи.

Розглянемо різні мікроконтролерні платформи представлені на ринку на сьогоднішній день, такі як: Arduino, Rapsberry Pi, та BlackFin від фірми Analog Devices.

Arduino – це сімейство апаратних обчислювальних платформ, основними компонентами яких є плата вводу / виводу на основі мікроконтролерів ATmega і середовище розробки на мові (C/C ++).

Апаратно-обчислювальна платформа Arduino Uno побудована на ATmega328. Платформа має 14 цифрових вхід/виходів (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШИМ), 6 аналогових входів, кварцевий генератор 16 МГц, роз'єм ICSP, силовий роз'єм, роз'єм USB та кнопку перезавантаження. Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою кабелю USB, або подати живлення за допомогою батареї, або адаптера AC/DC.

Апаратні засоби Arduino включають доступні та популярні комплектуючі, що випускаються серійно, тому принцип роботи системи зрозумілий, налагоджування схеми під вимоги розробника проста і забезпечена можливість подальшої модифікації.

Для більш легкої і продуктивної роботи з Arduino є можливість використовувати додаткові бібліотеки. Бібліотеки Arduino - це частини програми для виконання конкретних завдань. За допомогою бібліотек можна виконувати складні дії всього парою рядків коду, тому що хтось інший вже написав частину коду за вас.

В Arduino IDE зручний інтерфейс для роботи з бібліотеками Ардуіно. Прямо з меню програми ви можете завантажити, встановити і підключити до свого скетч безліч бібліотек. Для більшості бібліотек Arduino можна подивитися приклади використання. Це допоможе зрозуміти принцип роботи бібліотеки. Приклади можна доопрацювати під свої потреби і використовувати для реалізації своїх пристроїв.

Наразі існують стандартні бібліотеки, які встановлюються разом з Arduino IDE. Деякі з них навіть автоматично підключаються в скетч (наприклад Serial).

Як приклад, для сигнальних процесорів сімейства BlackFin від фірми Analog Devices з'являється необхідність забезпечити доступ до окремої програми - середовища для програмування процесора, яка працює тільки з покупкою, коли в Arduino використовується безкоштовна платформа, та безкоштовні бібліотеки, які доступні для будь-якої людини з доступом в мережу інтернет.

Arduino Uno використовує в якості мікропроцесору ATmega328.

Табл.3

Технічні характеристики мікроконтролера ATmega32

Рис.5. Призначення портів виводу та вводу мікроконтролера ATmega 328 на платі Arduino Uno

BlackFin - це сімейство 16- / 32-бітних мікропроцесорів, розроблених, виготовлених та реалізованих на ринку аналоговими пристроями. Процесори мають вбудовану функцію цифрового сигнального процесора з фіксованою точкою (DSP), що забезпечується 16-бітовим множинним накопиченням (MAC), що супроводжується мікросхемою на мікросхемі. Він був розроблений для єдиної архітектури процесорів низької потужності, яка може запускати операційні системи, одночасно обробляючи складні числові завдання, такі як кодування відео H.264 у режимі реального часу.

Raspberry Pi – це одно-платний комп'ютер, тобто зібраний з різних частин комп'ютера, які зазвичай розташовуються на окремих платах, тут представлені на одній. До того ж ця плата має відносно невеликий розмір - приблизно 8,5 \* 5,5 см.

Raspberry Pi побудований на системі-на-чипі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV, і 512 чи 256 мегабайтів оперативної пам'яті. Твердий диск відсутній, натомість використовується SD карта.

Raspberry Pi 2В використовує 32-розрядний чотирьох-ядерний процесор ARM Cortex-A7 900 МГц, Broadcom BCM2835 SoC, що знаходиться в самому першому поколінні Raspberry Pi, включає в собі процесор ARM11 76JZF-S з частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV (GPU), та оперативну пам'ять. 1176JZ (F) -S - це той самий процесор, що використовується в оригінальному iPhone, хоча і з вищою тактовою частотою, і сполучається з набагато швидшим GPU.

Табл.4

Технічні характеристики мікропроцесорів Raspberry Pi Швидкодії Arduino Uno для виконання поставленої задачі вистачає загалом повністю. Такі мікропроцесорні контролери як плати від BlackFin та Raspberry Pi занадто круті для даної системи, вони використовуються у більш ресурсно затратних процесах та приладах. З використанням Arduino Uno, ціна з усіма компонентами та збиранням даного приладу виходить приблизно 20\$, отже це також і вибір апаратно-обчислювальної платформи в сторону економії, коли як наприклад найпростіше програмне забезпечення Real Time Audio Analyzer офіційно коштує 30\$.

### ВИСНОВКИ

1. Був проведений аналіз та порівняння існуючих аналогів цифрового аналізатора спектра. Приведені характеристики кожного. Оцінені ціна, можливості та функції, мобільність, і середовище роботи. Можна зробити висновок, що прилади дуже різноманітні за своїми функціями, та за своїми призначеннями. Цифрові аналізатори спектра фонограм у яких багата функціональність, це хороші, якісні прилади, але основною проблемою є тільки ціна. Отже, було вирішено зробити дешевий, та компактний прилад.

2. На основі отриманого аналізу було оформлено технічне завдання та створені вимоги до пристрою, згідно яких пристрій в подальшому буде збиратися.

3. Виконавши аналіз та порівняння трьох мікроконтролерних систем, було обгрунтовано обрано Arduino Uno з мікроконтролером ATmega 328, як найвигідніший та найоптимальніший варіант з понад усіх. Швидкості Arduino Uno з її тактовою частотою процесора в 16 МГц повністю вистачає для підтримки всього функціоналу приладу цифровий аналізатор спектра сигналу. У Arduino Uno є безкоштовна та розширена бібліотека для програмування, та зручний інтерфейс з налагоджуванням системи за допомогою комп'ютера.

4. Оформивши технічне завдання та визначивши подальші вимоги до пристрою і перелік необхідного функціоналу для забезпечення роботи, можна розробити схеми роботи даної системи: структурна схема, функціональна, та електрична принципова схеми.

## РОЗДІЛ 2

### ЦИФРОВИЙ АНАЛІЗАТОР СПЕКТРА ФОНОГРАМ

#### 2.1 Розробка структурної схеми пристрою цифровий аналізатор спектра фонограм

Виходячи з попередніх підрозділів, розроблено структурну схему роботи пристрою.

Структурна схема складається з основних чотирьох блоків: джерело звуку (3.5 jack вхід), Апаратно – обчислювальна платформа Arduino Uno, мікроконтролер ATmega328 та LCD дисплей на який виводиться зображення графічної функції сигналу, та пінів A4, A5 до яких під'єднується екран

Рис. 6. Структурна схема цифрового аналізатора спектра фонограм

Джерело звуку (3.5 jack вхід) - роз'єм, що зазвичай використовується для під'єднання різних приладів вводу та виводу звука, у нашому випадку використовується джерело звуку, або мікрофон, або звук з комп'ютера, ноутбука, чи телефона.

Мікроконтролер ATmega 328 – це мікроконтролер сімейства AVR, побудований на 8-ми бітному процесорі.

LCD дисплей – засіб для виводу кінцевої інформації. Використовується для візуалізації функції сигналу.

Розроблена структурна схема пристрою дає змогу виконати всі поставленні задачі в попередньому розділі в повному обсязі.

#### 2.2 Опис процесу розкладу звукового сигналу на частотні складові за допомогою Швидкого перетворення Фур'є

Розглянемо процеси та принципи, що лежатимуть в основі пристрою, що проектується. У роботі мова йтиме про цифрові звукові сигнали. Їх основна відмінність від аналогових полягає в тому, що числові значення цифрового сигналу в кожен момент часу кодуються двійковими даними за допомогою семплів - набору біт значень 0 або 1. По суті відбувається перетворення амплітуд звукових коливань у двійкову систему. Втім сигнал залишається у часовій площині, що унеможливорює його подальший аналіз та графічне представлення у частотній площині.

Пристрій, що розробляється, призначений для графічного представлення розбиття сигналу на частотні складові (спектр) та зображення інтенсивності сигналу на різних частотах. В основі операції з перетворення сигналів з часової області в частотну існують Перетворення Фур'є.

Оскільки працюватимемо з дискретним (цифровим) сигналом, то доцільно використовувати Дискретне Перетворення Фур'є, формулу якого подано нижче:

- $X(m)$  –  $m$ -ий компонент ДПФ, тобто  $X(0), X(1), X(2), \dots$ ,
- $M$  – індекс ДПФ в частотній області,  $m=0,1,2,3,\dots,N-1$ ,
- $x(n)$  – послідовність вхідних відліків,  $x(0), x(1), x(2), \dots$ ,
- $n$  – часовий індекс вхідних відліків,  $n=0,1,2,3,\dots,N-1$ ,
- $N$  – кількість частотних відліків та відліків вхідної послідовності результату Дискретного перетворення Фур'є.

Важливо розуміти, що коли беремося аналізувати реальний сигнал за допомогою будь якого перетворення Фур'є, маємо ідеальну ситуацію і виходимо з припущення, що сигнал періодичний на поточному часовому інтервалі і складається з простих синусоїд. Найчастіше так і відбувається, так як акустичні сигнали, як правило, мають гармонійну природу, але можливі і більш складні випадки.

Як же відбувається процес. Головною задачею перш за все є виділення короткого кадру, або інтервалу композиції, яка складається з дискретних відліків, який умовно представляємо періодичним та застосовуємо до нього перетворення Фур'є. В результаті перетворення отримаємо цілий масив комплексних чисел, який містить інформацію про амплітудний і фазовий спектр аналізованого кадру. Причому спектри також є дискретними з кроком рівним (частота дискретизації) поділити на (кількість відліків). Тобто чим більше беремо відліків, тим точніше розширення виходить по частоті. Однак при постійній частоті дискретизації збільшуючи число відліків, збільшуємо аналізований часовий інтервал, а оскільки в реальних музичних творах ноти мають різну тривалість звучання і можуть швидко змінюватися, відбувається їх накладення, тому амплітуда тривалих нот «затмарює» собою амплітуду коротких. З іншого боку для гітарних тюнерів такий спосіб збільшення розширення по частоті підходить добре, оскільки нота, як правило, звучить довго і одна. Тривалість кадру зазвичай становить приблизно від 30 мс до 1 с. Чим він коротший, тим краще розширення ми отримуємо за часом, але гірше за частотою, а чим семпл довше, тим краще за частотою, але гірше за часом.

Втім використання обчислювальних можливостей Arduino дозволяє використовувати алгоритми Швидкого Перетворення Фур'є, що дозволяє замість  $N$  відліків робити  $N/2$  відліків і автоматизувати процеси проходження вікна. Кожен відлік обчислюється окремо, а потім сумується з іншими складовими. Найчастіше використовується алгоритм з проріджуванням по часу:

На кожному етапі відбувається по  $N$  комплексних операцій множення та додавання. А оскільки число складових вихідної послідовності на підпоследовностях вихідної довжини рівне  $\log_2 N$ , то повне число операцій,

що необхідні для ШПФ рівне  $N \log_2 N$ . При великих  $N$  має місце суттєва економія обчислювальних ресурсів порівняно з прямим вирахуванням ДПФ. Наприклад при  $N=210=1024$  число операцій, що потрібні, зменшиться в 117 разів.

Існують загальні визначення, які прийнято використовувати по відношенню до аналого-цифрових перетворювачів. Двома головними параметрами є точність і роздільна здатність, хоча ці дві характеристики реального АЦП вкрай слабо пов'язані між собою. Роздільна здатність не є ідентичною точності, 12-розрядний аналого-цифровий перетворювач може мати меншу точність, ніж 8-розрядний. Для АЦП дозвіл являє собою міру того, на скільки сегментів може бути поділений вхідний діапазон вимірюваного аналогового сигналу (наприклад, для 8-розрядного АЦП це  $2^8 = 256$  сегментів). Точність ж характеризує сумарне відхилення результату перетворення від свого ідеального значення для даного вхідного напруги. Тобто, роздільна здатність характеризує потенційні можливості АЦП, а сукупність точних параметрів визначає реалізація такої потенційної можливості.

Аналого-цифровий перетворювач - це пристрій, який приймає вхідні аналогові сигнали та генерує відповідні до них цифрові сигнали, які придатні для обробки мікропроцесорами та іншими цифровими пристроями.

В більшості мікропроцесорів та мікрокомп'ютерів є готові математичні функції та бібліотеки для виконання ШПФ. За їх допомогою обробка сигналу здійснюється майже миттєво, що дає змогу, за потреби, працювати і з аналоговим сигналом у реальному часі, виконуючи спершу його дискретизацію, а потім і подальші перетворення. Приклад використання ШПФ на Arduino приведено в додатках.

### 2.3 Характеристика мікроконтролера та компонентів, що входять до складу системи

Апаратно-обчислювальна платформа Arduino Uno побудований на ATmega328. Платформа має 14 цифрових вхід/виходів (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШИМ), 6 аналогових входів та кварцевий генератор 16 МГц, роз'єм USB. Для початку роботи треба підключити платформу до комп'ютера за допомогою звичайного кабелю USB, чи подати живлення за допомогою адаптера AC/DC або батареї.

На відміну від усіх попередніх плат, що використовували FTDI USB мікроконтролер для зв'язку по USB, в Arduino Uno застосований мікроконтролер ATmega8U2.

Рис. 7. Фотографія вигляду Arduino Uno

#### Живлення на платі

Arduino Uno може отримувати живлення через підключення USB або від зовнішнього джерела живлення.

Зовнішнє живлення (не USB) може подаватися акумуляторною батареєю або через перетворювач напруги AC/DC. Перетворювач напруги



підключається за допомогою роз'єму 2.1 мм. Дроти від батареї підключаються до виведень Gnd і Vin роз'єму живлення.

Платформа працює при зовнішньому живленні від 6 В до 20 В. При напрузі живлення нижче 7 В, виведення 5v може видавати менше 5 В, при цьому платформа може працювати нестабільно. При використанні напруги вище 12 В регулятор напруги може пошкодити плату, через високу температуру.

Основний діапазон від 7 В до 12 В.

#### Виводи живлення:

- **VIN.** Вхід використовується для подання живлення від зовнішнього джерела (у відсутність 5 У від роз'єму USB або іншого регульованого джерела живлення). Подання напруги живлення відбувається через це виведення.
- **5v.** Джерело напруги, яким можна керувати, що використовується для живлення мікроконтролера та всіх компонентів на платі.
- **3v3.** Напруга на виведенні 3.3 з вбудованим вбудованим регулятором на платі. Максимальне споживання струму 50 мА.
- **GND.** Заземлення

#### Основна пам'ять Arduino Uno

Мікроконтроллер ATmega328 розташовує 2 кБ ОЗУ (SRAM) і 1 Кб EEPROM та також 32 кБ флеш пам'яті, з яких 0.5 кБ використовується задля зберігання завантажувача.

#### Входи і виходи

Кожне з 14 цифрових виведень Uno може бути налагоджене як вхід або вихід, використовуючи функції pinMode (), digitalWrite (), і digitalRead (). Виводи працюють при напрузі 5 В. Кожне виведення має резистор навантаження (за умовчанням відключений) 20-50 кОм і може пропускати до 40 мА. Деякі виводи мають особливі функції:

- **Послідовна шина: 0 (RX) і 1 (TX).** Виводи використовуються для передачі (TX) і отримання (RX) даних TTL. Ці виводи підключені до виводів мікросхеми послідовної шини ATmega8U2 USB - to - TTL.
- **ШИМ: 3, 5, 6, 9, 10, і 11.** Будь яке з виведень забезпечує ШИМ з дозволом 8 біт за допомогою функції analogWrite ().
- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** За допомогою цих виведень здійснюється зв'язок SPI, для чого використовується бібліотека SPI.
- **LED. 13.** Вбудований світлодіод, підключений до цифрового виведення 13. Якщо значення на виведенні має високий потенціал, то світлодіод горить.

На платформі Uno встановлені 6 аналогових входів (позначених як A0... A5) здатністю 10 біт (тобто може набувати 1024 різні значення).

Стандартно виведення мають діапазон виміру до 5 В, проте є можливість змінити верхню межу за допомогою виведення AREF і функції analogReference (). Деякі виводи мають додаткові функції:

- **I2C: 4 (SDA) і 5 (SCL).** За допомогою виведень здійснюється зв'язок I2C (TWI), для створення якої використовується бібліотека Wire.

Додаткова пара виводів платформи:

- **AREF.** Опорна напруга для аналогових входів. Використовується з функцією `analogReference()`.
- **Reset.** Низький рівень сигналу на виведенні перезавантажує мікроконтролер. Зазвичай застосовується для підключення кнопки перезавантаження на платі розширення, що закриває доступ до кнопки на самій платі Arduino.

Рис. 8. Розпіновка на платі Arduino Uno

### Використання можливості програмування

Платформа програмується за допомогою програмного забезпечення Arduino.

Мікроконтролер ATmega328 поставляється із записаним завантажувачем, що полегшує запис нових програм без використання зовнішніх програматорів. Зв'язок здійснюється оригінальним протоколом STK500.

Є можливість не використовувати завантажувач і запрограмувати мікроконтролер через виведення ICSP (внутрішньосхемне програмування).

### Зв'язок

На аналого-цифровій платформі Arduino Uno встановлені декілька пристроїв для оброблення та роботи зв'язку з комп'ютером, іншими приладами Arduino або мікроконтролерами. ATmega328 підтримують послідовний інтерфейс здійснюваний виведеннями 0 (RX) і 1 (TX).

Мікросхема ATmega8U2, що розташована на платі направляє цей інтерфейс через USB, програми на стороні комп'ютера з'єднуються з платою через віртуальний COM порт. Прошивка ATmega8U2 використовує стандартні драйвера USB COM. Моніторинг послідовної шини (Serial Monitor) програми Arduino дає змогу посилати та отримувати текстові дані при підключенні до апаратно-обчислювальної платформи. Світлодіоди TX та DX на платформі блимають при передачі даних через USB підключення або мікросхему FTDI.

ATmega328 також підтримує інтерфейси SPI і I2C (TWI). У Arduino також включена і бібліотека Wire для зручної роботи з шиною I2C.

### Автоматичне (програмне) перезавантаження

Arduino Uno розроблена так, щоб перед записом коду перезавантаження здійснювалося самою програмою Arduino на комп'ютері, а не натисненням кнопки перезавантаження на самій платформі. Активація лінії DTR, тобто подання сигналу низького рівня, перезавантажує мікроконтролер. Лінія мікросхеми ATmega8U2, керує потоком даних (DTR), підключена до виведення перезавантаження мікроконтролеру ATmega328 через 100 нФ конденсатор. Важливо, що програмне забезпечення Arduino, використовуючи цю функцію, завантажує код одним натисненням кнопки "завантаження" в самому середовищі програмування. Подання сигналу низького рівня по лінії DTR скоординирована з початком запису коду, що зменшує таймаут завантажувача.

Ця функція має ще одне цікаве застосування. Перезавантаження Uno відбувається кожного разу при підключенні до програми Arduino на



комп'ютері з ОС Mac X або Linux (через USB). Якщо відбувається разова відладка скетчу, або введення яких-небудь інших даних при першому запуску, необхідно переконатися, що програма на комп'ютері чекає впродовж секунди перед самою передачею даних.

Під час програмування відбувається затримка декількох перших байтів коду, для того щоб уникнути отримання платформи невірних даних (усіх, окрім коду нової програми).

В Arduino Uno є можливість відключити лінію автоматичного перезавантаження розривом потрібної лінії. Контакти мікросхем з обох кінців лінії можуть бути сполучені з метою відновлення. Відключити автоматичне перезавантаження також можливо підключивши резистор 110 Ом між цією лінією та джерелом напруги в 5 В.

### Захист від перепадів роз'єму USB

У апаратно-обчислювальної платформи Arduino Uno вбудований самовідновлюючий автоматичний запобіжник, що захищає порт USB комп'ютера від надструмів, а також струмів короткого замикання. Практично усі комп'ютери мають подібний захист, хоча, цей запобіжник забезпечує ще один, додатковий бар'єр. Запобіжник спрацьовує при проходженні струму більше 500 мА через USB порт і розмикає ланцюг до тих доки нормальні значення струмів не будуть відновлені.

### Основні фізичні розміри

Довжина і ширина друкованої плати Arduino Uno складають 6,9 см і 5,3 см відповідно. Силовий роз'єм та роз'єм USB виходять за межі цих самих розмірів. Чотири отвори в платі дозволяють зафіксувати її на поверхні. Відстань між выводами номер 7 та 8 дорівнює 0,4 см, хоча між іншими выводами воно складає 0,25 см

## 2.4 Розробка функціональної схеми пристрою цифровий аналізатор спектра фонограм

Функціональною схемою називається схема на якій міститься зображення всіх функціональних елементів системи та зв'язки між ними. Функціональна схема та опис дає не повне уявлення про функціонування системи та завдання кожного блоку. Функціональні блоки на схемі позначаються у вигляді красних прямокутників з заокругленими сторонами, з вписаними в середині їх назвами. Зв'язки між елементами показують білими стрілками, шини в яких пристрої об'єднуються один з одним товстими лініями синього кольору, а їх напрямок зв'язку синіми стрілками. Жовтим кольором позначений блок вхідного сигналу.

Рис. 9. Функціональна схема роботи цифрового аналізатора спектра фонограм на базі Arduino Uno

Відповідно до знайденої документації для Arduino Uno шина адресу 24 біти, а шина даних 32 біти.

Центральний процесор (CPU) — функціональна частина Arduino Uno, що призначена для інтерпретації команд.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – це пристрій, що дає можливість перетворювати вхідну фізичну величину в її числове уявлення.

Арифметико-логічний пристрій (АЛП) - блок процесора, який під керуванням пристрою керування слугує для виконання логічних та арифметичних перетворень.

Регістр команд - регістр керуючого пристрою мікроконтролера, призначений для зберігання коду команди на період часу, необхідний для її виконання(32 8-бітових регістра загального призначення).

Flash пам'ять програм – це основне сховище для команд, її пам'ять є об'ємом 32 кБ.

SRAM - це пам'ять об'ємом 2 кБ. Її основною функцією є зберігання змінних і об'єктів, які створюються в ході виконання програми.

EEPROM - це пам'ять обсягом 1кб. В ній зберігаються дані, що не видаляються при виключенні контролера. Гарантований життєвий цикл 100 000 операцій запису/стирання.

Послідовний протокол обміну даними I2C (також називають ІІС - Inter-Integrated Circuits, міжмікросхемне з'єднання) застосовує за для передачі даних між пристроями дві лінії зв'язку, що працюють в двох напрямках, які мають назву шина послідовних ліній даних SDA (Serial Data) та послідовна лінія тактування шина SCL (Serial Clock). Ще є дві інші лінії для живлення. Шини SDA і SCL підключаються до шини для живлення через окремі резистори.

Рис. 10. Блок-схема проходження та перетворення сигналу через процесор Arduino Uno

Сигнал, що отримується з будь-якого джерела під'єданого до системи, з мікрофона, комп'ютера, ноутбука, або телефона, надходить в аналого-цифровий перетворювач (АЦП), де він перетворюється з аналогового сигналу в цифровий, в 0 та 1. Розрядність аналого-цифрового перетворювача в Arduino Uno - 10 біт.

Далі перетворений сигнал потрапляє в процесорний блок. А саме у регістр команд, де відбувається ініціалізація програми, програмним забезпеченням та бібліотекою, яка була спеціально написана для виконання потрібних приладу подальших функцій.

Після ініціалізації програми у регістрі команд, цифровий не інтегрований сигнал потрапляє в арифметично-логічний пристрій (АЛП), всередині якого відбувається Швидке перетворення Фур'є, інтегрування, та розбиття нашого сигналу на складові.

Сигнал аналізується програмою, та виконується функція виділення амплітуди окремих коливань. І останнім кроком є додавання перетвореного сигналу та вивід його на LCD дисплей LCD2004 I2C.

## 2.5 Формування електричної принципової схеми пристрою.

### Опис роботи схеми

Принципова електрична схема – це проект технічної документації, в якому визначається повний склад всіх електричних елементів, та зв'язків між ними, що дає повне уявлення про принцип роботи системи.

Принципові електричні схеми призначені для детального та повного відображення взаємозв'язків пристроїв з урахуванням послідовності роботи та їх принципів дії. На принципових електричних схемах всі електричні компоненти відображують за допомогою стандартизованих умовних позначень. Також вказуються лінії зв'язків між ними, між модулями та блоками.

#### Рис. 11. Принципова електрична схема цифрового аналізатора спектра фонограм

Маючи мікроконтролер ATmega328, маємо 6 аналогових пінів, та 14 цифрових пінів. Екран LCD2004, характеристики якого представлені нижче, має чотири входи: GND (земля), VCC (живлення), SDA (шина даних), SCL (шина тактування).

#### Рис.12. Позначення LCD дисплею на принциповій схемі ЦАСФ

Живлення екрану 5 В, тому VCC під'єднується до піну +5V на блоці Arduino Power. В цей же блок під'єднуємося до землі (GND).

Тепер маємо потрібну в аналогових входах. Для під'єднання шини даних (SDA) та шини тактування (SCL), використовуємо піни AD0 та AD1 відповідно.

Сигнал у провіднику це напруга. Ця напруга досить маленька особливо на виході навушників в телефоні, та комп'ютера. За замовчуванням Arduino Uno оцифровує сигнал напругою від 0 до 5 В. Для більшої точності оцифрування сигналу на невеликій гучності, хорошим рішенням є понизити верхній поріг в 5 В.

#### Рис. 13. Під'єднання до блоку Arduino живлення

Підключаємо вхід опорної напруги IREF (другий пін в блоці Arduino Power), до піну +3V3 дільником напруги на резисторах. Використовуємо три резистора 10 кОм кожний, два з яких підключаємо послідовно, та один паралельний до них. Тепер маємо максимальну напругу для оцифрування в 1,2 В, і тепер можна працювати з сигналом маленької напруги поданим з 3.5 jack з телефона, або комп'ютера. Під'єднуємо центральний канал до землі GND, а звуковий канал до головного піну.

Також додаємо конденсатор на 10 нФ, задля згладжування шумів. У якості модулю виведення інформації використаємо LCD2004 I2C дисплей на контролері HD44780

Табл.5

Технічні характеристики дисплею LCD2004 I2C

### ВИСНОВКИ

1. Було розроблено структурну схему приладу цифровий аналізатор спектра фонограм. Це дало можливість якісно підійти до питання вибору обчислювального пристрою та створення функціональної схеми та електричної принципової схеми приладу.

2. Розроблена функціональна схема приладу цифровий аналізатор спектра фонограм. Також розписана блок-схема проходження та перетворення сигналу через процесор Arduino Uno.

3. Розроблена електрична принципова схема блоку управління системою, та описаний принцип її роботи.

### РОЗДІЛ 3

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРИСТРОЮ

##### 3.1 Конструкторська розробка пристрою цифровий аналізатор спектра фонограм

Для реалізації даної електричної принципової схеми використовується лише макетна плата. Макетна плата – це плата, яка зазвичай використовується для швидкої зборки, або попереднього експериментального моделювання роботи прототипів електронних пристроїв. Макетні плати діляться на два типи: для монтажу з пайкою та без пайки. Макетні плати без пайки використовуються для моделювання роботи цифрових приладів. Для моделювання роботи електронних приладів та пристроїв використовують окремі макетні плати, монтаж та підключення елементів на які, проводиться за допомогою пайки. В ролі електричних провідників виступають перемички. Дана плата представляє собою текстоліт з великою кількістю просвердлених в ньому отворів з металізацією.

Рис. 14. Геометричні розміри екрану LCD 2004 I2C

Рис. 14. Геометричні розміри Arduino Uno

##### 3.2 Набір звукових сигналів, що використовуватимуться для тестування пристрою

Для створення експериментального прототипу пристрою цифровий аналізатор спектра фонограм, була використана макетна плата.

Для перевірки працездатності виробленого експериментального прототипу використаємо генератор тону в мережі інтернет, задамо декілька різних нот, та перевіримо відповідність зображення на екрані приладу.

Частоти налаштування фортепіано спираються на еталонну частоту ноти «ля» першої октави - 440 Гц.

У музикальній термінології для звуку існують такі важливі позначення, як октава, тон і обертон звуку. Октава означає інтервал, в якому співвідношення частот між звуками становить 1 до 2. Октава зазвичай дуже добре помітна на слух, в той час як звуки в межах цього інтервалу можуть бути дуже схожими один на одного. Октавою також можна назвати звук, який робить вдвічі більше коливань, ніж інший звук, в однаковий часовий період. Наприклад, частота 800 Гц, є ні що інше, як більш висока октава 400 Гц, а частота 400 Гц в свою чергу є наступною октавою звуку частотою 200 Гц. Октава в свою чергу складається з тонів і обертонів. Змінні коливання в гармонійної звукової хвилі однієї частоти сприймаються людським вухом як музичний тон.

В стандартному фортепіано з 88 клавішами октава розділена на 12 півтонів за логарифмічною шкалою. У кожній наступній октаві частота

відповідного основного тону вдвічі вище: «ля» першої октави - 440 Гц, «ля» другої октави - 880 Гц, «ля» третьої октави - 1760 Гц і так далі.

Приведемо таблицю відповідності деяких частот до їх чіткої ноти.

Табл.6

Деякі відповідності нажатої ноти фортепіано та її частоти  
Скористуємося сайтом Online Tone Generator, який дає змогу задати будь яку частоту від 1 Гц до 20,154 Гц. Та перевіримо відповідність між частотами нот та тим, що демонструє прилад

Перш за все задамо 880 Гц, що відповідає ноті А5 (ля4)

Рис. 15. Online Tone Generator

На дисплею LCD 2004 I2C, бачимо 16 смуг частот, і 880 Гц відображається на четвертій полосі.

## ВИСНОВОК

1. Провівши аналіз існуючих аналогів приладу цифровий аналізатор спектра фонограм були описані головні якості та приведені характеристики. На основі обробленої інформації, складено технічне завдання та визначені вимоги до функціональних можливостей приладу, що розробляється, та висунуті також технічні вимоги.

2. Було визначено, що можливостей та швидкості обчислювального пристрою Arduino Uno, для виконання поставлених задач вистачає повністю. Перевагою також є безкоштовні бібліотеки для програмування Arduino. Зроблений опис процесів та принципів, що лежать в основі пристрою цифровий аналізатор спектра фонограм.

3. Для візуалізації вихідної інформації було обрано дисплей з підтримкою інтерфейсу I2C LCD 2004. Обрана елементна база приладу цифровий аналізатор спектра фонограм має наступні параметри:

- Діапазон робочих частот: 20 Гц ... 20 кГц;
- Робота на частотах дискретизації (44,1; 48; 88,2; 96 кГц) ;
- Можливість роботи як з цифровими, так із аналоговими сигналами;
- Живлення від AC/DC, або від батарейки, або комп'ютера (+7 В -+12 В).

4. Були розроблені схеми: структура, з мінімалістичним та простим описанням принципу роботи пристрою цифровий аналізатор спектра, функціональна, з демонстрацією функціональних елементів та зв'язків на базі Arduino Uno та електрична принципова, з описом принципу роботи пристрою, та описом під'єднання компонентів до пінів.

5. Були приведені габаритні розміри двох основних елементів схеми, як дисплею LCD 2004 I2C, та апаратно-обчислювальної форми Arduino Uno. Проведений експеримент з генератором частот, з подавання частоти відповідної до ноти, та демонстрації її на екрані.

## SUMMARY

### Digital Phonogram Spectrum Analyzer

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic Instruments and Devices Yermakov Nykyta Dmytrovych. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv

Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE – 62. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 60 p., Ill. 24, tables 6.

**Keywords:** digital spectrum analyzer, Fast Fourier Transform, microcontroller, Arduino Uno, Rapsberry Pi, Black Fin, signals, the structural scheme, the functional scheme, the electric schematic diagram, amplitude-frequency response

**The purpose and objectives of the study:** the creation of a digital device based on Arduino, the main task of which is to demonstrate the amplitude-frequency characteristics of the sound (music) signal. It is based on the Fast Fourier Transform.

**Object of research:** sound signal.

**Subject of research:** decomposition of a sound signal into spectral components in real time with the subsequent visualization

The work consists of an introduction of 2 pages, which describes the importance of music for people, and a ways to extract sound. Sound spectrum analyzers occupy a very important place in the work of every sound engineer in the studio. Especially popular are a large number of analogues of sound spectrum analyzers in the form of software for various operating systems.

The first section was a review of the literature on the theme of physics of a musical sound. A musical signal is a set of sound waves of different frequency and length. An analysis and comparison of existing analogues of a digital spectrum analyzer was also performed. Amplitude-frequency response (AFC) - I'll attach the amplitude of the output signal to the transmission system, but to process the signal from the input frequency to the output signal. The characteristics of each are given. Estimated price, features and functions, mobility, and work environment. This section includes 20 pages. A spectrum analyzer is a device for measuring and

displaying the spectrum of a signal, which is the distribution of signal energy over frequencies. On the basis of the received analysis the technical task was made and requirements to the device according to which the device will be assembled further were created. After analyzing and comparing the three microcontroller systems, like Arduino, Rapsberry Pi and Black Fin, it was reasonably chosen Arduino Uno with ATmega 328 microcontroller, as the most profitable and optimal option of all. The speed of the Arduino Uno with its processor clock speed of 16 MHz is fully sufficient to support the entire functionality of the device digital signal spectrum analyzer. The Arduino Uno has a free and advanced programming library, and a user-friendly interface for debugging your computer. Work supporting was determined operation in the frequency range (20 Hz - 20 kHz), supporting for USB and 2ic interfaces, and operation at sampling frequencies (44.1; 48; 88.2; 96 kHz).

The next section of the work is devoted to the review of the element base for the implementation of the digital phonogram spectrum analyzer. The section is set out on 20 pages. The beginning of the section is devoted to the formation of the structural scheme of operation of the device. The structural scheme of the device digital analyzer of a spectrum of phonograms was developed that gave the chance to approach qualitatively a question of a choice of the computing device and

creation of the functional scheme and the electric schematic scheme of the device. The processes and principles that will underlie the projected device were considered. A complete description of the characteristics and features of the Arduino was made.

The functional scheme of the device the digital analyzer of a spectrum of phonograms is developed. There is also a block diagram of the passage and conversion of the signal through the Arduino Uno processor. A functional diagram is a diagram that contains an image of all the functional elements of the system and the relationship between them. The functional diagram and description does not give a complete picture of the operation of the system and the tasks of each unit. Functional blocks in the diagram are indicated in the form of red rectangles with rounded sides, with their names inscribed in the middle. The connections between the elements are indicated by white arrows, the buses in which the devices are connected to each other by thick blue lines, and their direction of connection by blue arrows. The input signal unit is highlighted in yellow.

The electric schematic diagram of the system control unit is developed, and the principle of its work is described. Schematic electrical diagram is a design document that defines the full composition of electrical elements, the connections between them and gives a complete picture of the principle of operation of the system.

## Схожість

Схожість із джерелами з Інтернету

123

3	<a href="https://studfile.net/preview/5285785/page:8">https://studfile.net/preview/5285785/page:8</a>	3 Джерело	4.95%
6	<a href="https://studfile.net/preview/3535314/page:3">https://studfile.net/preview/3535314/page:3</a>	4 Джерело	4.38%
10	<a href="http://www.8ref.com/18/referat_186555.html">http://www.8ref.com/18/referat_186555.html</a>		3.52%
12	<a href="https://knowledge.allbest.ru/medicine/2c0a65625b3ac69b5c53a89521306d26_1.html">https://knowledge.allbest.ru/medicine/2c0a65625b3ac69b5c53a89521306d26_1.html</a>	2 Джерело	2.76%
13	<a href="http://ukrefs.com.ua/page,2,155602-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html">http://ukrefs.com.ua/page,2,155602-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html</a>		2.7%
22	<a href="https://ukrbukva.net/page,2,101741-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html">https://ukrbukva.net/page,2,101741-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html</a>		1.64%
23	<a href="https://langeron.net.ua/arduino/platy-arduino/arduino-nano-v30-atmega328p">https://langeron.net.ua/arduino/platy-arduino/arduino-nano-v30-atmega328p</a>	27 Джерело	1.45%
27	<a href="https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi">https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi</a>		0.7%
28	<a href="http://eprints.library.odeku.edu.ua/1410/1/Korytnyuk%20MI_Spektral%27nyy_analiz_muzychnykh_zhanriv_t_%20vykonavtsiv_KM">http://eprints.library.odeku.edu.ua/1410/1/Korytnyuk%20MI_Spektral%27nyy_analiz_muzychnykh_zhanriv_t_%20vykonavtsiv_KM</a>		1.07%
30	<a href="https://studopedia.su/20_7142_strumoviy-zahist-roziemu-USB.html">https://studopedia.su/20_7142_strumoviy-zahist-roziemu-USB.html</a>		0.99%
31	<a href="https://ukrbukva.net/page,3,101741-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html">https://ukrbukva.net/page,3,101741-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html</a>		0.98%
32	<a href="https://studopedia.su/20_7140_zhivlennya.html">https://studopedia.su/20_7140_zhivlennya.html</a>	2 Джерело	0.98%
34	<a href="https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Arduino_Mega_2560">https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Arduino_Mega_2560</a>	2 Джерело	0.92%
35	<a href="http://ukrefs.com.ua/155602-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html">http://ukrefs.com.ua/155602-Struktura-i-ispol-zovanie-mikrokontrollerov.html</a>		0.83%
37	<a href="https://beegreen.com.ua/otladochnaja-plata-kontroller-arduino-uno-r3-atmega328-usb-kabel-12510">https://beegreen.com.ua/otladochnaja-plata-kontroller-arduino-uno-r3-atmega328-usb-kabel-12510</a>		0.8%
39	<a href="https://www.bestreferat.ru/referat-179970.html">https://www.bestreferat.ru/referat-179970.html</a>		0.74%
42	<a href="https://rivera-rv.com.ua/index.php?route=product/product&amp;path=244_146&amp;product_id=5591">https://rivera-rv.com.ua/index.php?route=product/product&amp;path=244_146&amp;product_id=5591</a>		0.55%
47	<a href="https://knowledge.allbest.ru/programming/3c0a65625a3ad79a4d43a89521306d37_0.html">https://knowledge.allbest.ru/programming/3c0a65625a3ad79a4d43a89521306d37_0.html</a>	3 Джерело	0.47%
49	<a href="https://www.wikizero.com/uk/Virtual_Studio_Technology">https://www.wikizero.com/uk/Virtual_Studio_Technology</a>	6 Джерело	0.39%
51	<a href="https://studopedia.su/20_7144_vhodi-i-vihodi.html">https://studopedia.su/20_7144_vhodi-i-vihodi.html</a>		0.33%



55	<a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28891/1/Kleban_magistr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28891/1/Kleban_magistr.pdf</a>		0.31%
56	<a href="https://greenchip.com.ua/5-0-73-1.html">https://greenchip.com.ua/5-0-73-1.html</a>	2 Джерело	0.31%
58	<a href="https://beegreen.com.ua/mikrokontroler-atmega32a-au-tqfp44-avr-10244">https://beegreen.com.ua/mikrokontroler-atmega32a-au-tqfp44-avr-10244</a>	13 Джерело	0.29%
59	<a href="https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%BD%D0%B5_%D0%E">https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%BD%D0%B5_%D0%E</a>	2 Джерело	0.28%
60	<a href="https://www.ria.com/uk/other-domestic-technique-kontroller-arduino-uno-r3-atmega328-ch340g-48066461.html">https://www.ria.com/uk/other-domestic-technique-kontroller-arduino-uno-r3-atmega328-ch340g-48066461.html</a>		0.27%
61	<a href="https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D1%96%D1%82%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%BE-%D1%...">https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D1%96%D1%82%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%BE-%D1%...</a>		0.24%
66	<a href="https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/work/2016/Sharai/Sharai_PZ.pdf">https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/work/2016/Sharai/Sharai_PZ.pdf</a>		0.2%
67	<a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28338/1/Zavalniuk_bakalavr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28338/1/Zavalniuk_bakalavr.pdf</a>		0.19%
69	<a href="https://otherreferats.allbest.ru/radio/00421530_0.html">https://otherreferats.allbest.ru/radio/00421530_0.html</a>	9 Джерело	0.18%
70	<a href="https://ua-referat.com/%D0%A1%D1%83%D1%87%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%96_%D0%BC%D1%96%D0%BA%D1">https://ua-referat.com/%D0%A1%D1%83%D1%87%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%96_%D0%BC%D1%96%D0%BA%D1</a>	5 Джерело	0.14%
76	<a href="https://beegreen.com.ua/otladochnaja-plata-kontroller-arduino-leonardo-r3-usb-kabel-12511">https://beegreen.com.ua/otladochnaja-plata-kontroller-arduino-leonardo-r3-usb-kabel-12511</a>		0.13%
77	<a href="http://afgp.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/05/Metod.-rekom.-do-napysannya-dyplomnyh-robot-OKR-spetsialist-Pravoznavstvo...">http://afgp.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/05/Metod.-rekom.-do-napysannya-dyplomnyh-robot-OKR-spetsialist-Pravoznavstvo...</a>		0.11%
81	<a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27163/1/Riabchenko_magistr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27163/1/Riabchenko_magistr.pdf</a>	6 Джерело	0.1%
82	<a href="http://bibliograph.com.ua/economika-predpriyatiya-2/33.htm">http://bibliograph.com.ua/economika-predpriyatiya-2/33.htm</a>		0.1%
86	<a href="https://www.bestreferat.ru/referat-275742.html">https://www.bestreferat.ru/referat-275742.html</a>	17 Джерело	0.1%

## Схожість по Бібліотеці акаунту

257

1	31_Сніжко (1)	ID файлу: 5958284	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic In	87 Джерело	5.81%
2	Студентська робота	ID файлу: 107944	Institution: Lviv Polytechnic National University		5.13%
4	Студентська робота	ID файлу: 1003493204	Institution: Cherkasy State Technological University		4.86%
5	Студентська робота	ID файлу: 5952598	Institution: National University of Life and Environmental Scienc	4 Джерело	4.68%
7	Студентська робота	ID файлу: 1000081659	Institution: National University of Water Management and Natural Re...		3.96%
8	Студентська робота	ID файлу: 3625082	Institution: Lviv Polytechnic National University		3.84%

9	Студентська робота	ID файлу: 1000806201	Institution: Vasyl Stus Donetsk National University		3.7%
11	Студентська робота	ID файлу: 47026	Institution: Lviv Polytechnic National University	2 Джерело	2.95%
14	Студентська робота	ID файлу: 1000793695	Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University		2.66%
15	14_ПТМ_Бак_2019	ID файлу: 1000086495	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Inst...		2.53%
16	Студентська робота	ID файлу: 5946109	Institution: Lviv Polytechnic National University		2.35%
17	Студентська робота	ID файлу: 4627494	Institution: Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University		1.91%
18	Студентська робота	ID файлу: 1000080684	Institution: National University of Water Management and Natural Re...		2.18%
19	Студентська робота	ID файлу: 6023157	Institution: Lviv Polytechnic National University		2.16%
20	Студентська робота	ID файлу: 3553497	Institution: Lviv Polytechnic National University		2.12%
21	Студентська робота	ID файлу: 3461377	Institution: National University of Life and Environmental Sciences of Uk...		1.69%
24	Антиплагиат_Евдокимова	ID файлу: 1004002093	Institution: National Technical University of Ukraine "К	3 Джерело	1.39%
25	2020-bachelor-EDD_Ilchenko_rezervne_zhyvlennya_fch	ID файлу: 1004048808	Institution: National Technica	34 Джерело	1.29%
26	Диплом Невгод	ID файлу: 1003946436	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Inst...		1.26%
29	Студентська робота	ID файлу: 1003587459	Institution: Lviv Polytechnic National University		1.03%
33	Гончаренко О.М	ID файлу: 5950873	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institu...		0.97%
36	Студентська робота	ID файлу: 1000793800	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.81%
38	Студентська робота	ID файлу: 8155588	Institution: Vasyl Stus Donetsk National University		0.75%
40	Студентська робота	ID файлу: 5200312	Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University	5 Джерело	0.66%
41	Студентська робота	ID файлу: 2024670	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.56%
43	Погребенний	ID файлу: 5936921	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.17%
44	Бех антиплагиат КА-74мп	ID файлу: 8091993	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytech...		0.51%
46	Студентська робота	ID файлу: 1003755324	Institution: National University of Life and Environmental Sciences of...		0.5%

48	Студентська робота	ID файлу: 1004103594	Institution: Lviv Polytechnic National University	0.15%
50	dontsov_magistr	ID файлу: 5720279	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.1%
52	МаленчикТ_бакалавр	ID файлу: 1000085893	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.33%
53	Ліневич	ID файлу: 1000044856	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">2 Джерело</a>	0.31%
54	Студентська робота	ID файлу: 1584699	Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University	0.32%
57	Пахольченко ДП	ID файлу: 1003960893	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">11 Джерело</a>	0.29%
62	Студентська робота	ID файлу: 1000767298	Institution: Lviv Polytechnic National University	0.24%
63	МВ-71мн - Солнцев (перевірка)	ID файлу: 11929520	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">2 Джерело</a>	0.23%
64	PolihovychRA_Rlp71_bachelor_2020	ID файлу: 1004042435	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">3 Джерело</a>	0.23%
65	Студентська робота	ID файлу: 1000991442	Institution: National Aviation University	0.2%
68	Диплом Стрижеус А.І	ID файлу: 1000032450	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">30 Джерело</a>	0.18%
71	хрущ	ID файлу: 1000086063	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.13%
72	Golub_Unicheck	ID файлу: 5317125	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">5 Джерело</a>	0.13%
73	Студентська робота	ID файлу: 4218346	Institution: National University of Water Management and Natural Resources	0.13%
74	ПЗ Резник	ID файлу: 1000779162	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.13%
75	Студентська робота	ID файлу: 1000505017	Institution: Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozub	0.13%
78	Студентська робота	ID файлу: 1000988655	Institution: National Aviation University	0.11%
79	Студентська робота	ID файлу: 1000746097	Institution: Lviv Polytechnic National University	0.11%
80	Студентська робота	ID файлу: 46430	Institution: Lviv Polytechnic National University <a href="#">2 Джерело</a>	0.11%
83	Kosovetcl_Rlp71_bachelor_2020	ID файлу: 1004037667	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.1%
84	Магістерська дисертація Лавренюк	ID файлу: 1000794433	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">30 Джерело</a>	0.1%
85	Ковеня_ПБ-51	ID файлу: 1000072635	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" <a href="#">2 Джерело</a>	0.1%

## Цитати

Цитати

1

- 1 Raspberry Pi побудований на системі-на-чипі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV, і 512 чи 256 мегабайтів оперативної пам'яті.

## Вилучення

Вилучення по Бібліотеці акаунту

15

Студентська робота ID файлу: 1000101687 Institution: Lviv Polytechnic National University

15 Джерело 0.09%