

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ ініціали, прізвище
підпис

“ ____ ” _____ 20__ року

Дипломна робота магістра

на тему: **ЕМІСІЙНИЙ СПЕКТР МЕТАНОЛУ З ІМПУЛЬСНИМ
УПОРСКУВАННЯМ РЕЧОВИНИ**

Виконала: студентка II курсу магістратури, групи РЕ-61
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка
освітньо-професійна програма «Фізична та біомедична
електроніка»

Марія АЛЕКСЕЄВА.

Керівник
доктор фіз.-мат. наук,
професор

Віктор КАТРИЧ

Консультант
Maître de conférence
d'Université de Lille

Роман МОТІЄНКО

2023 рік

Емісійний спектр метанолу з імпульсним впорскуванням речовини

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 31 сторінок, 16 ілюстрацію, 5 бібліографічних джерел.

В роботі розглянути методи емісійної радіоспектроскопії, а також апаратура емісійного спектрометра лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лілльського університету. Розглянути методи та завдання для яких застосовується імпульсний впорск речовини, що досліджується. На основі мікроконтролера ARDUINO UNO розроблено гнучку систему керування імпульсами впорску речовини, що досліджується, в комірку взаємодії. Розроблена система забезпечує керування тривалістю імпульсів впорску в межах від 0.2 мс до 25.5 мс. Також система може забезпечувати затримку імпульсу впорску в межах від 0 мс до 255 мс. Виконано випробування розробленої системи, а також при випробуваннях було досліджено форму струма клапанів. З використанням розробленої системи отримано запис емісійного спектра молекули метанолу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: емісійний спектрометр, імпульсний впорск речовини, ARDUINO UNO.

ABSTRACT

This work contains 31 pages, 16 illustrations, 5 bibliographic sources.

The methods of emission radi spectroscopy and the equipment of the emission spectrometer laboratory for terahertz spectroscopy at the Laboratory of Laser Physics, Atoms, and Molecules (PhLAM) of Lille University are considered in the work. The methods and tasks for which pulsed injection of the substance under investigation is applied are examined. Based on the ARDUINO UNO microcontroller, a flexible control system for substance injection pulses into the interaction cell has been developed. The system allows control of the duration of injection pulses within the range of 0.2 ms to 25.5 ms. Additionally, the system can provide a delay of the injection pulse within the range of 0 ms to 255 ms. Tests of the developed system were conducted, and during the tests, the shape of the valve current was investigated. Using the developed system, the emission spectrum of methanol molecules was recorded.

KEYWORDS: emission spectrometer, pulsed injection of substance, ARDUINO UNO.

Зміст

Вступ.....	5
1. Завдання, що вирішує радіоспектроскопія.....	7
2. Види спектрометрів та переваги емісійних спектрометрів	12
3. Емісійний спектрометр Лілльського університету.....	15
4. Система імпульсного впорску речовини, що досліджується	18
5. Система керування імпульсним впорском	21
6. Дослідження імпульсів струму клапанів впорску	27
7. Емісійний спектр молекули метанолу	29
Висновки	29
Література	31

Вступ

Радіоспектроскопія є науковим методом вивчення взаємодії між речовиною та електромагнітним випромінюванням в радіочастотному діапазоні. Цей метод дозволяє аналізувати спектри радіочастотного випромінювання, яке поглинається або випромінюється речовиною.

На відміну від інших видів спектроскопії, які використовують світло чи інші видимі частини електромагнітного спектра, радіоспектроскопія вивчає поглинання або випромінювання у діапазоні частот від кількох гігагерц (ГГц) до кількох терагерц (ТГц). Принцип радіоспектроскопії полягає в тому, що атоми та молекули речовини можуть поглинати енергію від радіочастотного випромінювання і переходити в збуджений стан. Цей перехід викликає характерні зміни у спектрі поглинання або випромінювання, які можна вимірювати та аналізувати. Основною особливістю радіоспектроскопії є вимірювання частоти молекулярних ліній, саме тому досягається найвища точність вимірювань.

Результати радіоспектроскопічних досліджень застосовуються в різних галузях науки, включаючи астрономію, хімію, фізику, медицину та техніку. Радіоспектроскопія дозволяє досліджувати властивості речовини, визначати їхні складові, вивчати структуру молекул та отримувати важливу інформацію про об'єкти в міжзоряному середовищі.

Історія радіоспектроскопії сягає коренів у ранні дослідження електромагнітного випромінювання та його впливу на речовину. У 19-20 століттях дослідження Максвелла та Герца стали основою для розуміння характеру електромагнітних хвиль. Протягом років учені, такі як Галілео Ферріко, вдосконалювали методи вимірювання та аналізу радіочастотних явищ. Вперше мікрохвильовий спектр молекули амоніаку експериментально було отримано у 1934 році.

Переломний момент у галузі застосування радіоспектроскопії для аналізу радіовипромінювання міжзоряних об'єктів стався в 1931 році, коли Карл Янський в 1931 році здійснив перше вимірювання радіочастотного випромінювання зорі. Подальші розвитки призвели до створення радіотелескопів, таких як Радіотелескоп Парсек та Арресібо, що використовуються для вивчення космічних об'єктів.

Завдяки значному прогресу у фізиці електронних приладів та прогресу в електроніці сучасна радіоспектроскопія є потужним методом досліджень багатьох об'єктів мікросвіту.

1. Завдання, що вирішує радіоспектроскопія

Радіоспектроскопія відіграє ключову роль в сучасних наукових дослідженнях та технологічних застосуваннях. В астрономії вона дозволяє досліджувати віддалені галактики, пульсари, квазари та інші об'єкти, які не завжди можна вивчати за допомогою видимого світла. Радіоспектроскопія надає нам можливість отримувати інформацію про склад, температуру та інші властивості цих об'єктів.

У хімії радіоспектроскопія дозволяє визначати молекулярну структуру речовини, досліджувати хімічні взаємодії та визначати концентрації різних речовин у зразках.

В медицині та біології вона знаходить застосування в області магнітно-резонансної терапії, де радіочастотні імпульси використовуються для отримання детальних зображень внутрішніх органів.

У високотехнологічних галузях, таких як телекомунікації та безпека, радіоспектроскопія використовується для аналізу та підтримки роботи радіочастотних пристроїв.

Таким чином, радіоспектроскопія виявляється важливою галуззю науки та техніки, що відкриває нові можливості для досліджень та технологічного розвитку. У наш час вона є необхідним інструментом для розвідки Всесвіту, розуміння молекулярних структур та удосконалення технологічних рішень у різних галузях науки та промисловості.

У молекулярній фізиці радіоспектроскопія дозволяє вивчати структуру молекул на основі їхньої взаємодії з радіочастотним випромінюванням. Це важливо для розуміння властивостей та поведінки речовин на молекулярному рівні.

Також радіоспектроскопія застосовується для виявлення різних молекул у міжзоряному середовищі. Вивчення спектрів молекул у лабораторних

умовах дозволяє отримати необхідну інформацію для подальшого пошуку та виявлення, перш за все, складних органічних молекул у міжзоряному середовищі. Такі дослідження важливі для розуміння хімічного складу та еволюції космосу.

Дипломна робота виконується в Лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лілльського університету. Дана лабораторія є одним з світових лідерів у галузі молекулярної спектроскопії. Дослідники даної лабораторії співпрацюють з радіоастрономами, які виконують спостереження з використанням найсучасніших радіотелескопів. Завдяки такій співпраці вже виявлено багато молекул в різних об'єктах у міжзоряного середовища. Зокрема результати радіоспектроскопічних досліджень використовується для аналізу областей зореутворення, що дозволяє досліджувати процеси формування зір та їхні властивості.

В лабораторії виконуються дослідження спектрів різних органічних молекул, наприклад метил форміату [1]. Метил форміат дуже часто називають космічним «бур'яном» саме тому, що лінії цієї молекули спостерігаються майже у всіх напрямках, що значно ускладнює виявлення інших молекул. Саме тому на початку досліджень необхідно виключити усі відомі лінії метил форміату.

Активно вивчаються нежорсткі молекули із внутрішнім рухом, зокрема з великою амплітудою внутрішніх рухів. Такі молекули мають дуже складні власні спектри поглинання або випромінювання [2].

Також вивчаються спектри інших складних органічних молекул, що дозволяє створити необхідну базу даних для їх подальшого пошуку у міжзоряному середовищі. Співробітники лабораторії працюють над створенням публічно доступної бази даних з молекулярних спектрів. Перш за все в таку базу включаються результати власних досліджень.

Крім того, співробітники лабораторії терагерцової спектроскопії виконують дослідження із моделюванням умов, що є притаманними об'єктам міжзоряного середовища. З цією метою застосовується імпульсний впорск речовини, що досліджується, у комірку для подальшої взаємодії з електромагнітним випромінюванням. За умов такого впорску з'являється можливість охолодження зразка, що досліджується, до дуже низьких температур, які є характерними для об'єктів Всесвіту. Крім того, застосування електричного розряду дозволяє стимулювати деякі хімічні реакції та формування деяких нестабільних молекул, існування яких передбачається у міжзоряних хмарах.

В лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лілльського університету розроблено та побудовано цілу низку радіоспектрометрів, зокрема високоточний абсорбційний спектрометр, що дозволяє виконувати вимірювання спектрів в діапазоні частот від 75 ГГц до 1500 ГГц [3]. Крім того, побудовано високочутливий емісійний спектрометр, який дозволяє реєструвати дуже слабкі лінії в діапазоні 200 — 330 ГГц [4, 5].

Також є три відносно низькочастотних емісійних спектрометра діапазону 2 — 20 ГГц, які призначено для вивчення структури молекул. Зовнішній вигляд одного з таких спектрометрів показано на Рис. 1.



Рис.1. Зовнішній вигляд емісійного спектрометра з перетворенням Фур'є в Лільському університеті

Попри створення так званої Стандартної моделі фізики елементарних частинок, цілу низку сучасних досліджень спрямовано саме на пошук деяких відхилень від згаданої моделі, зокрема виконується активний пошук просторово-часових варіацій фундаментальних сталих. Такий пошук здійснюється на основі високоточних спектроскопічних та радіоспектроскопічних досліджень, що є важливим для тестування фізичних теорій, зокрема саме Стандартної моделі.

Останнім часом інтенсивно виконуються дослідження, які спрямовано на розробку методів застосування радіоспектроскопії для моніторингу та аналізу забруднень навколишнього середовища. Такі методи мають дозволити

виявляти хімічні речовини та визначати їхні концентрації. Такі дослідження також виконуються в лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лілльського університету.

Таким чином, можна скласти загальний перелік основних завдань, що вирішує радіоспектроскопія:

1. Вивчення структури молекул, та розв'язання інших проблем молекулярної фізики.
2. Виявлення молекул у міжзоряному середовищі, а також моделювання поведінки молекул в умовах, що наближуються до умов міжзоряного середовища.
3. Вивчення радіоспектроскопічними методами областей зореутворення у міжзоряному середовищі.
4. Пошук просторово-часових варіацій фундаментальних сталих.
5. Розробка та створення вторинних еталонів частоти та часу.
6. Екологічний моніторинг забруднень навколишнього середовища.
7. Спектроскопічний контроль перебігу різних технологічних процесів, що супроводжуються хімічними реакціями.

2. Види спектрометрів та переваги емісійних спектрометрів

Для вивчення спектрів молекул за лабораторними умовами застосовуються наукові прилади, які називають радіоспектрометрами. Є два основних методи вивчення взаємодії електромагнітного випромінювання та речовини: 1) поглинання та 2) випромінювання (Рис.2).

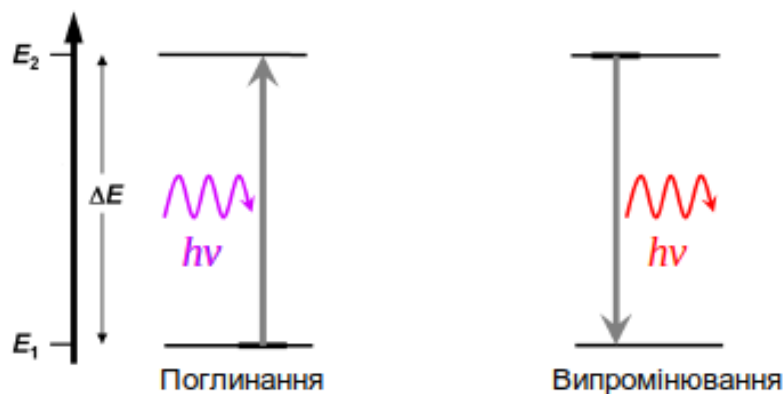


Рис. 2. Два основних методи вивчення взаємодії електромагнітного випромінювання та речовини

Усі радіоспектрометри, що існують, за методом реєстрації молекулярних ліній можна поділити на дві основні групи:

1. Абсорбційні спектрометри, тобто прилади, що реєструють резонансне поглинання молекул як функцію частоти.
2. Емісійні спектрометри, характерною рисою яких є реєстрація випромінювання молекул. Зазвичай такі прилади працюють в імпульсному режимі, тобто спочатку збуджують молекулярні лінії, що досліджуються, а потім реєструють відповідне випромінювання.

Загальну структуру абсорбційного спектрометра показано на Рис.3.

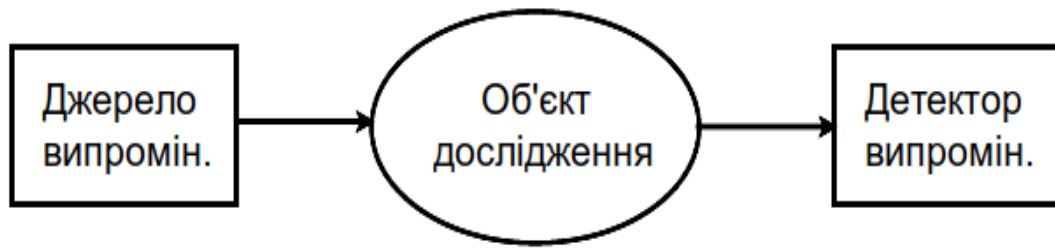


Рис. 3. Загальна структура абсорбційного спектрометра

Зазвичай абсорбційні спектрометри містять джерело випромінювання, частота якого змінюється із заданим кроком. Якщо частота джерела випромінювання збігається з частотою молекулярної лінії, то це супроводжується поглинанням електромагнітної енергії та призводить до зменшення потужності сигналу на виході комірки поглинання. Перевагою абсорбційних спектрометрів є дуже висока точність вимірювання частоти молекулярних ліній. Але значний рівень шумів джерела випромінювання суттєво обмежує чутливість абсорбційних спектрометрів, тобто їх здатність виявляти слабкі лінії поглинання.

Загальну структуру емісійного спектрометра показано на Рис. 4.

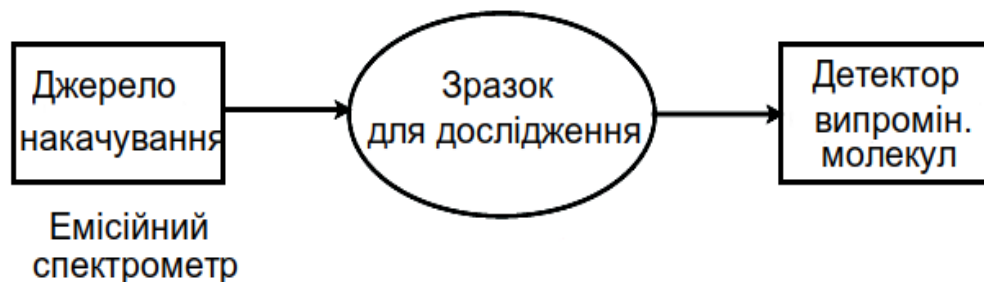


Рис. 4. Загальна структура емісійного спектрометра

На відміну від абсорбційних спектрометрів в емісійних приладах джерело випромінювання є включеним тільки під час збудження молекулярної лінії. Реєстрація випромінювання здійснюється високочутливим

супергетеродинним приймачем за умов відключення джерела випромінювання. Саме тому чутливість емісійних спектрометрів не обмежується шумами джерела випромінювання. Зрозуміло, що структура емісійних спектрометрів є набагато складнішою за абсорбційні. Також основною вадою таких приладів є гірша (у порівнянні з абсорбційними спектрометрами) точність вимірювання частоти ліній. Але ця вада не є важливою, якщо треба зареєструвати дуже слабкі лінії.

Саме для досягнення найвищої чутливості в лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лілльського університету ціла низка досліджень виконується з використанням емісійних спектрометрів [4, 5].

3. Емісійний спектрометр Лівльського університету

Функціональну схему емісійного спектрометра лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лівльського університету показано на Рис. 5.

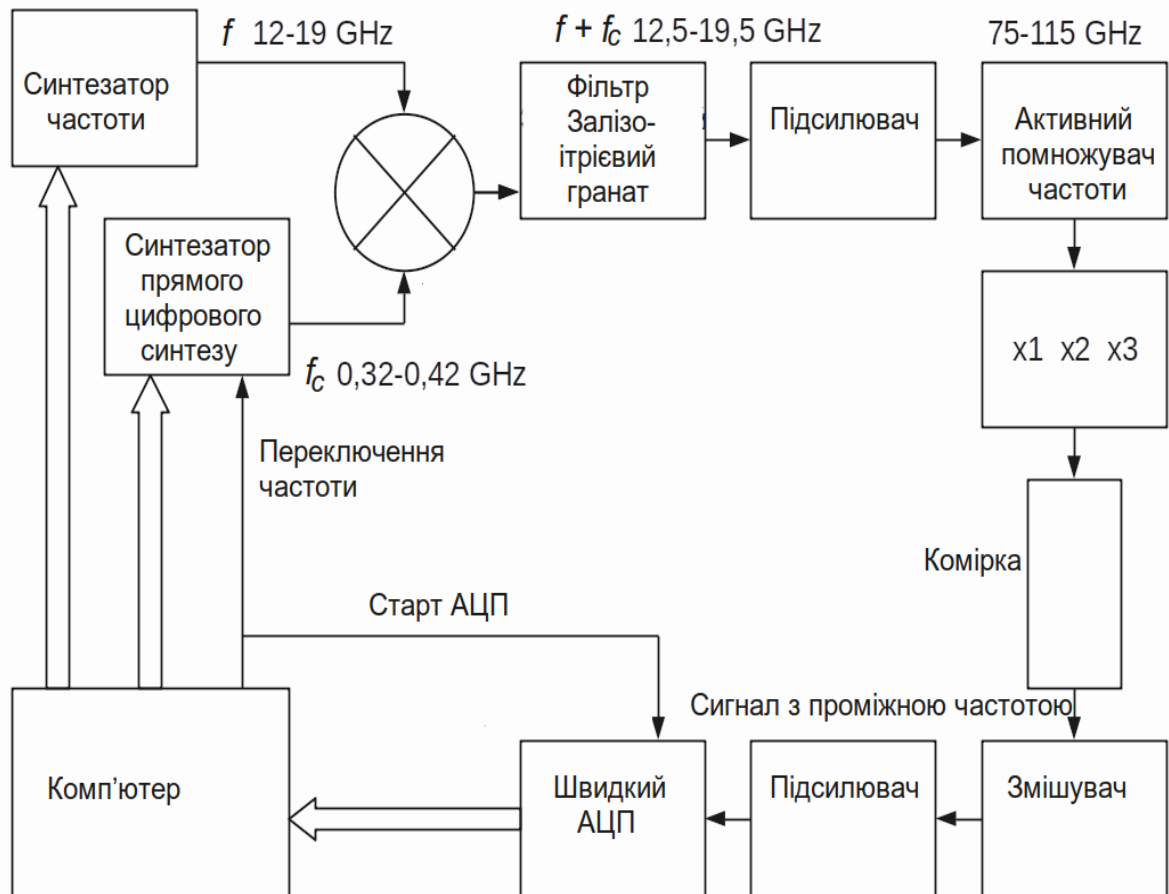


Рис. 4. Функціональна схема емісійного спектрометра лабораторії терагерцової спектроскопії Лабораторії Фізики Лазерів, Атомів та Молекул (PhLAM) Лівльського університету.

Основною властивістю спектрометра є застосування одного й того ж мікрохвильового джерела як для збудження молекул, так і для супергетеродинного приймання молекулярного випромінювання. Джерело

випромінювання має забезпечувати швидке перемикання частоти між двома значеннями:

1. Частота джерела дорівнює частоті молекулярної лінії, що вивчається. Протягом близько 1 мікросекунди здійснюється збудження лінії, що досліджується. Таке збудження збільшує населеність верхнього рівня лінії.
2. Частота джерела дуже швидко перемикається на інше значення, яке дорівнює частоті гетеродина високочутливого супергетеродинного приймача.

Швидке перемикання частоти виконується завдяки застосуванню синтезатора прямого цифрового синтезу частоти (Рис. 4). Для того, щоб забезпечити випромінювання в діапазоні частот аж до 300 ГГц, спочатку використовується перетворення частоти в діапазон 12.5 — 19.5 ГГц з використанням вузькосмугового фільтра з резонатором на залізо-ітрієвому гранаті. Частота отриманого сигналу помножується в шість разів промисловим активним помножувачем частоти. Подальше множення частоти здійснюється промисловими пасивними подвоювачами або потроювачами частоти.

Часову діаграму, яка ілюструє роботу емісійного спектрометра, показано на Рис. 5.

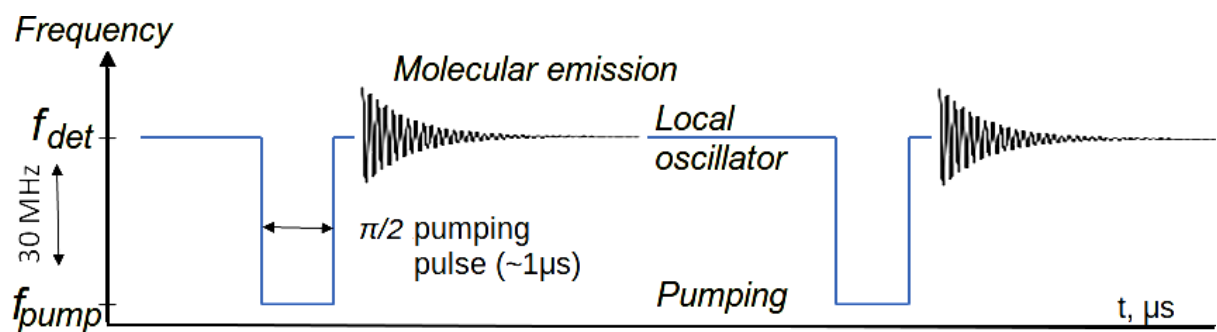


Рис. 5. Часова діаграма, що ілюструє процес збудження та супергетеродинного приймання молекулярного випромінювання

Як показано на Рис. 5, джерело випромінювання збуджує лінії, що досліджуються, протягом 1 мкс. Далі джерело перемикається у режим гетеродина, тобто його частота збільшується на значення проміжної частоти. Сигнал молекулярного випромінювання приймається змішувачем супергетеродина приймача. Сигнал гетеродина також проходить через комірку взаємодії (Рис. 4). Після підсилювання отриманий сигнал оцифровується надшвидким аналого-цифровим перетворювачем. Отримана реалізація у часовій області вводиться в керувальний комп'ютер для подальшого накопичування. Щоб отримати спектр виконується перетворення Фур'є від накопиченої реалізації.

4. Система імпульсного впорску речовини, що досліджується

Для виконання досліджень, що передбачають моделювання умов міжзоряного середовища, треба забезпечувати дуже низьку температуру речовини, що досліджується. Безпосереднє охолодження комірки взаємодії призведе до повного виморожування зразка, тобто майже уся речовина перейде з газоподібного стану у стан льоду на поверхні комірки. Тому неможливо отримати записи спектрів за відсутністю газоподібного зразка.

Для розв'язання даної проблеми зазвичай використовують імпульсний впорск речовини, що досліджується, в комірку взаємодії. За умов такого впорску у вакуум комірки, речовина дуже швидко охолоджується, при цьому залишається у газоподібному стані.

Впорск речовини виконується спеціальними клапанами. Але для того, щоб забезпечити дуже швидке відкривання клапана, треба його живити струмом спеціальної форми. Експериментально отриману осцилограму струма через клапан показано на Рис. 6.

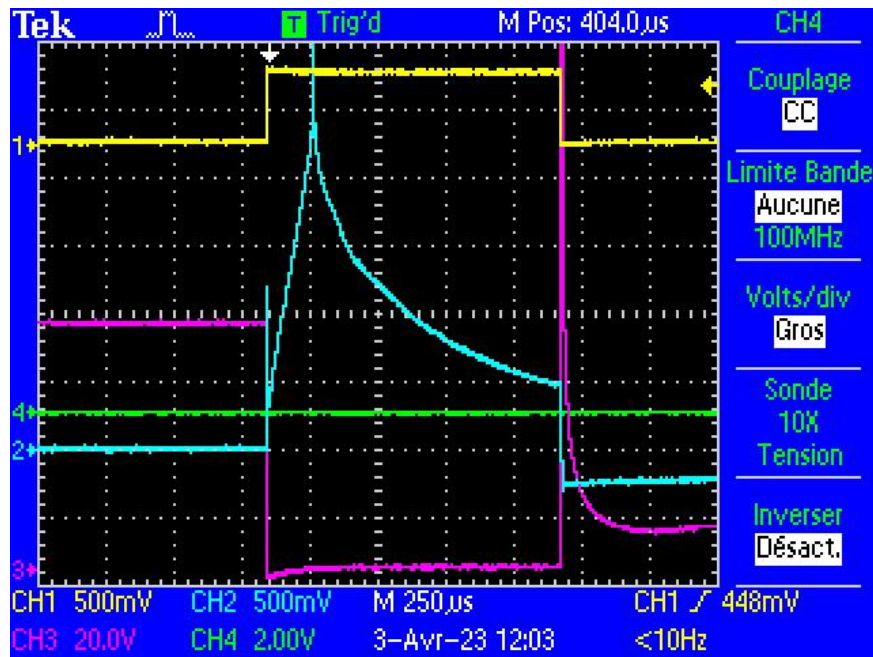


Рис. 6. Експериментально отримана осцилограма струма через клапан

Жовтим кольором показано низьковольтний імпульс керування електронними ключами. Струм через клапан показано блакитним кольором.

Струм необхідної форми забезпечує відповідна електронна схема, яку показано на Рис. 7.

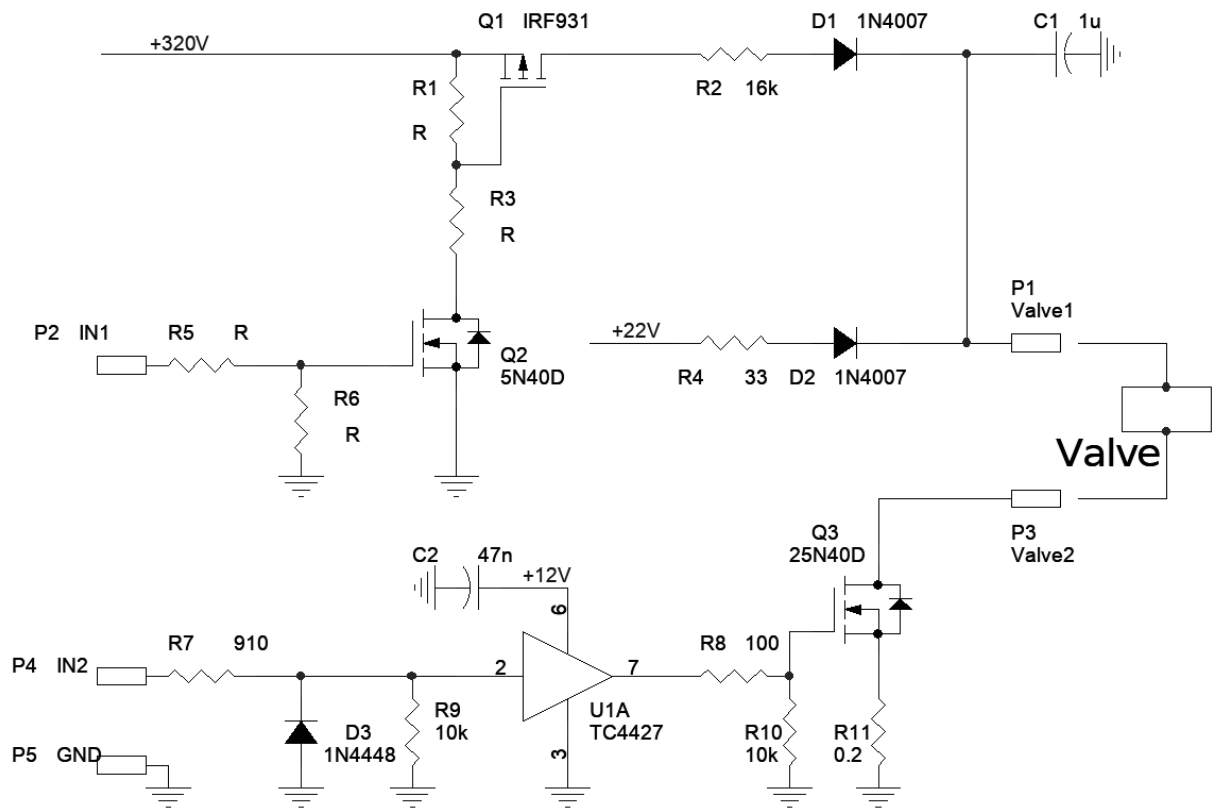


Рис. 6. Електронна схема керуванням струмом через клапан

Для швидкого відкриття клапана використовується висока напруга 320В. Транзисторний ключ Q1 застосовано для безпеки — він дозволяє відключати високу напругу при монтажних та налаштувальних роботах.

Конденсатор C1 заряджується до 320В через діод D1 та резистор R2. Керування клапаном (Valve) забезпечується транзистором Q3, який у свою чергу керується драйвером U1A. На вхід драйвера подається звичайний логічний сигнал.

Логічний сигнал з ТТЛ рівнями подається на вхід P4 IN2, транзистор Q3 відкривається, при цьому саме розряд через клапан конденсатора C1

забезпечує швидке відкривання клапана. Слід зазначити, що опір клапана складає 28 Ом, тому імпульс струму через клапан короткочасно сягає кількох Ампер, що й спричинює його швидке відкривання.

Конденсатор C1 швидко розряджається через низький опір клапана. Для того щоб забезпечити удержання клапана відкритим протягом необхідного часу, струм удержання забезпечується від додаткового низьковольтного джерела живлення 22В через резистор R4 та діод D2.

Зазвичай період включення клапана складає від 0.1 до 1 секунди, саме тому між включеннями конденсатор C1 встигає заряджатися через діод D1 та резистор R2 від джерела 320В.

Необхідну тривалість та затримку ТТЛ імпульсів керування забезпечує мікроконтролер ARDUINO UNO. Опис системи керування буде наведено у наступному розділі.

5. Система керування імпульсним впорском

Систему керування тривалістю імпульсів керування, та їх затримкою, побудовано на основі мікроконтролера ARDUINO UNO.

Основна мета такого рішення полягає в створенні системи керування, яка при подальшому розвитку буде спроможною забезпечувати цілком дистанційне керування усіма параметрами системи. При цьому передбачається побудова систему одночасного керування кількома клапанами.

На даному етапі реалізовано керування лише одним клапаном. Система керування має забезпечувати регулювання тривалістю імпульсу впорску в межах від 0.2 мс до 25.5 мс. Крок змінювання тривалості має складати 0.1 мс. Керування затримкою включення клапана має забезпечуватися у межах від 0 до 255 мс. Крок змінювання затримки має бути 1 мс.

Для реалізації завдання ми вирішили застосувати таймери 0 та 1 мікроконтролера ARDUINO UNO, один з яких буде формувати тривалість імпульсу включення клапана, а другий забезпечувати необхідну затримку.

Для візуального відображення як тривалості, так і затримки, відповідну інформацію буде показано на рідкокристалічному дисплеї. Ручне керування тривалістю та затримкою буде здійснюватися покроково з використанням чотирьох кнопок керування.

Програму керування ARDUINO UNO побудовано з використання механізму переривань, тому програма включає основний цикл програми, який забезпечує початкове програмування таймерів та рідкокристалічного дисплея, а також опитування кнопок керування. Формування затримки та імпульсу включення клапанами здійснюється за зовнішнім перериванням, яке запускає роботу таймерів. Блок-схему основного циклу програми керування показано на Рис. 7.

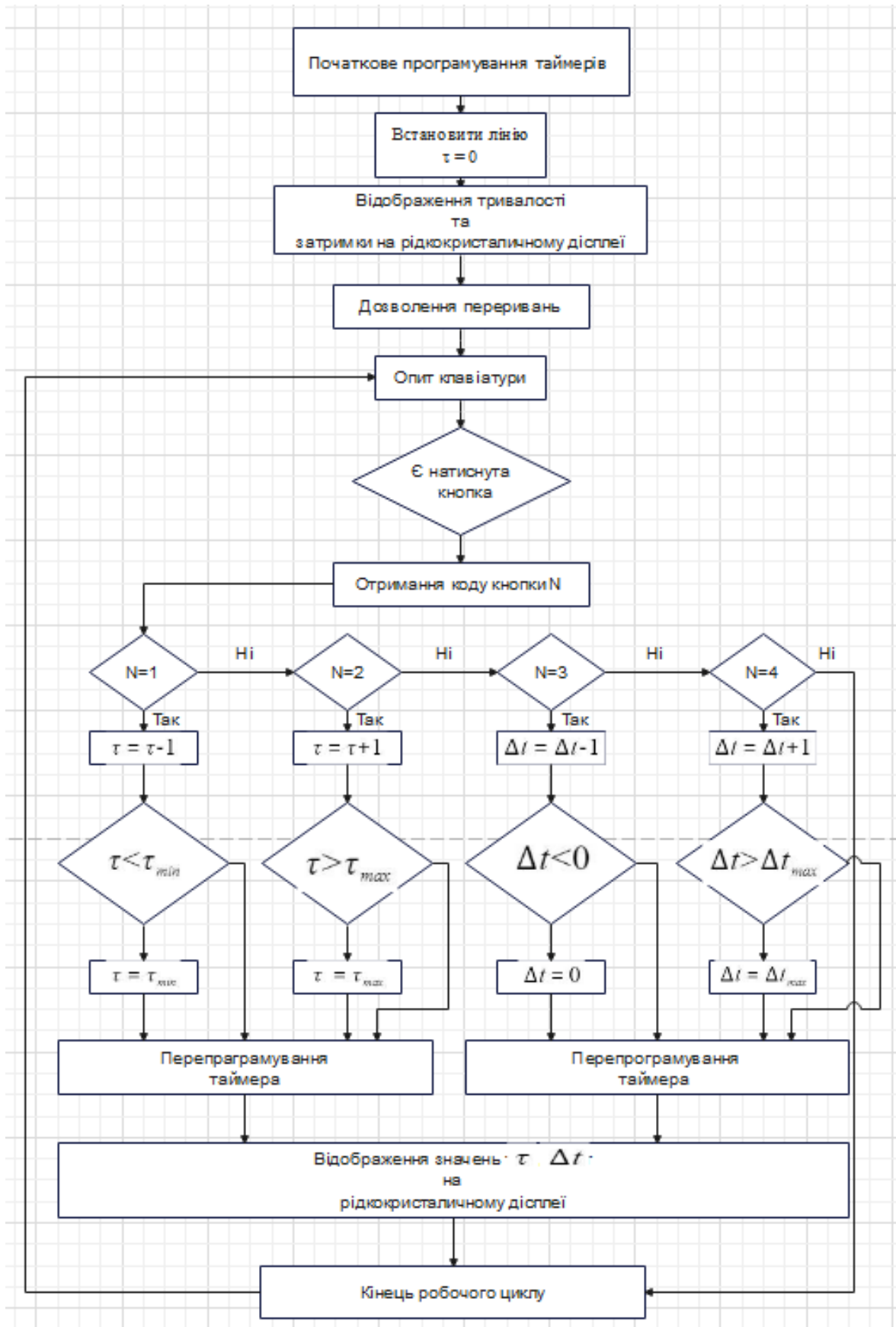


Рис. 7. Блок-схема основного циклу програми керування ARDUINO UNO



Рис. 8. Блок-схема підпрограми відображення основних параметрів на рідкокристалічному дисплеї.

Відображення тривалості імпульсу та затримки здійснюється за допомогою рідкокристалічного дисплея. Обидва параметри зберігаються у двійковому форматі, тому для їх коректного відображення перш за все треба перетворити їх значення у двійково-десяткову форму, після чого кожен цифру перевести в ASCII код, який є прийнятним для дисплея. Блок-схему підпрограми показано на Рис. 8.

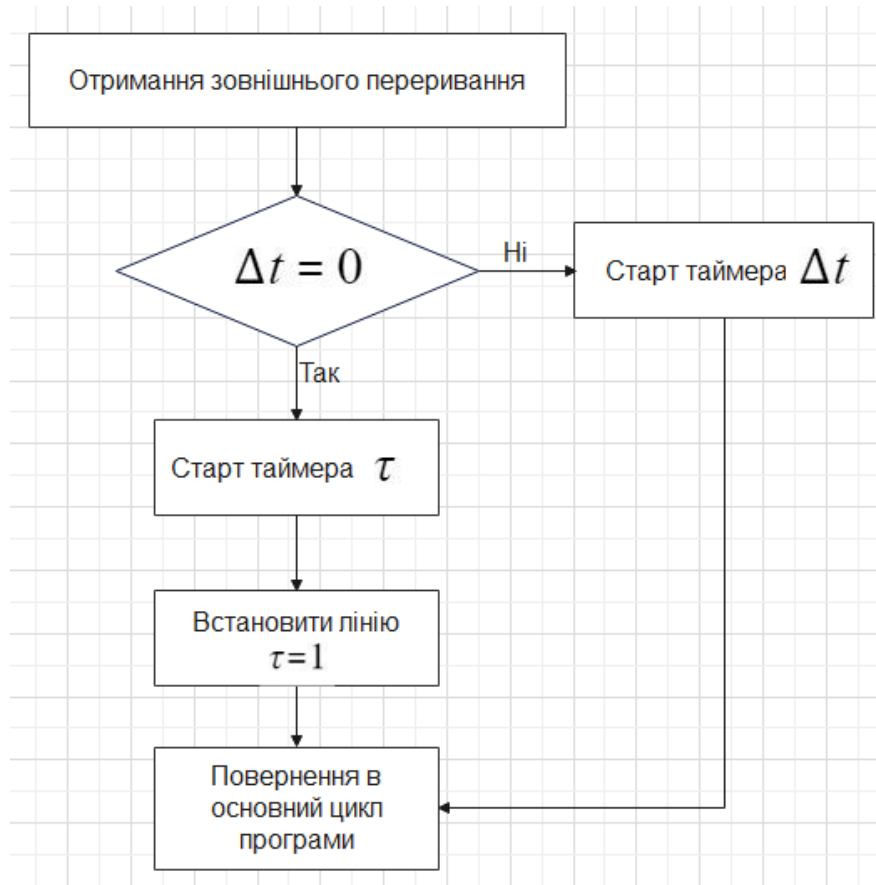


Рис. 9. Блок-схема програми обслуговування зовнішнього переривання.

Запуск системи формування імпульсу керування клапаном та можливою затримкою забезпечується зовнішнім сигналом, який викликає зовнішнє переривання. Блок-схему програми обслуговування зовнішнього переривання показано на Рис. 9.

Оскільки мінімальне значення затримки може бути 0 мс, то перш за все виконується перевірка чи дорівнює затримка 0 мс. Якщо так, то програма обслуговування переривання безпосередньо запускає таймер формування тривалості імпульсу керування клапаном, та встановлює логічну одиницю на лінії керування.

Якщо затримка не дорівнює 0 мс, то програма обслуговування переривання запускає таймер затримки та повертається в основний цикл програми.

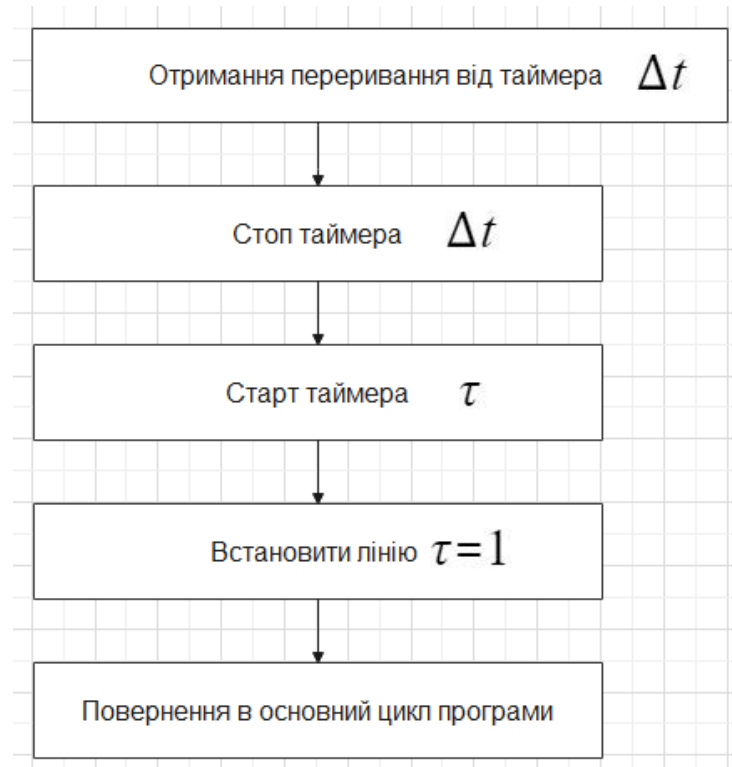


Рис. 10. Блок-схема програми обслуговування переривання від таймера затримки.

Якщо було задано не нульову затримку пуску клапана, то після завершення відліку затримки виникає переривання, що викликається таймером затримки. Блок-схеми програми обслуговування переривання від таймера затримки показано на Рис. 10. Перш за все виконується зупинка (стоп) таймера затримки. Далі запускається таймер тривалості імпульсу керування, а також встановлюється логічну одиницю на лінії керування.

Після чого керування повертається в основний цикл програми.

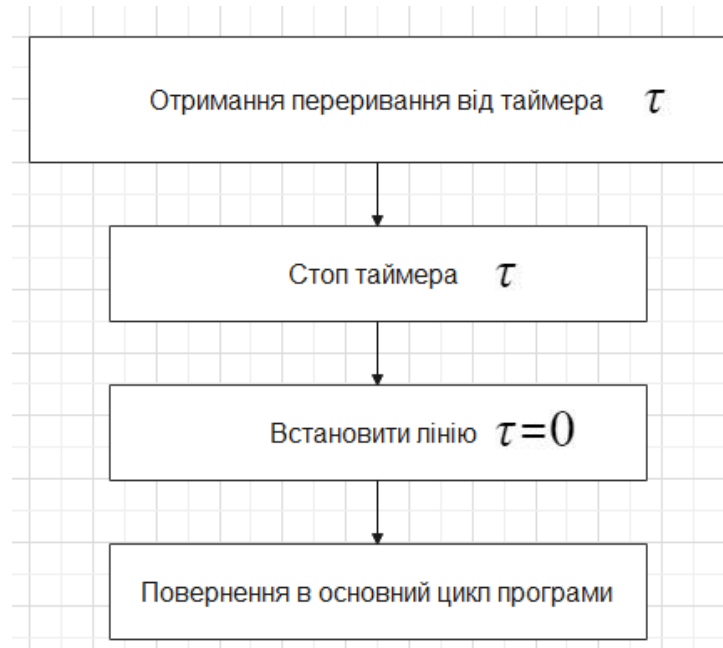


Рис. 11. Блок-схема програми обслуговування переривання від таймера формування тривалості імпульсу керування клапаном.

Після того, як таймер формування тривалості імпульсу керування клапаном завершує відлік необхідного часу, він викликає відповідне переривання. Блок-схему програми обслуговування переривання від таймера формування тривалості імпульсу керування клапаном показано на Рис. 11.

Дана програма виконує зупинку (стоп) таймера тривалості імпульсу керування клапаном а також встановлюється логічний нуль на лінії керування.

Після чого керування повертається в основний цикл програми.

6. Дослідження імпульсів струму клапанів впорску

Для того, щоб бути впевненими, що імпульси формуються коректно, ми виконали експериментальне дослідження форми та тривалості імпульсів керування клапанами. Для того, щоб не порушувати роботу клапанів, дослідження виконувалося з використанням спеціально розробленого струмового трансформатора. Такий трансформатор був підключений послідовно з клапаном, форму струма якого було необхідно дослідити. Таке включення дозволяло виконати безпечне підключення осцилографа.

На Рис. 12 зеленим кольором показано керувальний імпульс, який було сформовано мікроконтролером ARDUINO UNO. Синім кольором показано форму струма, що протікає через клапан. На даному рисунку показано можливість формування імпульсу керування з мінімальною тривалістю, що дорівнює 0.2 мс. Перевірка включення клапана показала, що клапан надійно вмикається.

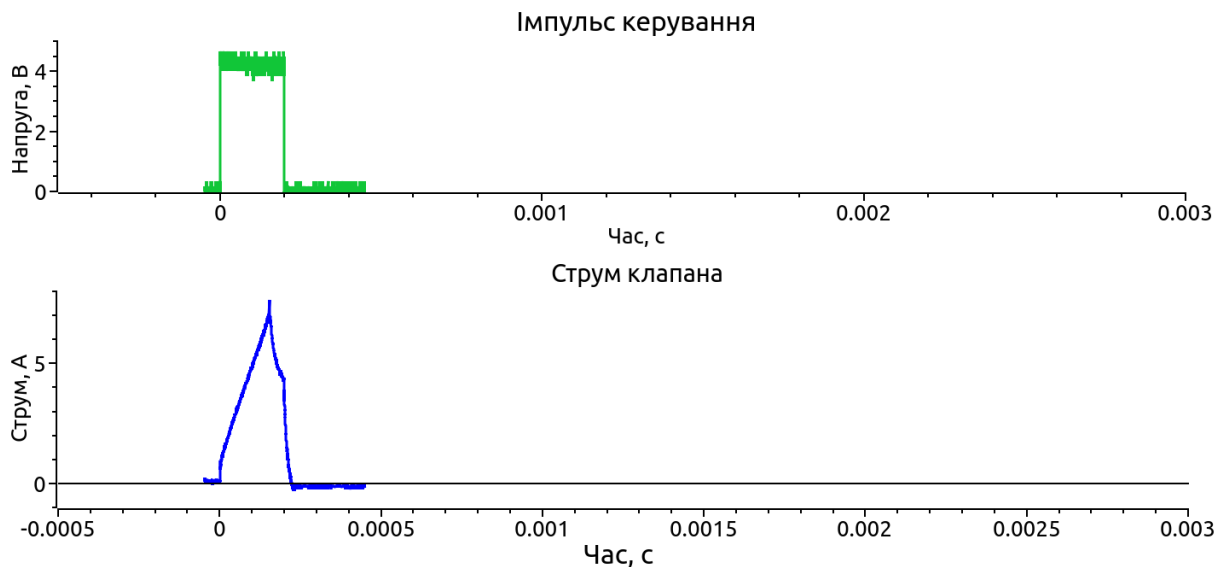


Рис. 12. Зеленим показано керувальний імпульс мінімальної тривалості, який було сформовано мікроконтролером ARDUINO UNO. Синім кольором показано форму струма, що протікає через клапан.

Також було виконано перевірки при формуванні керувальних імпульсів різної тривалості. На Рис. 13 показано приклад формування імпульсу тривалістю 2.6 мс.

Зеленим кольором показано керувальний імпульс, який було сформовано мікроконтролером ARDUINO UNO. Синім кольором показано форму струма, що протікає через клапан. На даному рисунку показано можливість формування імпульсу керування з мінімальною тривалістю, що дорівнює 0.2 мс. Перевірка включення клапана показала, що клапан надійно вмикається.

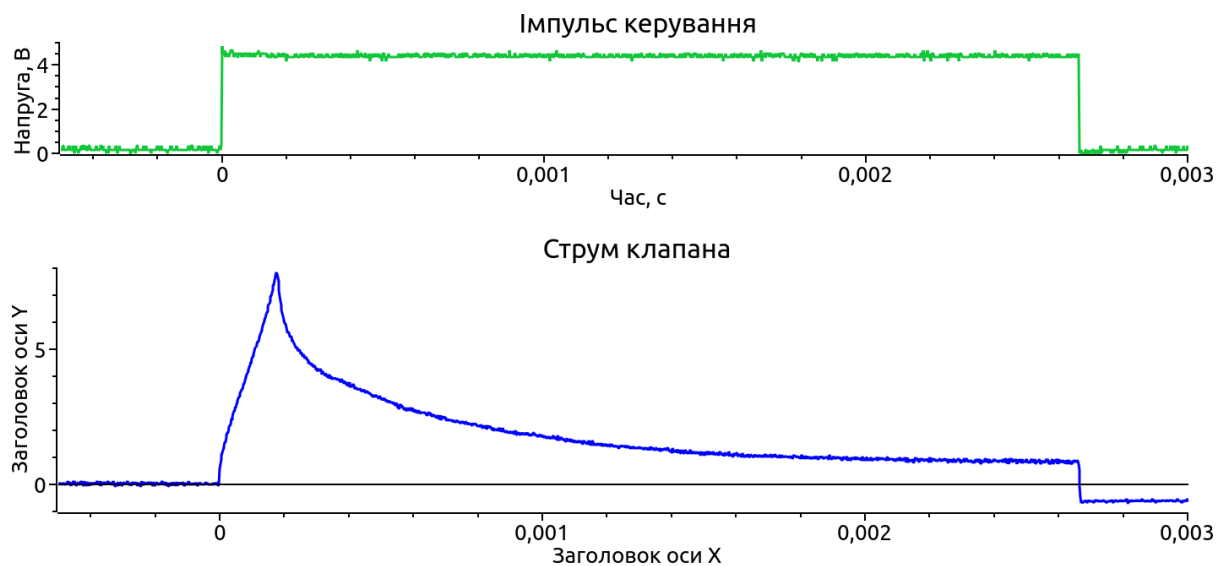


Рис. 13. Зеленим показано керувальний імпульс 2.6мс, який було сформовано мікроконтролером ARDUINO UNO. Синім кольором показано форму струма, що протікає через клапан.

7. Емісійний спектр молекули метанолу

Для перевірки роботи системи впорску було записано емісійний спектр молекули метанолу. На Рис. 14 показано емісійний спектр молекули метанолу, який отримано із застосуванням системи керування клапанами впорску на основі мікроконтролера ARDUINO UNO, що розроблено в даній роботі.

На основі такого запису можна зробити висновок, що розроблена система функціонує нормально, що дозволяє виконувати записи спектрів молекул.

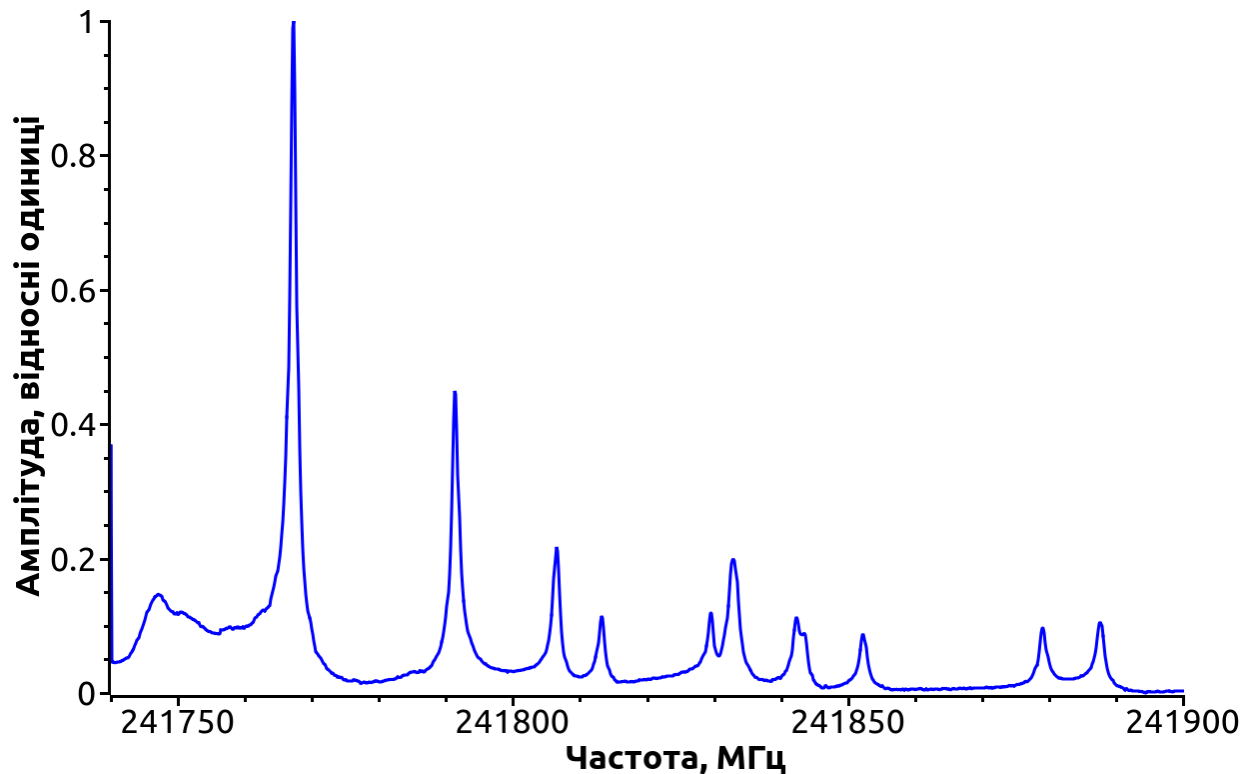


Рис. 14. Емісійний спектр молекули метанолу, який отримано із застосуванням системи керування клапанами впорску на основі мікроконтролера ARDUINO UNO, що розроблено в даній роботі.

Висновки

На основі мікроконтролера ARDUINO UNO розроблено гнучку систему керування імпульсами впорску речовини, що досліджується, в комірку взаємодії. Розроблена система забезпечує керування тривалістю імпульсів впорску в межах від 0.2 мс до 25.5 мс. Також система може забезпечувати затримку імпульсу впорску в межах від 0 мс до 255 мс.

Виконано випробування розробленої системи, а також при випробуваннях було досліджено форму струма клапанів.

З використанням розробленої системи отримано запис емісійного спектра молекули метанолу.

Література

1. B.Tercero, L.Margulès, R.A.Motiyenko, M.Carvajal, I.Kleiner, N.Marcelino, J.Cernicharo, T. R.Huet, J.C.Guillemain, H.Møllendal, E.A.Alekseev, Sub-mm spectroscopy and first ISM detection of ^{18}O -methylformate // *Astronomy and Astrophysics*. – 2012. – Vol. 538. – id.A119.
2. I.A.Smirnov, V.V.Ilyushin, E.A.Alekseev, L.Margulès, R.A.Motiyenko, B.J.Drouin, Spectroscopy of the ground, first and second excited torsional states of acetaldehyde from 0.05 to 1.6 THz // *Journal of Molecular Spectroscopy*, - 2014.- Vol.295.- P. 44-50.
3. O. Zakharenko, R. A. Motiyenko, L. Margulès, T. R. Huet, Terahertz spectroscopy of deuterated formaldehyde using a frequency multiplication chain // *Journal of Molecular Spectroscopy*, - 2015. - Vol.317. - p.41–46
4. Luyao Zou, R.A.Motiyenko, L.Margulès, E.A.Alekseev, Millimeter-wave emission spectrometer based on direct digital synthesis // *Review of Scientific Instruments*, – 2020. – Vol.91. – Id. 063104.
5. E. Alekseev, R. Motiyenko, L. Zou, L. Margulès, High-Sensitivity Emission Spectrometer // *Proc. Of IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*. Kharkov, Ukraine, 2020, p.813-816.