

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. І. СІКОРСЬКОГО»
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

КУРСОВА РОБОТА

з дисципліни Схемотехніка аналогової та цифрової радіоелектронної апаратури
на тему: Пошуковий дозиметр гамма-опромінення

Студента 2 курсу групи ДК-51

Напряму підготовки: Радіоелектронні апарати

Спеціальності: Радіоелектронні апарати та засоби

Махньова О. І.

ст. викл., к.т.н. Короткий Є.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна оцінка: _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії: _____ ст. викл., к.т.н. Короткий Є.В.

(підпис)

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Київ - 2017 рік

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Список умовних скорочень.....	4
Розділ 1 – Розробка принципової схеми приладу.....	5
1.1. Опис використаних мікросхем.....	5
1.2. Вибір конструкції детектора.....	8
1.3. Розробка високовольтного блоку живлення.....	9
1.4. Дослідження потенційних умов роботи приладу та розробка алгоритму роботи блоку обробки даних.....	13
1.5. Розробка блоку обробки даних.....	14
1.6. Забезпечення електромагнітної сумісності приладу.....	16
Розділ 2 - Математичне обґрунтування деяких вузлів схеми.....	18
Розділ 3 – Моделювання роботи приладу.....	25
3.1. Моделювання роботи високовольтного блоку живлення.....	25
3.2. Моделювання входних каскадів блоку обробки даних.....	27
3.3. Моделювання роботи фільтрів.....	28
3.4. Моделювання роботи нуль-індикатору.....	30
Розділ 4 – Створення, калібрування та дослідження робочого прототипу пристрою.....	33
4.1. Створення високовольтного блоку живлення.....	33
4.2. Створення детектора.....	33
4.3. Створення блоку обробки даних.....	38
4.4. Складання пристрою.....	39
4.5. Дослідження роботи фільтрів.....	41
4.6. Калібрування пристрою.....	43
Висновки.....	44
Перелік використаних джерел.....	46
Додатки.....	47

ВСТУП

Апаратура радіаційного контролю є одною з найважливіших складових арсеналу засобів та інструментів екологів. З розвитком ядерних технологій та виробництва, пов'язаного з радіоактивними речовинами, радіаційний контроль стає все більш важливим аспектом інженерної діяльності.

Серед апаратури радіаційного контролю, що виробляється в Україні переважають два класи дозиметрів: професійні та побутові. Найбільш значущим серед усіх їх параметрів є чутливість. Професійні дозиметри мають високу вартість (від \$1600) та ґрунтовані на детекторах на сцинтиляторах, що дають їм високу чутливість (від 800 імп./с/мкЗв/год). Побутові дозиметри використовують лічильники Гейгера-Мюллера і тому мають набагато нижчу чутливість (від 2 імп./с/мкЗв/год), але й низьку вартість (від 2000 грн.). В той же час, ніша напів-професійної апаратури залишається незайнятою, що надає сенс провести роботи в цій області.

Тож, метою даної роботи є створення приладу, що придатний як для пошуку джерел гамма-випромінювання, так і для проведення вимірювань потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання. Дозиметр має бути портативним та мати ресурс роботи не менший, ніж робоча зміна. Прилад має використовувати чутливий елемент на сцинтиляторах з великою чутливістю (на порядок вищу на таку у дозиметрах на лічильниках Гейгера-Мюллера). Пошук джерел має бути супроводжений інформативною та комфортною для роботи звуковою індикацією наближення або віддалення користувача від джерела опромінення, а результати вимірювання повинні виводитися на дисплей користувача.

Для досягнення поставлених цілей необхідно:

1. Розробити принципову схему пристрою з урахуванням заданих параметрів.
2. Провести математичне обґрунтування окремих вузлів схеми.
3. Провести моделювання роботи пристрою у SPICE-системі.
4. Створити робочий прототип пристрою.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ККД	Коефіцієнт корисної дії
ШІМ	Широтно-імпульсна модуляція
ФНЧ	Фільтр низької частоти
ФЕП	Фотоелектронний помножувач
ОП	Операційний підсилювач
ФВЧ	Фільтр високої частоти
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
АЧХ	Амплітудно-частотна характеристика
ПЕД	Потужність еквівалентної дози

РОЗДІЛ 1

Розробка принципової схеми приладу

1.1. Опис використаних мікросхем наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Перелік використаних мікросхем

№ п.п.	Назва	Опис
1	CA3140	Інтегральна мікросхема-високошвидкісний операційний підсилювач із вхідним каскадом на польових транзисторах. Основні технічні характеристики: <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: до $\pm 36\text{В}$ • Швидкість наростання вихідного сигналу: 9В/мкс • Полоса пропускання: 4.5МГц • Коефіцієнт підсилення за великим сигналом: 100 кВ/В
2	LM2903	Інтегральна мікросхема-два компаратора з відкритим колектором та однополярним живленням. Основні технічні характеристики: <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: до $\pm 36\text{В}$ • Затримка переключення: 1.3 мкс • Напруга логічного «0»: $150\div 400\text{ мВ}$ • Діапазон вхідної напруги: $0\div V_{cc}-1.5\text{В}$
3	TL431	Прецизійний регульований стабілітрон (джерело опорної напруги). Основні технічні характеристики: <ul style="list-style-type: none"> • Напруга між катодом та анодом: $0\div 36\text{В}$ • Точність регулювання: $\pm 2\%$ • Напруга стабілізації: $2.5\div 36\text{В}$

		<ul style="list-style-type: none"> • Ток стабілізації: $0,5 \div 100 \text{mA}$ • Температурний дрейф: не більш, ніж 25mV
4	OP07	<p>Інтегральна мікросхема-операційний підсилювач з наднизькою вхідною напругою зміщення (75 мкВ).</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: до $\pm 18 \text{V}$ • Швидкість наростання вихідного сигналу: 0.3V/мкс • Полоса пропускання: 0.6МГц • Коефіцієнт підсилення за великим сигналом: 200 кВ/В
5	NE5532	<p>Інтегральна мікросхема-два операційних підсилювача.</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: до $\pm 22 \text{V}$ • Швидкість наростання вихідного сигналу: 9V/мкс • Полоса пропускання: 10МГц • Коефіцієнт підсилення за великим сигналом: 100 кВ/В
6	LM311	<p>Інтегральна мікросхема-два компаратора з відкритим колектором та емітером.</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: до $\pm 18 \text{V}$ • Затримка переключення: 115 нс • Напруга логічного «0»: 750 мВ • Діапазон вхідної напруги: до $\pm 15 \text{V}$
7	RO-0505	<p>Інтегральна мікросхема-DC/DC перетворювач.</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Діапазон вхідної напруги: $\pm 10 \text{V}$ • Точність перетворення: $\pm 5\%$ • ККД: $70 \div 80\%$

		<ul style="list-style-type: none"> • Коефіцієнт перетворення: 1
8	ATtiny-44	<p>Малопотужний 8-разрядний КМОН мікроконтролер AVR-RISC архітектури.</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 кБ програмованої flash-пам'яті • 256 байт EEPROM • 256 байт ОЗУ • 32 регістра загального призначення • 8-разрядний лічильник-таймер з 2 каналами ШІМ • 16-разрядний лічильник-таймер • 8-канальний, 10-разрядний АЦП
9	ICL7106	<p>Малоспоживаючий АЦП з семисегментним виходом на 3.5 розряди.</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: до $\pm 15\text{В}$ • Вхідний струм: 1 пА • Гарантована індикація «0» при 0В на вході • Діапазон вхідної напруги: діапазон живлення • Лінійність: ± 1 відлік на весь діапазон вхідної напруги • Драйвер для рідкокристалічного дисплею
10	TL494	<p>Інтегральна мікросхема-ШІМ контролер з двома підсилювачами відхилень, контролером мертвого часу, генератором імпульсів, джерелом опорної напруги та відкритим колектором та емітером.</p> <p>Основні технічні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напруга живлення: $6\div 40\text{В}$ • Струм споживання спокою: $6\div 10\text{мА}$

Продовж. табл. 1.1

		<ul style="list-style-type: none"> • Частота коливань: $1 \div 300 \text{ кГц}$ • Вихідний струм: до 25 мА • Час перемикання: до 200 нс • Вхідна напруга підсилювача відхилень: $-0.3 \div V_{cc} - 2 \text{ В}$ • Напруга опорного джерела: $4.75 \div 5.25 \text{ В}$
--	--	---

1.2. Вибір конструкції детектора

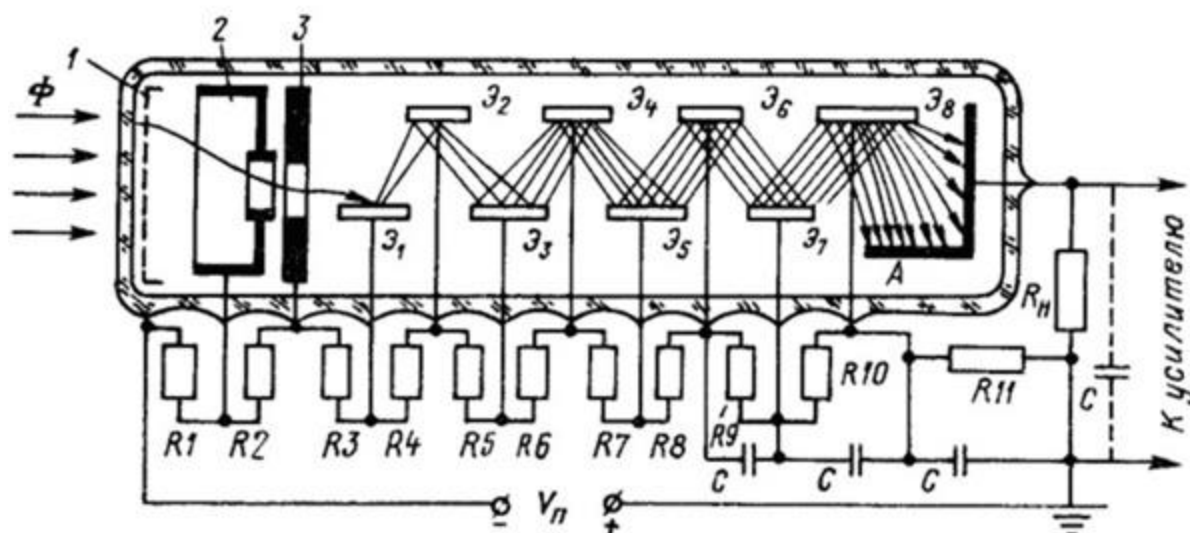
В якості детектора іонізуючого опромінення (принцип роботи детектору описано в роботі [1]) було вирішено використовувати сцинтилятор NaI(Tl) циліндричної форми розмірами $18 \times 40 \text{ мм.}$. В якості датчика світла обрали фотоелектронний помножувач ФЭУ-35 через такі його переваги:

- Великий рівень сигналу на виході, що не ставить високих вимог до вхідних опорів підсилювачів та електромагнітної сумісності.
- Достатній розмір вікна фотокатоду для кріплення кристалу без додаткових засобів світлозбирання.
- Можливість простого перенесення схемотехнічних рішень на детектори з твердотільними помножувачами, що підвищить надійність конструкції.
- Доступність та низька ціна.

Фотоелектронні помножувачі потребують захисту від світла, а сцинтилятори – від вологи. Тому необхідно створення захисного корпусу детектора, що описано у четвертому розділі цієї роботи.

Живлення на ФЕП подається за допомогою подільника напруги, що під'єднаний до динодів та фотокатоду за схемою, наведеною на рис. 1.1 [2].

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)



41

1 - фотокатод; 2 - фокусирующая система; 3 - диафрагма;
 31-38 - диноды;
 4 - анод; R1-R11 - делители напряжения

Рис. 1.1: Схема підключення ФЕП.

1.3. Розробка високовольтного блока живлення

За технічною документацією [2], помножувач виходить на номінальну чутливість при катодній напрузі біля -800В. Тож, необхідно створити блок високовольтного живлення, що може видавати велику від'ємну напругу з задовільним ККД та низьким рівнем пульсацій.

Для вирішення цієї задачі було створено 4 різних конструкцій блока живлення:

1. Імпульсний зворотньоходовий генератор зі зніманням напруги вторинною обмоткою.

Схема складалася з генератора пилоподібних імпульсів, компаратора, що генерував ШІМ-сигнал та зворотньоходового каскаду, де самоіндукція виникала в первинній обмотці трансформатора, а вихідна обмотка, ввімкнена у зворотному напрямі, знімала енергію, що була накоплена в магнітному осерді. Блок живлення був стабілізований зворотнім зв'язком. Макетний зразок наведений у Додатку 1.

Не дивлячись на задовільний ККД (25%) та низький рівень пульсацій (менше 1 В), схема була відкинута, так як використаний при макетуванні трансформатор деградував із часом через перенапруження.

2. Автогенератор на трансформаторі Pulse PE-6185.

Після відкидання першої схеми блока живлення було знайдено можливе рішення у документації на трансформатор для високовольтних інверторів Pulse PE-6185. Воно являло собою генератор з додатнім зворотнім зв'язком через вторинну обмотку. Принципова схема та макетний зразок наведені у Додатку 2. Під час дослідження схеми виявили високий ККД перетворення (біля 75%), але незадовільні параметри пульсацій, неможливість будь-якого регулювання напруги та нестабільна робота схеми стали причиною її відкидання.

3. Полумостовий генератор на трансформаторі Pulse PE-6185.

Виявлений високий ККД другої схеми став причиною розробки генератору на мікросхемі TL494, яка являє собою широко поширений ШІМ-контролер для блоків живлення. Схема являла собою стандартне підключення мікросхеми з її технічної документації. Схема наведена в Додатку 3. Отриманий зразок показав високий ККД (біля 50%), високу стабільність вихідної напруги (пульсації менш 1В). Схема була прийнята як робоча, але при монтуванні фінального зразка трансформатор був критично пошкоджений. Як виявилось, Pulse PE-6185 більше не виробляється і в Україні недоступний, тому схема була відкинута.

4. Мостовий генератор на трансформаторі з інвертору підсвічення рідкокристалічного дисплею.

Четвертий варіант схеми складався з мікросхеми TL494 з колами, що задають частоту та коефіцієнт заповнення. TL494 має два виходи, на яких генерує ШІМ-сигнали, що протифазні один до одного. Вихідні транзистори мікросхеми створюють половину мостової схеми підключення навантаження, а інша половина створена дискретними транзисторами. Вихідні транзистори підключені як каскади з загальним емітером, до їх виходів під'єднано навантаження (первинна обмотка трансформатора), колектори

транзисторів другої половини мостової схеми та їх бази, причому бази під'єднані до колекторів хрест-навхрест. Таким чином, коли мікросхема видає імпульс напруги на одному з виходів, він відкриває свій транзистор та транзистор на діагоналі від нього. В результаті, навантаження підключається до живлення в прямому напрямі на одному півперіоді коливач і в зворотному на іншому.

До вторинної обмотки трансформатора (коефіцієнт трансформації 1:100) підключили помножувач на два та дільник напруги між виходом помножувача та джерелом опорної напруги. Один з виводів вторинної обмотки заземлили. Напругу з дільника подали на вхід підсилювача помилки TL494 для реалізації зворотного зв'язку. Вхід підсилювача захистили діодним обмежувачем. Вихід схеми фільтрується RC-ФНЧ.

Для визначення частоти коливач, на якій буде досягнений максимальний ККД, було необхідно визначити власну частоту коливач трансформатору. Для цього на трансформатор подали імпульсні коливач та заміряли частоту синусоїдальних коливач, що виникають після імпульсу. Ця частота виявилася близькою до 50 кГц.

Під час дослідження роботи макетного зразка схеми визначили діапазон регулювання вихідної напруги -150÷-1000В, ККД в 43%, дрейф вихідної напруги менш 1В при зміні напруги живлення від 6 до 10В та зміні навантаження через різний рівень опромінення детектора. Всі перевірки було проведено при навантаженні схеми вольтметром зі входним опором 10МОм та детектором із опором живленню 8МОм. Визначенні параметри схеми було визнано задовільними, а макетний зразок було визнано робочим та включено в подальшу розробку. Схему блока живлення наведено на рис. 1.2.

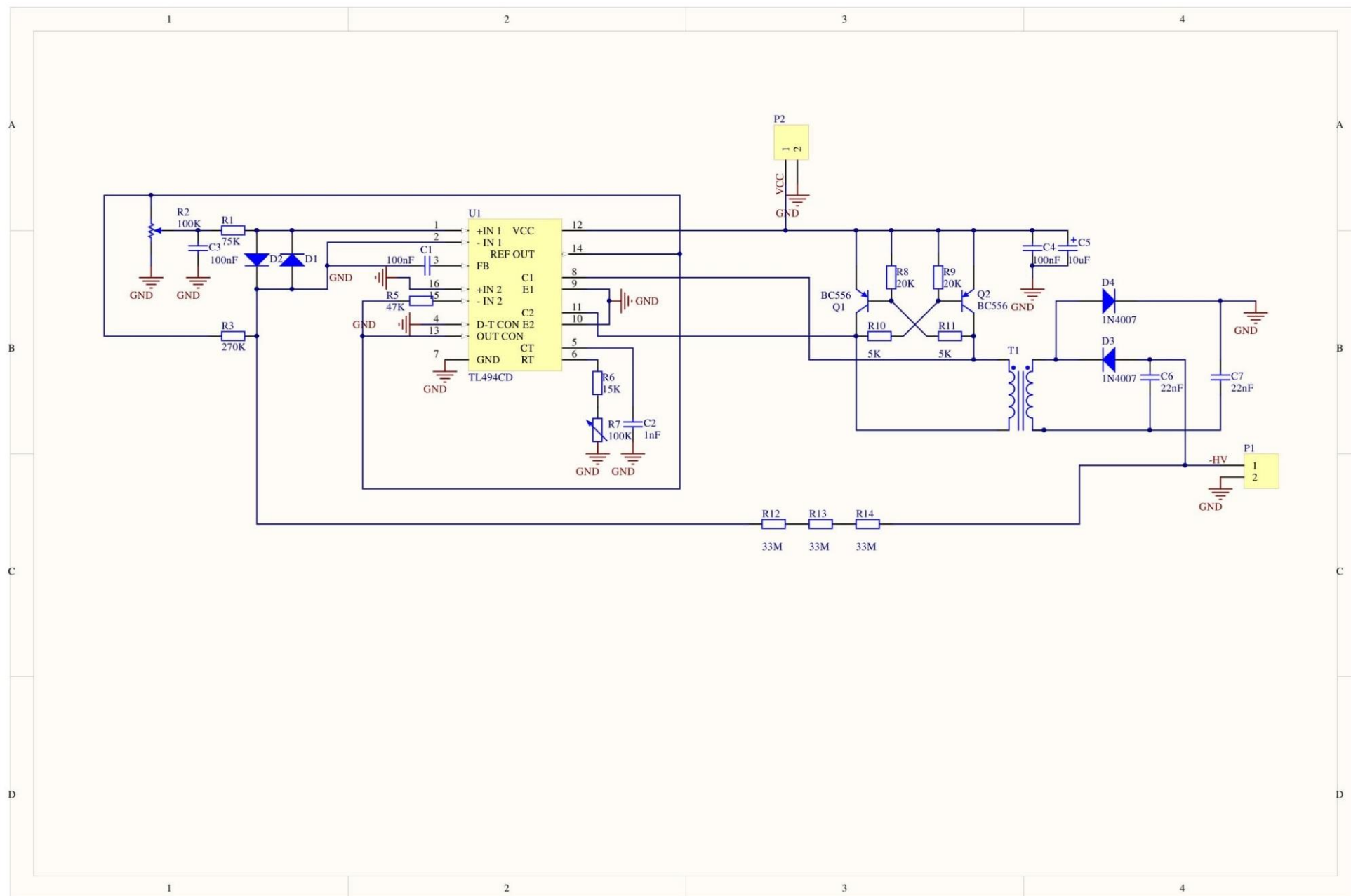


Рис. 1.2: Блок живлення високовольтний. Схема електрична принципова.

1.4. Дослідження потенційних умов роботи приладу та розробка алгоритму роботи блоку обробки даних

Одним з найбільш поширених застосувань пошукових дозиметрів є пошук радіонуклідів у транспортних засобах (вантажівках, вагонах, тощо) при вхідному (приймання металобрухту на комбінатах і т. д.) або при митному контролі.

Прилади, що використовують при такому контролі, мають так зване «налаштування порогу» - деякий рівень опромінення, після якого прилад сигналізує про аномалію. Приклади дозиметрів, що мають таке налаштування: МКС-07 «Пошук», Ритм-1 і його модифікації [3-4]. Умови роботи біля масивних транспортних засобів передбачають постійно змінний рівень фоновго опромінення – користувач переміщується навколо транспортного засобу або піднімається на нього, що призводить до екранування. Це явище добре ілюстровано у Пам'ятці для інспектора з радіаційного контролю ОБСЄ [5] (рис. 1.3).



Рис. 1.2: Типовий профіль рівню опромінення біля транспортного засобу

Це призводить до того, що після кожного переміщення необхідно проводити повторне налаштування порогового рівня. Так як умови екранування для кожного транспортного засобу різні, ця вимога або виконується некоректно, або ігнорується. В такому випадку налаштування порогового рівню залишається завищеним. Якщо ж рівень опромінення не такий великий, як наведено на ілюстрації (джерело не таке активне або добре екрановано), то аномалія може бути взагалі пропущена.

З цих даних можна зробити висновок, що інформативним є не рівень опромінення, а його підвищення чи спадання, що і має бути реалізовано у блоці обробки даних.

1.5. Розробка блоку обробки даних

Фотоелектронний помножувач являє собою джерело від'ємного струму, амплітуда якого залежить від енергії частинки, що попала в детектор. Сигнал з ФЕП знімають за допомогою подільовача напруги, що описаний в роботі [2]. Для зручної роботи з цими даними вихід (анод) ФЕП підключили до перетворювача струм-напруга. В якості ОП, що використаний у перетворювачі, обрали CA3140 через високу швидкість наростання сигналу, що дає йому можливість реагувати на швидкі фронти вхідного струму.

Сигнал з виходу перетворювача подається на так званий «дискримінатор нижнього рівня», що являє собою компаратор LM2903 з введеним гістерезисом, що порівнює сигнал з перетворювача з деяким константним рівнем, що формується потенціометром, під'єднаним до джерела опорної напруги TL431. Цей рівень напруги був налаштований таким чином, щоб виключити можливість спрацювання через завади, але і так, щоб пропускати сигнал найменшої можливої амплітуди. Для цього детектор опромінили капсулою Am-241 з блоку пожежної сигналізації. Am-241 має малу енергію часток, тому сигнал, що він спричиняє, має малу амплітуду. До виходу дискримінатора під'єднано емітерний повторювач, який приводить напругу до 0В при логічному «0» на виході компаратора.

Імпульси, що генеруються дискримінатором, подаються на ФНЧ Баттерворта другого порядку з постійною часу 10 секунд. Вихід фільтру підключений до вольтметра на основі мікросхеми ICL7106 з рефлексивним рідкокристалічним дисплеєм. Цей канал обробки даних вирішує завдання вимірювання потужності еквівалентної дози гамма-опромінення.

Для реалізації пошуку джерел гамма-опромінення сигнал з дискримінатора подається на одинівбратор 74НС123.

Це вирішує дві проблеми:

а. Підвищує співвідношення сигнал-шум.

б. Підвищує здатність дозиметра проводити пошук джерел з низькоенергетичних нуклідів.

Постійна часу одновібратора визначена так, щоб він формував сигнал з середнім значенням 5В при опроміненні в 2 мкЗв, що є достатнім максимальним рівнем для пошуку.

Вихід одновібратора поданий на ФНЧ Баттерворта другого порядку з постійною часу 3 секунди. На виході ФНЧ додано RC-ФНЧ першого порядку, так як виявлено, що обраний ОП ОР07 генерує високочастотні шуми при досягненні максимальної напруги виходу.

Для визначення наближення чи віддалення від джерела опромінення було розроблено так званий «нуль-індикатор», що визначає, підвищується чи знижується сигнал з виходу ФНЧ.

Нуль-індикатор являє собою RC-ФВЧ, вихід якого підключений до двох ОП, що включені як інвертуючий і неінвертуючий підсилювачі. Виходи ОП підключені до компараторів LM311, що не руйнуються при подачі від'ємної напруги. До компараторів підключений позитивний зворотній зв'язок, що вводить у їх схему гістерезис. Компаратори порівнюють сигнал з деякими рівнями, що встановлюються потенціомерами, що під'єднані до джерела опорної напруги.

Схема працює так: коли сигнал на вході росте, на виході RC-ФВЧ утворюється позитивний сигнал. Сигнал підсилюється неінвертуючим ОП та викликає спрацювання під'єданого до нього компаратора. В той же час, на інший компаратор подана від'ємна напруга, що не дає йому спрацювати. При зниженні вхідного сигналу, RC-ФВЧ формує від'ємний сигнал і починає працювати інвертуюча половина схеми. Саме така конструкція схеми була вибрана через широкі можливості її налаштування та незалежність від напруг живлення та положення точки землі між додатнім та від'ємним живленням.

Схема обробки даних наведена на рис. 1.3.

Виходи нуль-індикатора подаються на мікроконтролер ATtiny44, що відповідає лише за звукову індикацію. Також на вхід АЦП контролера підведений вихід 3-секундного ФНЧ. Також до контролера під'єднані світлодіоди-індикатори наближення чи віддалення та push-pull каскад, що керує динаміком. Контролер грає ноти з нотного ряду першої та другої октави декілька раз в секунду. Номер ноти відповідний значенню АЦП контролера, а проміжок часу між ними залежить від виходу нуль-індикатора. При стабільному сигналі ноти граються з музикальним темпом алегро (2 рази у секунду), а при нестабільному – 10 разів у секунду. Цей канал обробки даних вирішує завдання пошуку джерел гамма-опромінення та звукової індикації. Код мікроконтролера наведений у Додатку 4.

1.6. Забезпечення електромагнітної сумісності приладу

Розроблені високовольтний блок живлення та цифрова частина блоку обробку даних створюють завади по лініях живлення, що може призводити до некоректних сигналів у аналоговій частині. Для боротьби з даними ефектами передбачили роздільні лінії живлення для цифрової та аналогової частини, фільтровані LC-фільтрами. Також, живлення високовольтного блоку живлення підключили через індуктивність, а сам блок живлення змонтували в металічному корпусі.

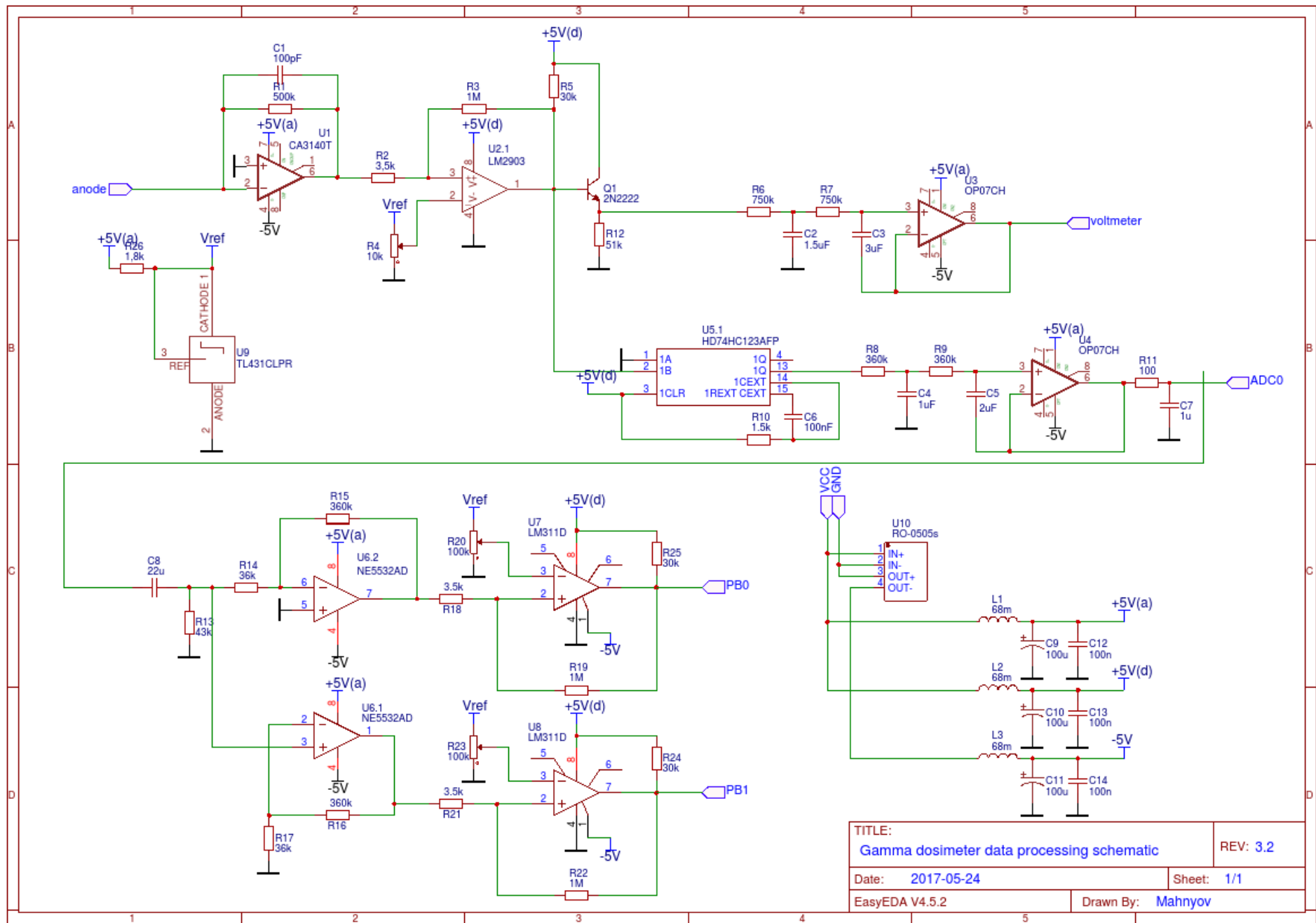


Рис. 1.3: Блок обработки данных. Схема электрична принципиальная.

РОЗДІЛ 2

Математичне обґрунтування деяких вузлів схеми

В той час, як параметри більшості вузлів схеми визначаються завданням або фізикою процесів, що виникають в детекторі, побудова активних фільтрів низької частоти потребує виконання додаткових розрахунків.

В схемі використано два активних фільтра низької частоти другого порядку Баттерворта структури Саленна-Кі для інтегрування сигналу за часом.

Розрахуємо АЧХ «швидкого фільтра» - 3-секундного ФНЧ - за наступними параметрами:

Пульсації характеристики в полосі пропускання: $R_p = 3$ дБ

Пульсації характеристики за полосою затримки: $R_s = 20$ дБ

Частота зрізу: $f_0 = 0.3$ Гц

Частота кінцю коридору затримки: $f_1 = 1$ Гц

Порядок фільтра Баттерворта визначають з рівняння [6]:

$$F_N \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right) = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} \rightarrow \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right)^N = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p}$$

Даний вираз перетворюють, логарифмують і отримують:

$$N = \frac{\log \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p}}{\log \frac{\omega_1}{\omega_0}}$$

Де:

$$\varepsilon_p = \sqrt{10^{R_p/10} - 1}; \quad \varepsilon_s = \sqrt{10^{R_s/10} - 1};$$

Розрахуємо необхідні параметри:

$$\varepsilon_p = \sqrt{10^{\frac{R_p}{10}} - 1} = 0.9976$$

$$\varepsilon_s = \sqrt{10^{\frac{R_s}{10}} - 1} = 9.9498$$

Тоді бажаний порядок фільтру буде:

$$N = \frac{\log \frac{9.9498}{0.9976}}{\log \frac{1}{0.3}} = 1.91$$

Округлюємо в більший бік: необхідний другий порядок фільтру.

Розрахуємо параметри компонентів, що входять в активний ФНЧ другого порядку спрощеної схеми Саленна-Кі:

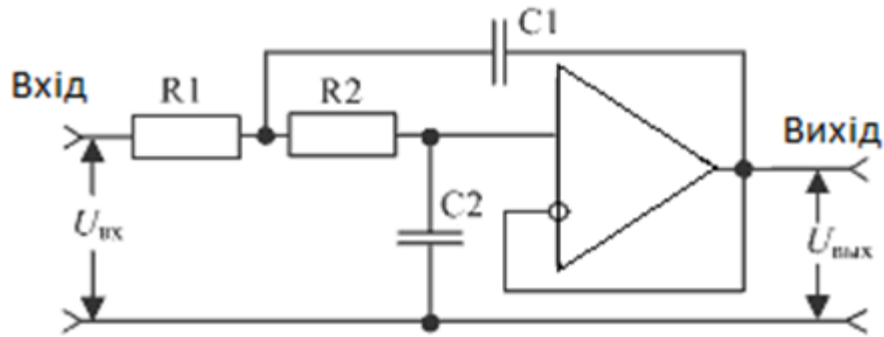


Рис. 2.1: Загальна спрощена схема ФНЧ другого порядку структури Саленна-Кі

Виведемо формулу передавальної функції такого фільтра у формі:

$$H(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + p\left(\frac{\omega_0}{Q}\right) + \omega_0^2}$$

Назвемо точку з'єднання R1, R2 та C1 точкою «А», а напругу в ній відносно землі – U_A .
Тоді:

$$U_A = i_{C2}R_2 + U_{\text{вих}}$$

$$U_A = u_{\text{вих}}R_2C_2p + U_{\text{вих}}$$

$$U_A = U_{\text{вих}}(R_2C_2p + 1) \quad (1)$$

За першим законом Кірхгофа:

$$i_{C2} = i_{C1} + i_{R1}$$

$$\frac{U_{\text{вих}}}{1/pC_2} = \frac{U_{\text{вих}} - U_A}{1/pC_1} + \frac{U_{\text{вх}} - U_A}{R_1}$$

$$pR_1C_2U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} - U_A + pR_1C_1(U_{\text{вих}} - U_A)$$

Підставимо U_A з виразу (1):

$$pR_1C_2U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}(R_2C_2p + 1) + pR_1C_1U_{\text{вих}} - pR_1C_1(R_2C_2p + 1)$$

$$U_{\text{вих}}(pR_1C_2 + U_{\text{вих}}(R_2C_2p + 1) + pR_1C_1(R_2C_2p + 1) - pR_1C_1) = U_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{вих}}(p^2R_1R_2C_1C_2 + p(R_1C_2 + R_2C_2) + 1) = U_{\text{вх}}$$

$$H(p) = \frac{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{p^2 + p\left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1}\right) + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}$$

Тоді квадрат частоти зрізу дорівнює:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$$

А добротність:

$$Q = \frac{\omega_0R_1R_2C_1C_2}{(R_1 + R_2)C_2} = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{(R_1 + R_2)C_2}$$

Для даної схеми зазвичай покладають, що $C_1 \approx 2C_2$ та $R_1 = R_2 = R$. [6] Тоді:

$$Q = \frac{\sqrt{C_1C_2}}{2C_1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R^2C_1C_2}$$

$$C_1 = 4C_2Q^2$$

$$C_1 = \frac{2Q}{R\omega_0}; C_2 = \frac{1}{2RQ\omega_0}; (2)$$

Покладемо $R = 360$ кОм та розрахуємо ємності конденсаторів фільтру виходячи з рівнянь (2):

$$C_1 = \frac{2Q}{R\omega_0} = \frac{2Q}{2\pi f_0 R} = \frac{2 * 0,707}{2 * 3,14 * 0,3 * 360 * 10^3} = 2,084 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = \frac{1}{2RQ\omega_0} = \frac{1}{4\pi f_0 RQ} = \frac{1}{4 * 3,14 * 0,3 * 360 * 10^3 * 0,707} = 1,047 \text{ мкФ}$$

З даними параметрами передавальна функція приймає вигляд (вик. утиліту [7]):

$$H(s) = \frac{3.5363}{p^2 + 2.6658 * p + 3.5363}$$

Частота зрізу такого фільтру дорівнює $f_0 = 0.299$ Гц, що підтверджує коректність розрахунків. Швидкість спадання – 40дБ/декаду. АЧХ фільтру показана на рис. 2.2.

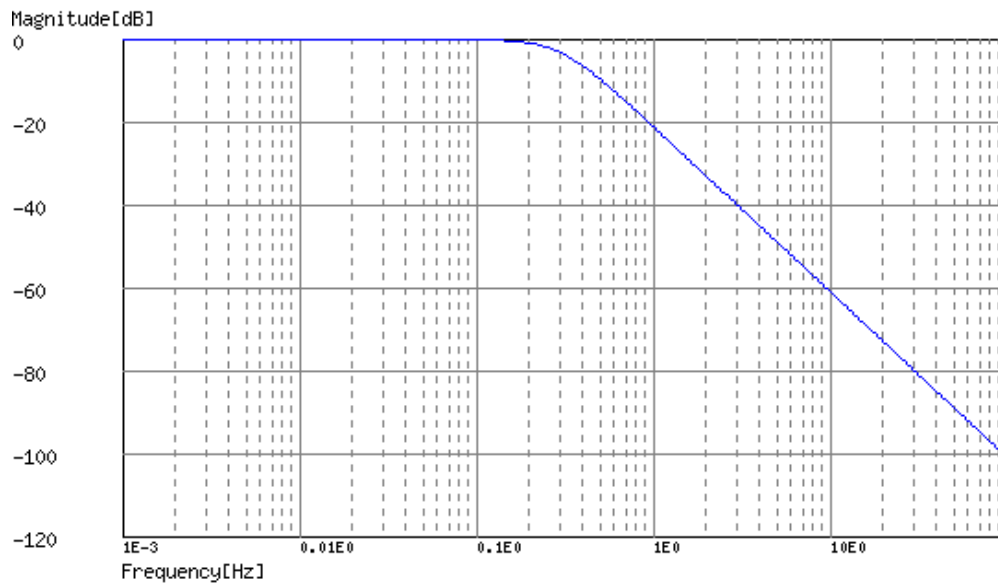


Рис. 2.2: АЧХ ФНЧ Баттерворта другого порядку

Проведемо аналогічний розрахунок для «довгого фільтру» - 10-секундного ФНЧ тієї ж конструкції. Параметри фільтру:

Пульсації характеристики в полосі пропускання: $R_p = 3$ дБ

Пульсації характеристики за полозою затримки: $R_s = 20$ дБ

Частота зрізу: $f_0 = 0.1$ Гц

Частота кінцю коридору затримки: $f_1 = 0.3$ Гц

$$\varepsilon_p = \sqrt{10^{\frac{Rp}{10}} - 1} = 0.9976$$

$$\varepsilon_s = \sqrt{10^{\frac{Rs}{10}} - 1} = 9.9498$$

$$N = \frac{\log \frac{9.9498}{0.9976}}{\log \frac{0.3}{0.1}} = 2.09$$

Округлюємо: другий порядок влаштовує.

Покладемо $R = 750$ кОм та розрахуємо ємності конденсаторів фільтру виходячи з рівнянь (2):

$$C_1 = \frac{2Q}{R\omega_0} = \frac{2Q}{2\pi f_0 R} = \frac{2 * 0.707}{2 * 3.14 * 0.1 * 750 * 10^3} = 3,002$$

$$C_2 = \frac{1}{2RQ\omega_0} = \frac{1}{4\pi f_0 RQ} = \frac{1}{4 * 3.14 * 0.1 * 750 * 10^3 * 0.707} = 1,501$$

З даними параметрами передавальна функція приймає вигляд:

$$H(s) = \frac{0.3945}{p^2 + 0.8882 * p + 0.3945}$$

Частота зрізу такого фільтру дорівнює $f_0 = 0.0999$ Гц, що підтверджує коректність розрахунків. Швидкість спадання – 40дБ/декаду. АЧХ фільтру показана на рис. 2.3.

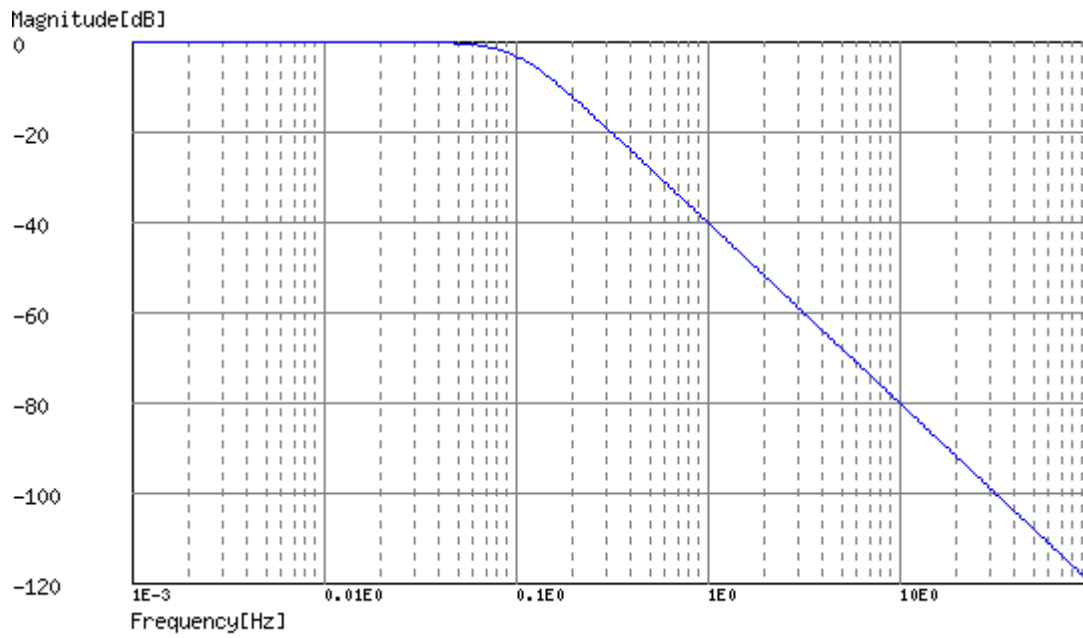


Рис. 2.3: АЧХ ФНЧ Баттерворта другого порядку

РОЗДІЛ 3

Моделювання роботи приладу

Було проведено моделювання роботи окремих систем пристрою у SPICE-системі LTspice XVII [8]. У зв'язку з тим, що робота схеми залежить від поведінки детектора, блок живлення та різні компоненти блоку обробки даних моделювали окремо.

3.1. Моделювання роботи високовольтного блоку живлення

Схему високовольтного блоку живлення останнього варіанту було відтворено в середовищі симулятора (рис. 3.1). Симуляцію проводили в режимі Transient analysis.

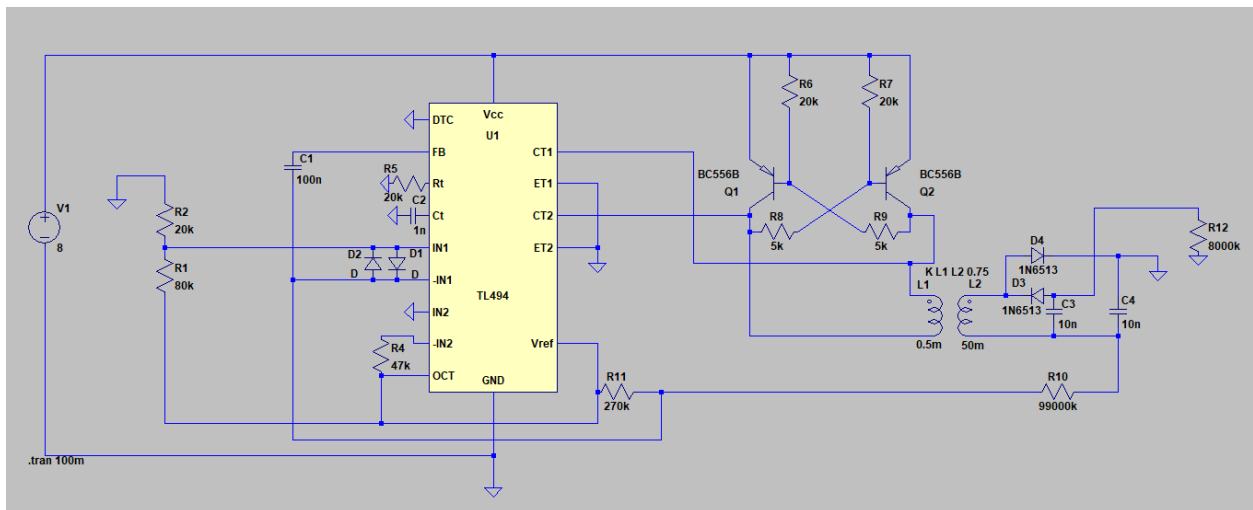


Рис. 3.1 Схема високовольтного блоку живлення у середовищі

Під час складення схеми було прийнято такі припущення:

- Напругу живлення визначили як 8В через особливості моделі ШІМ-контролера – джерело опорної напруги в моделі починає працювати саме на такій напрузі.
- ККД трансформатора визначили рівному 75%.
- Навантаження моделювали резистором 8 МОм.

- Змінні резистори моделювали подільниками напруги.
- Налаштування частоти, коефіцієнту заповнення та глибини зворотного зразку виставили близькими до таких у макетного зразка.

За даними симуляції, даний блок живлення дійсно здатний генерувати напругу до -800В після проходження деякого перехідного процесу. Графік вихідної напруги на резисторі навантаження (R12) наведено на рисунку 3.2.

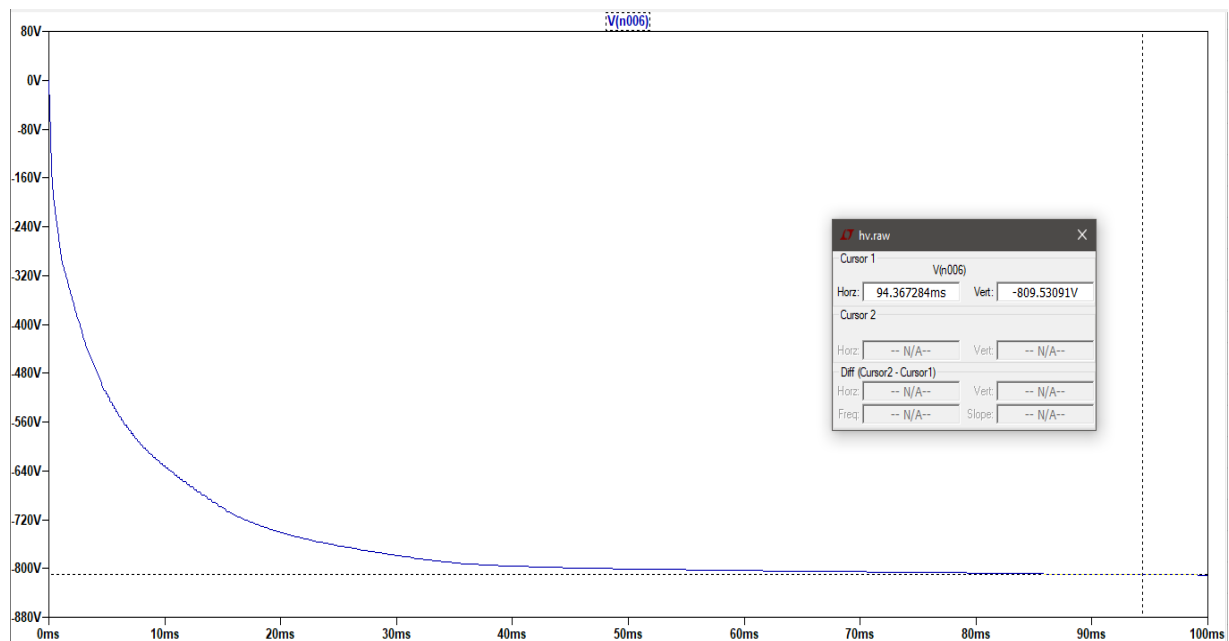


Рис. 3.2: Графік вихідної напруги симульованого блоку

3.2. Моделювання вхідних каскадів блоку обробки даних

У середовищі симулятора відтворили схему вхідного перетворювача струм-напруга та дискримінатора нижнього рівня. (рис. 3.3) Симуляцію проводили в режимі Transient analysis.

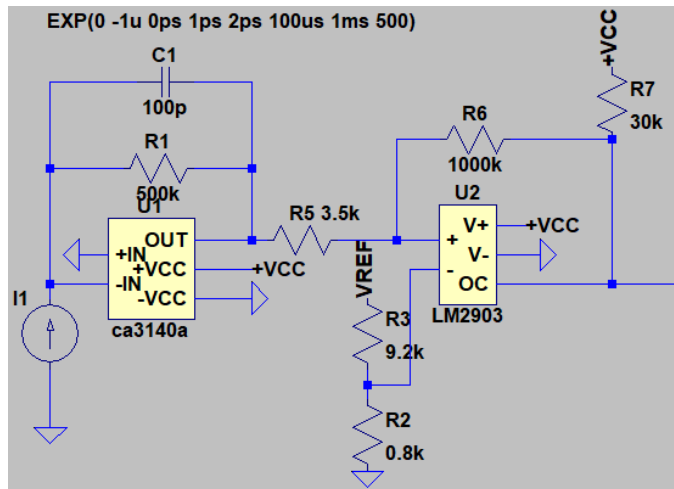


Рис. 3.3: Схема вхідних каскадів блоку обробки даних у середовищі LTspice

Згідно симуляції, вхідні каскади дійсно здатні перетворювати вхідні імпульси струму у послідовність логічних імпульсів. Графік вхідного струму та вихідної напруги наведено на рис 3.4.

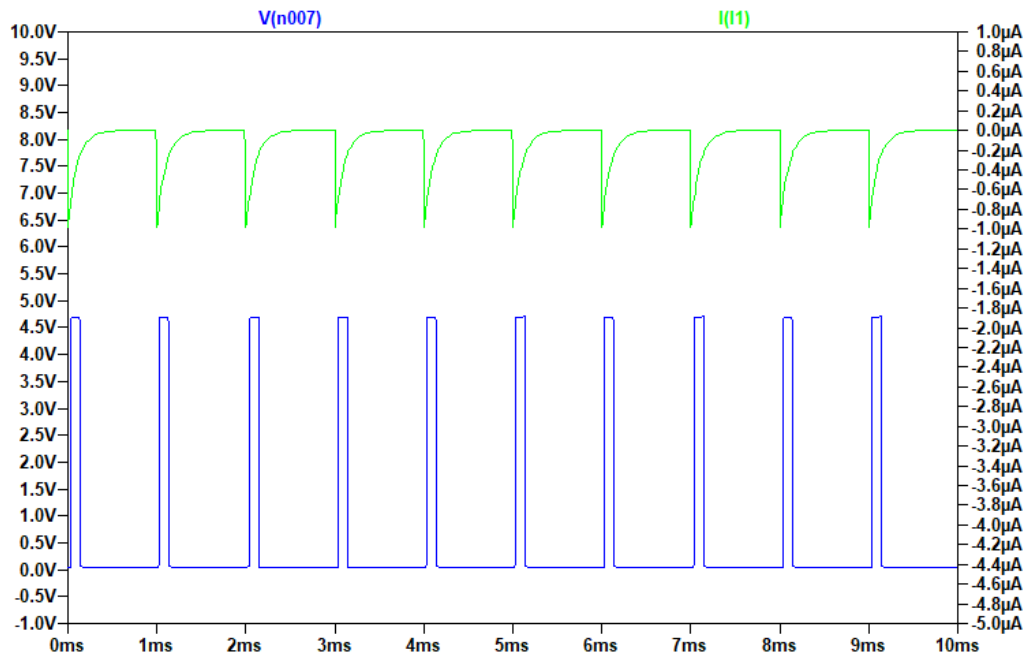


Рис. 3.4: Графік вхідного струму та вихідної напруги вхідного каскаду

3.3. Моделювання роботи фільтрів

Для перевірки розрахунків, що були виконані у другому розділі, було проведено симуляцію роботи фільтрів в режимі AC sweep, на частоті вхідного сигналу від 0.01 до 10 Гц.

У середовищі симулятора склали схему «довгого фільтра» (рис. 3.5).

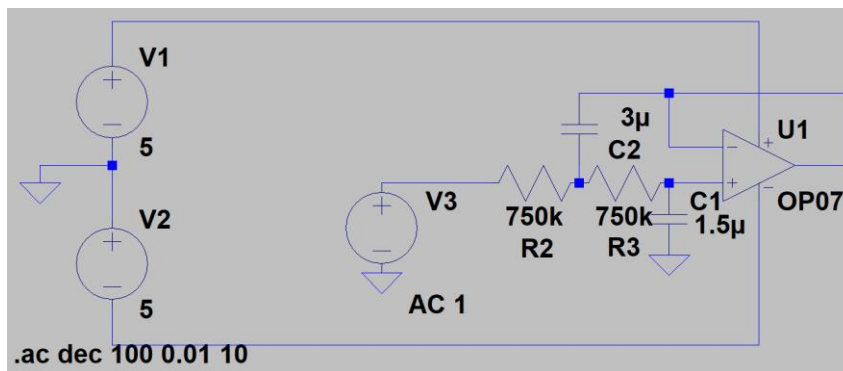


Рис. 3.5: Схема 10-секундного ФНЧ Баттерворта у середовищі LTspice

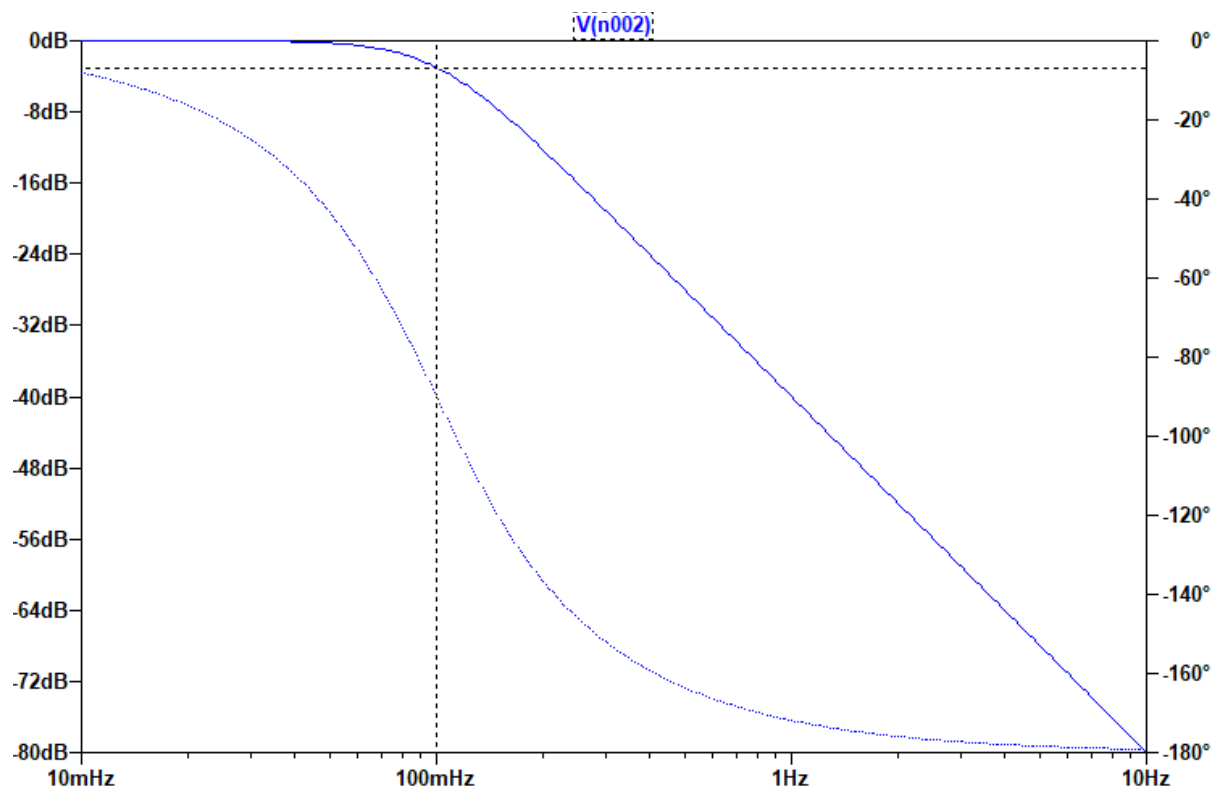


Рис. 3.5.1. Графік АЧХ (суцільна лінія) та ФЧХ (пунктирна лінія) 10-секундного фільтра

Моделювання АЧХ показало, що фільтр із розрахованими вище параметрами дійсно має частоту зрізу 0,1 Гц та швидкість спадання 40 дБ/декаду. Графік АЧХ, ФЧХ та параметри на частоті зрізу наведено на малюнку 3.5.1 та 3.5.2.

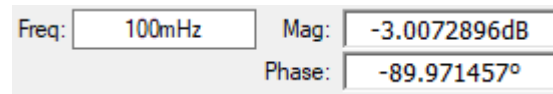


Рис. 3.5.2. Параметри АЧХ та ФЧХ на частоті зрізу 10-секундного фільтра

Аналогічну симуляцію провели для «короткого фільтра». Схема, зібрана в середовищі для симуляції, наведена на рисунку 3.6, а результати – на 3.7.1 та 3.7.2.

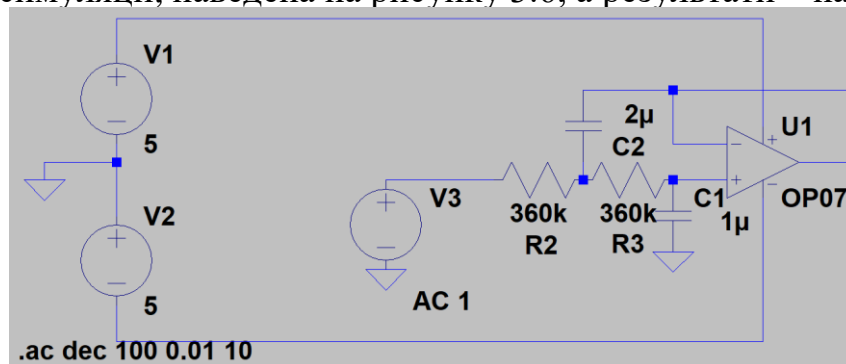


Рис. 3.6. Схема 3-секундного ФНЧ Баттерворта у середовищі LTspice

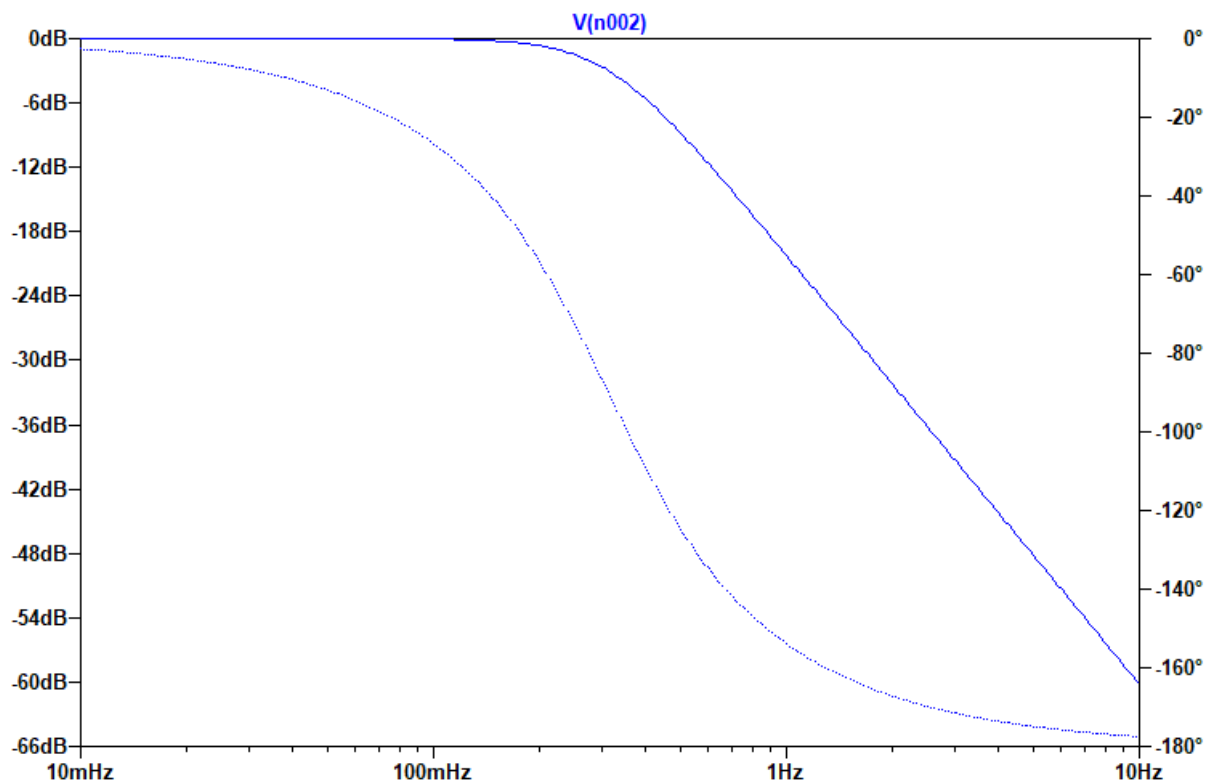


Рис. 3.7.1. Графік АЧХ (суцільна лінія) та ФЧХ (пунктирна лінія) 3-секундного фільтра

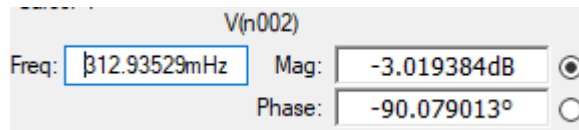


Рис. 3.7.2. Параметри АЧХ та ФЧХ на частоті зрізу 3-секундного фільтра

3.4. Моделювання роботи нуль-індикатору

Для моделювання роботи нуль-індикатору у середовищі симулятора склали генератор випадкових імпульсів, розподілених за нормальним законом. Середня частота імпульсів визначається синусоїдальним законом, що має моделювати радіаційні аномалії у навколишньому середовищі, або константним рівнем, що моделює фонове опромінення. Дана модель буде замінювати собою вихід дискримінатора нижнього рівня. Симуляції проводили у режимі Transient analysis. Схема генератора наведена на рис. 3.8.

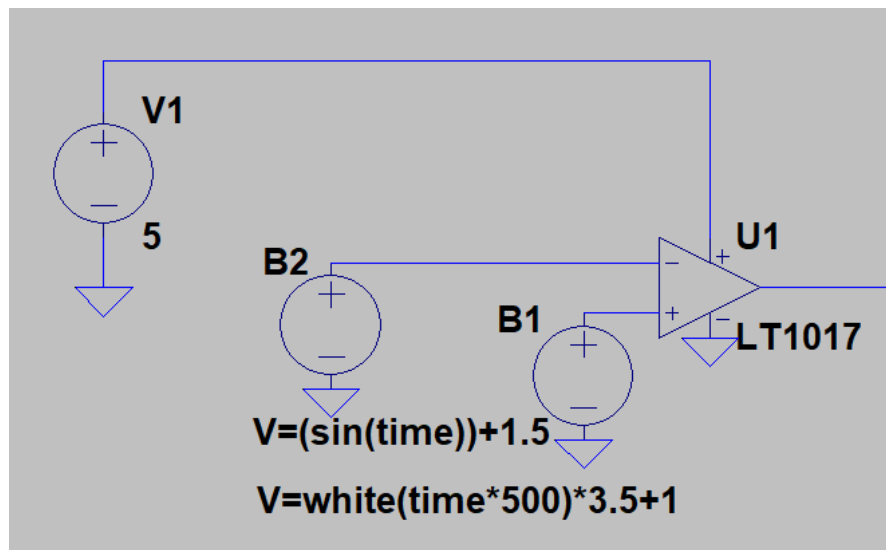


Рис. 3.8. Схема модульованого генератора випадкових імпульсів у середовищі LTspice

Схема генерує випадкові імпульси зі змінною середньою частотою. Приклад вихідного сигналу наведений на рис. 3.9.

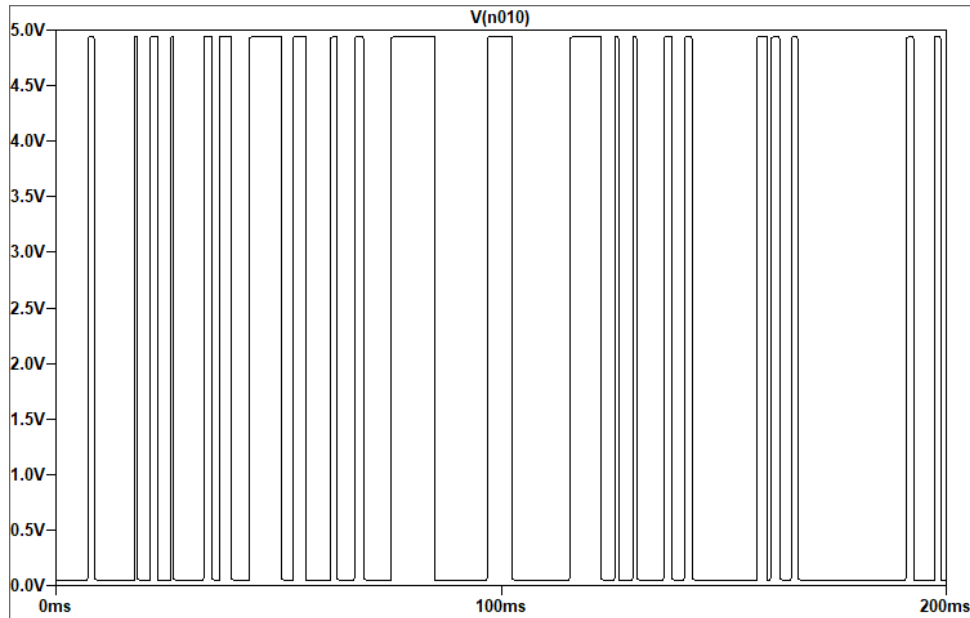


Рис. 3.9. Приклад вихідного сигналу генератора випадкових імпульсів

У середовищі симулятора склали схему нуля-індикатора, на вхід якого подавали сигнал з описаного раніше 3-секундного ФНЧ (рис. 3.10).

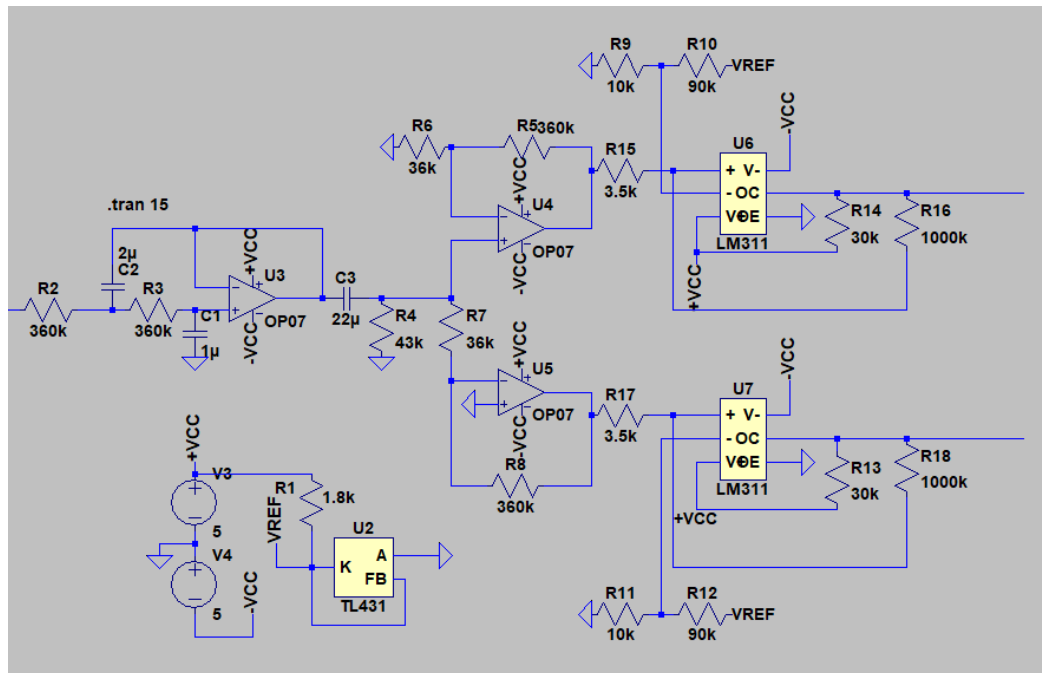


Рис. 3.10. Схема нуля-індикатора у середовищі LTspice

При нестабільному сигналі на вході (генератор модульований синусом) схема видає сигнали про ріст чи спадання рівня вхідного сигналу (рис. 3.11).

При стабільному сигналі на вході (генератор не модульований) схема практично не сигналізує про ріст чи спадання рівня вхідного сигналу (рис. 3.12).

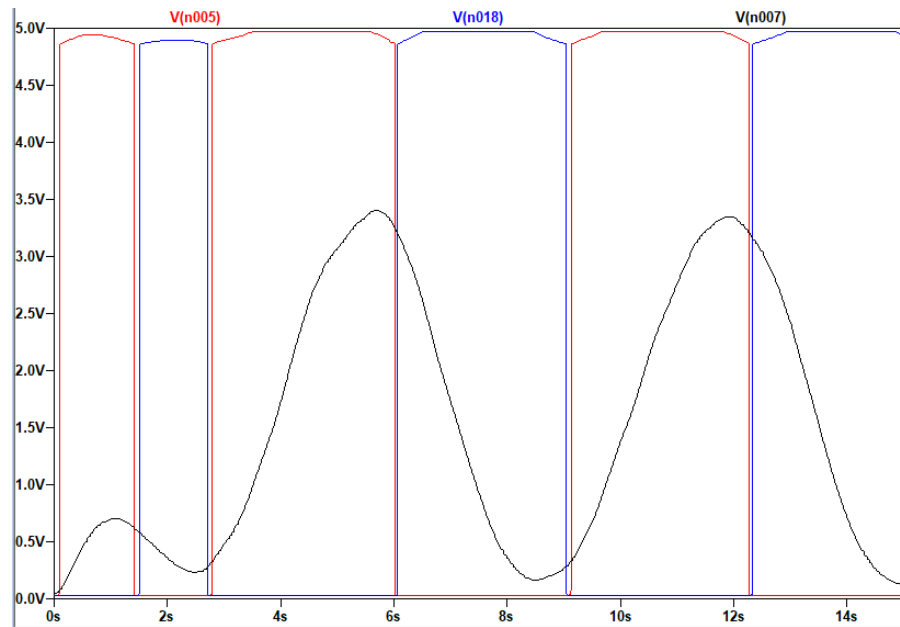


Рис. 3.11. Графік вхідних та вихідних сигналів нуля-індикатора при стабільному сигналі. Чорний – вихід ФНЧ, червоний – сигнал про ріст рівня, синій – сигнал про спадання рівня

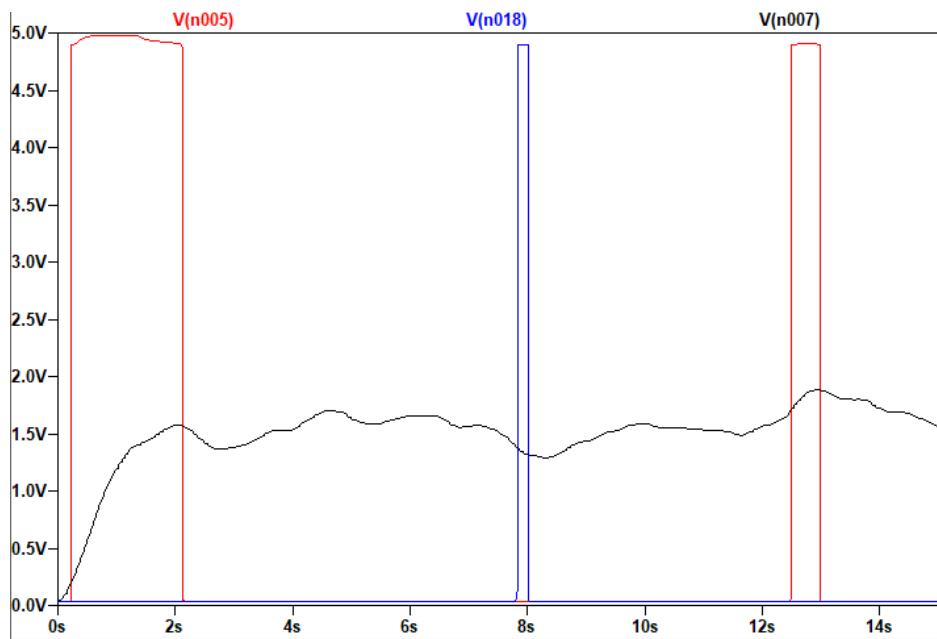


Рис. 3.12. Графік вхідних та вихідних сигналів нуля-індикатора при нестабільному сигналі. Чорний – вихід ФНЧ, червоний – сигнал про ріст рівня, синій – сигнал про спадання рівня

РОЗДІЛ 4

Створення, калібрування та дослідження робочого прототипу пристрою

4.1 Створення високовольтного блоку живлення

Створення приладу було розпочато зі складання макетного зразка високовольтного блоку живлення (рис 4.1).

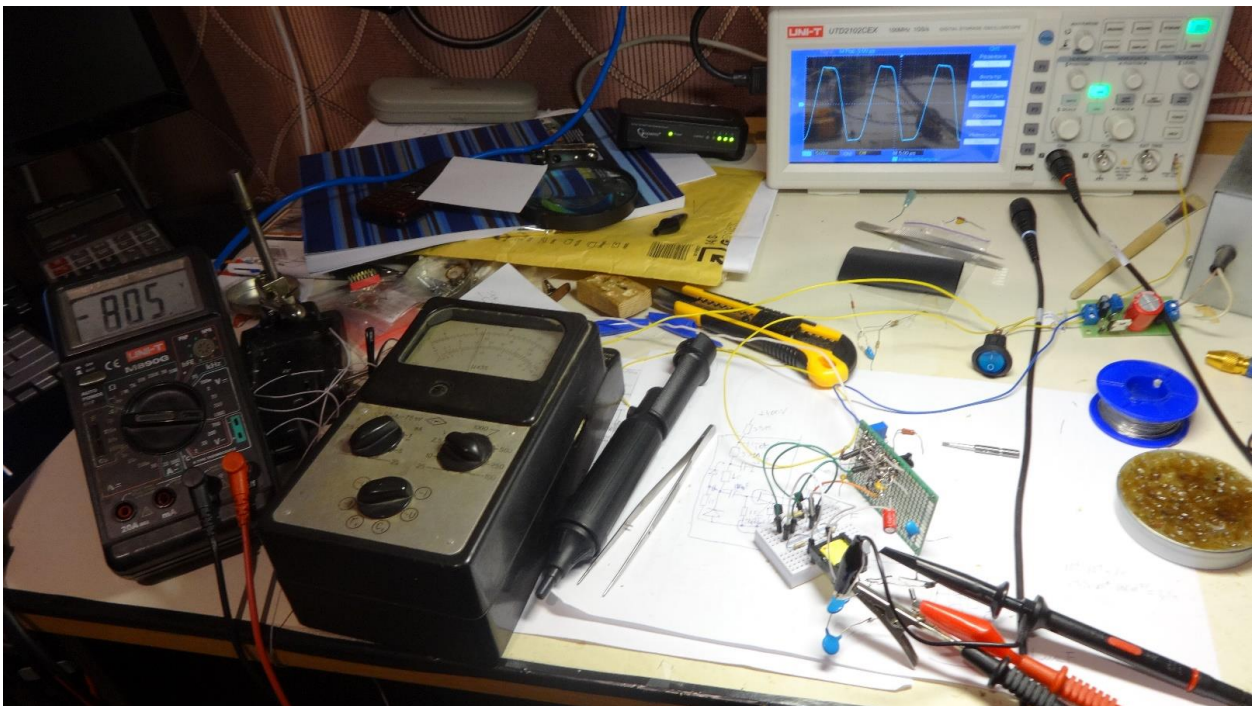


Рис. 4.1. Макетування високовольтного блоку живлення

Коли схема була доведена до прийнятних характеристик (наведених у розділі 1 цієї роботи), вона була повністю змонтована на макетній платі та вмонтована у металічний корпус для екранування оточуючої електроніки від завад.

4.2. Створення детектора

Наступним етапом було створення зборки кристал-ФЕП та захищеного від світла, вологи та електромагнітних завад корпусу детектора. Кристал NaI(Tl) приклеїли до ФЕП

двокомпонентним оптичним клеєм, після чого всю ФЕП обтягнули термоусадочною трубкою (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Збірка кристал-ФЕП

Для створення захисного корпусу використали алюмінієву трубу та захисну кришку для радіо-компонентів з нержавіючої сталі. В кришку вмонтували герметичний ввід для кабелю, під'єднали до неї дрід для екранування та залили місце з'єднання чорним термоклеєм для світлоізоляції (рис. 4.3.1, 4.3.2.).



Рис. 4.3.1. Кришка детектора

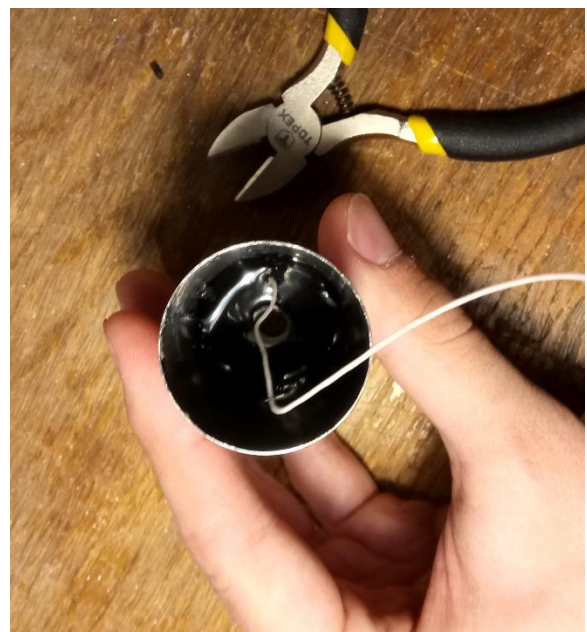


Рис. 4.3.2. Кришка детектора

Після цього на другу половину корпусу (трубу) намотали герметизаційну стрічку, ввели у кришку кабель та під'єднали до кабелю анод ФЕП та подільник напруги. Дріт екрану під'єднали до екрану кабеля (рис. 4.4.1, 4.4.2).

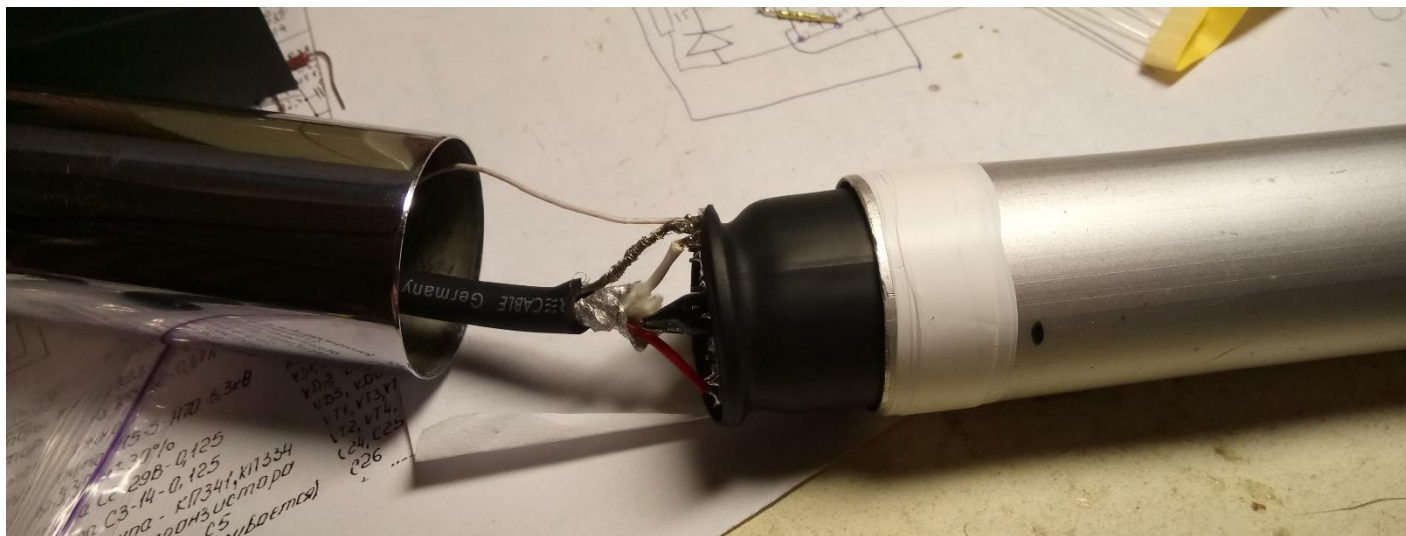


Рис. 4.4.1. Складання детектора



Рис. 4.4.2. Складання детектора

Після з'єднання половинок корпусу стик залили токопровідним клеєм та дали йому затвердіти (рис. 4.5).

Передній торець корпусу був закритий чорним спіненим полімером, а стики – залиті чорним термоклеєм. Для механічного захисту на торець корпусу додали пластикову кришку (рис. 4.6, 4.7).



Рис. 4.6. Захист торця детектору



Рис. 4.5. Склеювання половинок корпусу



Рис. 4.7. Захист торця детектору

Фінальний вигляд детектора наведено на рис. 4.8.



Рис. 4.7. Зібраний детектор

Після подачі на детектор високої напруги отримали сигнал, визначений радіоактивністю (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Сигнал з детектора

4.3. Створення блоку обробки даних

Після отримання сигналу з детектора почали розробку блоку обробки даних. Схему було спочатку зібрано на платах для монтування без пайки (рис. 4.9.), а потім – на паянній макетній платі (рис. 4.10-4.13.).

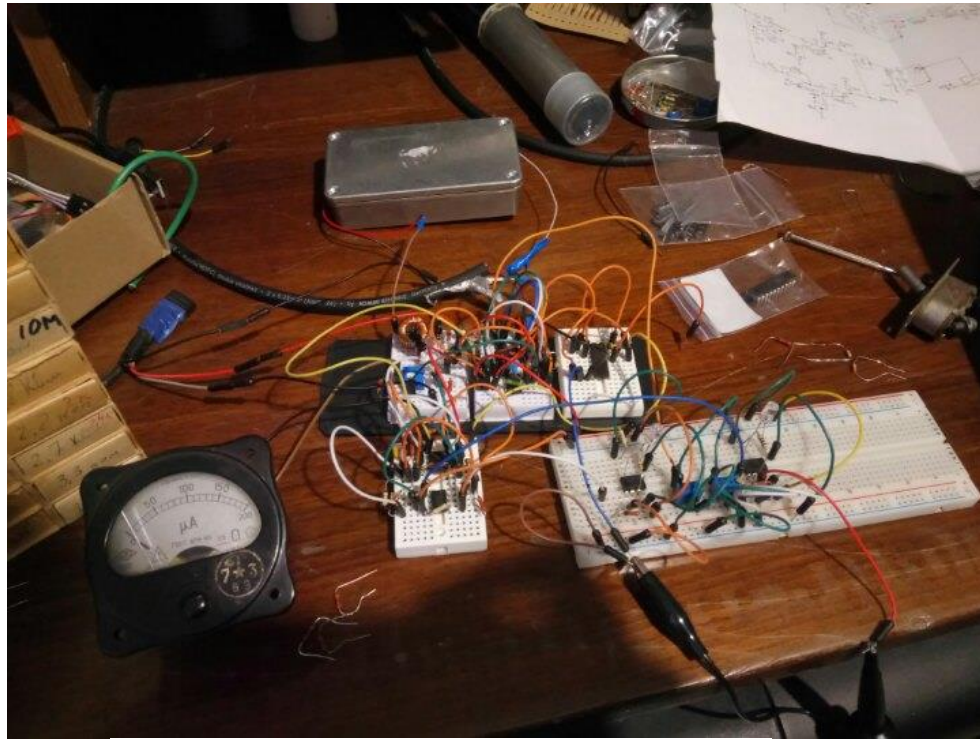


Рис. 4.9. Макет блоку обробки даних

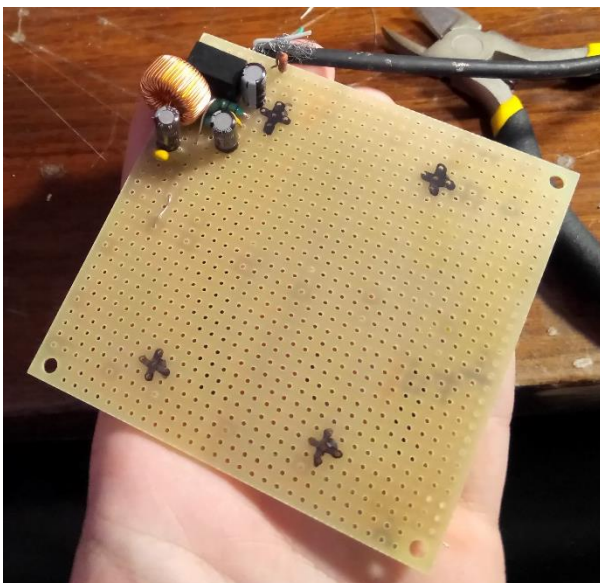


Рис. 4.10. Макет блоку обробки даних

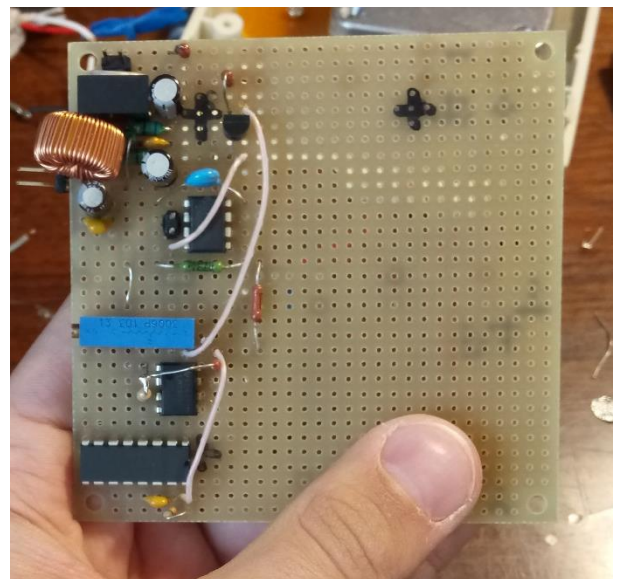


Рис. 4.11. Макет блоку обробки даних

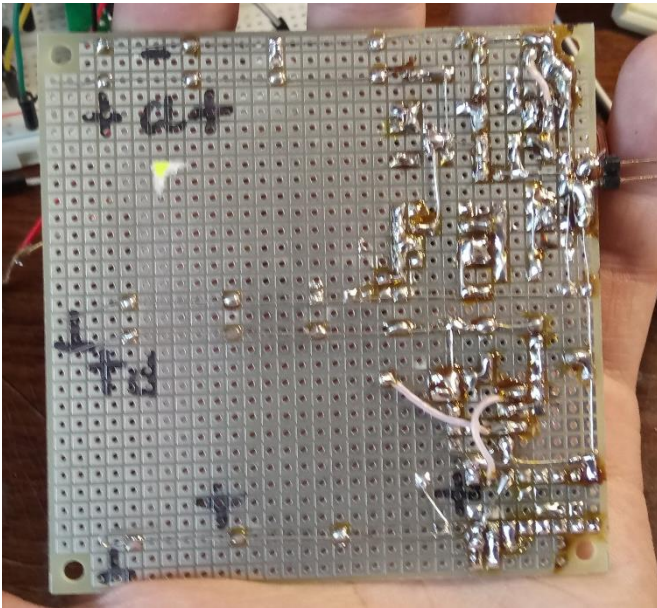


Рис. 4.12. Макет блоку обробки даних

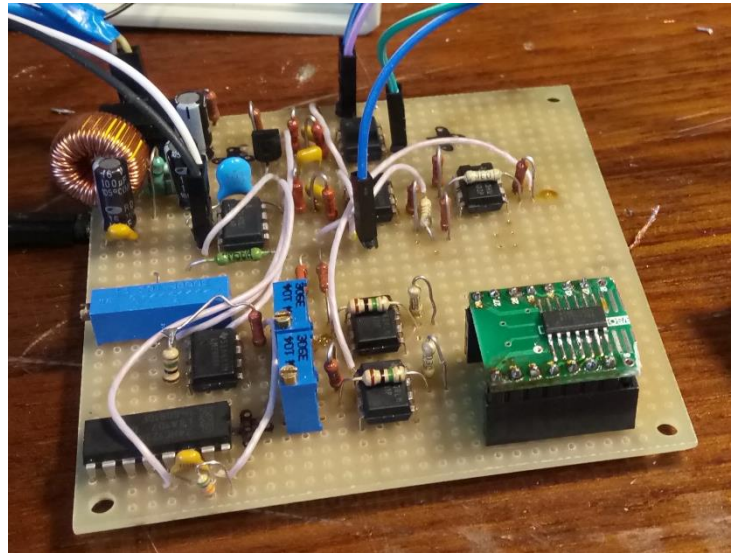


Рис. 4.13. Макет блоку обробки даних

4.4. Складання пристрою

Після створення макетної плати усі компоненти було змонтовано у пластиковому корпусі. Для живлення пристрою обрали літійовий акумулятор типорозміру 18650 та стандартні плати заряджання-розряджання для нього.

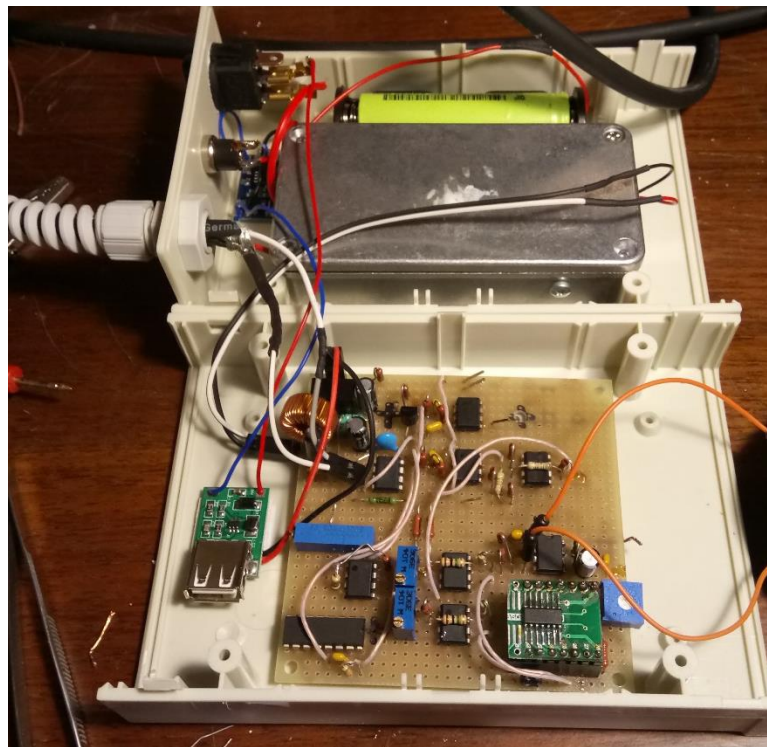


Рис. 4.14. Монтaж елементів в корпусі

Для створення передньої панелі пристрою використали 3D-друк з моделі, розробленої у редакторі Tinkercad [9] (рис. 4.15, 4.16).

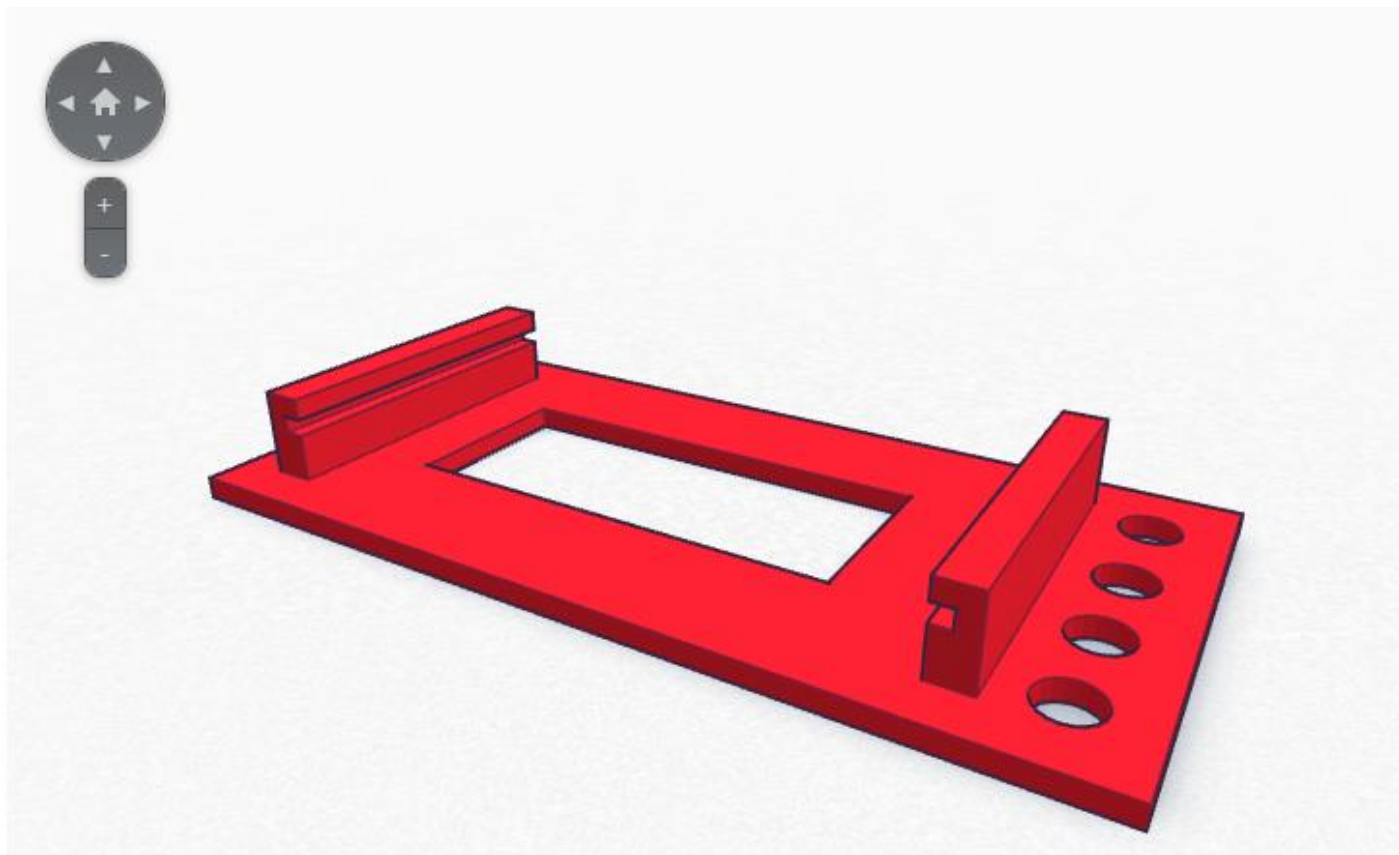


Рис. 4.15. Модель передньої панелі пристрою



Рис. 4.16. Надрукована передня панель

Зібраний пристрій представлено на рис. 4.17.



Рис. 4.17. Дозиметр у зборі

4.5. Дослідження роботи фільтрів

Для перевірки розрахунків, наведених у розділі 3 цієї роботи, провели експеримент з отримання АЧХ фільтрів, що були створенні у макетному зразку. За допомогою плати Analog Discovery 2 на фільтри подали синусоїдальний сигнал амплітудою 1В та знімали амплітуду на виході. Отримані дані представлені на рис. 4.18-4.19.

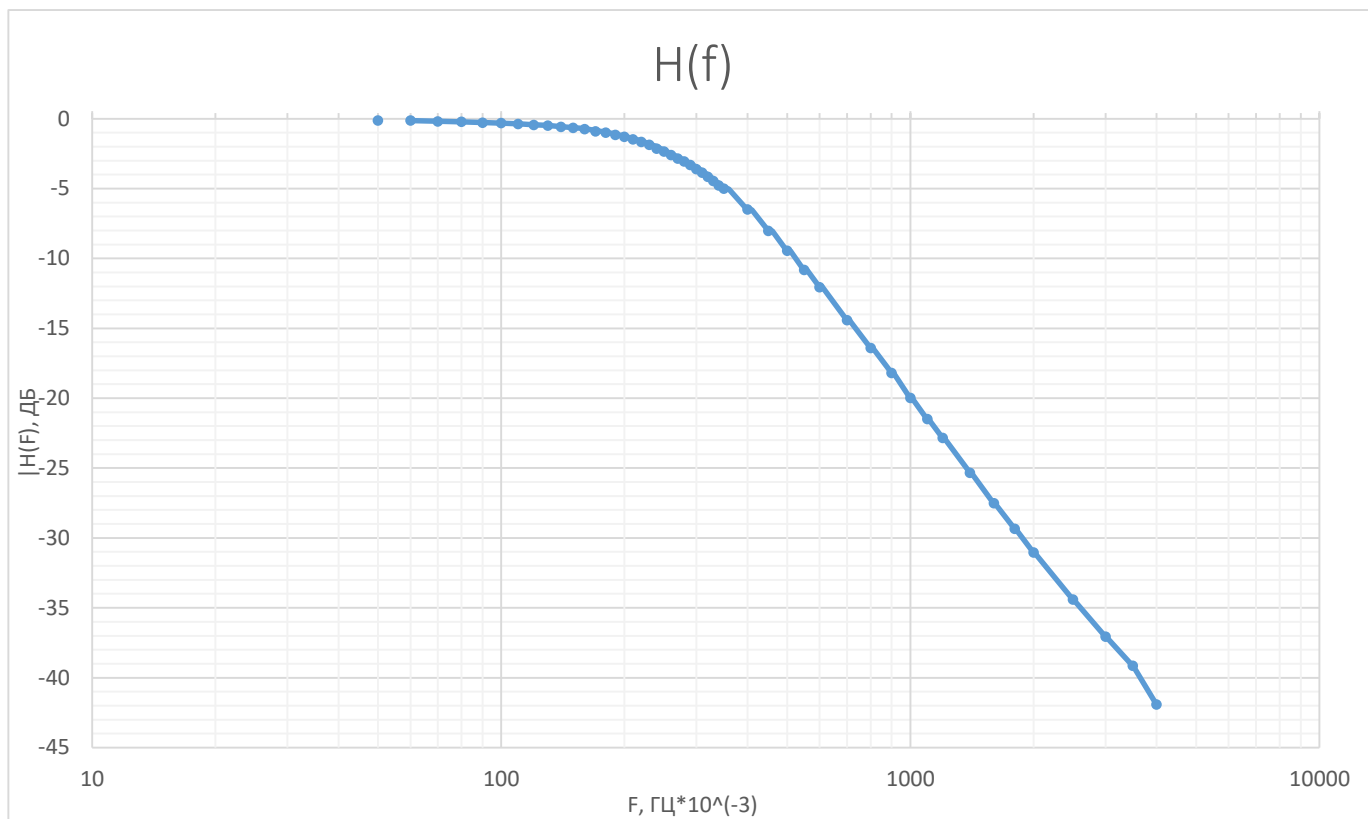


Рис. 4.18. АЧХ 3-секундного фільтра

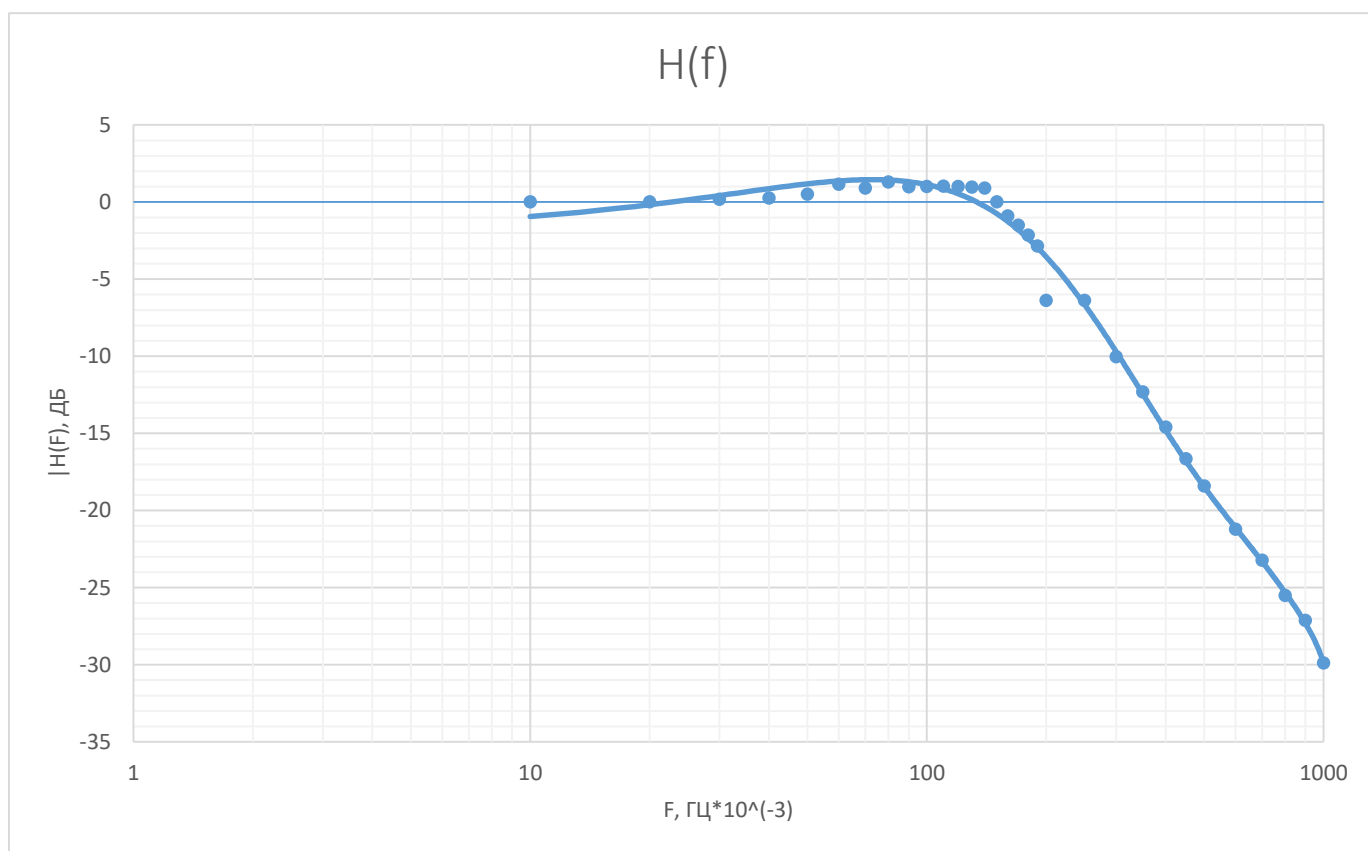


Рис. 4.19. АЧХ 10-секундного фільтра

4.6. Калібрування пристрою

Калібрування пристрою проводили за допомогою дозиметра Ритм-5, що пройшов метрологічну атестацію. Детектори обох дозиметрів розмістили поряд один з одним, а на деякому віддалені від них поклали джерело високої активності – шкалу танкового гірокомпаса, покриту Ra-226. Після завершення перехідних процесів у дозиметрах, покази дозиметра, що калібрується, виставили однаковими зі зразковим дозиметром (рис. 4.20, 4.21).



Рис. 4.20. Калібрування дозиметру (джерело у чайнику)



Рис. 4.20. Покази дозиметру

ВИСНОВКИ

Підсумуємо проведену роботу.

В першому розділі провели дослідження типових умов роботи пошукових дозиметрів та визначили необхідні схемотехнічні рішення для створення приладу, що буде відповідати задачам, поставленим у вступі. Виходячи з цих даних, розробили працездатну схему дозиметру.

В другому розділі провели розрахунок деяких вузлів схеми, а саме: математичне обґрунтування вибору параметрів компонентів, що входять в активні фільтри. Для отриманих схем розраховували та побудували на графіках амплітудні характеристики.

В третьому розділі провели моделювання розробленої схеми з використанням SPICE-системи. Отримані дані довели працездатність та вірність обраних технічних рішень, а також підтвердили розрахунки, виконані у другому розділі.

В четвертому розділі описали процес створення прототипу пристрою, навели фотозвіт зі складання приладу, провели калібрування та підтвердили працездатність приладу. Також у четвертому розділі провели експериментальне дослідження амплітудних характеристик приладу. Отримані залежності зійшлися для 3-секундного фільтру та мали значні відхилення для 10-секундного. Це може бути спричинено відхиленнями у параметрах обраних компонентів, довгими перехідними процесами, що виникають у фільтрах з довгою постійною часу та похибкою вимірювань.

Загалом, проведена робота дала результат у вигляді повністю робочого дозиметра, що являє собою представника нового класу пошукової апаратури радіаційного контролю – приладу, що реагує не стільки на рівень опромінення, скільки на його зміну. Досягнули таких характеристик приладу:

- Час автономної роботи: ≈ 30 год.
- Діапазон вимірюваної ПЕД: $0.01 \div 15$ мкЗв/год.

- Діапазон чутливості за енергією: 30 кЕв÷1.5МЕв
- Чутливість: 200 імп./с/мкЗв/год (за Cs-137)
- Час реакції на аномалію: до 1с.
- Маса приладу: 660 г.
- Звукова, світлова та цифрова індикація

Отриманий прилад відповідає завданню, поставленому у вступі, тому задачу курсової роботи можна вважати виконаною.

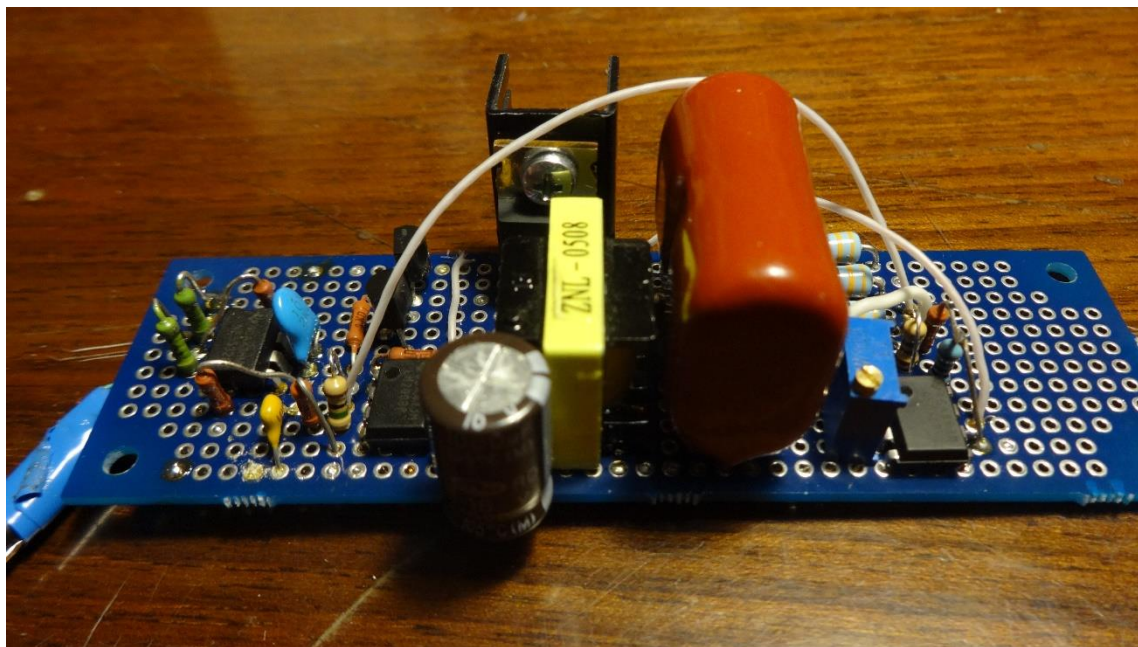
Макетний зразок приладу складено з доступних компонентів, тому прилад може бути складено повторно.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сцинтилляционные детекторы / Ядерная физика в интернете [Электронный ресурс] : проект / проф. Б.С. Ишханов / Кафедра общей ядерной физики физического факультета МГУ – Режим доступа:
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/scint.htm> - Дата звернення: 25.05.17
2. Кацнельсон Б. В. Электровакуумные электронные и ионные приборы. Справочник. Книга первая. / Кацнельсон Б. В., Калугин А. М., Ларионов А. С. ; за ред. А. С. Ларионов - Москва : Энергия, 1970 – 411 с.
3. Поиск. Дозиметр-радиометр поисковый / [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<http://ecotest.ua/ru/products/mks-07/> - Дата звернення 05.06.17
4. Поисковый дозиметр гамма-излучения "Ритм-1М" ДБГ-02 / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://opyt.com.ua/ritm1m.php>
5. Radiological control cards / [Электронный ресурс] / OSCE Project Co-ordinator in Ukraine / OSCE – 2013 – Режим доступа: <http://www.osce.org/ukraine/107094>
6. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс] / Бахурин С. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/filters/ch3/ch3.html> - Дата звернення 28.05.17
7. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / Пейтон А. Дж., Волш. В. – Москва : Бином, 1994 – с. 111
8. OKAWA Electric Design. Engineering Design Utilities / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm> - Дата звернення: 28.05.17
9. LTspice XVIII / Linear Technology/Analog Devices / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice> – Дата звернення 05.05.17
Tinkercad / Autodesk, Inc. / [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://www.tinkercad.com/> - Дата звернення 22.05.17

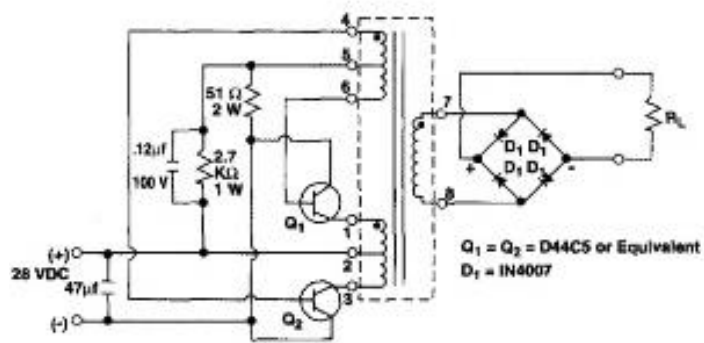
ДОДАТКИ

Додаток 1. Блок живлення високовольний, версія 1.



Додаток 2. Блок живлення високовольний, версія 2.

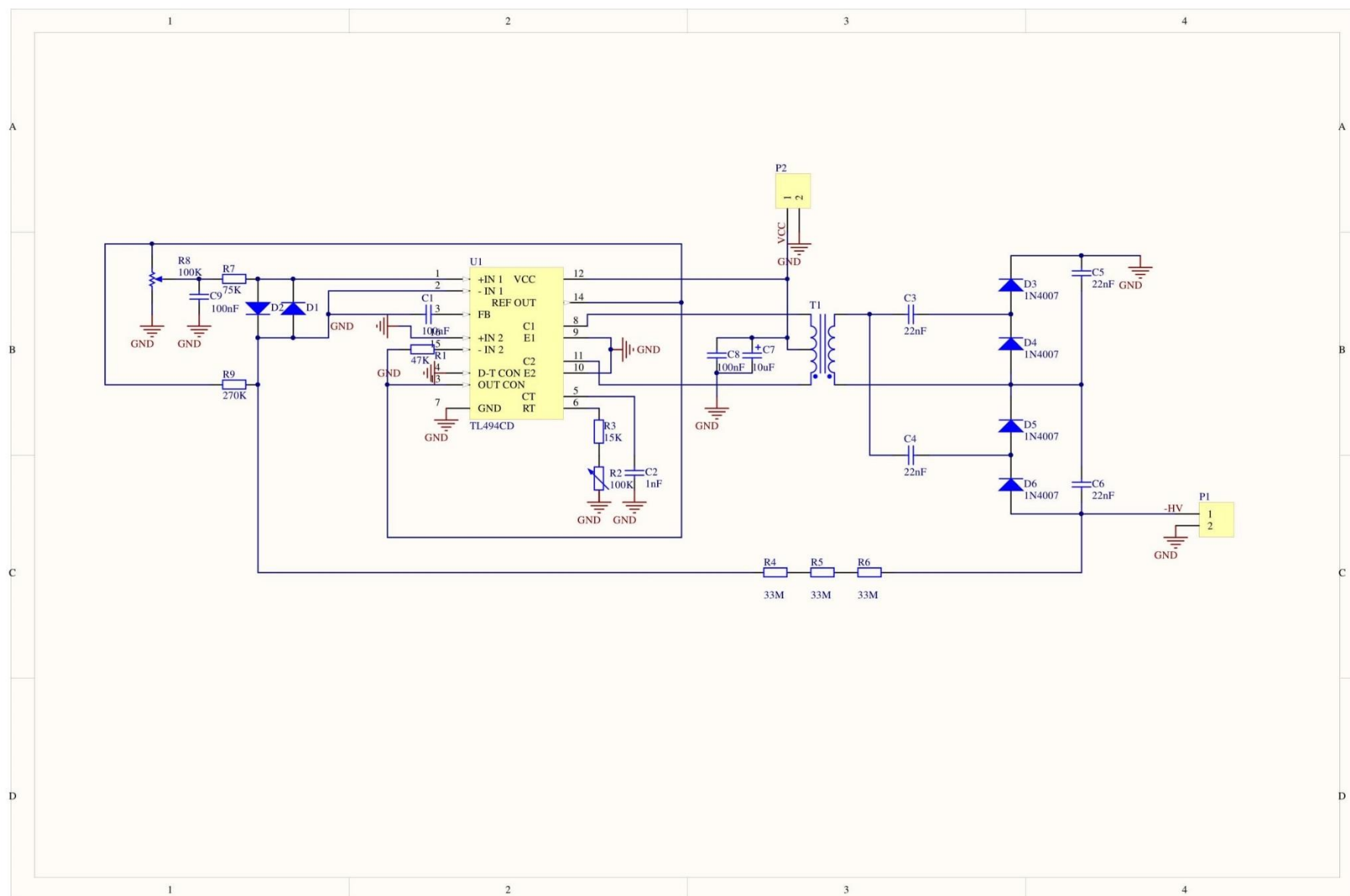
TYPICAL APPLICATION CIRCUIT



Unless otherwise specified,
all tolerances are \pm $\frac{0.005}{0.127}$

Dimensions: $\frac{\text{Inches}}{\text{mm}}$

Додаток 3. Блок живлення високовольтний, версія 3.



Додаток 4. Програма мікроконтролера.

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/delay.h>

unsigned volatile char toggle = 0;
void beep(unsigned int compare);
int findClosest(float input);
int skipPause = 0;

const unsigned int notes[] = {1915, 1706, 1519, 1432, 1275, 1136, 1012,
                              956, 851, 758, 716, 637, 568, 506,
                              478, 425, 379, 358, 318, 290, 253,
                              239};

int main(void){

    DDRA |= (1 << PA7);      //output on PA7
    DDRB |= (1 << PB0) | (1 << PB1);
    TCCR1A = 0;              //CTC mode
    //CTC mode, clk src = clk/8, start timer
    TCCR1B = (1 << WGM12) | (1 << CS10);
    TCCR0B = (1 << CS02); //Timer0, clk/256

    ADCSRA = (1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS0);
    // ADEN: Set to turn on ADC , by default it is turned off
    //ADPS2: ADPS2 and ADPS0 set to make division factor 32
    ADMUX=0; // ADC input channel set to ADC0
    unsigned int adcValue;

    while(1){
        ADCSRA |= (1<<ADSC); // Start conversion
        while (ADCSRA & (1<<ADSC)); // wait for conversion to complete
        adcValue = 1024-ADC; //Store ADC value

        int midNote = notes[findClosest(adcValue * 1.63)];

        beep(midNote);
        int i;
        if(PINA & (1 << 1)){
            skipPause = 1;
            PORTB |= (1 << PB0);
            PORTB &= ~(1 << PB1);
        }
        else{
            if(PINA & (1 << 2)){
                skipPause = 1;
            }
        }
    }
}

```

```

        PORTB |= (1 << PB1);
        PORTB &= ~(1 << PB0);
    }else skipPause = 0;
    }
    if(!skipPause){
        for(i = 0; !(i > 500 || PINA & (1 << 1) || PINA & (1 <<
2)); i++)
            _delay_ms(1);
            PORTB &= ~(1 << PB0);
            PORTB &= ~(1 << PB1);
    }
    else _delay_ms(100);
}
}

```

```

void beep(unsigned int compare){
    OCR1A = compare;
    TCNT1 = 0;
    TCNT0 = 0;
    while(TCNT0 <= 250){
        if (TIFR1 & (1 << OCF1A)) { //count reached?
            TIFR1 |= (1 << OCF1A); //clear flag
            if (toggle) { //toggle output
                toggle = 0;
                PORTA &= ~(1 << PA7);
            }
            else {
                toggle = 1;
                PORTA |= (1 << PA7);
            }
        }
    }
    PORTA &= ~(1 << PA7); //set output to 0
}

```

```

int findClosest(float input){
    int intInput = (int)input; //in case it goes wrong
    int i;
    for(i = 0; i < 21; i++){
        if(intInput > notes[i]) break;
    }
    return i;
}

```