

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет**

**Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури**

До захисту допущено:

В.о. зав.кафедрою

 Євгеній НЕЛІН

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»**

**за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: Малоінерційний керований генератор шуму міліметрового діапазону**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РІ-71

Воєвода Олексій Миколайович

Прізвище, ім'я, по батькові



Керівник: доцент к.т.н. Перебудов Сергій Миколайович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові



Рецензент: старший викладач Турєєва Ольга Василівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_



Київ – 2021 року

# ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PI71.468171.001.T3	Завдання на дипломний проєкт	4	
2	A4	PI71.468171.001.T3	Пояснювальна записка	60	
3	A3	PI71.468171.001 E3	Схема електрична принципова	1	
4	A3	PI71.758725.001	Друкована плата	1	
5	A4	PI71.468171.001 ПЕ	Перелік елементів	2	
6	A2	PI71.468171.001 СК	Складальний кресленник друкованого вузла	1	
7	A2	PI71.468171.002 СК	Складальний кресленник блоку живлення	1	
8	A2	PI71.468171.003 СК	Складальний кресленник генераторної голівки	1	
9	A4	PI71.468171.001	Специфікація на друкований вузол	2	
10	A4	PI71.468171.002	Специфікація на блок живлення	2	
11	A4	PI71.468171.003	Специфікація на генераторну голівку	2	
12	A2	PI71.468732184	Корпус блоку живлення	1	

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Радіотехнічний факультет**

**Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.зав. кафедрою

 Євгеній НЕЛІН

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Воєводи Олексію Миколайовичу**

1. Тема проєкту «Малоінерційний керований генератор шуму міліметрового діапазону», керівник проєкту Перебудов Сергій Миколайович, доцент, к.т.н. , затверджені наказом по університету від «18»травня 2021 р. №1205-с
2. Термін подання студентом проєкту 09 червня 2021 року
3. Вихідні дані до проєкту: вихідна потужність ГШ від 0,1 до 1 нВт, діапазон робочих частот 53-78 ГГц, вихідна напруга блоку живлення до 35 В, потужність споживання не більше 5 Вт. Робочі температури від мінус 10 до +40 °С. Габарити блоку живлення не більше 200x150x100 мм
4. Зміст пояснювальної записки: 1 Вступ, 2 Аналіз ТЗ, 3 Обґрунтування схематичного рішення, 4 Вибір елементної бази, 5 Проектування друкованої плати, 6 Проектування приладу та аналіз його працездатності.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо 1 Схема електрична принципова, 2 Друкована плата, 3 Складальний кресленик друкованого вузла, 4 Складальний кресленик блоку живлення, 5 Складальний кресленик генераторної голівки, 6 Корпус блоку живлення

6. Дата видачі завдання 12 квітня 2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Розробка технічного завдання	20.04.2021р	виконано
	Огляд джерел за темою проєкта	27.04.2021р	виконано
	Функціональна та електрична схеми	05.05.2021р	виконано
	Проектування конструкції	15.05.2021р	виконано
	Проведення дослідів та аналіз їх результатів	22.05.2021р	виконано
	Написання основної частини пояснювальної записки	26.05.2021р	виконано
	Підготовка креслеників	03.06.2021р	виконано
	Здача проєкту на перевірку	08.06.2021р	виконано

Студент

Олексій ВОЄВОДА

Керівник

Сергій ПЕРЕГУДОВ

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту**

на тему: Малоінерційний керований генератор шуму міліметрового  
діапазону

Київ – 2021 року

## АНОТАЦІЯ

В дипломному проекті розглянуто генератор шумових сигналів в міліметровому діапазоні на базі лавино-пролітного діоду. Метою роботи було спрощення способу модуляції вихідного сигналу та підвищенні швидкодії генератора. Для цього було розроблено схему електричну принципову пристрою, друковану плату та конструкцію корпусу блоку живлення, обґрунтовано вибір елементної бази. Проведено перевірку отриманих параметрів на відповідність ТЗ, зокрема, представлені результати розрахунку показників надійності.

Результатом виконаної роботи є конструкторська документація, необхідна для виготовлення розробленого генератора шуму.

Дипломний проект складається з пояснювальної записки обсягом 60 сторінки, включає 38 рисунка, 3 таблиці, 5 креслень, 34 посилань, 5 додатків.

Ключові слова: лавинно-пролітний діод, ЛПД, генератор шуму.

## ANNOTATION

In the diploma project the generator of noise signals in the millimeter range on the basis of the avalanche-span diode is considered. The purpose of work with methods of simplification of modulation of an output signal and increase of speed of coding of the generator. For this purpose the scheme of the electric basis of the device, the printed circuit board and a design of the case of the power supply unit, in general the chosen element of the basis was developed. The obtained parameters were checked for the response of the vehicle, if the results of the calculation of reliability indicators are presented.




The result of the work performed is the design documentation that is not received for the manufacture of a sample noise generator.

The diploma project consists of an explanatory note of 60 pages, includes 38 figures, 3 tables, 5 drawings, 34 references, 5 appendices.

Key words: avalanche-span diode, noise generator.

## Зміст

Перелік скорочень.....	3
Вступ.....	4
1 Аналіз технічного завдання .....	5
2 Огляд існуючих рішень .....	6
2.1 Генератори шуму для вимірювальної НВЧ апаратури .....	6
2.2 Використання генераторів шуму в засобах захисту інформації ....	11
2.3 Застосування ГШ в радіометричних системах міліметрового діапазону .....	21
3 Обґрунтування схемотехнічного рішення.....	25
3.1 Лавинно-пролітний діод та принцип його роботи.....	25
3.2 Аналіз існуючих генераторів шуму на ЛПД .....	29
3.3 Обґрунтування структурної схеми ГШ .....	31
3.4 Обґрунтування схеми електричної принципової.....	33
4 Вибір елементної бази .....	35
4.1 Вибір ЛПД .....	35
4.2 Вибір стабілізатору напруги .....	36
4.3 Вибір оптопар .....	37
4.4 Вибір транзисторів.....	38
4.5 Вибір діоду, стабілітрону та діодного мосту .....	40
4.6 Вибір резисторів та конденсаторів.....	41

					<b>PI71.468171.001 ПЗ</b>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Воєвода			Малоінерційний керований генератор шуму міліметро- вого діапазону		
Перев.		Перебудов С.М.					
Н. Контр.							
Затв.		Перебудов С.М.					
					Лит.	Арк.	Аркуші
						1	60
					НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", РТФ		



4.7 Розрахунок трансформатору .....	42
5 Проектування друкованої плати .....	45
5.1 Розрахунок друкованих провідників.....	45
5.1.1 Розрахунок ширини друкованих провідників .....	45
5.1.2 Розрахунок зазорів між елементами .....	47
5.1.3 Розрахунок відстані у вузькому місці для прокладання провідника між двома контактними майданчиками.....	47
5.2 Вибір конструкційних матеріалів та технології виготовлення .....	48
5.3 Розміщення елементів на та провідникових доріжок на платі.....	49
6 Проектування приладу та аналіз його працездатності.....	51
6.1 Опис конструкції.....	51
6.2 Розрахунок надійності .....	53
Висновки .....	55
Перелік джерел посилання.....	56
Додатки .....	60

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГШ — генератор шуму

ЛПД — лавинно-пролітний діод

НВЧ — надвисока частота

РС — радіометрична система

СЩПШ — спектральна щільність потужності шуму

Воєвода О.М. РІ-71, 2021

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

З моменту відкриття способу передачі інформації за допомогою радіосигналів людство знаходило все нові й нові способи застосування цієї технології. Досягнення технічного прогресу дозволило зменшити довжини хвилі електромагнітного випромінювання, з якими люди могли працювати, що відкривало нові можливості для науки і техніки. На сьогоднішній день в радіотехніці використовуються не тільки гармонічні сигнали з довжиною хвилі порядку міліметра, а й шумоподібні.

Генератори шумових сигналів мікрохвильового діапазону знаходять широке застосування в радіометричній, медичній апаратурі, засобах захисту інформації, комплексах зондування землі та системах мобільного зв'язку 5G.

В даному дипломному проекті представлено результати розробки генератора електромагнітного шуму (ГШ) мм-діапазону на базі лавинно-пролітного діода (ЛПД). Розроблений генератор відрізняється від аналогів більш простим способом модуляції вихідного сигналу та підвищеної швидкодією. Керування генератором буде здійснюватися за допомогою зовнішнього джерела керуючих сигналів, що дозволить автоматизувати деякі процеси в роботі апаратури, складовою частиною якої буде виступати даний генератор.

Практична цінність полягає в тому, запропонований генератор може використовуватись як джерело шумових сигналів мм-діапазону у вимірювальній техніці, апаратних засобах захисту інформації, а також медичній апаратурі.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Розроблюваний пристрій – генератор електромагнітного шуму.

Пристрій повинен відповідати таким вимогам:

- забезпечувати достатній рівень електромагнітного шуму (0,1-1 нВт) у діапазоні частот 53-78 ГГц;
- напруга живлення повинна становити не більше 35 В;
- керування генератором повинно здійснюватися за допомогою зовнішніх імпульсних та гармонічних сигналів
- пристрій має складатися з двох частин: блоку живлення та генераторної голівки.
- експлуатація пристрою повинна бути максимально простою;
- конструкція генератора має забезпечувати можливість ремонту, а вага не більше 1 кг;
- забезпечення мінімальних габаритних розмірів.

Згідно ТЗ пристрій призначений для застосування в приміщеннях, де відсутні агресивні середовища та є стабільний температурний режим, тому його герметизація не потрібна.

Для забезпечення високого рівня надійності, якості, мінімальної собівартості та ремонтпридатності треба використовувати елементну базу та матеріали, які широко представлені на ринку України.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Стрімкий розвиток сучасних телекомунікаційних систем, вимірювальної техніки та освоєння все більш високочастотних діапазонів потребує вдосконалення їх апаратного забезпечення, зокрема джерел надвисокочастотних сигналів, до яких відносяться генератори електромагнітного шуму. Вони, як правило, характеризуються досить широким робочим діапазоном при малій нерівномірності рівню потужності. Такі генератори знайшли застосування у вимірювальній техніці [1, 2], засобах захисту інформації [3], та апаратурі біомедицинного призначення [4 – 6]. Останніми роками спостерігається використання пристроїв міліметрового діапазону у системах мобільному зв'язку 5G [7], дистанційного зондування земної поверхні [8], медицині. Крім того, слід відзначити вплив на стан живих організмів випромінювання мм-діапазону навіть дуже низької інтенсивності (меншої за  $10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>) [4, 6].

### 2.1 Генератори шуму для вимірювальної НВЧ апаратури

Однією з характеристик приймальної та вимірювальної апаратури НВЧ є чутливість. Проте таке поняття можна тлумачити по-різному. Одним із визначень поняття чутливості є межа розпізнавання сигналу, яка визначається власним шумом приймального пристрою. Саме межа чутливості, яку встановлюють шумові властивості вхідних електронних пристроїв, є принципово важливою [1].

Теорія та техніка вимірювання чутливості завжди розвивалася паралельно з розробкою самих підсилюючих пристроїв. Багато робіт присвячено знаходженню критеріїв і параметрів чутливості. Так, наприклад, параметр “коефіцієнт шуму”  $K_{ш}$ , запропонований ще в 40-х роках ХХ століття, уточнювали багато разів, при чому однозначного тлумачення не існує і досі.

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

При описі поведінки підсилювача в неузгодженому тракті одного поняття “коефіцієнт шуму” не достатньо. Необхідна система, яка складається з чотирьох параметрів, до складу яких входить також і коефіцієнт шуму. Для підсилювачів з дуже малими шумами більш доцільно використовувати не коефіцієнт шуму, а шумову температуру підсилювача  $T_y$  [1, 2].

Разом із розробкою засобів для визначення характеристик чутливості покращувалися і методи вимірювання. Сучасні пристрої для вимірювання коефіцієнту шуму є доволі складними вимірювальними системами, які використовують модуляційний метод вимірювання, цифрову обробку сигналів і сучасні досягнення техніки НВЧ. Це дозволяє безпосередньо визначати коефіцієнт шуму, відстежувати його змінами в процесі налаштування мікрохвильових пристроїв, і в деяких випадках автоматично керувати процесом налаштування [1]. Створення засобів вимірювання шумових характеристик апаратури, зокрема коефіцієнту шуму потребує розробки різноманітних генераторів шуму НВЧ діапазону.

Існує декілька основних способів генерації шумових. Всі ці способи базуються на явищі нерегулярного руху заряджених частинок. Такий рух може відбуватися як в твердих тілах, так і в газоподібному середовищі.

Причинами нерегульованого руху іонів можуть виступати розряди у газах, тепловий рух при нагріванні твердого тіла, або лавинний пробій в напівпровіднику. На рисунку 2.1 показані основні джерела шумових сигналів, які використовуються в НВЧ діапазоні.

Інтенсивність шумових сигналів (потужність випромінювання, віднесена до одиниці опромінюваної поверхні) в залежності від їх джерела визначається за різними формулами.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 — Методи формування шумових сигналів НВЧ діапазону

Зокрема нагріте тіло, що знаходиться у вільному просторі випромінює так званий тепловий шум, інтенсивність якого для певної частоти можна визначити за формулою Релея-Джинса

$$I_f = \frac{2\pi f^2}{c^2} \beta k T \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (2.1)$$

де  $f$  – частота електромагнітних коливань;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура об'єкта;

$c$  – швидкість світла у вакуумі;

$\beta$  – коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкту, який можна визначити, знаючи інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла  $I'_f$  при температурі  $T$  за формулою

$$\beta = I_f / I'_f. \quad (2.2)$$

Для вимірювального тракту, який можна вважати одновимірною систе-

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

мою, формула (2.1), переходить у формулу Найквіста [1\*], яка визначає спектральну щільність потужності шуму  $p$ , а також для інтегральну потужність шуму  $P$  в певній смузі частот  $\Delta f$

$$p = kT, P = kT\Delta f. \quad (2.3)$$

Найбільш поширений метод вимірювання коефіцієнту шуму полягає в порівнянні рівню власного шуму пристрою (наприклад, підсилювача) із сигналом генератора шуму (ГШ), рівень вихідної потужності якого відомий (рис. 2.2). При цьому в автоматизованих вимірювачах може використовуватися амплітудна модуляція шумового сигналу як генератора, так і досліджуваного підсилювача [1, 2].

Основні складові блоки системи, що вимірює шумові характеристики, зокрема коефіцієнт шуму, можуть бути виконані по-різному в залежності від діапазону довжин хвиль, характеристик досліджуваного пристрою, наявності НВЧ вузлів, тощо. Проте така система, як правило, містить генератор шуму.

Необхідні функціональні можливості та задана точність вимірювання можуть бути забезпечені за умови виконання певних вимог щодо елементів вимірювального тракту. Нормування параметрів даних елементів часто зводиться до виконання певних вимог.

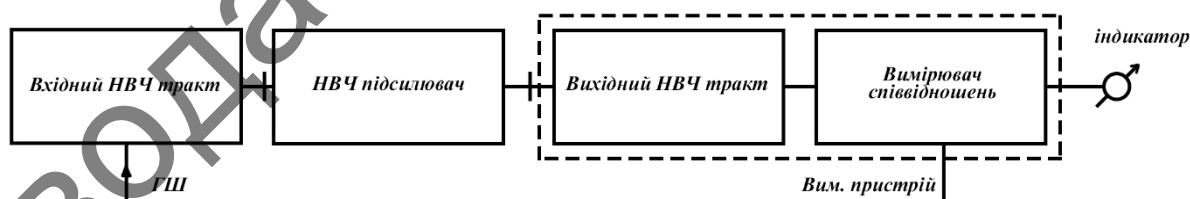


Рисунок 2.2 — Структурна схема пристрою для вимірювання коефіцієнту шуму в НВЧ діапазоні

На рисунку 2.3 для прикладу показано декілька варіантів побудови ГШ, кожен з яких може бути використаний в певних умовах.

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9



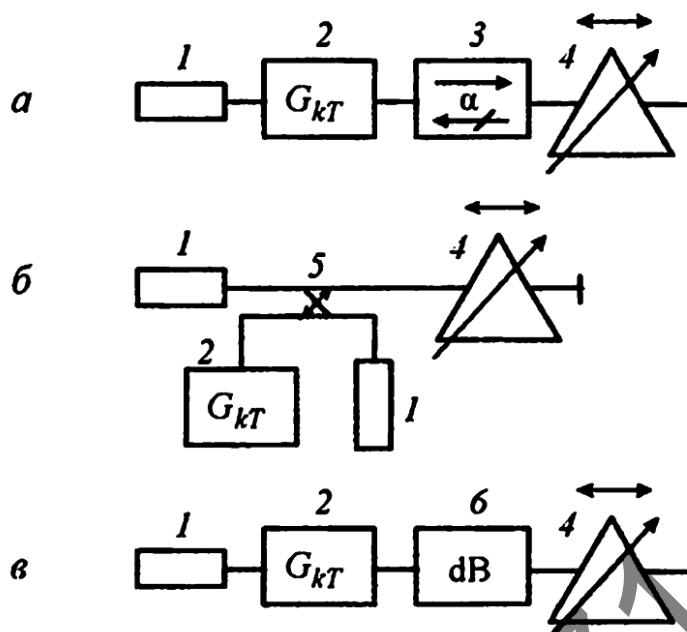


Рисунок 2.3 — Варіанти-побудови ГШ:

1 – узгоджене навантаження, 2 – газорозрядний генератор шуму, 3 – феритовий вентиль, 4 – трансформатор узгодження, 5 – напрямлений відгалужувач, 6 – атенюатор

Для структурної схеми рис. 2.3а вимоги до відбитого сигналу, який характеризується коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХН) узгодженого навантаження 1 невеликі, оскільки КСХН виходу генератора визначається, головним чином, відповідним параметром феритового вентилля 3. В той же час навантаження 1 в тракті на рис. 2.3б суттєво впливає на вихідний КСХН генератора шуму, реалізованого за такою схемою. Генератори шуму на рисунку 2.3б, в повинні бути більш потужними, в порівнянні з ГШ на рис. 2.3а при однакових вимогах до рівня сигналу на виході ГШ, оскільки мають вузли зміни потужності: спрямований відгалужувач 5 та атенюатор 6.

Для забезпечення вимірювання параметрів, похідних від коефіцієнту шуму, ГШ повинен мати відому відносну спектральну щільність потужності шуму (ВСЩПШ) та можливість регулювати вхідний імпеданс.

Також до важливих параметрів ГШ відносяться [1]:

– робочій діапазон частот;

- рівень надлишкової ВСЩПШ в вимкненому стані та похибку її вимірювання;
- рівень надлишкової ВСЩПШ в робочому стані та похибку її вимірювання;
- межі регулювання модулю і фази вихідного коефіцієнту відбиття при вимкненні;
- параметр нерівномірності частотної залежності ВСЩПШ ГШ  $\beta_{f(c)}$ .

У розглянутих генераторах використовується нагріте узгоджене навантаження як джерело електромагнітного шуму. Такі пристрої найчастіше використовуються у вимірювальній НВЧ апаратурі, оскільки вони мають більш рівномірну амплітудно-частотну характеристику, а їх СЩПШ легко визначається за формулою Найквіста (2.3). Проте керування вихідним сигналом потребує додаткових пристроїв, що може погіршити зазначені характеристики. Крім того, суттєвим недоліком таких генераторів є їх інерційність, що ускладнює їх використання як генераторів опорного сигналу в автоматизованих вимірювальних системах.

## 2.2 Використання генераторів шуму в засобах захисту інформації

У бездротових телекомунікаційних мережах використовують електромагнітні канали зв'язку різних діапазонів. Такі канали за своєю фізичною природою та експлуатаційними особливостями технічних засобів є досить небезпечними, що спричиняється наявністю у технічних засобах, які використовуються під час експлуатації, джерел завад та інших шкідливих сигналів. Насамперед до таких джерел відносять прилади, що перетворюють сигнали однієї фізичної природи в зміни сигналів іншої. Знання принципів такого перетворення дозволяє визначати можливі неконтрольовані прояви фізичних полів, що і створюють електромагнітні канали витоку інформації

Для захисту інформації під час її передачі та ліквідації зазначених каналів витоку часто використовують шумові генератори НВЧ діапазону.

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

При просторовому електромагнітному зашумленні потужність генератора у певній мірі залежить від типу об'єкту, розміру контрольованої зони (КЗ), а також заходів та засобів захисту інформації, що застосовуються. Розмір КЗ визначається розмірами приміщення [3].

Аналіз розмірів КЗ для невеликих приміщень та характеристик існуючих засобів перехоплення інформації показує, що для надійного захисту електромагнітного каналу см-діапазону достатньо зашумлення з рівнем інтегральної потужності 0,1-1 мкВт. Тому одним з ефективних засобів може бути генератор широкосмугового шуму вихідної потужності від 1мкВТ до декількох міліват.

Параметри типових генераторів шуму, що використовуються в засобах захисту інформації для зашумлення каналів зв'язку приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Генератори шуму для захисту каналів зв'язку

Назва	Параметри	Діапазон
		до 1 ГГц
ЛГШ-220	Живлення: 220/12 В Діапазон: 20 ... 1000 МГц Габарити: 220×155×70 мм	Рис.2.4
RNR-03	Живлення: 220 Діапазон: 10 кГц - 1 ГГц Габарити: 125 х 40 х 150 мм	Рис.2.5а Рис.2.5б
NGR-900	Живлення: 220 Діапазон: 0,15-1000 МГц Габарити: 175 х 80 х 210 мм	Рис 2.6
Генератор придушення радіопередавачів	Живлення: 220 Діапазон: 30 -1000 МГц Габарити: 2х2м	Рис 2.7
		до 2 ГГц
SEL SP-21 "Баррикада"	Живлення: 220 Діапазон: 0,1- 2000 МГц Габарити: 180х92х45 мм	Рис.2.8

Трьохканальний пристрій ЛГШ-220 (рис. 2.4) [9] призначений для маскування інформативних побічних електромагнітних випромінювань і наведень від персональних ЕОМ і периферійних пристроїв, а також іншої оргтехніки за

The diagram illustrates a three-channel receiver circuit, labeled КАНАЛ 1, КАНАЛ 2, and КАНАЛ 3. The main power supply section at the top includes two transformer units, TP2 and TP4, each with a primary winding connected to input A. TP2's secondary is connected to a bridge rectifier (VD1-4) and a filter network consisting of a resistor R1, a diode VD9, and capacitors C1 and C2. TP4's secondary is connected to a bridge rectifier (VD5-8) and a filter network with capacitor C3 and a diode DA1. The output of the power supply is connected to input B. The receiver consists of three channels. КАНАЛ 1 is the most detailed, showing a tuned circuit with transformer TP1, a variable capacitor C6, and a diode VD12. It includes a detector stage with a diode VD11 and a mixer/oscillator stage with a diode VD10. The output stage uses a transformer TP3 and a diode VD13. КАНАЛ 2 and КАНАЛ 3 are shown as simplified versions of the first channel, each with its own transformer and diode. The circuit is powered by a common power supply and includes various passive components like resistors (R1-R7) and capacitors (C1-C7) for tuning and filtering.

Проте серйозним недоліком його застосування є створення завад також і для широкого класу радіоелектронних пристроїв, розташованих в безпосередній близькості від передавача. Так, наприклад, включення генератора просторового зашумлення робить неможливим в приміщенні прийом телевізійних програм, порушує роботу мобільного зв'язку, тощо.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

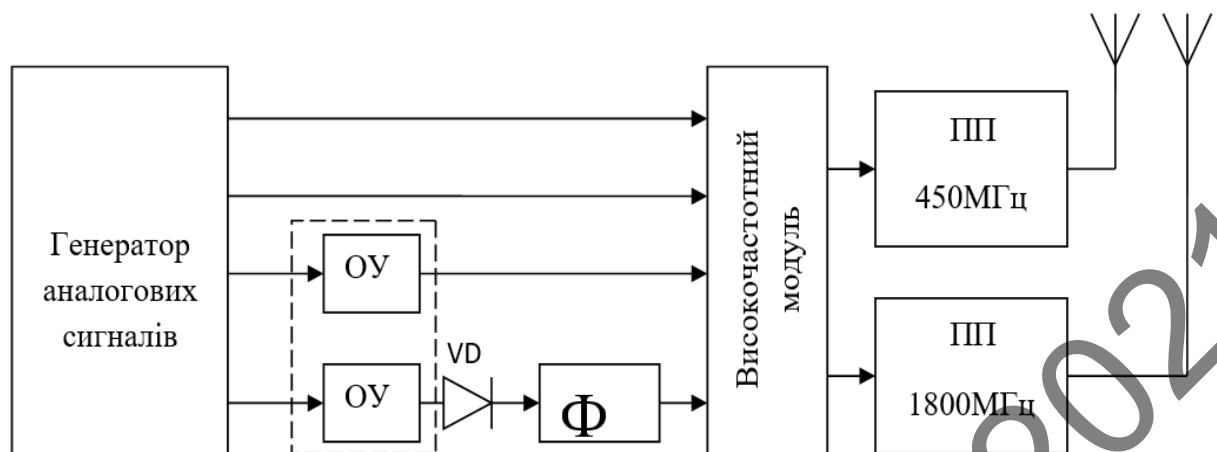


Рисунок 2.5 а — Схема електрична структурна ГШ для мереж зв'язку

Генератор аналогових сигналів (рис. 2.5б) створює цифрові сигнали вибору робочого діапазону високочастотного модуля. Одночасно з цифровими сигналами, генератор аналогових сигналів виробляє пилоподібний сигнал для лінійної перебудови несучої частоти високочастотним модулем і синусоїдальний сигнал, який після проходження через елемент з нелінійної вольт-амперної характеристикою стане шумоподібним. Діод VD має нелінійну вольт-амперну характеристику і служить для формування шумоподібного сигналу з синусоїдального. Фільтр Ф, служить для обмеження максимальної смуги зашумлення. Підсилювачі потужності забезпечують збільшення амплітуди вихідного сигналу-та узгодження виходу високочастотного модуля з активним зі входами антенних систем.

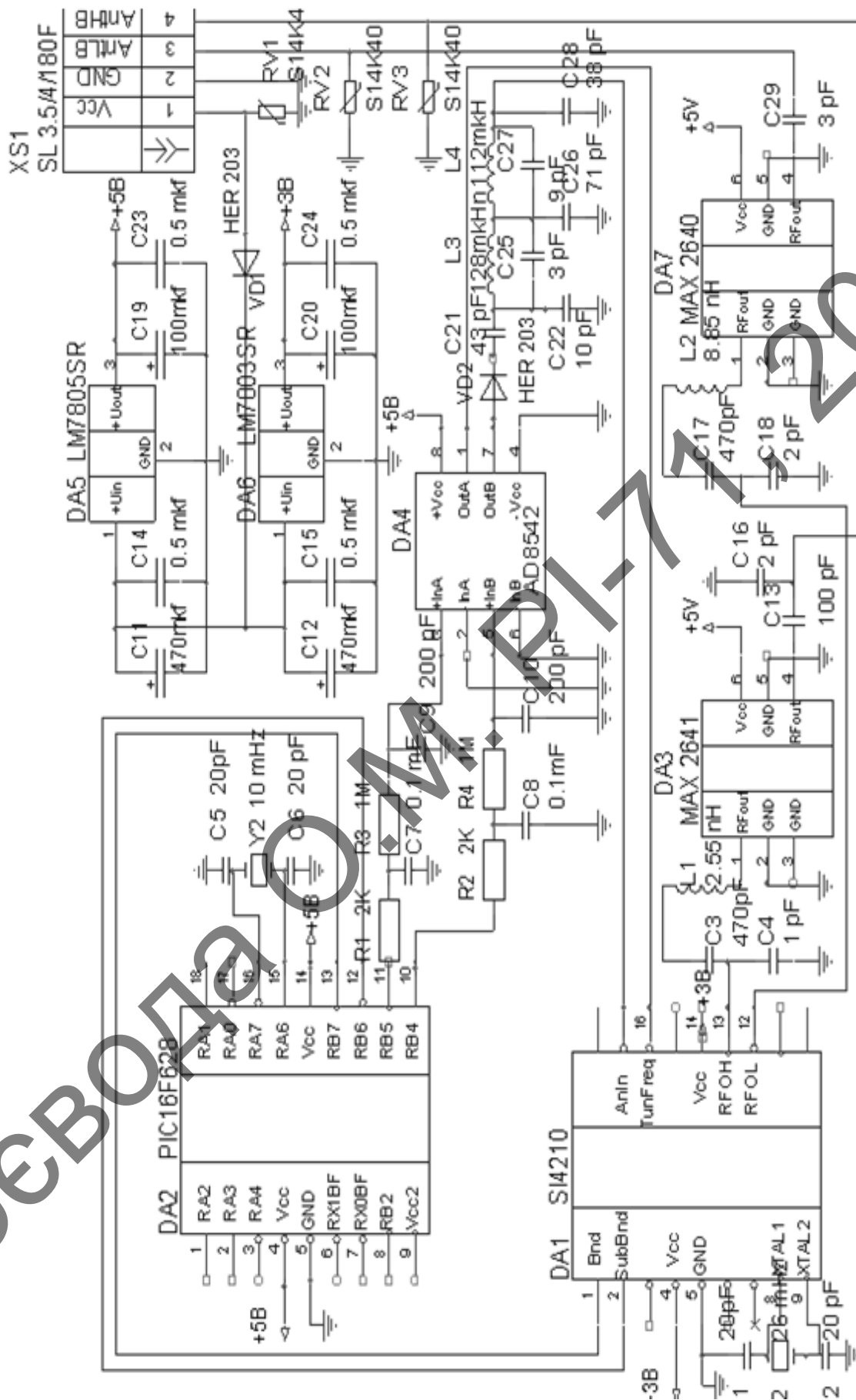


Рисунок 2.5 б — Повна схема електрична принципова генератора зашумлення мереж зв'язку

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.468171.001 ПЗ

Прилад призначений для блокування роботи телефонів, систем мобільного зв'язку в межах виділених приміщень для ведення переговорів, проведення нарад. Він запобігає витоку інформації за межі виділеного приміщення при використанні підслуховуючих пристроїв, які працюють із застосуванням терміналів мобільного зв'язку стандарту GSM.

Сигнал зашумлення генерується в діапазоні мобільного зв'язку, потужність випромінювання в інших діапазонах незначна. Потужність випромінювання невелика і не впливає на роботу інших технічних засобів (побутової електронної техніки, комп'ютерів, оргтехніки) та безпечна для здоров'я людини.

Зона ефективної дії пристрою залежить від відстані до найближчої базової станції мережі мобільного зв'язку і становить до 5 м.

Високочастотний широкосмуговий генератор шуму NGR-900 [11] використовується для захисту приміщень та об'єктів електронно-обчислювальної техніки від витоку конфіденційної інформації за рахунок побічного електромагнітного випромінювання комп'ютерів та іншої оргтехніки, ускладнює роботу мікрофонів і блокує роботу мікрофонів з дистанційним включенням.

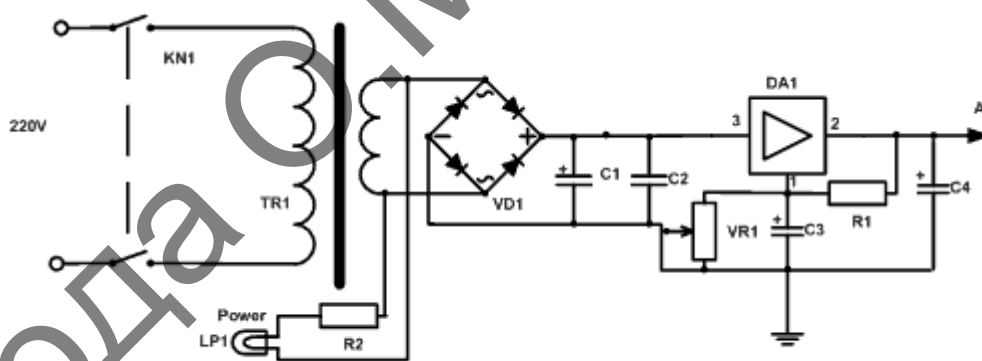


Рисунок 2.6 — Схема електрична принципова радіочастотного генератора шуму NGR-900

Схема приладу класична, а дане технічне рішення застосоване в інших генераторах зашумлення ("ГНОМ-3", "ГШК"). Слід відзначити деякі конструктивні особливості. У приладі застосований регульований блок живлення, що дозволяє змінювати живлення генератора від 1,5 V до 18 V при струмі до 2A,

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

що дозволяє оптимізувати рівень вихідної потужності. Регулювання режиму живлення проводиться із застосуванням індикатора поля (струм споживання не повинен перевищувати 2А). Для регулювання рівномірності спектру вихідного сигналу служать підстроювальні резистори VR2, VR3, а спектральна характеристика контролюється за допомогою аналізатора спектру. Крім того, необхідно застосовувати примусове повітряне охолодження та радіатор певного розміру. У даному випадку застосований типової 12V вентилятор від CPU, радіатор виконаний з листового алюмінію товщиною 3мм, розміром у всю площину приладу. Трансформатор живлення, транзистори, мікросхема DA1, друкована плата приладу розміщені на радіаторі.

Прилад [12] призначений для роботи в системі активного захисту інформації (рис. 2.7). У включеному стані він створює електромагнітні завади в ефірі з інтенсивністю, достатньої для маскування інформаційних електромагнітних сигналів, що випромінюються оргтехнікою, зокрема, комп'ютерами та периферійним обладнанням, а також забезпечує ефективне придушення випромінювання малопотужних передавачів діапазону 30 МГц – 1000 МГц.

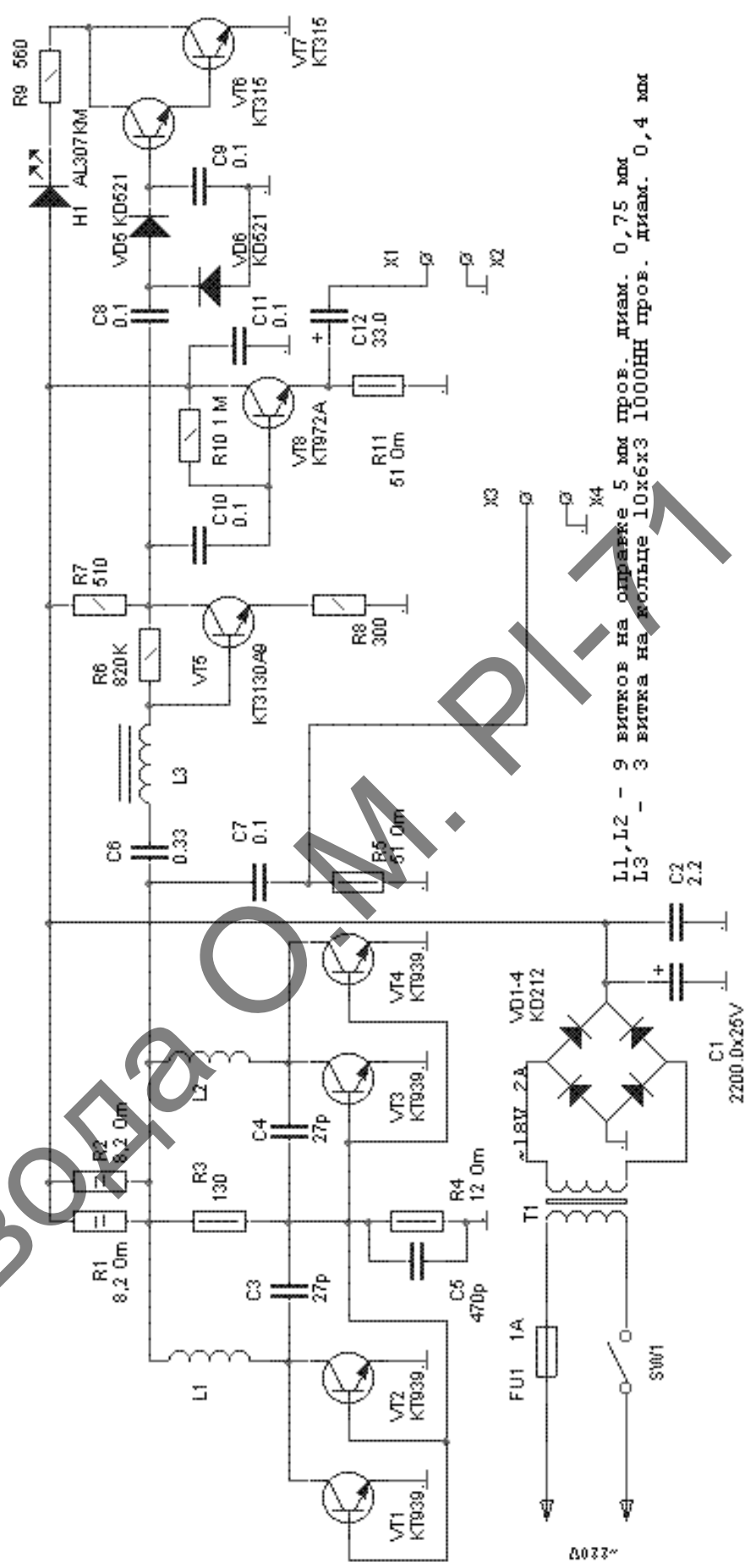
Крім того, прилад може застосовуватися для запобігання активації мікрофонів з дистанційним управлінням, за допомогою впливу на вхідний тракт приймача дистанційного керування. Недоліком даного приладу є те, що генератор шуму працює в досить важкому тепловому режимі.

Система просторового електромагнітного зашумлення SEL SP-21 "Баррикада" (рис.2.8) призначена для запобігання перехоплення інформативного побічного електромагнітного випромінювання та наведень при обробці інформації обмеженого користування в засобах обчислювальної техніки [13]. Пристрій генерує широкосмуговий шумовий електромагнітний сигнал і забезпечує маскування побічного електромагнітного випромінювання засобів офісної техніки, захист від підслуховуючих пристроїв, що передають інформацію через радіоканал. Рівень шумового сигналу дозволяє блокувати стільниковий зв'язок на відстані до 5 м.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



ВОВОДА ОМ. РІ. 1, 2021



L1, L2 - 9 витков на оправке 5 мм пров. диам. 0,75 мм  
L3 - 3 витка на фольге 10x6x3 1000НН пров. диам. 0,4 мм

Рисунок 2.7 — Генератор придушення радіопередавачів

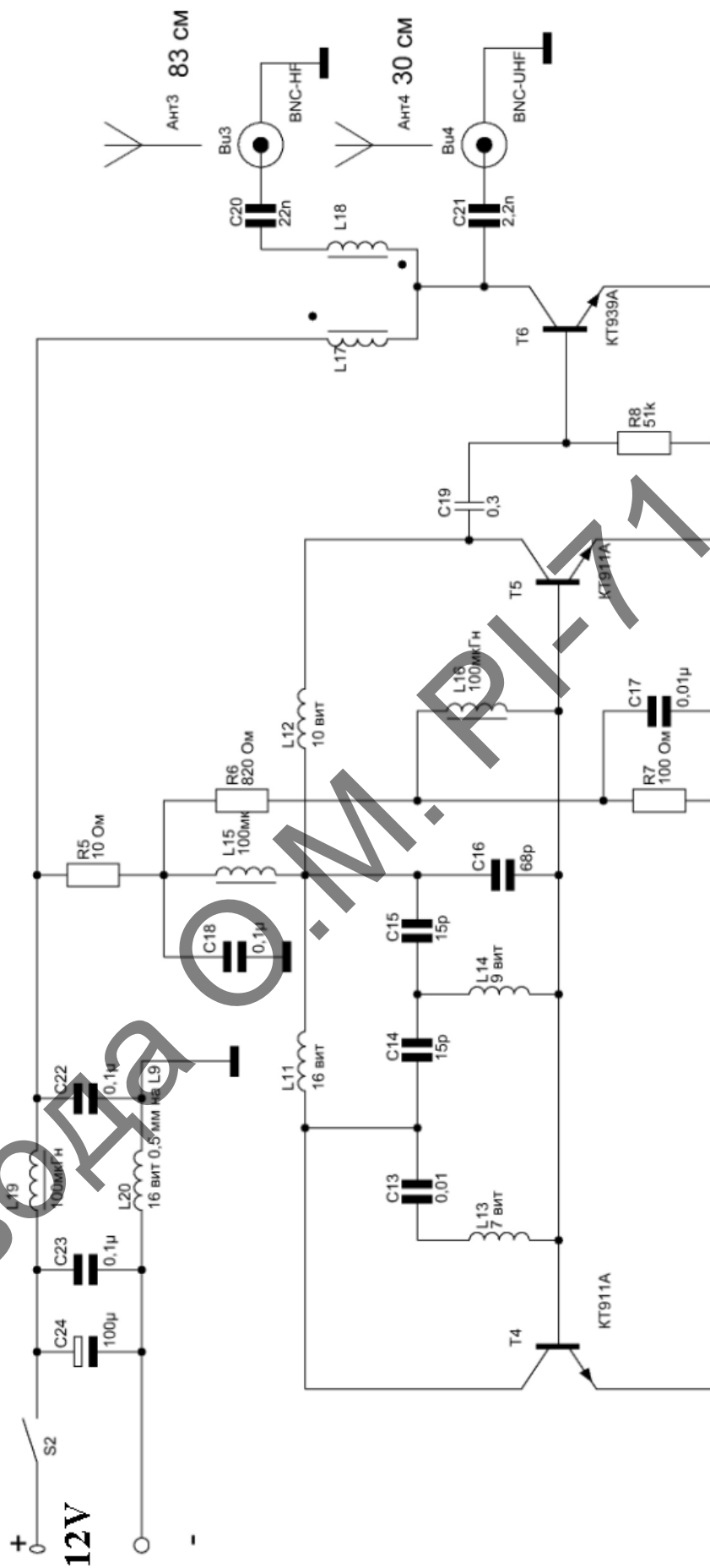


Рисунок 2.8 — Электрична принципова схема пристрою "SP-21B Баррикада"

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.468171.001 ПЗ

Арк.

19

Необхідно відмітити, що всі представлені генератори призначені для захисту електромагнітного каналу на відносно низьких частотах (не більше 1-2 ГГц). Проте, останніми роками проглядається тенденція до підвищенню частоти інформативних сигналів, що поширюються через електромагнітний канал. Найбільш перспективним стає надширокосмуговий зв'язок (НШЗ), який здатний забезпечувати високу швидкість передачі інформації за рахунок суттєвого збільшення відносної смуги робочих частот. Але НШЗ використовує діапазон від 3,1 до 10,6 ГГц [14].

Інформаційний сигнал, при такому зв'язку, як правило, є широкосмуговим. Ширина його смуги складає близько 160% від центральної частоти.

Особливості технології НШЗ визначають її практичне застосування, а саме:

- велика швидкість передачі інформації;
- висока перешкодозахищеність;
- висока степінь захищеності зв'язку від перехоплення;
- висока електромагнітна сумісність;
- можливість роботи з малою випромінювальною потужністю, забезпечуючи скритність передачі радіосигналів з низькою ймовірністю перехоплення інформації та мініатюаризація приладів і економне енергоспоживання;
- технічна простота та відносна дешевизна апаратурної реалізації.

Проте застосування НШЗ потребують додаткових заходів із захисту інформації, зокрема збільшення смуги робочих частот генераторів зашумлення. Враховуючи діапазон частот НШЗ і той факт, що витік інформації може бути на частотах аж до 3-й гармоніки, тому потрібно здійснити електромагнітне зашумлення в діапазоні 30-40 ГГц.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

### 2.3 Застосування ГШ в радіометричних системах міліметрового діапазону

Застосування радіометричних методів в різних галузях народного господарства [4, 8] потребує подальшого вдосконалення технічних засобів. Основним з них є радіометричні системи (РС) — високочутливі приймачі НВЧ діапазону, які дозволяють вимірювати низькоінтенсивне електромагнітне випромінювання із шумоподібним спектром. СЦПШ вимірюваних сигналів дорівнює  $10^{-21}$  Вт/Гц. Зокрема така чутливість РС відкрила широкі перспективи для біомедичних досліджень.

Разом з тим, недостатня автоматизація радіометричних систем не дозволяє цілком використовувати їх можливості та спростити вимірювальний процес. Одним з важливих вузлів автоматизованої РС [16] є генератор опорного сигналу, яким може бути, зокрема тепловий генератор шуму, побудований за однією зі схем (рис. 2.3), або генератор шуму, побудований на лавинно-пролітному діоді [17]. Останній потрібно додатково калібрувати за допомогою зразкового ГШ [16]. Застосування у складі автоматизованих радіометричних установок зразкових засобів вимірювання зменшує похибку, а також прискорює сам процес вимірювань.

На рис. 2.9 показана структурна схема автоматизованої РС, яка складається з трьох частин: надвисокочастотного блоку, блоку проміжної (200 МГц) та низької частоти і цифрового блоку індикації та контролю на базі персонального комп'ютера.

Високочастотна та низькочастотна частини установки виконані за схемою комутаційно-модуляційного радіометра [4]. З метою автоматизації вимірювань і покращення метрологічних характеристик, схема доповнена зразковим температурним генератором електромагнітного шуму з можливістю регулювання рівня вихідної потужності та цифровим блоком, який дозволяє автоматизувати процес вимірювання.

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

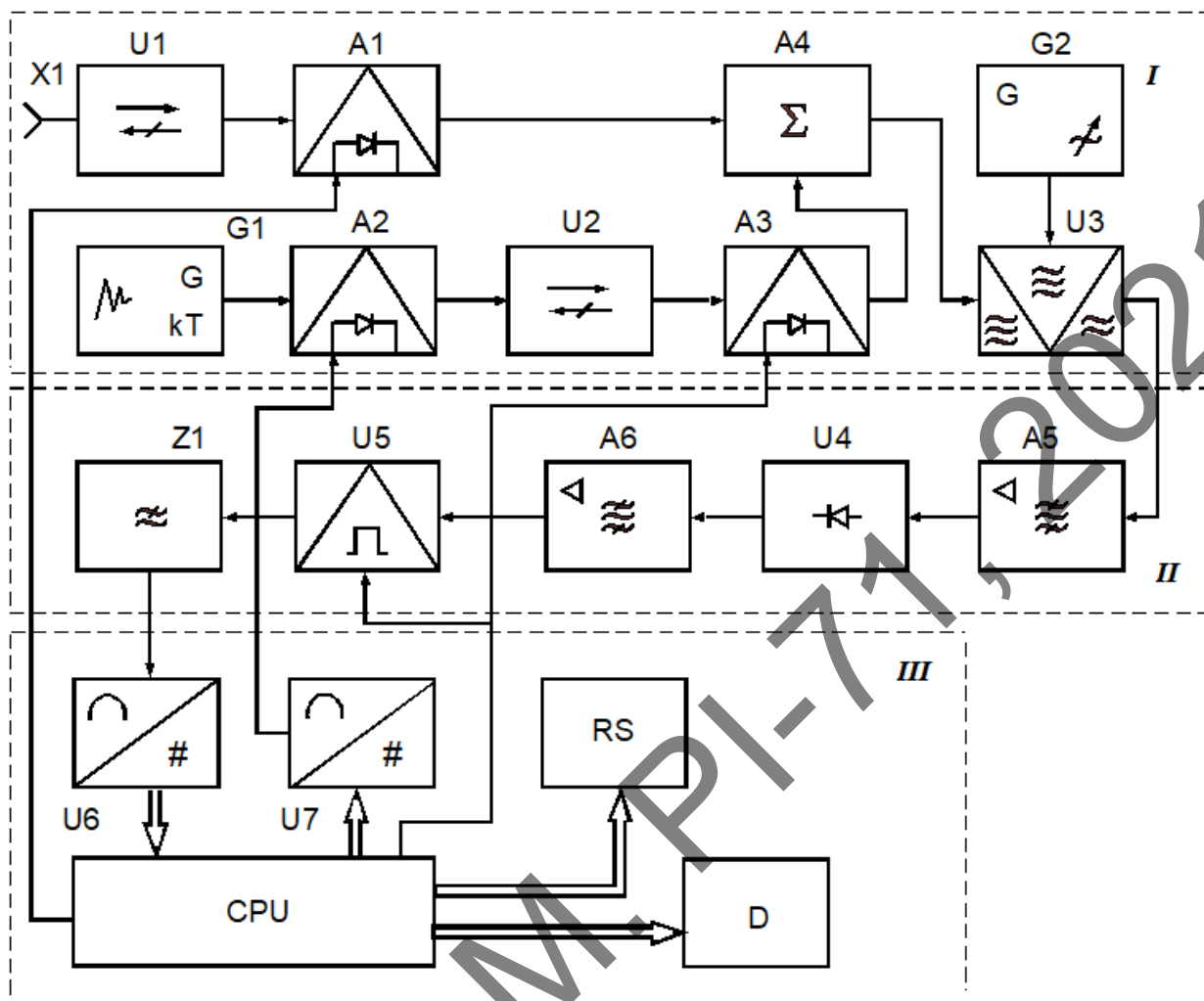


Рисунок 2.9 — Спрощена структурна схема установки:

I — НВЧ блок: X1 — приймаюча антена; A1, A3 — електрично керовані модулятори; A2 — електрично керований атенюатор; A4 — високочастотний суматор; U1, U2 — розв'язуючі вентилі; U3 — перетворювач частоти; G1 — опорний генератор шуму (зразковий); G2 — гетеродин (високочастотний генератор).

II — блок ПЧ та НЧ: A5 — підсилювач середньої частоти (ПСЧ); U4 — квадратичний детектор; A6 — підсилювач низької частоти (ПНЧ); U5 — синхронний детектор; Z1 — фільтр низьких частот (ФНЧ).

III — персональний комп'ютер (ПК): CPU — системний блок ПК; D — дисплей; U6 — АЦП; U7 — ЦАП; RS — пристрій для реєстрації.

Спеціально розроблений зразковий генератор шуму був атестований Інститутом Метрології (м. Харків). Похибка встановлення його вихідної потужності не перевищує 0,23% в діапазоні частот 37,5-78,33 ГГц. На виході генератора встановлено електрично керований атенюатор на *pin*-діоді, передаточна характеристика якого була виміряна за допомогою зразкових поляризаційних атенюаторів ДЗ-37 і ДЗ-38, та занесена в пам'ять комп'ютера.

В розглянутій радіометричній установці високочастотні блоки відповідають діапазонам частот 37,5 – 53,57 ГГц та 53,57 – 78,33 ГГц.

Принцип роботи представленої в [4] автоматизованої РС пояснюється таким чином. Вимірюваний шумовий сигнал з певною частотною залежністю СЩПШ приймається антеною Х1, і через вентиль U1 поступає на вхід електрично керованого модулятора А1 на *pin*-діоді. Частота модуляції задається програмно реалізованим генератором. В результаті до одного зі входів виходів НВЧ суматора А4 поступає вимірюваний шумоподібний сигнал низької потужності. До іншого входу того ж суматора приходять сигнал опорного генератора (ГШ) G1. Цей сигнал також проходить через електрично керований атенюатор А2, який за конструкцією та характеристиками схожий з атенюатором А1, а його коефіцієнт передачі регулюється комп'ютером П. Далі отриманий сигнал проходить через розв'язуючий вентиль U2, і модулятор А3, також аналогічний модулятору А1. Сигнал, що створюється на виході модулятора А1 змішується з сигналом гетеродина G2 в перетворювачі частоти U3. Вихідний сигнал U3 проміжної частоти підсилюється ППЧ А5 в певній смузі частот. При проходженні сигналу через підсилювач низької частоти стала складова подавляється, а змінні частоти підсилюються. На синхронному детекторі U5 відбувається демодуляція сигналу.

Остаточна обробка сигналу реалізується в апаратно-програмному комплексі на базі ПК. Така обробка практично не впливає на час вимірювання. Отже, представлена автоматизована РС, до складу якої входить ПК з відповідним програмним забезпеченням дозволяє спростити процес радіометричних

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

вимірювань. Для забезпечення більш точного вимірювання параметрів низькоінтенсивних сигналів мм-діапазону вона має містити в своїй конструкції зразковий температурний генератор електромагнітного шуму або відкалібрований за його допомогою ГШ на лавинно-пролітному діоді (ЛПД). Проте в обох випадках керування амплітудою вихідної потужності ГШ реалізується за допомогою атенюаторів на *pin*-діоді. Це, по-перше, зменшує точність вимірювань, а по-друге ускладнює схему кола керування. Найбільш доцільним у даному разі було реалізувати керування амплітудою вихідного сигналу ГШ на ЛПД через коло живлення.

У даному розділі проведено аналіз існуючих рішень щодо реалізації генераторів шуму надвисокочастотного діапазону, які можна використовувати і різних галузях, зокрема у вимірювальній техніці, захисті інформації, медицині, тощо. Особливо слід, відмітити автоматизацію вимірювань у міліметровому діапазоні та розробку генераторів опорного сигналу. Найчастіше в якості таких використовується узгоджене навантаження певної температури, оскільки такі пристрої мають більш рівномірну амплітудно-частотну характеристику, а їх СЦПШ легко визначається за формулою Найквіста. Проте керування вихідним сигналом потребує додаткових приладів. Крім того, суттєвим недоліком таких генераторів є їх інерційність. Генератори, що розроблені для засобів захисту інформації позбавлені цих недоліків, проте вони працюють в сантиметровому та дециметровому діапазонах.

Таким чином, тема дипломного проекту є актуальною, а його метою є розробка малогабаритного генератора шуму з високою швидкодією та можливістю керування потужністю вихідного сигналу.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

### 3 ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ

В цьому розділі розглядається проведено аналіз принципу роботи лавинно-пролітного діоду, та існуючих генераторів шуму, спроектованих на його основі. Відомо, що генератори гармонічних сигналів на ЛПД характеризуються достатньо великим рівнем шуму [17]. У той же час, за рахунок вибору режиму роботи діоду можна реалізувати генератор надвисокочастотного шуму, який має значно більшу потужність, ніж температурні генератори [1]. Причому інерційність ГШ на ЛПД буде значно меншою. В результаті проведеного аналізу запропоновано покращений варіант генератора шуму, принцип роботи якого пояснюється нижче за допомогою структурної схеми, а більш детальний аналіз — за допомогою електричної принципової схеми. Після чого приводяться результати роботи по проектуванню пристрою.

#### 3.1 Лавинно-пролітний діод та принцип його роботи

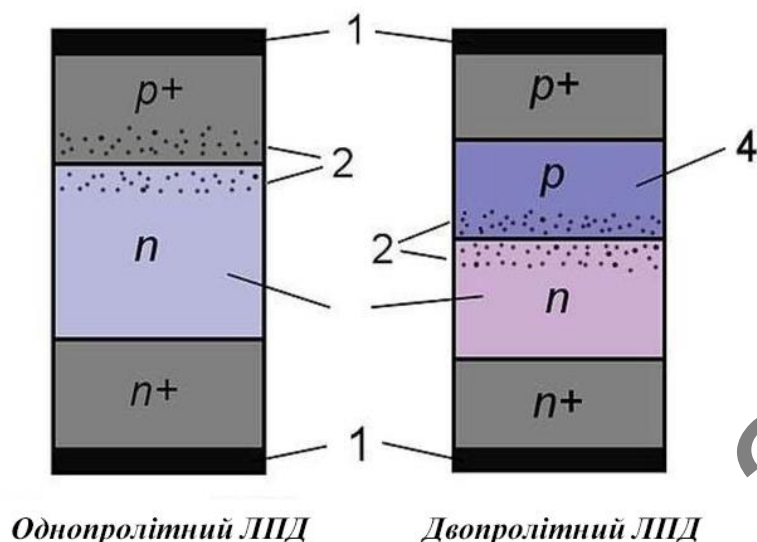
Перші лавинно-пролітні діоди (ЛПД) з'явилися на початку 60-х років минулого століття. За 60 років існування таких діодів було проведено ряд досліджень їх фізичних властивостей, в тому числі і шумових характеристик [18].

В основі роботи цих діодів закладено принцип лавинного пробію напівпровідникової структури. Цей принцип, разом з прольотними ефектами електронів та дірок є причиною генерації електромагнітного випромінювання в НВЧ та НЗВЧ діапазонах. Процес пробію має спонтанний характер, що в купі з різною в часі кількістю носіїв заряду, утворених в області перетину  $p-n$  переходу, призводить до генерації випадкових сигналів напруги на виході діоду.

Лавинно-пролітні діоди виготовляють на основі кремнію та арсеніду галію. Такі діоди можуть мати різні напівпровідникові структури:  $p^+-n-n^+$ ,  $p^+-n-i-n^+$ ,  $p-n-n^+$ ,  $n^+-n-p-p^+$  та інші [17, 18]. Розподіл концентрації домішок в переходах повинен бути максимально близьким до ступінчатого, а самі переходи — якомога більш плоскими. На рисунку 3.1 показана структура ЛПД.

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





1. Контактний шар  
 2. Область утворення лавини (p-n-переходів)  
 3. Область дрейфу електронів  
 4. Область дрейфу дірок

Рисунок 3.1 — Структура лавинно-пролітного діода

Для розрахунку максимального рівня потужності НВЧ генератора на ЛПД, необхідно отримати вираз для комплексного опору цього ЛПД. Це питання висвітлюється в працях [17, 18], в яких представлені моделі різних структур ЛПД. Проте лише для моделі Ріда, в якій лавинний пробій розглядається у вузькому шарі  $p-n$  переходу, а і область без домішок є пролітною для носіїв заряду, вдалось отримати аналітичний вираз. Імпеданс області лавини  $Z_a$  і кругова лавинна частота  $\Omega_a$ , від якої він залежить, визначаються за формулами

$$Z_a = \frac{1}{i\omega C_a [1 - (\Omega_a/\omega)^2]}, \text{ та } \Omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_a C_a}} = \sqrt{2 \frac{d\bar{\alpha}}{dE_p} \cdot \frac{j_0 v_s}{\varepsilon \varepsilon_0}}, \quad (3.1)$$

де  $L_a$  – еквівалентна індуктивність шару лавинного пробою;

$C_a$  – ємність шару лавинного пробою;

$\omega$  – кругова робоча частота;

$\bar{\alpha}$  – середній еквівалентний коефіцієнт іонізації;

$j_0$  – густина середнього струму живлення діода;

$v_s$  – швидкість насичення (для кремнію  $v_s \approx 10^5$  м/с);

$E_p$  – максимальна напруженість електричного поля у стані пробою;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність напівпровідника;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

В області дрейфу з товщиною  $w$  електрони мають постійну швидкість  $v_s$ .  
У лінійному наближенні комплексний опір простору дрейфу має вигляд:

$$Z_w = \frac{1}{\omega C_w} \left[ \frac{1}{1 - (\omega/\Omega_a)^2} \cdot \frac{1 - \cos \vartheta_w}{\vartheta_w} \right] + \frac{i}{\omega C_w} \left[ \frac{1}{1 - (\omega/\Omega_a)^2} \cdot \frac{\sin \vartheta_w}{\vartheta_w} \right], \quad (3.2)$$

де  $C_w$  – ємність області дрейфу;

$\vartheta = \omega w / 2v_s$  – кут прольоту носіїв заряду.

Імпеданс області дрейфу має дві складові: активну  $R_w$  та реактивну  $X_w$ . Активна складова  $R_w$  задається частотою лавинного резонансу  $\Omega_a$  та кутом прольоту в просторі дрейфу  $\vartheta$ , і може бути додатною та від'ємною. Межа існування від'ємного опору пропорційна  $\sqrt{j_0}$ . З цього випливає, що при переході з одного частотного діапазону в інший, густина струму змінюється як  $f$ , а розміри кристалу ЛПД-структури – як  $1/f$  [18].

За допомогою формул (3.1) та (3.2) можна досить точно вирахувати частотну залежність імпедансу діода за довідниковими даними, наприклад, наведеними в [18, 19]. Загальний її вид, а також його еквівалентна схема наведені на рис. 3.2, 3.3. Літерами  $R$  та  $X$  позначені відповідно сумарні активна та реактивна складові імпедансу ЛПД, а  $R_0$  – диференціальний опір напівпровідникової структури (чипа), який визначається за формулою

$$R_0 = l^2 / 2\pi \varepsilon \varepsilon_0 S v_s, \quad (3.3)$$

де  $l$  – товщина кристалу ЛПД-структури;

$S$  – його площа;

$R_l$  – сума опорів контактів ЛПД-структури та опору розтікання її підкладинки.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На графіку (рис. 3.2) видно, що для значення  $\Omega_a$  активна та реактивна складові комплексного опору мають нескінченні значення та змінюють знак.

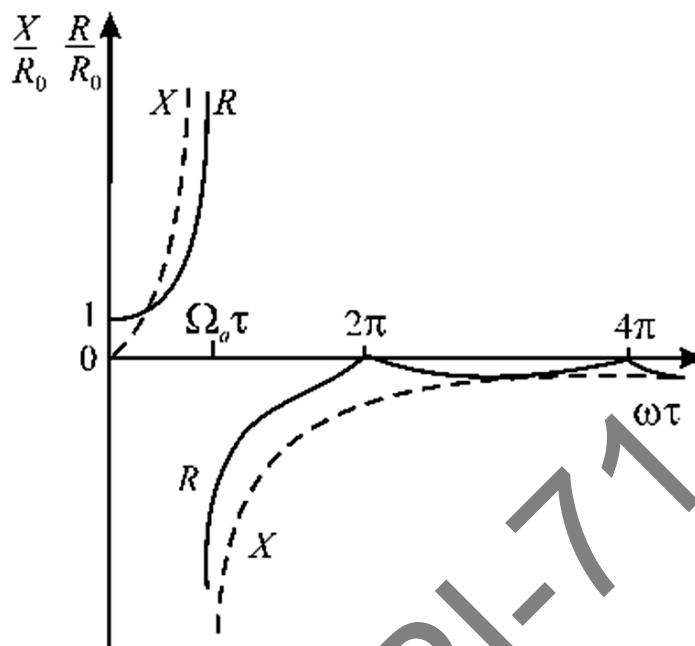


Рисунок 3.21 — Частотна залежність імпедансу ЛПД

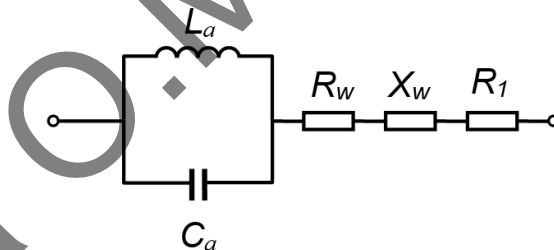


Рисунок 3.3 — Еквівалентна схема ЛПД

Генератори шуму на ЛПД можна реалізовувати на частотах як менших, так і більших за  $\Omega_a$ . У першому випадку діод має позитивну складову імпедансу, його робота є більш стійкою, смуга робочих частот достатньо широка, а амплітудно-частотна характеристика більш рівномірна у порівнянні з ГШ для яких робочі частоти перевищують  $\Omega_a$ . Проте у другому випадку ГШ мають більшу вихідну потужність (в 1000 і більше разів) [17, 18]. Для хвильоводного

варіанту виконання смуга робочих частот ГШ (якщо робочі частоти значно менші, ніж  $\Omega$ ) складає 30-40%. Проте нерівномірність АЧХ на рівні 3дБ не вдається гарантовано реалізувати по всьому діапазону через значну залежність імпедансу від частоти (рис. 3.2) [1].

Головними перевагами ГШ на ЛПД у порівнянні з температурними та газорозрядними ГШ мають більший динамічний діапазон, менші габаритні розміри та швидкість реакції на керування [1].

### 3.2 Аналіз існуючих генераторів шуму на ЛПД

Типові схеми генераторів шуму на ЛПД та їх блоків живлення представлені, наприклад, в працях [20-23].

Генератору шуму на ЛПД, схему якого зображено на рис. 3.4 [20] складається з ЛПД (VD6), резистора, конденсатора та рупорної антени (або відрізка прямокутного хвильоводу). При значенні напруги 30-35 В блоку живлення (рис. 3.5) робочий струм ЛПД стабільний, та лежить в діапазоні 50-70 мА. Вихідна потужність ГШ залежить від струму живлення та регулюється резистором R1 (рис. 3.5).

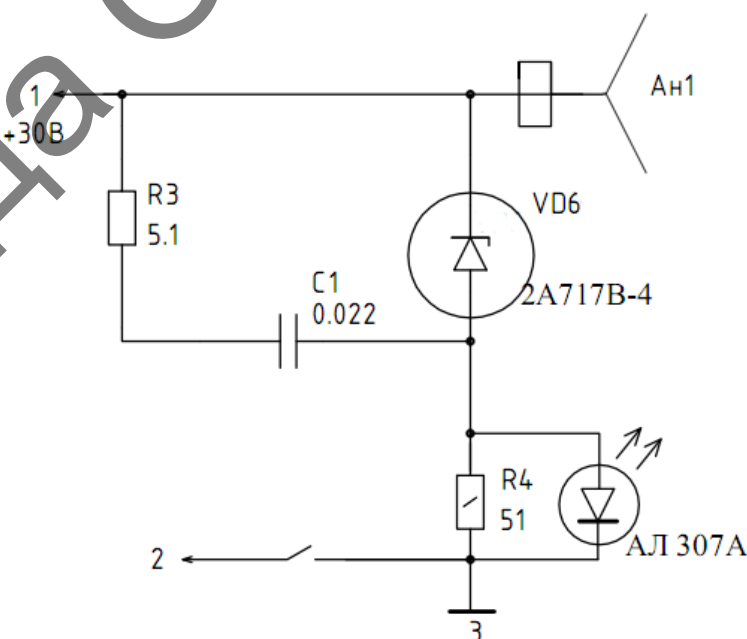


Рисунок 3.4 — Електрична схема генератора шуму на ЛПД

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Представлений на рис. 3.5 простіший блок живлення складається з трансформатора T1, який перетворює напругу, випрямляча напруги (діодний міст VD1...VD4 і конденсатор C1), та стабілізатора струму (транзистор VT1, стабілітрон VD5, резистори R1, R2).

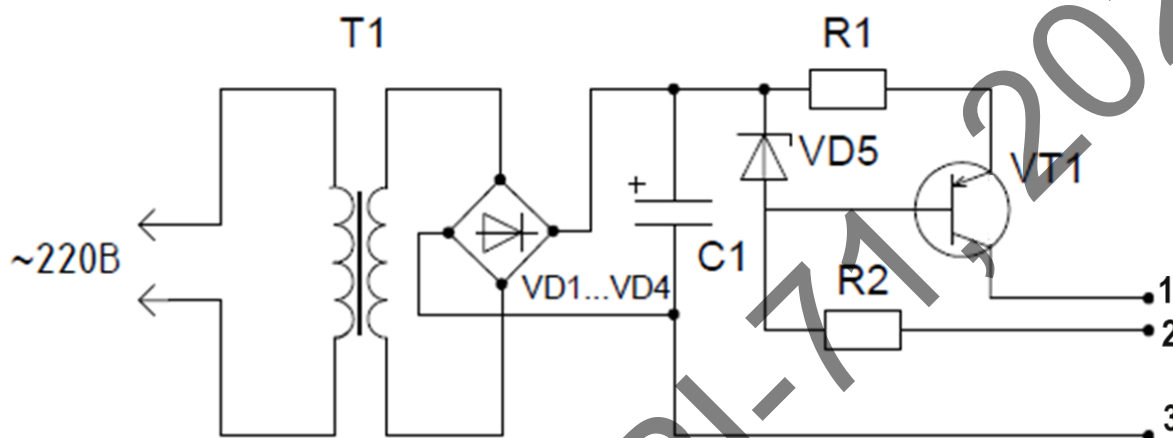


Рисунок 3.5 — Електрична схема блоку живлення ГШ на ЛПД

На вхід трансформатора надходить змінна напруга 220В, яка перетворюється в змінну напругу 25 В на виводах вторинної обмотки. За допомогою діодного моста змінна напруга випрямляється в постійну, а пульсації згладжуються конденсатором C1, який виконує роль фільтра нижніх частот.

Через вивід 1 на ЛПД генератора подається стабілізований струм живлення, а через вивід 2 здійснюється умикання ГШ.

В міліметровому діапазоні генератори на ЛПД мають хвилевідну конструкцію, яка містить відрізок прямокутного хвилеводу (генераторну камеру) та зв'язаний з нею резонатор. На відміну від монохроматичних генераторів на ЛПД, які мають резонатор з великою добротністю ( $10^3$ - $10^4$ ), в шумових добротність резонатора потрібно якомога зменшити. Для цього його разом з елементом зв'язку замінюють на узгоджене навантаження. Таким чином, конструкція ГШ виглядає так, як показано на рис. 3.6 [20, 23]. У такій конструкції відрізок хвилеводу прямокутної форми (1) стандартного перетину виступає в ролі

корпусу для джерела шумового сигналу. Для узгодження зі стандартним хвильоводом використовують чебишевський перехід (2). Діод (4) розташований в середині корпусу, і кріпиться за допомогою утримувача (3), який одночасно є виводом живлення ЛПД. Клин з поглинаючого матеріалу (5) відіграє роль узгодженого навантаження, і забезпечує стабільну роботу пристрою.

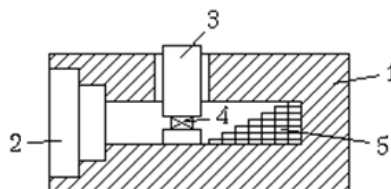


Рисунок 3.6 — Ескіз конструкції генератора шуму на ЛПД

З урахуванням еквівалентної схеми ЛПД та чисельних значень комплексного опору діода [23], можна визначити добротність хвильоводної камери  $Q$  через коефіцієнт стоячої хвилі  $(КСХН_G)$  вихода генератора з формулою [20]

$$Q = P_0 / (P_0 - P_1) = |КСХН_G + 1|^2 / |КСХН_G - 1|^2, \quad (3.4)$$

де  $P_0$  і  $P_1$  – потужності падаючого та відбитого генератором випромінювання.

Тоді смугу робочих частот ГШ на ЛПД можна оцінити за формулою

$$(\Delta f / f) = \frac{1}{Q} = \frac{\pi}{\ln [(КСХН)_G + 1] / [(КСХН)_G - 1]}. \quad (3.5)$$

Розрахунки за формулою (3.5) показують, смуга робочих частот ГШ буде дорівнювати смузі частот стандартного прямокутного хвильоводу (приблизно 40%), якщо КСХН генератора не перевищує 3.

### 3.3 Обґрунтування структурної схеми ГШ

На рисунку 3.7 зображена структурна схема генератора шуму.



Рисунок 3.7 — Структурна схема ГШЛПД

Структурна схема генератора шуму складається з чотирьох частин: джерела постійної напруги (1), кола керування (2), стабілізатора струму (3), та генераторної голівки СВЧ (4).

Електромагнітний шум генерує лавинно-пролітний діод, який знаходиться в генераторній голівці (4). Для його роботи на генераторну голівку необхідно подавати струм величиною 50...60 мА. Це забезпечується джерелом струму, яке складається із джерела постійного струму (1) та стабілізатора струму (3). Джерело постійної напруги складається з трансформатора, діодного моста і стабілізатора напруги. На вхід (1) подається змінна напруга з мережі живлення, на виході отримуємо постійну напругу величиною 30...35 В. Ця напруга подається на вхід (2), де стабілізується за допомогою стабілітрона. На виході (2) отримуємо струм 50...60 мА та напругу 20...25 В. Саме такі значення і необхідні для роботи ЛПД. Коло керування забезпечує гальванічну розв'язку з джерелом керуючого сигналу, в ролі якого може виступати генератор або комп'ютер. Гальванічна розв'язка забезпечується оптопарою. Сигнал в колі керування (2) відкриває транзистор в блоці живлення, що забезпечує живлення ЛПД. Шум, згенерований ЛПД, потрапляє у хвилеводний вихід.

### 3.4 Обґрунтування схеми електричної принципової

Моделювання схеми електричної принципової здійснювалося в середовищі Altium Designer. Для моделювання використовувалася бібліотека радіоелементів, створена відповідно до ГОСТ 2.721-74. Схема електрична принципова зображена на рисунку 3.8.

З мережі живлення XS1 на трансформатор T1 надходить змінна напруга 220 В, яка перетворюється в змінні 35 В на вторинній обмотці трансформатора. Ці 35 В подаються на вхід випрямляча напруги, який складається з діодного міста VD1 та конденсатора C1, де випрямляються в постійну напругу. Вихід випрямляча під'єднано до стабілізатора напруги, який побудовано на мікросхемі DD1 за рекомендованою схемою включення, яка складається з резисторів R3 R5, конденсатора C2 та діода VD2[25]. Після цього стабілізована напруга потрапляє на вхід стабілізатору струму, який складається з стабілітрона VD2, резисторів R7 R8 та транзистора VT2, який керується імпульсами з кола керування.

Оптопара VU1 відповідає за гальванічну розв'язку джерела сигналу XS2 та кола керування генератора. Сигнал на вихід оптопари надходить на базу транзистора VT1. При наявності позитивного імпульсу транзистор відкривається, і замикає коло. В результаті цього на ЛПД VD4 подається стабілізований струм, відбувається лавинний пробій в напівпровідниковій структурі ЛПД, і генератор починає роботу. Обґрунтування вибору ЛПД знаходиться в розділі 4. За відсутності керуючого імпульсу коло розмикається, і ЛПД перестає генерувати шум.

Діод HL1, підключений через резистор R10, відповідає за індикацію роботи генератора. Перемикач SA1 замикає та розмикає коло живлення ЛПД, тим самим дає можливість механічно контролювати роботу генератора. Перемикач SA1 дозволяє механічно контролювати роботу пристрою.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33



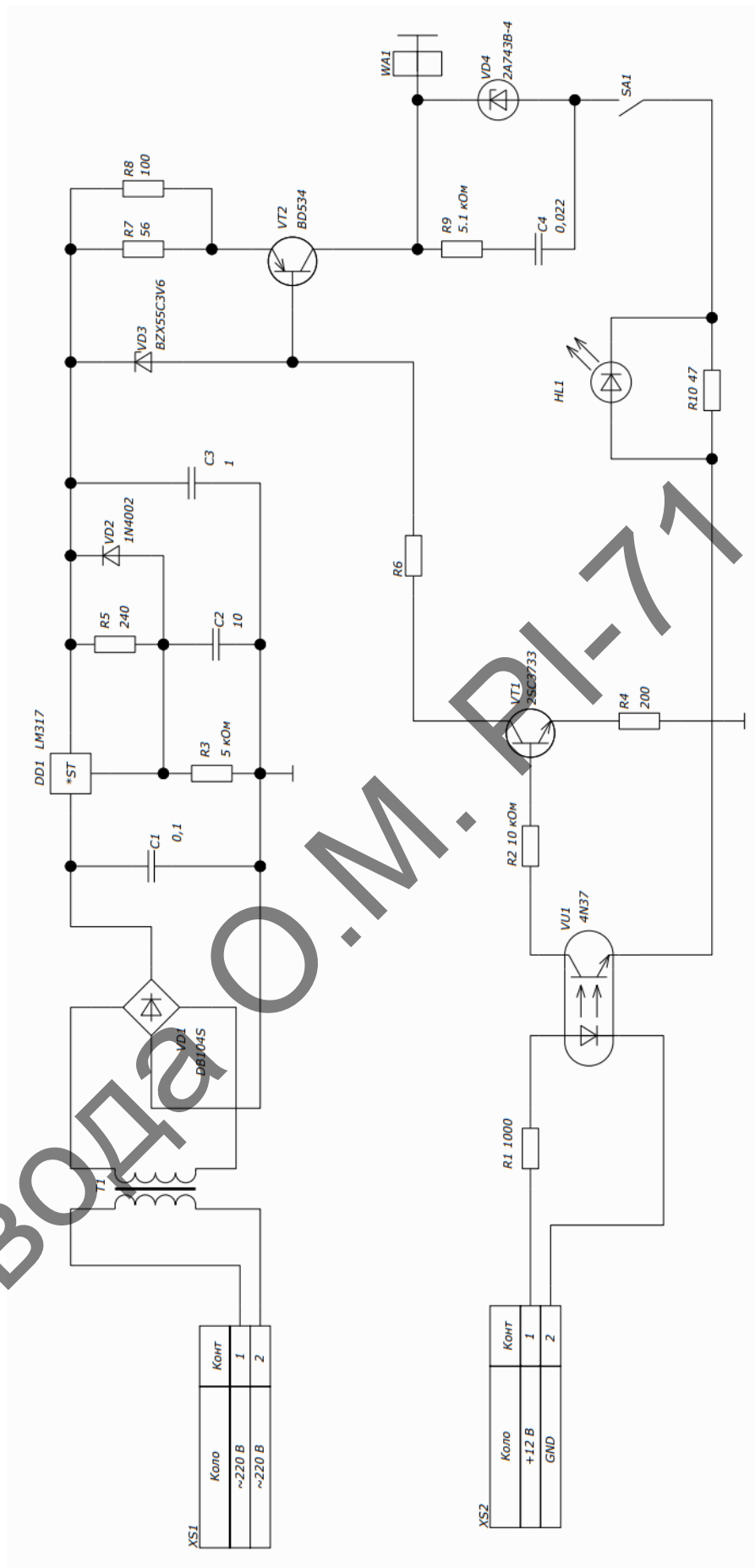


Рисунок 3.8 — Схема електрична принципова

## 4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

Цей розділ буде присвячено вибору радіо елементів з урахуванням схеми електричної принципової. Обрані елементи мають забезпечувати необхідні електричні параметри, бути придатні до ремонту або заміни, та доступні для покупки. Правильно обрана елементна база дозволить оптимізувати масу та габарити пристрою, і вплине на технологію виготовлення друкованої плати.

### 4.1 Вибір ЛПД

Лавинно-пролітні діоди серії 2A743(A-E)-4 призначені для застосування в генераторах шуму міліметрового діапазону довжини хвилі. Ці діоди випускаються в безкорпусному виконанні на тримачах з жорсткими виводами, як це показано на рисунку 4.1.

З лінійки представлених ЛПД за електричними характеристиками[19] підходять моделі В та Е. Обрано модель 2A743В-4.

Має такі параметри:

- потужність 0,1...1 нВт;
- робочій діапазон частот 62,0...66,0 ГГц;
- пробивна напруга 13...20 Вт;
- ККД 4,2%;
- постійна робоча напруга 18...25 В;
- ємність діода 0,6 пФ;
- ємність тримачів 0,42 пФ;
- індуктивність діоду 0,12 нГн

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

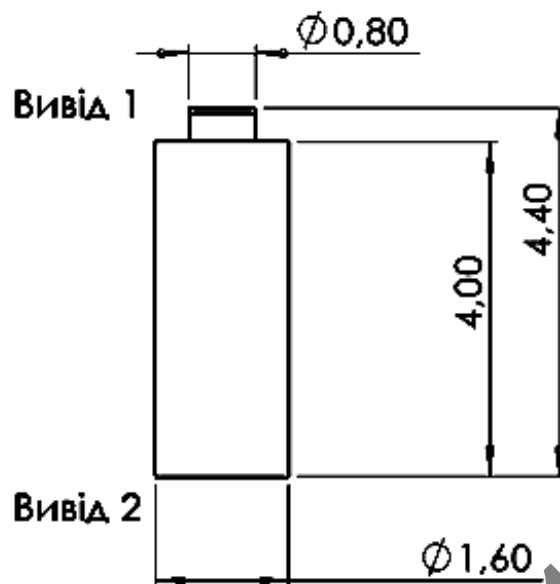


Рисунок 4.2 — Розміри ЛПД серії 2A743(A-E)-4

#### 4.2 Вибір стабілізатору напруги

Для стабілізації напруги було обрано інтегральний лінійний стабілізатор напруги LM317[25]. Він добре підходить для проектування нескладних блоків живлення. Стабілізатор випускається в корпусах TO-220, ISOWATT220, TO-3 а також D<sup>2</sup>PAK. Для можливості SMD монтажу було обрано корпус D<sup>2</sup>PAK, зовнішній вигляд стабілізатора показано на рисунку 4.2. Стабілізатор має такі параметри:

- вихідна напруга від 1,2 до 37 В;
- струм навантаження до 1,5 А;
- наявність захисту від короткого замикання;
- надійний захист мікросхеми від перегріву;
- похибка вихідної напруги 0,1%.

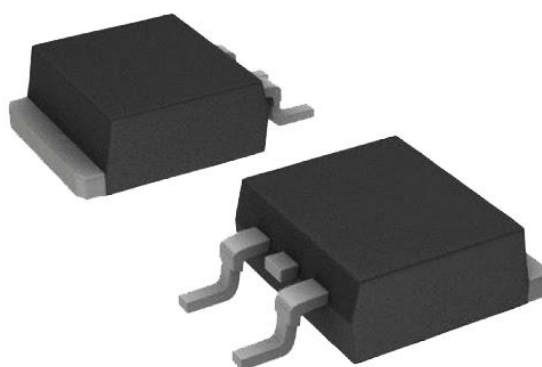


Рисунок 4.2 — Зовнішній вигляд стабілізатору напруги LM317

#### 4.3 Вибір оптопар

Обрано оптопару 4N37. Вона складається з випромінюючого діода та фототранзистору. Представлена оптопара випускається в корпусі DIP-6 та має такі параметри[26]:

- напруга ізоляції 5000 В;
- коефіцієнт передачі за струмом 100 %;
- час ввімкнення та вимкнення 10 мкс;
- тип входу DC;
- напруга виходу 30 В;
- вихідний струм 50 мА;
- робоча температура -55...+100 °C;

На рисунку 4.3 показано зовнішній вигляд оптопар 4N37;

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37



Рисунок 4.3 — Зовнішній вигляд 4N37

#### 4.4 Вибір транзисторів

Було обрано p-n-p транзистор 2SC3733 в корпусі SOT-23-3[27] , та p-n-p транзистор BD534 в корпусі TO-220-3[28]. На рисунку 4.4 а та 4.4 б показано зовнішній вигляд транзисторів. Транзистор 2SC3733 має такі параметри:

- тип матеріалу — кремній;
- структура — p-n-p;
- максимальна потужність 1 Вт;
- максимальна напруга колектор-база 80 В;
- максимальний постійний струм колектора 1 А;
- гранична температура p-n переходу 150 °С;
- статичний коефіцієнт передачі струму 55;

Параметри транзистора BD534 такі:

- тип матеріалу — кремній;
- структура — p-n-p;
- максимальна потужність 40 Вт;
- максимальна напруга колектор-база 45 В;
- максимальна напруга колектор-емітер 45 В;
- максимальна напруга база-емітер 5 В;
- максимальний постійний струм колектора 4 А;

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- гранична температура р-п переходу 150 °С;
- статичний коефіцієнт передачі струму 40;

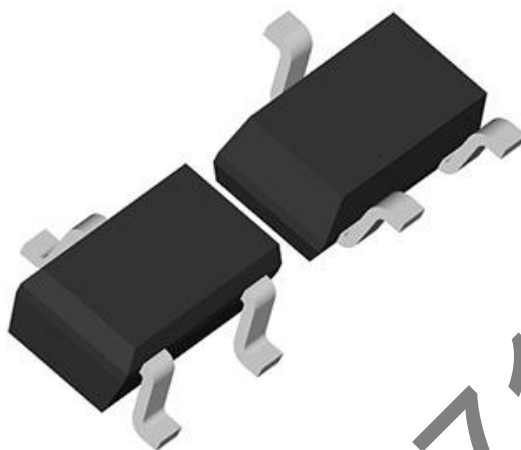


Рисунок 4.4 а — Зовнішній вигляд транзистору 2SC3733

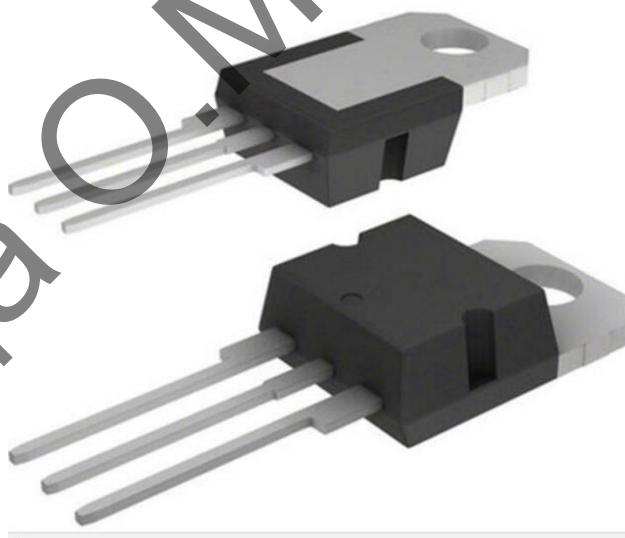


Рисунок 4.4 б — Зовнішній вигляд BD534

#### 4.5 Вибір діоду, стабілітрону та діодного мосту

В якості діодного мосту було обрано DB104S в корпусі DBS (DB-1S, SO-DIL)[29], в якості стабілітрону — BZX55C3V6 в корпусі DO35[90], в якості діоду — 1N4002 в корпусі DO-41[31]. Зовнішній вигляд обраних елементів показано на рисунках 4.5 а, 4.5 б, 4.5 в.

Міст DB104S має такі параметри:

- максимальна зворотня напруга 400 В;
- максимальний прямий струм 1 А;

Стабілітрон BZX55C3V6 має такі параметри:

- потужність 0,5 Вт;
- напруга стабілізації 3,6 В;

Діод 1N4002 має такі параметри:

- максимальна постійна зворотня напруга 100 В;
- максимальний прямий струм 1 А;
- робоча температура р-п переходу -65...+175 °С;



Рисунок 4.5 а — Зовнішній вигляд DB104S

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



Рисунок 4.5 б — Зовнішній вигляд BZX55C3V6



Рисунок 4.5 б — Зовнішній вигляд 1N4002

#### 4.6 Вибір резисторів та конденсаторів

Для забезпечення малих габаритів плати та можливості SMD монтажу було обрано резистори та конденсатори в корпусі 0805. На рисунку 4.6 а показано зовнішній вигляд резистора в обраному корпусі, на рисунку 4.6 б — конденсатора.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Рисунок 4.6 а — Зовнішній вигляд резистора в корпусі 0805



Рисунок 4.2 б — Зовнішній вигляд конденсатора в корпусі 0805

#### 4.7 Розрахунок трансформатора

Знаючи необхідну напругу на вторинній обмотці ( $U_2$ ) і максимальний струм навантаження ( $I_n$ ), трансформатор розраховуємо в такій послідовності [32]:

Розрахунок струму на вторинній обмотці трансформатора:

$$I_2 = 1,5 \cdot I_n, \quad (4.1)$$

де:  $I_2$  - струм через обмотку II трансформатора, А;

$I_n$  - максимальний струм навантаження, А.

$$I_2 = 1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 0,100 = 0,15 \text{ А} = 15 \text{ мА}. \quad (4.2)$$

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Отже, струм, що проходить через вторинну обмотку трансформатора становить 15мА.

Розрахунок потужності, що споживає випрямляч від вторинної обмотки трансформатора:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2, \quad (4.3)$$

де  $P_2$  максимальна потужність, споживана від вторинної обмотки, Вт;

$U_2$  - напруга на вторинній обмотці, В;

$I_2$  - максимальний струм через вторинну обмотку трансформатора, А.

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 40 \cdot 0,150 = 6 \text{ Вт} . \quad (4.4)$$

Розрахунок потужності трансформатора:

$$P_{\text{тр}} = 1,25 \cdot P_2, \quad (4.5)$$

де  $P_{\text{тр}}$  - потужність трансформатора, Вт;

$P_2$  - максимальна потужність, споживана від вторинної обмотки трансформатора, Вт.

$$P_{\text{тр}} = 1,25 \cdot P_2 = 1,25 \cdot 6 = 7,5 \text{ Вт} . \quad (4.6)$$

Розрахунок струму первинної обмотки

$$I_1 = \frac{P_{\text{тр}}}{U_1}, \quad (4.7)$$

де  $I_1$  - струм через обмотку I, А;

$P_{\text{тр}}$  - підрахована потужність трансформатора, Вт;

$U_1$  - напруга на первинній обмотці трансформатора (мережева напруга).

$$I_1 = \frac{P_{\text{тр}}}{U_1} = \frac{7,5}{220} = 34 \text{ мА} . \quad (4.8)$$

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потужність, споживана випрямлячем від первинної обмотки трансформатора:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1, \quad (4.9)$$

де  $P_1$  - максимальна потужність, споживана на первинній обмотці, Вт;

$U_1$  - напруга на первинній обмотці, В;

$I_1$  - максимальний струм через первинну обмотку трансформатора, А.

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 220 \cdot 0,034 = 7,5 \text{ Вт}. \quad (4.10)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається відношенням потужності  $P_2$ , що віддається трансформатором в навантаження, до потужності  $P_1$ , що споживається з мережі

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.11)$$

де  $P_2$  - потужність, що віддається трансформатором в навантаження;

$P_1$  - потужності, що споживається з мережі.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{6}{7,5} = 0,8. \quad (4.12)$$

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Цей розділ буде присвячено розрахунку параметрів друкованих провідників, необхідних для нормальної роботи пристрою. На основі схеми електричної принципової, обраної елементної бази, проведених розрахунків, будуть спроектовані друковані плати.

### 5.1 Розрахунок друкованих провідників

#### 5.1.1 Розрахунок ширини друкованих провідників

Проведемо розрахунки ширини друкованих провідників за допомогою Mathcad. Результати розрахунків для сигнальних та силових ланцюгів наведено на рис.5.1 а та 5.1 б. Узагальнюючі результати наведено на рис.5.2. Рисунок — скріншоти з програми Mathcad.

Для сигнальних:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у вузькому

Вибираємо за класом  $t_{minD_S} := 0.25mm$

Допуск на ширину провідника (нижче відхилення)  $\Delta t_{ноD_S} := -0.05mm$

$$t1_{V_S} := t_{minD_S} + |\Delta t_{ноD_S}| = 0.3mm$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у широкому

Вибираємо за класом точності (на один  $t_{minD_S} := 0.45mm$  менше)

Допуск на ширину провідника (нижче відхилення)  $\Delta t_{ноD_S} := -0.1mm$

$$t1_{III_S} := t_{minD_S} + |\Delta t_{ноD_S}| = 0.55mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника t2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників  $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$  (Ом\*мм<sup>2</sup>/м)-

Довжина провідника (м)-  $l_S := 0.11m$

Товщина фольги  $h_S := 35 \cdot 10^{-3}mm$

Прикладена напруга  $U_{жив_S} := 12V$

Максимальний струм  $I_{max_S} := 0.2A$  (А)-

$$t2_S := \frac{l_S \cdot I_{max_S} \cdot \rho}{h_S \cdot U_{жив_S} \cdot 0.03} = 0.031mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника t3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм  $I_{max_S} := 0.2A$

Товщина фольги  $h_S := 35 \cdot 10^{-3}mm$  (мм)-

Допустима щільність струму в провіднику (А/мм<sup>2</sup>)-  $j_S := 20 \frac{A}{mm^2}$

$$t3_S := \frac{I_{max_S}}{h_S \cdot j_S} = 0.286mm$$

Ст - 1

Рисунок 5.1 а — Розрахунок для сигнальних ланцюгів

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

**Для силових:** Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у вузькому

Вибираємо за класом точності-  
Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$t_{minDp} := 0.25\text{mm}$$

$$\Delta t_{кор} := -0.05\text{mm}$$

$$t1Vp := t_{minDp} + |\Delta t_{кор}| = 0.3\text{mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у широкому

Вибираємо за класом точності-  
Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$t_{minDp} := 0.45\text{mm}$$

$$\Delta t_{кор} := -0.1\text{mm}$$

$$t1IIIp := t_{minDp} + |\Delta t_{кор}| = 0.55\text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників  
( $\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ )-  
Довжина провідника (м)-  
Товщина фольги  
Прикладена напруга  
Максимальний струм (А)-

$$\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$l_p := 0.11\text{m}$$

$$h_p := 35 \cdot 10^{-3}\text{mm}$$

$$U_{живр} := 35\text{V}$$

$$I_{maxp} := 1.5\text{A}$$

$$t2p := \frac{l_p \cdot I_{maxp} \cdot \rho}{h_p \cdot U_{живр} \cdot 0.03} = 0.079\text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (А)-  
Товщина фольги (мм)-  
Допустима щільність струму в провіднику (А/мм<sup>2</sup>)-

$$I_{maxp} := 1.5\text{A}$$

$$h_p := 35 \cdot 10^{-3}\text{mm}$$

$$j_p := 20 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$$

$$t3p := \frac{I_{maxp}}{h_p \cdot j_p} = 2.143\text{mm}$$

Ст - 2

Рисунок 5.1 б — Розрахунок для силових ланцюгів

З розрахованих даних обираємо ширину провідників у вузькому та широкому місці, при цьому повинна виконуватись умова:

Для силових:

$$t_{min\_v} \geq \begin{cases} t1Vp \\ t2p \\ t3p \end{cases} \quad \text{у вузькому місці}$$

$$t_{min\_w} \geq \begin{cases} t1IIIp \\ t2p \\ t3p \end{cases} \quad \text{у широкому місці}$$

$$t_{min\_vS} := \max(t1Vp, t2p, t3p) = 2.143\text{mm}$$

$$t_{min\_wS} := \max(t1IIIp, t2p, t3p) = 2.143\text{mm}$$

Для сигнальних:

$$t_{min\_v} \geq \begin{cases} t1Vs \\ t2s \\ t3s \end{cases} \quad \text{у вузькому місці}$$

$$t_{min\_w} \geq \begin{cases} t1IIIS \\ t2s \\ t3s \end{cases} \quad \text{у широкому місці}$$

$$t_{min\_vP} := \max(t1Vs, t2s, t3s) = 0.3\text{mm}$$

$$t_{min\_wP} := \max(t1IIIS, t2s, t3s) = 0.55\text{mm}$$

Рекомендована ширина для сигнального провідника  $t_{min\_wP} = 0.55\text{mm}$   
 Рекомендована ширина для силового провідника  $t_{min\_wS} = 2.143\text{mm}$   
 Якщо не можливо провести провідник шириною  $t_{min\_wP} = 0.55\text{mm}$  та  $t_{min\_wS} = 2.143\text{mm}$   
 то можна використувати ширину провідників  $t_{min\_vP} = 0.3\text{mm}$  та  $t_{min\_vS} = 2.143\text{mm}$

Рисунок 5.2 — Узагальнюючі результати

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

PI71.468171.001 ПЗ

### 5.1.2 Розрахунок зазорів між елементами

Розрахунок проведений у програмі Mathcad. Результат наведений на рис.5.3. Рисунок — скріншот з програми Mathcad.

Розрахунок зазорів  $S$  між елементами друкованого монтажу:

Найменша номінальна відстань  $S_m$  між елементами провідникового рисунку (між двома провідниками)

Мінімально допустима відстань між сусідніми друкованими об'єктами (мм)-  $S_m := 0.25\text{mm}$

Допуск на ширину провідника (верхнє відхилення) (мм)-  $\Delta_{tbo} := 0.05\text{mm}$

$$S_{\min} := S_m + \Delta_{tbo} = 0.3\text{-mm}$$

Рисунок 5.3 — Розрахунок зазорів

### 5.1.3 Розрахунок відстані у вузькому місці для прокладання провідника між двома контактними майданчиками

Розрахунок проведений у програмі Mathcad. Результат наведений на рис.5.4. Рисунок — скріншот з програми Mathcad.

Результати розрахунків занесемо до таблиці 5.1:

Тип лінії	Напруга, В	Струм, А	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
			у широкому	у вузькому	
Силовa	35	1,5	2,143	2,143	0,3
Сигнальна	12	0,2	0,55	0,3	0,3

Розрахунок мінімальної відстані  $L$  у вузькому місці для прокладання одного провідника між двома контактними майданчиками

Діаметр контактного майданчика 1(мм) -	$D1 := 2\text{mm}$
Діаметр контактного майданчика 2(мм) -	$D2 := 2\text{mm}$
Відстань між елементами провідникового рисунку, (мм)-	$S_{\min} = 0.3\text{mm}$
Кількість провідників-	$N := 2$
Розміщення центрів осей (мм)-	$T := 0.05\text{mm}$
Ширина провідника-	$t_{\min} := 0.55\text{mm}$

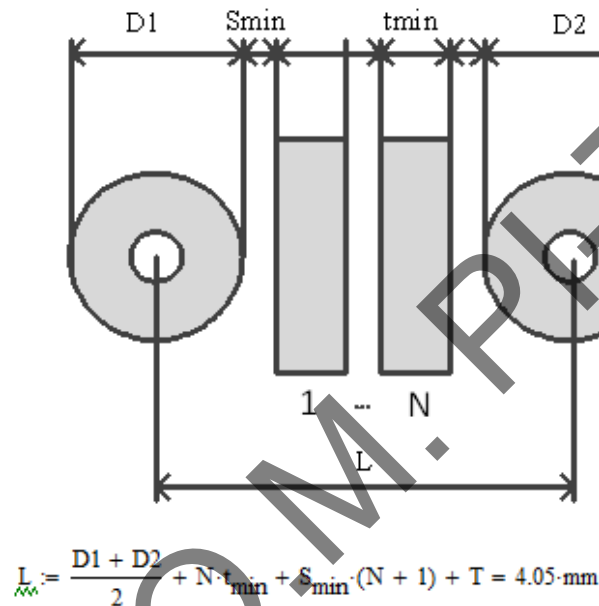


Рисунок 5.4 — Розрахунок відстані

## 5.2 Вибір конструкційних матеріалів та технології виготовлення

В якості матеріалу основи плати було обрано склотекстоліт FR-4 товщиною 1,5 мм і з шаром металізації 35 мкм. Цей матеріал має такі характеристики[33]:

- міцність на згин перпендикулярно шарам за нормальних умов 340 Мпа;
- ударна міцність при згині паралельно шарам (за Шарлі) 33 кДж/м<sup>2</sup>;
- електрична міцність перпендикулярно шарам 14,2 МВ/м;
- діелектрична проникність 5,5;
- тангенс кута втрат 0,04;

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

– щільність 1,7-1,9 г/см<sup>3</sup>.

Оскільки елементна база включає в себе елементи як SMD, так і поверхневого монтажу, було прийнято рішення робити плати двосторонньою, з одним шаром металізації. Спосіб встановлення елементів на плату показано на рисунку 5.5.

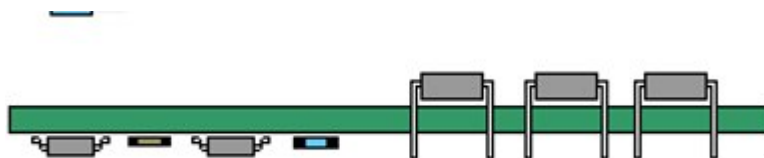


Рисунок 5.5 — Спосіб кріплення елементів

Плата виготовляється за третім класом точності позитивним комбінованим методом.

### 5.3 Розміщення елементів на та провідникових доріжок на платі

Трасування провідників та розміщення елементів виконано в програмному забезпеченні Altium Designer. Оскільки в ТЗ вказано, що генератор повинен складатися з двох частин, електричну принципову схему необхідно розділити на дві частини, та розвести дві плати. Плата, що встановлюється в корпус блоку живлення показана на рисунку 5.6. Плата, що встановлюється в генераторну голівку, показана на рисунку 5.7.

Плата, що встановлюється в корпус блоку живлення, має чотири отвори для кріплення гвинтами М3. Плата, що встановлюється в генераторну голівку, має два отвори для кріплення гвинтами М2. Для економії травнику була виконана заливка шаром міді по всій площі. Цей шар було під'єднано до землі. Розміщення контактних майданчиків обумовлено розміщенням вивідних елементів на корпусі пристрою.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



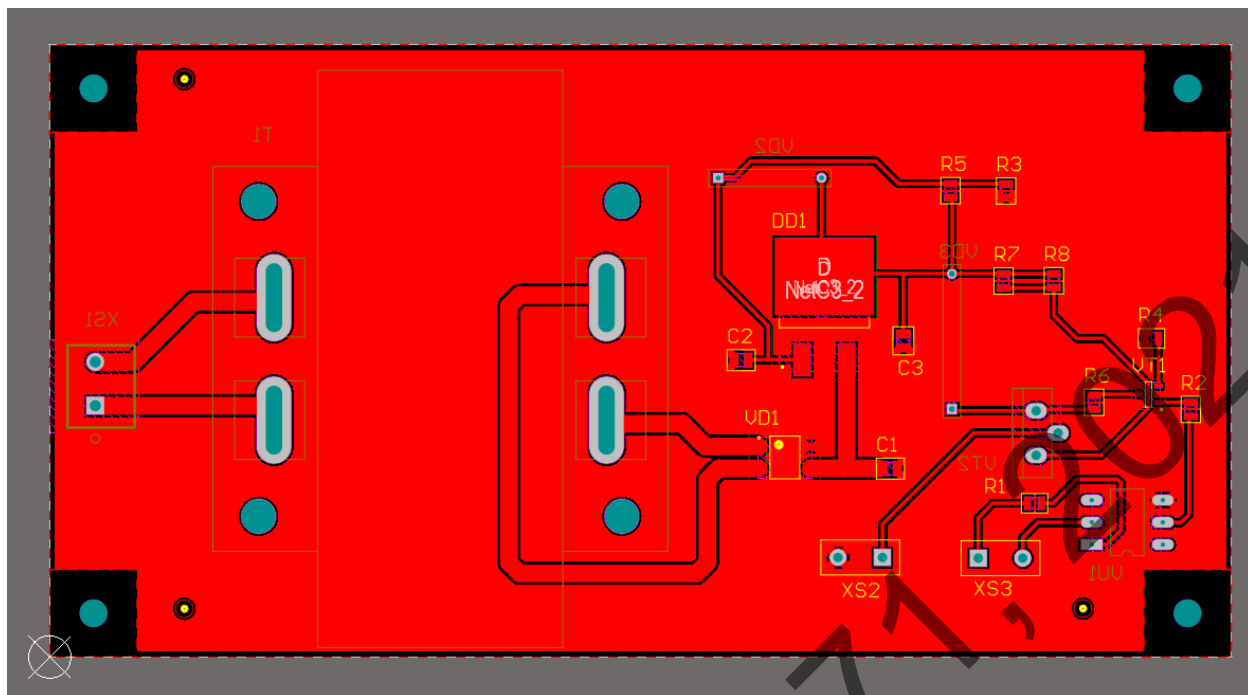


Рисунок 5.6 — Трасування провідників на платі блоку живлення

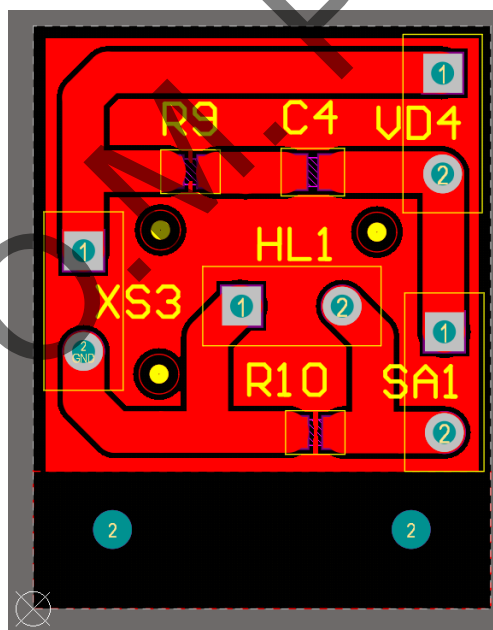


Рисунок 5.7 — Трасування провідників на платі генераторної голівки

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

## 6 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДУ ТА АНАЛІЗ ЙОГО ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

### 6.1 Опис конструкції

За вимогами, вказаними в ТЗ, генератор шуму складається з двох частин: блоку живлення та генераторної голівки.

Корпус блоку живлення складається з нижньої та верхньої кришки. Обидві деталі виконано з міцного АБС пластику методом лиття. Плата кріпиться до нижньої кришки за допомогою чотирьох гвинтів М3х6. Трансформатор кріпиться на плату за допомогою чотирьох гвинтів М3х4. Нижня кришка має додаткові стійки в тому місці, де на платі розташований трансформатор, для уникнення навантажень на текстоліт.

В корпусі передбачено два отвори з кріпленнями для вивідних роз'ємів, які припаюються до друкованої плати за допомогою провідників. Місця для пайки було закладено на етапі проектування друкованої плати.

В задній стінці передбачено отвір для кабелю живлення. На корпусі передбачено встановлення запобіжника, який монтується в фазу живлення 220 В. Запобіжник вмонтовано так, що б в разі необхідності його заміни не довелося розбирати весь корпус. Зовнішній вигляд блоку живлення ГШ було змодельовано в програмному забезпеченні SOLIDWORKS 2021. Результат моделювання показано на рисунку 6.1.

Корпус генераторної голівки складається з двох частин. Обидві частини виконано з алюмінію. В верхню кришку вставляється ПЛД з контактами, його положення в просторі відносно генераторної камери регулюється двома гвинтами М2х4. За допомогою чотирьох гвинтів М3х6 до верхньої кришки прикручується узгоджене навантаження. Також верхня кришка має стандартне кріплення до хвилевода 1.8х3.6. Сама верхня кришка прикручується до нижньої за допомогою чотирьох гвинтів М3х30.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Нижня кришка має кріплення для друкованої плати, перемикача та світлодіода. Плата кріпиться за допомогою двох гвинтів M2x4. Світлодіод та кнопка за допомогою термокля. Контакти ЛПД, кнопки та світлодіода припаюються до плати за допомогою провідників. Місця для пайки було передбачено на етапі розробки плати. Нижня кришка має отвір для виводу кабеля керування, з роз'ємним з'єднанням на кінці. Кабель також припаюється до друкованої плати всередині генераторної голівки. Кабель керування вставляється в відповідний роз'єм на блоці живлення. Органи керування та індикації пристроєм було винесено на генераторну голівку для зручності користування. В такому варіанті конструкції користувач може не контактувати з блоком живлення при роботі. Зовнішній вигляд генераторної голівки було змодельовано в програмному забезпеченні SOLIDWORKS 2021. Результат моделювання показано на рисунку 6.2.

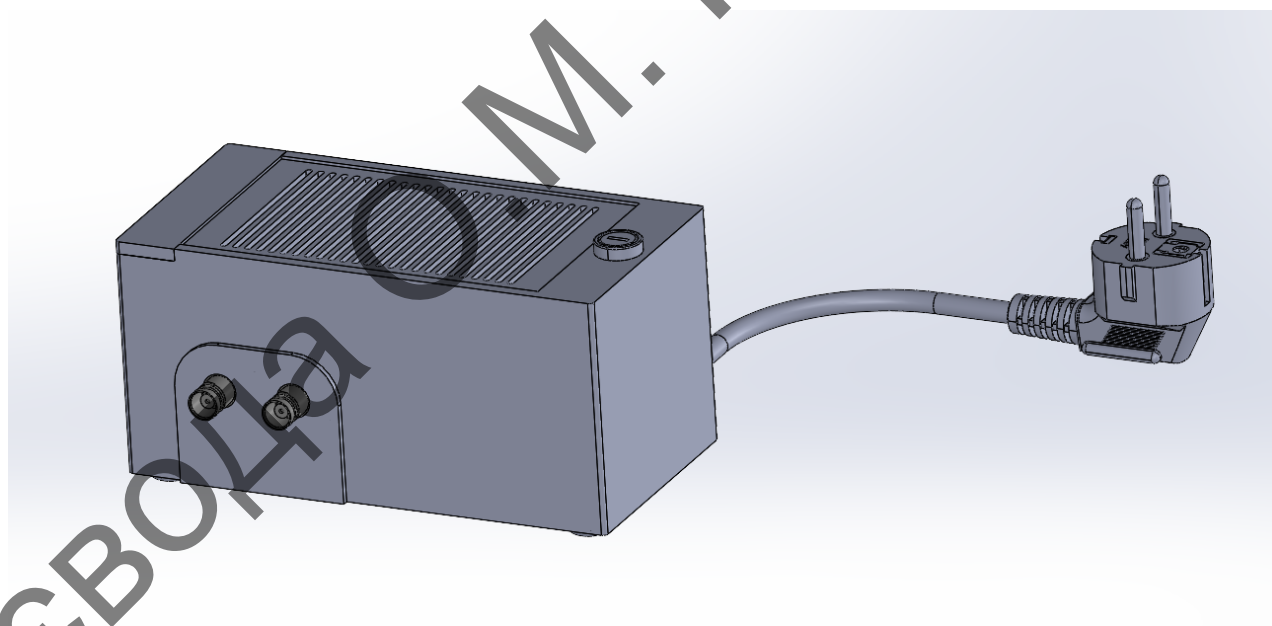


Рисунок 5.7 — Блок живлення генератора шуму

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

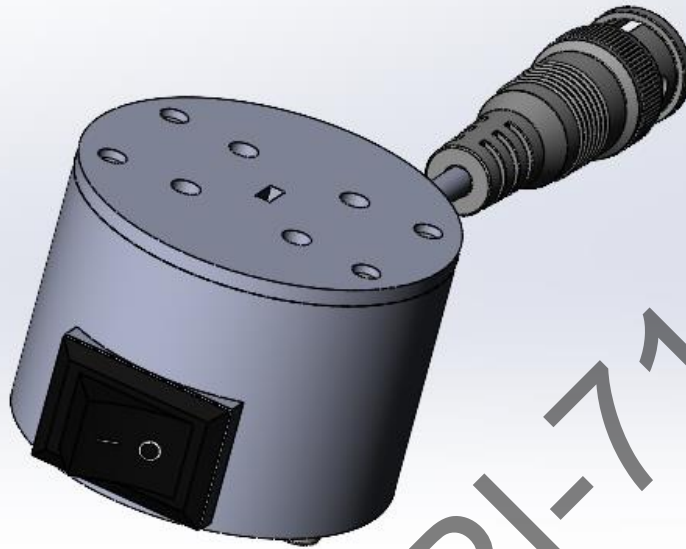


Рисунок 6.2 — Генераторна голівка

## 6.2 Розрахунок надійності

Розрахунок надійності буде проведено у відповідності до методичних вказівок [34]. Будь-який радіоелемент генератора можна відремонтувати або замінити, тому розроблений генератор шуму відноситься до відновлювальної апаратури. Генератор буде використовуватися в лабораторних умовах, тому поправочний коефіцієнт  $K_e = 1,5$ . Інтенсивність відмов для кожного радіоелементу можна розрахувати за формулою:

$$\lambda_{pi} = \lambda_{oi} \cdot K_{ei}, \quad (6.1)$$

де:  $\lambda_{pi}$  — робоче значення інтенсивності відмов кожного елементу;

$\lambda_{oi}$  — інтенсивність відмов кожного елементу;

$K_{ei}$  — поправочний коефіцієнт.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Підставивши в (6.1) відомі значення  $\lambda_0$  отримаємо робочі значення інтенсивності відмов для кожного елементу плати. Результат розрахунку для кожного елементу, разом з кількістю елементів  $N$  занесемо до таблиці 6.1

Таблиця 6.1 — результат розрахунків

Назва та тип елемента	$\lambda_0 \cdot 10^6$ , 1/год	N	$\lambda_p \cdot 10^6$ , 1/год
Резистор SMD	0,06	10	0,09
Конденсатор SMD	0,7	4	1,05
Трансформатор	2,0	1	3,0
Запобіжник плавкий	1,0	1	1,5
Діод	1,0	1	1,5
Стабілітрон	0,7	1	1,05
Діодний міст	0,5	1	0,75
ЛПД	1,0	1	1,5
Оптопара	1,5	1	2,25
Транзистор	1,6	2	2,4
Інтегральна мікросхема	2,0	1	3,0
Світлодіод	1,5	1	2,25
Перемикач	3,0	1	4,5

Для розрахунку потоку відмов потрібно використати формулу

$$\omega = \sum_{i=1}^n \lambda_p \cdot N_i. \quad (6.2)$$

Після підстановки даних з таблиці 6.1 в формулу (6.2) отримаємо  $\omega = 27,7 \cdot 10^{-6}$  1/год. Для розрахунку часу напрацювання на відмову потрібно використати формулу

$$T_0 = \frac{1}{\omega}. \quad (6.3)$$

Підставивши розраховане в (6.2) значення в (6.3) отримаємо  $T_0 = 36000$  год. Отриманий результат відповідає вимогам, поставленим в ТЗ.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

## ВИСНОВКИ

У дипломному проекті проведено аналіз відомих генераторів шуму міліметрового діапазону та їх використання у технічній галузі. За результатами аналізу згідно вимогам технічного завдання запропоновано конструкцію генератора шуму на лавинно-пролітному діоді. Розроблений блок живлення дозволяє керувати робочим струмом діоду, що значно спрощує спосіб модуляції вихідної потужності генератора, підвищує його швидкодію до 0,1 нс, а також дозволяє використовувати зовнішні джерела керуючих сигналів.

Розроблено структурну схему та схему електричну принципову, особливістю яких є наявність кола гальванічної розв'язки, що запобігає виходу з ладу генератора і джерела керуючих сигналів

Проведений розрахунок блоку живлення, зокрема трансформатора, показує можливість забезпечення робочого струму вибраного лавинно-пролітного діоду в межах 50...60 мА, що дозволяє реалізувати вихідну потужність шумового сигналу в межах 0,1...1 нВт, що задовольняє вимогам ТЗ.

Обрана елементна база, яка дозволяє зменшити розміри складових частин та пристрою в цілому. Габаритні розміри блоку живлення складають 160x94x80 мм, а генераторної голівки — 45x45x32 мм.

На основі схеми електричної принципової було проведено розрахунок параметрів друкованих провідників, необхідних для нормальної роботи пристрою. За результатами розрахунків розроблені друковані вузли пристрою.

На основі технічного завдання, та наявних моделей друкованих плат, було сконструйовано корпус для блоку живлення та генераторної голівки пристрою. Також було проведено розрахунки, які підтверджують, що спроектований пристрій задовольняє вимоги, поставлені в технічному завданні.

Представлено пакет конструкторської документації, оформлений за ЄСКД, за допомогою якого можна виготовити розроблений пристрій.

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Алмазов-Долженко К. И. Коэффициент шума и его использование на СВЧ / К. И. Алмазов-Долженко. — М. : Научный мир, 2000. — 240 с.
2. Измерения в электронике : Справочник / [В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.] : под ред. В.А. Кузнецова. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 512 с.
3. Защита информации в телекоммуникационных системах / Г. Ф. Конахович, В. П. Климчук, С. М. Паук, В. Г. Потапов. — К.: "МК-Пресс", 2005. — 288 с.
4. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / [Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф. и др.] ; под общ. ред. Ю.А. Скрипника. — Житомир : Волянь, 2003. — 408с.
5. Thuéry, Jacque. Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications / Jacque Thuéry. — Boston-London: Artech House Inc., 1992. — 675 p.
6. Бецкий О.В. Миллиметровые волны и живые системы / О.В. Бецкий, В.В. Кислов, Н.Н. Лебедева. — М. : Сайенс-Пресс, 2004. — 272 с.
7. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models / T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney et al. // IEEE Trans. on AP. — 2017. — Vol 65. — Issue 12. — P. 6213-6230.
8. Манойлов В.П. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації : [монографія] / В.П. Манойлов, В.В. Омельчук, В.В. Опанюк. — Житомир : Вид-во ЖДТУ, 2008. — 384 с.
9. Генератор шума "ЛГШ-220" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=3295&tbl=04.03.03.01>. – 21.05.21.
10. Генератор радишума "RNR-02" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=4894&tbl=04.03.04.01>. – 21.05.21.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

11. Устройство зашумления радиоэфира NGR-900 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.qrz.ru/schemes/contribute/security/jammers/jammer9.shtml> – 21.05.21.

12. Генератор подавления радиопередатчиков [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.qrz.ru/schemes/contribute/security/jammers/jammer2.shtml> – 21.05.21.

13. Генератор постановки помех SEL SP-21 "Баррикада" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.qrz.ru/schemes/contribute/security/jammers/jammerX3.shtml> – 21.05.21.

14. Арслан Х. Сверхширокополосная беспроводная связь / Х.Арслан, Чж.Х.Чен, М.Бенетто; перев. с англ. Н.Л.Бірюкова. – М.: Техносфера, 2012. — 640 с.

15. Автоматизированная установка мм-диапазона для биомедицинских приложений/ А.Д. Красюк, С.Н. Перегудов, Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко // Вісник Технологічного університету "Поділля". Технічні науки. – 2004. – № 2. – Т. 1, частина 1. – С.176-180.

16. Перегудов С. Н. Радиометрическая установка с автоматической регулировкой выходной мощности генератора эталонного шума / С. Н. Перегудов, А. Ф. Яненко. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Частина 1, Т. 1. – С. 131-134.

17. Касаткин Л. В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка ; под ред. Тараненко, С.П. Ракитина. – Севастополь : Вебер, 2006. – 319 с.

18. Тагер А.С. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов. – М. : Сов. радио, 1968. – 479 с.

19. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / [Б.А. Наливайко, А.С. Берлин, В.Г. Божков и др.] ; под ред. Б.А. Наливайко – Томск : МГП "РАСКО", 1992. – 223 с.

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



20. Calibration Noise Generator for High-Sensitivity mm-Range Radiometric Systems / [Yury Skripnik, Aleksey Yanenko, Vyacheslav Manoylov, Sergey Peregudov] // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: International Conference TCSET'2004, Lviv-Slavska, February 24-28, 2004: Proceedings. – Lviv, 2004. – P. 524-525.

21. Лошицкий П.П. Исследование сверхширокополосных генераторов шума миллиметрового диапазона длин волн с высоким уровнем шумов / Лошицкий П.П., Павлюченко А.В. // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – № 4(35). – С.4-10.

22. Мясин Е.А. Широкополосные диодные генераторы шума миллиметрового диапазона волн / Е.А. Мясин, В.Д. Котов // Радиотехника. – 2006. – № 3. – С. 46-50.

23. Перегудов С.М. Чисельно-аналітичне моделювання генератора шуму міліметрового діапазону на корпусних лавинно-пролітних діодах / Перегудов С.М. // Вісник НТТУ "КПІ". Радіотехніка радіоапаратобудування. – 2007. – Вип. 34.– С. 71-76.

24. Portal.tpu [Електронний ресурс] : <https://portal.tpu.ru/> – 2011. 14 – 15 с, 23 – 26 с. — Режим доступу до ресурсу : [https://portal.tpu.ru/SHARED/s/STZIBULSKY/academic/Tab2/Teploprovodnost\\_mat.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/s/STZIBULSKY/academic/Tab2/Teploprovodnost_mat.pdf)

25. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] : <https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/877643/ISC/LM317.html>

26. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] : <https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/542521/FAIRCHILD/4N37.html>

27. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] : <https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/169988/NEC/2SC3733.html>

28. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] :  
<https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу :  
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/606246/CDIL/BD534.html>

29. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] :  
<https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу :  
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/334345/RFE/DB104S.html>

30. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] :  
<https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу :  
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/252343/VISHAY/BZX55C3V6.html>

31. Electronic Component Datasheet Search [Електронний ресурс] :  
<https://www.alldatasheet.com/> – 2021. — Режим доступу до ресурсу :  
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/810112/CHENDA/1N4002.html>

32. Корис Р. Справочник инженера-схемотехника / Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. — Москва: Техносфера, 2008. — 608с.

33. Стеклотекстолит FR-4 [Електронний ресурс] :  
<https://www.rcscomponents.kiev.ua> – 2021. — Режим доступу до ресурсу :  
[https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/FR4\\_datasheet.pdf](https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/FR4_datasheet.pdf)

34. Фізико-теоретичні основи конструювання електронних апаратів [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до розрахункових та контрольних робіт для студентів напряму підготовки 06050902 «Радіоелектронні апарати» / Уклад.: С. М. Перегудов, М. В. Зінченко — К.: НТУУ «КПІ» 2012 — 56

					PI71.468171.001 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ДОДАТКИ

Додаток А — Технічне завдання

Додаток Б — Перелік елементів

Додаток В — Специфікація на друкований вузол

Додаток Г — Специфікація на блок живлення

Додаток Д — Специфікація на генераторну голівку

Воєвода О.М. РІ-71, 2021

					РІ71.468171.001 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПОГОДЖЕНО

к.т.н., доц. Перегудов С.М.

(керівник)



(підпис)

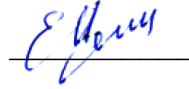
(розшифровка

підпису)

ЗАТВЕРДЖЕНО

д.т.н., проф. Нелін Є.А.

(Завідувач кафедри КіВРА)



(підпис)

(розшифровка

підпису)

ДОДАТОК А

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ

Малоінерційний керований генератор шуму міліметрового діапазону

Воєвода О.М.

(виконавець)



(підпис)

(розшифровка

підпису)

					PI71.468171.001 T3	Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.1 Назва. Підстава для виконання

Малоінерційний керований генератор шуму міліметрового діапазону.

Підставою для виконання є наказ факультету №1205-с від 18 травня 2021р.

## 1.2 Мета виконання і призначення розробки

Метою роботи є розробка генератора електромагнітного шуму міліметрового діапазону з імпульсним керуванням.

## 1.3 Технічні вимоги

### 1.3.1 Показники призначення

Загальна вихідна потужність генератора шуму.....0,1...1 нВт.  
Діапазон робочих частот генератора.....53...78 ГГц.  
Напруга живлення.....220 В.  
Вихідна напруга блоку живлення не більше.....35 В.  
Потужність споживання не більше.....5 Вт

### 1.3.2 Вимоги до життєдіяльності та стійкості до зовнішніх впливів та чинників

Кліматичне виконання – У1 (згідно ГОСТ 15150–69).

У1 – для мікрокліматичного району за помірним кліматом, для експлуатації на відкритому повітрі. Температури експлуатації:...+10 — 40 °С.

Мінімальна робоча температура.....мінус 5 °С

Максимальна робоча температура.....+ 50 °С

### 1.3.3 Вимоги до надійності

Виріб по забезпеченню надійності повинен задовольняти вимогам ГОСТ 27.003-90.

Середнє напрацювання на відмову не менше 10000 годин.

Середній час відновлення не більше 5 години.

					PI71.468171.001 T3	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середній строк служби не менше 2 років.

Виріб повинен витримувати вплив зовнішніх механічних та кліматичних факторів згідно з ГОСТ 11478-88.

#### **1.3.4 Вимоги до технологічності**

Вимоги до технологічності по ГОСТ 14.201-83.

#### **1.3.5 Вимоги до конструкції**

Пристрій повинен бути відновлюваний та ремонтпридатний згідно ГОСТ 27.002-89.

Пристрій повинен мати дві складові частини, блок живлення та генераторну голівку. З'єднання двох частин має бути роз'ємним. Генераторна голівка повинна мати змогу кріпитися до хвильоводного виходу. Блок живлення повинен мати роз'ємний вивід для подачі керуючих імпульсів.

Габарити блоку живлення не більше:

Довжина.....200 мм;

Ширина.....150 мм;

Висота.....100мм.

Габарити генераторної голівки

Довжина кабелю з'єднання від 1,5 до 2 м.

#### **1.3.6 Вимоги до стандартизації та уніфікації**

Рівень стандартизації та уніфікації повинен відповідати ГОСТ 12.201-83.

Коефіцієнт стандартизації.....не менше 0,4.

Коефіцієнт уніфікації.....не менше 0,6.

#### **1.3.7 .Вимоги до дизайну та ергономіки**

Вимоги до дизайну не висуваються.

					PI71.468171.001 T3	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### **1.3.8 Вимоги до експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту**

Вимоги до технологічності згідно ГОСТ 14.201-83. Всі комплектуючі вироби повинні проходити вхідний контроль на відповідність вимогам ТУ.

Пристрій повинен бути відновлюваний та ремонтпридатний згідно ГОСТ 27.002-89.

### **1.3.9 Вимоги безпеки життя, здоров'я та охорони довкілля**

Керуватися положеннями стандартів про вимоги технічної безпеки, електробезпеки, пожежної безпеки.

Утилізація згідно вимог для промислових відходів за ГОСТ 30773-2001.

### **1.3.10 Вимоги до транспортування, зберігання та експлуатації**

Умови експлуатації згідно ГОСТ 16019-2001. С1 — Стаціонарний, розміщується в опалюваних приміщеннях.

### **1.3.11 Вимоги до якості і технічного рівня**

Відповідає світовому рівню.

## **1.4 Вимоги до сировини, матеріалів і ПКВ**

Вимоги до сировини та матеріалів не висуваються.

## **1.5 Вимоги до консервації, пакування та маркування**

Генератор пакувати в індивідуальну тару.

Упаковка повинна бути виконана у вигляді картонної коробки.

Упаковка повинна забезпечити цілісність виробу при роботах по завантаженню - розвантаженню, транспортуванню, зберіганню та потрібний захист при зовнішніх впливах.

## **1.6 Вимоги до розроблюваної документації**

Документація оформлюється згідно ЄСКД.

					PI71.468171.001 T3	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Воєвода О.М. РІ-71, 2021



Позн.	Найменування				Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>					
C1	C0805B104K250NT-Hitano				1	
C2	0805B106K160N3-Hitano				1	
C3	0805B105K160N3-Hitano				1	
C4	C0805Y223M500NT-Hitano				1	
	<u>Резистори</u>					
R1	RC0805FR-1KR-Hitano 1000 Ом 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R2	RC0805FR-10KR-Hitano 10 кОм 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R3	RC0805FR-5KR-Hitano 5 кОм 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R4	RC0805FR-200R-Hitano 200 Ом 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R5	RC0805FR-240R-Hitano 240 Ом 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R6	RC0805FR-2700R-Hitano 2,7 кОм 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R7	RC0805FR-56R-Hitano 56 Ом 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R8	RC0805FR-100R-Hitano 100 Ом 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R9	RC0805FR-5100R-Hitano 5,1 кОм 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
R10	RC0805FR-47R-Hitano 47 Ом 0,125 Вт $\pm$ 1%				1	
	<u>Транзистори</u>					
VT1	2SC3733 SOT-23-3				1	
VT2	BD534 TO-220				1	
VD1	DB104S DBS (DB-1S, SO-DIL), SMD				1	
VD2	1N4002 DO41				1	
VD3	BZX55C3V6 DO35				1	
VD4	2A743B-4				1	
HL1	HB5-115R				1	
					<b>PI71.468171.001 ПЕ</b>	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Генератор шуму Перелік елементів	
Розробив	Воввода			06.06		
Перевір.	Перебудов			06.06		
Реценз.	Попсуй					
Н. Контр	Попсуй					
Затверд.	Перебудов					
					Лім.	Арк.
						1
					Аркуші	2
					КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ	

[illegible]

## ДОДАТОК В

Воєвода О.М. РІ-71, 2021

[illegible]

[illegible]

ДОДАТОК Г

Воєвода О.М. РІ-71, 2021

[illegible]

[illegible]



ДОДАТОК Д

Воєвода О.М. РІ-71, 2021

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк.	Прим.	
				Документація			
A2			PI71.468171.003 СК	Складальний кресленик	1		
A4			PI71. 468171.001 ПЗ	Пояснювальна записка	1		
				Складальні одиниці			
		1	PI71. 468171.002	Друкований вузол	1		
				Деталі			
		2	PI71. 734271.001	Верхня кришка	1		
		3	PI71. 724274.001	Нижня кришка	1		
		4	PI71. 757852.001	Узгоджене навантаження	1		
		5	PI71. 714551.001	Контакт 1	1		
		6	PI71. 713141.001	Проставка	1		
		7	PI71. 715111.001	Контактна чашка	1		
		8	PI71. 715111.002	Контакт 2	1		
		9	PI71. 715111.003	Контакт 3	1		
		10	PI71. 713141.002	Діелектрична втулка	1		
		11	PI71. 713141.003	Стопор	1		
		12	PI71. 753521.001	Пружина			
				PI71. 468171.003			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп	Дата			
Розробив		Возвода					
Перевір.		Перегудов					
Реценз.		Попсуй					
Н.Контр		Попсуй					
Затверд.		Перегудов					
Генераторна голівка					Лім.	Арк.	Аркушів
						1	2
					КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ PI-71		

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк.	Прим.
				<u>Стандартні вироби</u>		
		13		Гайка M2 ISO 4032	2	
		14		Гвинт M2x4 ISO 4032	2	
		15		Гвинт M2x6 ISO 4032	2	
		16		Гвинт M3x8 ISO 4032	4	
		17		Гвинт M3x30 ISO 4032	4	
				<u>Інші вироби</u>		
		18		Кнопка MRS-101/KCD-101	1	
		19		Світлодіод HB5-115R	1	
		20		BNC connector (male)	1	
		21		ЛПД	1	
				<u>Матеріали</u>		
		22		Провід ПВС 2х1	1	1,5 м
		23		Провід ПВС 2х1	6	5 см
					</	