

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший бакалаврський

(рівень вищої освіти)

на тему Розробка генератора стоячих хвиль високої потужності

Виконав: студент II курсу, групи 6.1531-с
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікро- та наносистемна
техніка

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

А.С. Кіяшко

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.ф.-м.н.,
Світанько М.В.

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

Рецензент завідувач кафедри електричної інженерії
та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ,
професор, д.т.н., Коваленко В.Л.

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

Запоріжжя
2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Факультет _____
Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
(код і назва)
Освітня програма Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕІСПЗ

Критська Т.В.

“ 30 ” травня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Кіяшку Артему Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка генератора стоячих хвиль високої потужності

керівник роботи Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від “26” грудня 2023 року № 2215-с

2 Строк подання студентом роботи 30 травня 2024 року

3 Вихідні дані до роботи БПЛА, 10 кГц – 200 МГц, 220 В, 15 В, Microcap, Proteus

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Лінії передачі електроенергії без втрат 2. Розробка генератора стоячих хвиль високої потужності 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці генератора стоячих хвиль високої потужності

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Генератор стоячих хвиль. 2. Електрична схема детектора генератора стоячих хвиль 3. Генератор стоячих хвиль із повздовжнім ефектом Доплера

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>I</i>	<i>Світанько М.В., доцент</i>	<i>31.12.2023</i>	<i>29.03.2024</i>
<i>II</i>	<i>Світанько М.В., доцент</i>	<i>31.12.2023</i>	<i>26.04.2024</i>
<i>III</i>	<i>Світанько М.В., доцент</i>	<i>31.12.2023</i>	<i>30.05.2024</i>

7 Дата видачі завдання 31 грудня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Літературний огляд</i>	<i>29.03.2024</i>	
<i>2</i>	<i>Розрахункова частина</i>	<i>26.04.2024</i>	
<i>3</i>	<i>Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки</i>	<i>30.05.2024</i>	
<i>4</i>	<i>Розробка графічної частини роботи</i>	<i>30.05.2024</i>	
<i>5</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>30.05.2024</i>	
<i>6</i>	<i>Нормоконтроль</i>	<i>30.05.2024</i>	
<i>7</i>	<i>Попередній захист роботи</i>	<i>30.05.2024</i>	

Студент _____ *Кіяшко А.С.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Світанько М.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л.Л.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 56 сторінок, 18 рисунків, 1 таблицю, 13 джерел літератури.

Об'єкт дослідження – системи передачі електричної енергії.

Мета роботи – розробка генератора стоячих хвиль високої потужності.

Завдання роботи – на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну схему генератора стоячих хвиль.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus, Microcap 5.0.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено структурну схему генератора стоячих хвиль високої потужності із широким діапазоном переналаштовування частоти.

Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – запропоновано подальше удосконалення схеми генератора із застосуванням газорозрядного пристрою із поздовжнім ефектом Доплера.

ГЕНЕРАТОР, СТОЯЧІ ХВИЛІ, ЧАСТОТНИЙ СПЕКТР, ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, ЕФЕКТ ДОПЛЕРА.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 31.12.2023 р. по 30.05.2024 р.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	6
1. Лінії передачі електроенергії без втрат	7
1.1 Ідеальна лінія	7
1.2 Генератори електричних коливань.....	10
1.2.1 Генератори синусоїдальних коливань	10
1.2.2 RC генератори	15
2 Розробка генератора стоячих хвиль високої потужності	20
2.1 Структурна схема генератора стоячих хвиль високої потужності.....	20
2.2 Основні структурні блоки генератора стоячих хвиль високої потужності	21
2.2.1 Генератор	21
2.2.2 Детектор електро-магнітних стоячих хвиль	29
2.3 Моделювання фільтрів нижніх та верхніх частот генератора високочастотних коливань	30
2.3.1 Моделювання фільтра нижніх частот генератора високочастотних коливань.....	30
2.3.2 Моделювання фільтра верхніх частот генератора високочастотних коливань	32
2.4 Подальше вдосконалення схеми генератора.....	34
3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці пристрою дистанційного керування системою тепловізійних вимірювань	39
3.1 Характеристика потенційних шкідливих та небезпечних виробничих факторів	39
3.2 Заходи з поліпшення умов праці	42
3.3 Виробнича санітарія.....	45
3.4 Електробезпека.....	48

3.5 Протипожежна безпека.....	50
Висновки та рекомендації.....	54
Перелік посилань.....	55

Вступ

Неефективне використання енергетичних ресурсів, споживання та експорт легкодоступної нафти, неекономне використання електроенергії підприємствами чи домогосподарствами змушують серйозно замислитись над проблемою енергозбереження в країні. Енергетичний сектор економіки України потребує особливої уваги як з боку держави, так й індивідів. Важливим є використання альтернативних джерел енергії, пошук нових шляхів, способів постачання її державі. Енергосистема України навіть за наяості палива не може достатньо забезпечити споживачів тими обсягами енергії, який вони потребують.

Одним із ефективних шляхів забезпечення електроенергією є використання мереж без втрат[1].

Основним носієм енергії у цих мережах є стоячі хвилі високої інтенсивності.

Тому актуальним є питання розробки та створення генераторів стоячих хвиль високої потужності.

1. Лінії передачі електроенергії без втрат

1.1 Ідеальна лінія

Лінію, у якій відсутні втрати енергії, називають ідеальною лінією, або лінією без втрат. Для коротких високочастотних ліній справедливе співвідношення $R_0 \ll L_0$ й $G_0 \ll C_0$. Тому часто розглядають такі двопровідні та коаксіальні лінії, як лінії без втрат. Лінію без втрат варто розглядати як ідеалізацію дійсної лінії. Така ідеалізація не вносить помітних кількісних похибок і дозволяє більш характерно виявити якісні особливості виникаючих процесів.

Основні параметри ідеальної лінії, при умові, що $R_0=0$ і $G_0=0$:

Хвильовий опір [1-2]:

$$\underline{z}_{\text{хв}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1)$$

Хвильовий опір лінії без втрат - активний й не залежить від частоти.

Стала поширення [1-2]:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = j\omega \sqrt{L_0 C_0} = j\beta \quad (2)$$

Таким чином, вторинні параметри лінії - хвильовий опір і стала поширення - залежать від погонних (на одиницю довжини) індуктивності і ємності. За умови, що відстань між проводами D набагато більше радіусу проводу r , індуктивність та ємність на одиницю довжини відповідно визначають за формулами [1-2]:

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \ln \frac{D}{r}; \quad C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{D}{r}} \quad (3)$$

відповідно магнітна та діелектрична проникності порожнечі;

$$\mu_0 = 10^{-7} \text{ Гн/м}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м. а } \quad r \text{ та } R - \text{ відносні}$$

магнітна та діелектрична проникності оточуючого середовища.

Фазова швидкість лінії:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega \sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = c \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (4)$$

Фазова швидкість хвилі в лінії без втрат не залежить від частоти. Для повітряних ліній $\epsilon_r = \mu_r = 1$, тому фазова швидкість збігається із швидкістю світла c . Для кабельних ліній $\mu_r = 1$, $\epsilon_r > 1$, тому $v < c$ [1-2].

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{L_0 C_0}} = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (5)$$

Лінія без втрат - окремий випадок лінії, що не спотворює форму сигналу, який поширюється уздовж лінії.

Рівняння ідеальної лінії виходять із рівнянь реальної лінії, записаних у комплексній формі з використанням гіперболічних функцій і з урахуванням, що $\underline{\gamma} = j\beta$ [1-2]:

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x + \dot{I}_2 z_{xx} \operatorname{sh} \underline{\gamma} x = \dot{U}_2 \cos \beta x + j \dot{I}_2 z_{xx} \sin \beta x; \\ I(x) &= \frac{\dot{U}_2}{z_{xx}} \operatorname{sh} \underline{\gamma} x + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x = j \frac{\dot{U}_2}{z_{xx}} \sin \beta x + \dot{I}_2 \cos \beta x. \end{aligned} \quad (6)$$

Тут координата x відраховується від кінця лінії.

Стоячі хвилі в лінії. У режимах н.х., к.з. і чисто реактивного навантаження спостерігаються стоячі хвилі. Вони виникають як результат накладання двох зустрічних незгасаючих хвиль, що рухаються із однаковою швидкістю та мають однакові амплітуди. Розглянемо процес їхнього формування у зазначених режимах [1-2].

При н.х. ($z_2, \dot{I}_2 = 0$) рівняння лінії (6) набувають вигляду (7):

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_2 \cos \beta x; \quad \dot{I}(x) = j \frac{\dot{U}_2}{z_{xx}} \sin \beta x. \quad (7)$$

Розподіл миттєвих значень напруги та струму при $U_2=0$, (тобто U_2) описується рівняннями (8), які являють собою рівняння стоячих хвиль.

$$u(x) = \sqrt{2} U_2 \cos \beta x \cdot \sin \omega t; \quad i(x) = \frac{U_2}{Z_{xx}} \sin \beta x \cdot \cos \omega t \quad (8)$$

Рівняння (8) показують, що в точках, де $\cos x = 0$, у будь-який момент часу напруга дорівнює нулю, а в точках, для яких $\cos x = 1$, вона завжди максимальна. Струм в будь-який момент часу дорівнює нулю в точках для яких $\sin x = 0$, і завжди максимальний в точках, де $\sin x = 1$. Струм випереджає по фазі напругу на 90° (коли знаки $\sin x$ та $\cos x$ однакові) і відстає по фазі на 90° від напруги, коли знаки $\sin x$ та $\cos x$ протилежні. На рис.1.1 демонструється зміна миттєвих значень напруги для різних моментів часу в режимі стоячих хвиль при н.х. рис.а та при к.з. рис б. Тут продемонстровано, що переміщення хвиль уздовж лінії відсутнє а відбувається тільки зміна у часі амплітуди напруги (струму). У вузлах напруга (струм) стоячої хвилі весь час дорівнює нулю[1-2].

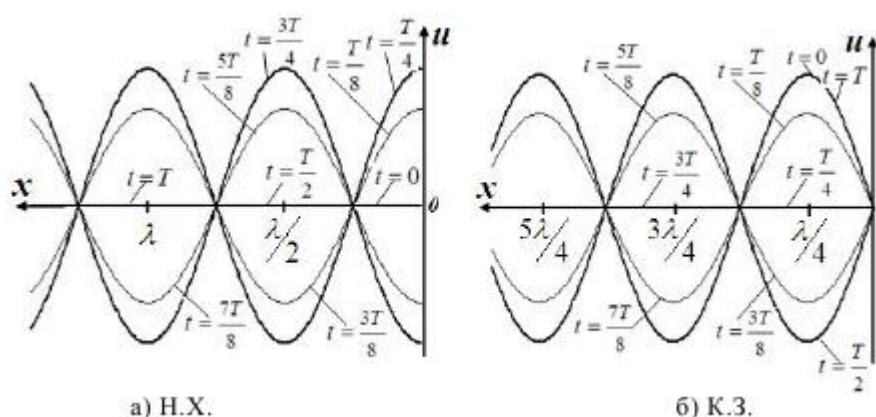


Рис. 1.1 Зміна миттєвих значень напруги для різних моментів часу в режимі стоячих хвиль при н.х. рис.а та при к.з. рис б.

Останні рівняння приводяться до вигляду (9):

$$\begin{aligned}
 u(x,t) &= \sqrt{2} \frac{U_2}{2} \sin(\omega t + \beta x) + \sqrt{2} \frac{U_2}{2} \sin(\omega t - \beta x); \\
 i(x,t) &= \sqrt{2} \frac{U_2}{2Z_{\text{ном}}} \sin(\omega t + \beta x) - \sqrt{2} \frac{U_2}{2Z_{\text{ном}}} \sin(\omega t - \beta x).
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Графіки розподілу миттєвих значень напруги в різні моменти часу в режимах неробочого ходу представлено на рис. 1.2. Неробочий хід НХ рис.1.2.а та короткого замикання (КЗ) 1.2.б.

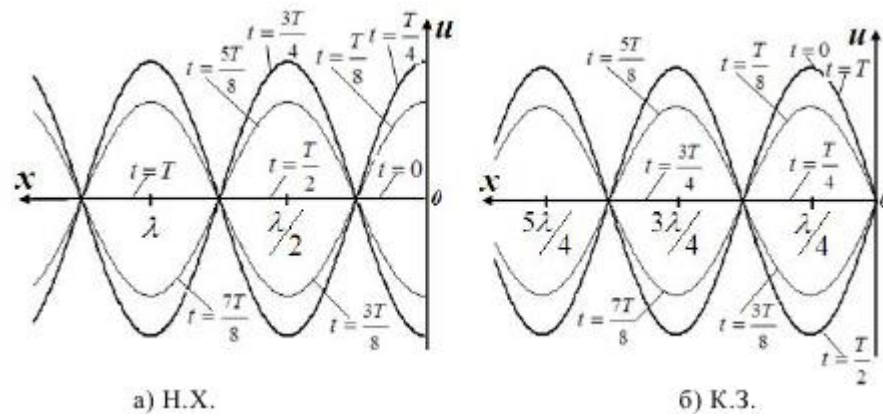


Рис.1.2 Зміна миттєвих значень напруги для різних моментів часу в режимі стоячих хвиль.

1.2 Генератори електричних коливань

1.2.1 Генератори синусоїдальних коливань

Дана група генераторів призначена для отримання коливань синусоїдальної форми необхідної частоти. Їхня робота заснована на принципі самозбудження підсилювача, охопленого позитивним зворотним зв'язком (рис.1.1). Коефіцієнт посилення і коефіцієнт передачі ланки зворотний зв'язок прийняті комплексними, тобто. враховується їхня залежність від частоти. При цьому вхідним сигналом для підсилювача у схемі рис.1.3 є частина його вихідної напруги, що передається ланкою зворотного зв'язку [1-2]

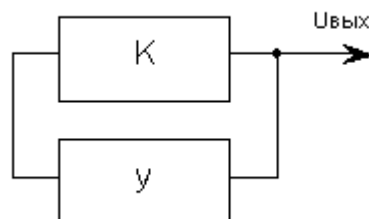


Рисунок 1.3 – Структурна схема генератора

Для порушення коливань у системі рис.1.3 необхідне виконання двох умов. Перше полягає у забезпеченні балансу фаз, яке полягає в тому, щоб фазові зрушення, створювані підсилювачем ланкою зворотного зв'язку, в сумі повинні бути кратними 2π :

$$\varphi_{\gamma} + \varphi_{\gamma} = 2\pi n$$

Друга умова, необхідне виникнення генерації, це умова балансу амплітуд, що випливає із загальної формули для підсилювача, охопленого позитивним зворотним зв'язком $|K| |\mu| \geq 1$:

$$K_c = \frac{K}{1 - K_{\gamma}}$$

При виконанні балансу амплітуд підсилювач компенсує ослаблення сигналу, створюване ланкою зворотного зв'язку, і у схемі виникають стійкі коливання. Для отримання синусоїдальної форми вихідного сигналу використовують кілька способів побудови схем[1-2].

LC-генератори

На рис.1.4 показана схема LC-генератора з трансформаторним зв'язком, який являє собою підсилювальний каскад, виконаний за схемою із загальним емітером. Як колекторне навантаження використовується резонансний LC-контур з високою добротністю[1-2].

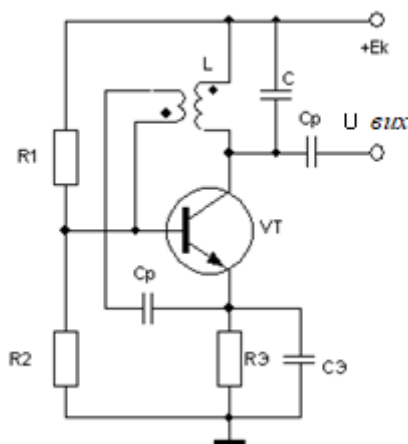


Рисунок 1.4 - Схема генератора з трансформаторним зв'язком

Сигнал зворотного зв'язку знімається з вторинної обмотки резонансного контуру і через розділовий конденсатор C_p подається на базу транзистора забезпечуючи сумарний фазовий рівний зсув (баланс фаз). Якщо прийняти індуктивний зв'язок між первинною (w_1) і вторинною (w_2) ідеальними обмотками, для забезпечення балансу амплітуд необхідно виконати умову:

$$\beta \geq \frac{w_1}{w_2}$$

де β - коефіцієнт посилення струму транзистора, число витків первинної і вторинної обмоток, відповідно. Частота коливань, що генеруються, близька до резонансної частоти коливального контуру:

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

На рис.1.5 представлена схема генератора Колпітца, що часто використовується, виконана на польовому транзисторі. Паралельний LC-контур встановлений на вході та з виходу на вхід через конденсатор C_{OC} подається сигнал зворотного зв'язку. Частота синусоїдальних коливань напруги на виході генератора, як і попередньої схемою, обумовлена параметрами LC-контуру[1-2]..

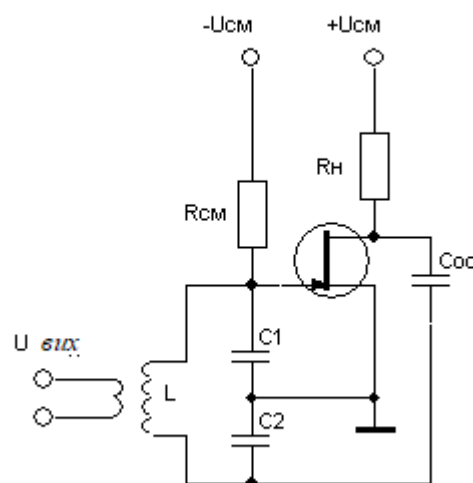


Рисунок 1.5- Генератор Колпітца

Одним з найважливіших параметрів будь-якого генератора є коефіцієнт нестабільності частоти коливань, що генеруються. де абсолютне відхилення частоти від номінального значення f . За рахунок коливань температури та напруги джерела живлення коефіцієнт нестабільності транзисторних LC-генераторів не перевищує десятих часток відсотка[1-2].

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} 100\%$$

1.1.2 Генератори з кварцовою стабілізацією частоти

Істотне зменшення нестабільності генераторів може бути досягнуто за рахунок використання кварцового резонатора, який є особливим чином вирізаною і відшліфованою пластиною натурального або штучного кварцу. Кварц - п'єзоелектрик, тому пружні коливання кристала можуть бути викликані додатком електричного поля, а ці коливання, у свою чергу, генерують напругу на гранях кристала. В цьому випадку кристал поводить ся як RLC-елемент, еквівалентна схема якого наведена на рис.1.6

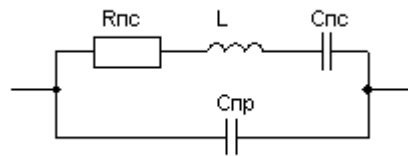


Рисунок 1.6 – Еквівалентна схема заміщення кварцового резонатора

Два конденсатори еквівалентної схеми дають пару близько розташованих резонансних частот – послідовного та паралельного контуру, що відрізняються один від одного не більше ніж на 1%. Загалом кварцовий резонатор веде себе як резонансний контур із високою добротністю (близько 10000) та високою стабільністю параметрів. При включенні резонатора в позитивний зворотний зв'язок і виконання умови балансу амплітуд на частоті резонансної виникають автоколивання[1-2]..

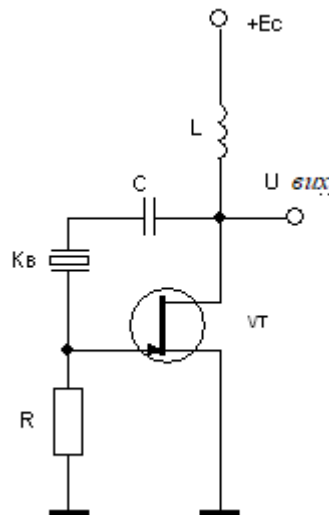


Рисунок 1.6 – Генератор Пірса

На рис.1.5 представлений генератор синусоїдальних коливань на польовому транзисторі, відомий як генератор Пірса. За рахунок кварцового резонатора фаза вихідного сигналу змінюється на 180° , тобто сумарний зсув фази по відношенню до сигналу на затворі досягає, що призводить до виникнення коливань резонансної частоти кварцу. Інша схема (рис.1.7) є аналогом генератора Колпітца (рис.1.5), в якому LC – контур замінений кварцовим резонатором. Наявність кварцового резонатора забезпечує коефіцієнт нестабільності генератора не вище 10^{-6} у діапазоні температур від 0 до 5°C . [1-2].

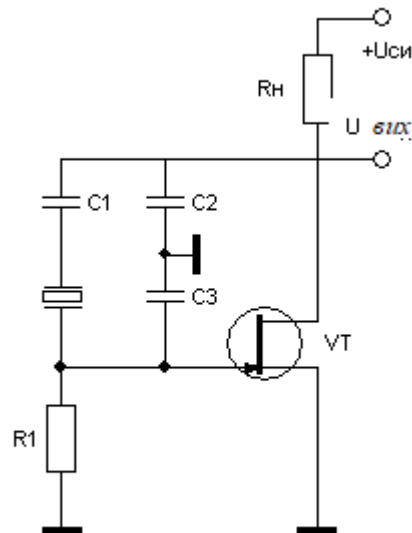


Рисунок 1.7 – Кварцовий генератор Колпітца

Генератори, аналогічні до розглянутих, доцільно використовувати на високих частотах. Це з тим, що з зниження частоти генерації габаритні розміри LC-контурів неприпустимо зростають. Виготовлення кварцових резонаторів на частоти нижче кількох десятків кілогерців також пов'язане із значними технологічними труднощами.

1.2.2 RC генератори

У генераторах цього балансу фаз досягається з допомогою спеціальної фазосдвигаючої RC-ланцюга, встановлюваної ланцюга зворотний зв'язок. Схема найпростішого RC-генератора на транзисторі наведена на рис.1.8. Трьохланковий RC-ланцюг на частоті квазірезонансу забезпечує зсув фази, що дорівнює 180° . Схема із загальним емітером, на якій зібраний генератор, змінює фазу сигналу на виході 0° , тобто. сумарний фазовий зсув дорівнює 0° , рахунок чого виконується умова балансу фаз. За умови $C_1 = C_2 = C_3 = C$ і $R_3 = R_4 = R_{вх_{VT}} = R$ коефіцієнт передачі триланкового RC-ланцюга дорівнює приблизно $1/29$, тому, якщо коефіцієнт посилення транзисторного каскаду $K_{IN} < 29$ у схемі виникають коливання з частотою

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

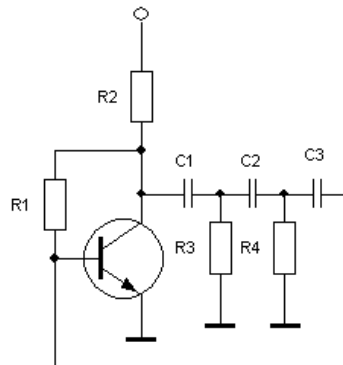


Рисунок 1.8 – RC-генератор на транзисторі

Не дивлячись на простоту схеми, даний генератор знаходить обмежене застосування в практичних пристроях. Це з тим, що коефіцієнт нелінійних спотворення вихідної напруги може досягати 10% а стабільність частоти недостатня. Слід зазначити, що у схемі рис.1.9 можна деяких межах змінювати частоту генерації. Для цього послідовно з резистором R3 встановлюють змінний опір[1-2]..

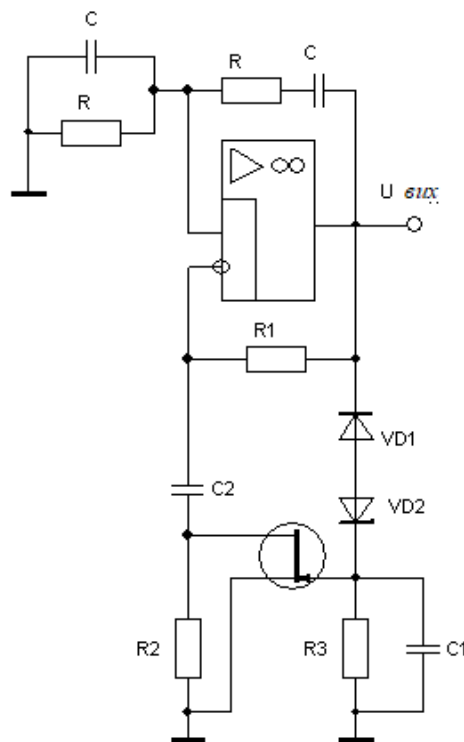


Рисунок 1.9 – RC-генератор із мостом Вина

Найбільш часто для побудови RC-генераторів використовується міст Вина, який не має фазового зсуву на частоті квазірезонансу, а коефіцієнт передачі на цій частоті дорівнює $1/3$. На рис.1.9 наведено генератор синусоїдальних коливань на основі моста Вина. Він є неінвертуючим підсилювачем з коефіцієнтом посилення $(1+R1/R2)$, на неінвертуючий вхід якого подається сигнал з моста Вина. Так як фазовий зсув моста Вина дорівнює нулю, у схемі забезпечується баланс фаз. Для забезпечення балансу амплітуд коефіцієнт посилення неінвертуючого підсилювача має бути $K>3$. Виконання цієї умови призводить до виникнення автоколивань у схемі на частоті. Особливістю даного генератора є необхідність досить точно підтримувати величину коефіцієнта посилення підсилювача. При зменшенні коефіцієнта посилення коливання згасають, зі збільшенням – амплітуда вихідної напруги починає зростати, до насичення вихідних каскадів підсилювача, що зумовлює спотворення форми вихідного сигналу. Для підтримки синусоїдальної форми вихідної напруги у схемі рис.1.8 передбачено ланцюг автоматичного регулювання посилення (АРУ). Активним елементом АРУ є польовий транзистор, включений паралельно резистору $R2$. Транзистор працює у режимі регульованого резистора. На затвор транзистора подається випрямлена та згладжена напруга з виходу генератора. При збільшенні вихідної напруги транзистор підзапирається, його опір "стік-витік" зростає, що шунтує дію транзистора зменшується, що призводить до зменшення коефіцієнта посилення підсилювача, а значить і відновлення вихідного значення амплітуди сигналу на виході генератора. Зменшення амплітуди вихідної напруги має зворотню дію. Наявність глибокого негативного зв'язку у схемі забезпечує високу стабільність підсилювальної ланки у RC-генераторі. Тому температурна нестабільність частоти генераторів визначається в основному залежністю від температури параметрів елементів RC-ланки зворотного зв'язку. Тому в практичних схемах цього виду можна отримати значення коефіцієнта нестабільності на рівні U . У багатьох випадках при практичному застосуванні RC-генераторів синусоїдальних коливань

виникає завдання регулювання частоти. При побудові генераторів з регульованою частотою слід враховувати той факт, що зміна хоча б одного із частотоздатних елементів змінює умову виникнення генерації, що може призвести до зриву коливань. З огляду на це у схемі рис.1.10 регулювання частоти пов'язані з певними труднощами, оскільки за зміни величини резистора R3 потрібно коригування коефіцієнта посилення транзисторного підсилювача. Однак, зміна опору R1 змінює вхідний опір транзисторного каскаду, а зміна колекторного навантаження R2 може призвести до зміни параметрів робочої точки транзистора та його переходу в нелінійний режим роботи. Це обмежує практичне використання генератора рис.1.10 у схемах із регульованою частотою.

У генераторі на основі моста Вина умова стійкої генерації полягає в тому, щоб коефіцієнт посилення сигналу по ланцюгах позитивного і негативного зворотного зв'язку дорівнював одиниці на будь-якій частоті. Тому при зміні частоти коливань вихідної напруги у генераторах необхідно використовувати здвоєний потенціометр (або конденсатор). Однак використання здвоєних регулюючих елементів має певні незручності. У схемі рис.1.10 потенціометр R2 є одним з елементів моста Вина та його регулювання змінює частоту генерації відповідно до виразу[1-2].

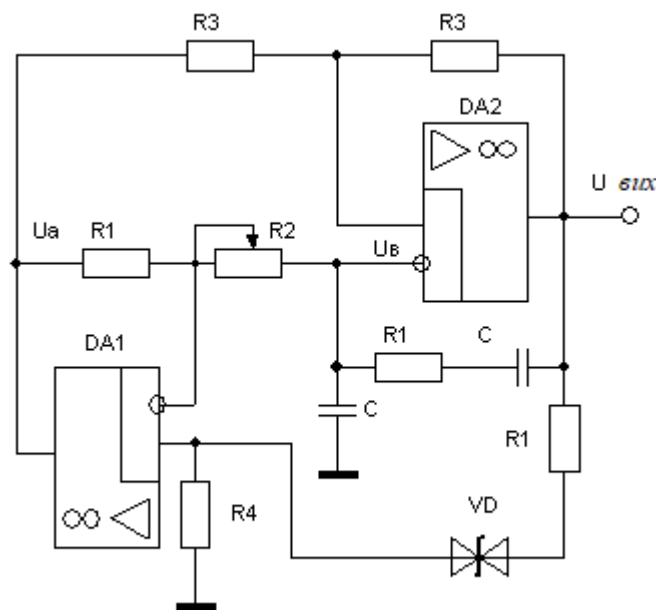


Рисунок 1.10 Схемарегулювання частоти генератора

Одночасно R_2 є вхідним резистором інвертуючого підсилювача на DA_1 , який формує сигнал негативного зворотного зв'язку U_a на вхід операційного підсилювача DA_2 . Наприклад, при зменшенні R_2 збільшується частота коливань і одночасно зменшується сигнал позитивного зворотного зв'язку U_b на вході DA_2 , що не інвертує.

Отже, метою дипломної роботи є дослідження і розробка генератора стоячих хвиль високої потужності

Для досягнення мети у роботі потрібно виконати такі завдання:

- 1) на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну схему генератора стоячих хвиль;
- 2) розробити структурну схему пристрою;
- 3) провести моделювання фільтруючого каналу генератора;
- 4) розглянути можливість удосконалення схеми генератора та розширення частотного діапазону генерації;
- 4) розробити заходи із норм дотримання умов безпеки праці та техногенної безпеки.

2. Розробка генератора стоячих хвиль високої потужності

2.1 Структурна схема генератора стоячих хвиль високої потужності

У якості структурної схеми була обрана схема, представлена на рисунку 2.1.

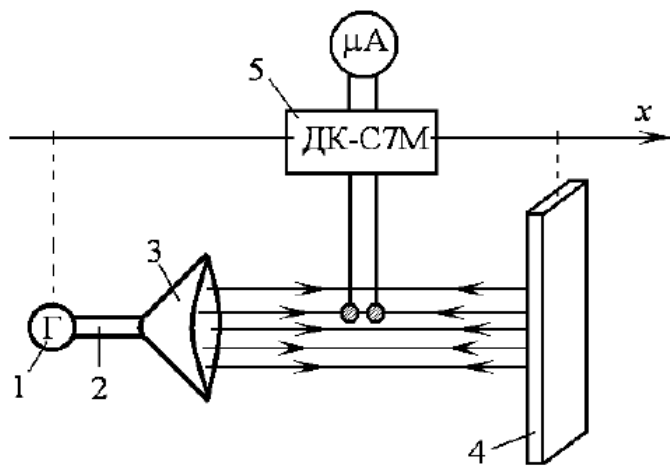


Рисунок 2.1 – Структурна схема генератора стоячих хвиль високої потужності

Структурна схема включає: 1- генератор, 2- хвилевід. 3 – підсилювач сигналу, 4- відбивач резонатора. У якості контролю параметрів стоячих хвиль використовується детектор типу ДК-С7М [3-5].

2.2 Основні структурні блоки генератора стоячих хвиль високої потужності

2.2.1 Генератор

У роботі пропонується використати генератор із широким діапазоном генерації хвиль [12]. Параметри по діапазнам представлені у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Діапазони генерації хвиль

Діапазон	Частота, МГц	Напруга, мВ
ДХ1	0,058 - 0,214	40...70
ДХ2	0,185 - 0,726	
СХ	0,56 - 2,33	53...120
КХ1	2,05 - 3,4	110...150
КХ2	2,9 - 4,8	
КХ3	4,8 - 8,3	
КХ4	7 - 12	
КХ5	11,9 - 20,7	
КХ6	17,7 - 32 35,5 - 38,5	
НКХ1	37 - 57,5 65 - 72	150...210
НКХ2	70 - 82	
	94 - 108	

Точність установки частоти генератора - не гірше ± 2 кГц на частоті 10 МГц і ± 10 кГц на частоті 100 МГц. Її відхід за годину роботи (після годинного прогріву) не перевищує 0,2 кГц на частоті 10 МГц і 10 кГц на частоті 100 МГц. У тій же таблиці наведено максимальні ефективні значення вихідної напруги в кожному діапазоні. Нелінійність шкали мілівольтметра - не більше 20 %. Напруга живлення - 7,5...15 В. Схема генератора сигналів наведена на рисунку 2.4

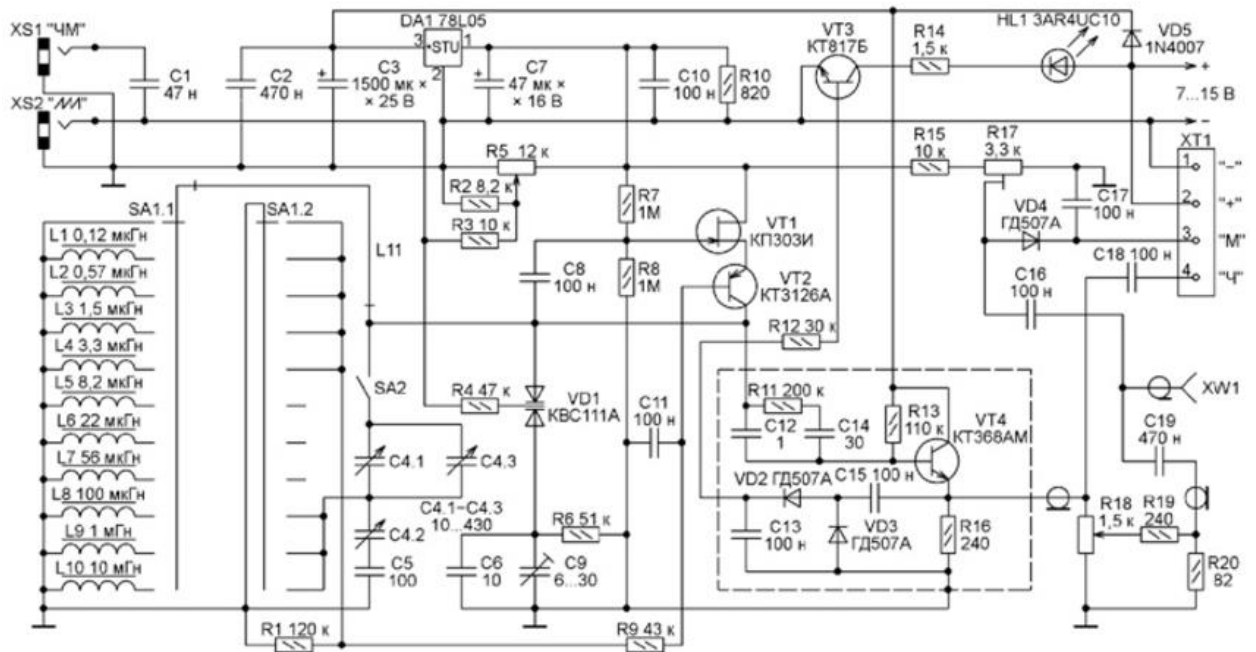


Рисунок 2.4 – Схема генератора сигналів

Зазвичай генератори з двоточковим підключенням коливального контуру, здатні працювати на частоті понад 100 МГц, у середньохвильовому діапазоні генерують радше спотворений меандр, ніж синусоїду. Для зменшення спотворень потрібна значна зміна режимів роботи активних елементів генератора залежно від частоти. Сигнал застосованого в описуваному пристрої задавального генератора з увімкненими послідовно за постійним струмом польовим і біполярним транзисторами має набагато менші спотворення. Їх можна знижувати, регулюючи режим роботи лише біполярного транзистора.

На низькочастотних діапазонах режим роботи транзистора VT2 задано включеними послідовно резисторами R1 і R9. З переходом на високочастотні діапазони перемикач SA1.2 замикає резистор R1. Для збільшення крутизни характеристики польового транзистора VT1 на його затвор подано постійне зміщення, що дорівнює половині напруги живлення. Напруга живлення задавального генератора стабілізована інтегральним стабілізатором DA1. Резистор R10 слугує мінімальним навантаженням стабілізатора, без якого його вихідна напруга засмічена шумом.

Як котушки індуктивності L1-L10 задавального генератора використано дроселі промислового виробництва. Їх комутує перемикач SA1.1. У діапазоні УКВ2 індуктивністю L11 слугує відрізок дроту завдовжки приблизно 75 мм, що з'єднує перемикач із друкованою платою.

Відхилення фактичної індуктивності дроселя від номінальної може бути доволі значним, тому межі діапазонів обрано з деяким перекриттям, щоб унеможливити їх трудомістке укладання. Зазначені в таблиці межі діапазонів отримано без будь-якого підбору дроселів. Переважно застосовувати дроселі великого розміру, стабільність індуктивності яких (отже, і генерованої частоти) вища, ніж у малогабаритних.

Для перебудови частоти в приладі використано трисекційний конденсатор змінної ємності з редуктором. Щоб його корпус не мав електричного контакту з корпусом приладу, він закріплений усередині нього через ізолюючу прокладку. Це дало можливість увімкнути одну секцію конденсатора послідовно з двома іншими з'єднаними паралельно. Так реалізовано розтягнуті КХ-діапазони. У діапазонах ДХ, СХ1 і СХ2, де потрібне велике перекриття за частотою, перемикач SA1.2 з'єднує корпус змінного конденсатора із загальним проводом. У діапазонах КХ6, НКХ1 і НКХ2 передбачено відключення конденсатора змінної ємності вимикачем SA2. Коли вимикач замкнений, частота стійкої генерації не перевищує 37 МГц.

Паралельно змінному конденсатору під'єднано ланцюг із варикапної матриці VD1, конденсаторів С6, С9 і резистора R6, який слугує частотним модулятором, електричним верньєром, а в разі вимкненого змінного конденсатора - основним елементом налаштування. Оскільки амплітуда високочастотної напруги на коливальному контурі досягає декількох вольт, з'єднані зустрічно-послідовно варикапи матриці вносять набагато менші спотворення, ніж вносив би одиночний варикап. Напруга налаштування на варикапи матриці VD1 надходить зі змінного резистора R5. Резистор R2 дещо лінеаризує шкалу налаштування.

Сигнал частотної модуляції генератора подають на роз'єм XS1 від будь-якого зовнішнього джерела. Під час налаштування і перевірки АМ-радіоприймача перетворення частотної модуляції в амплітудну відбувається в ньому самому за рахунок нерівномірності частотної характеристики додетекторної частини приймального тракту. Спостерігати АМ-сигнал можна на останньому контурі ПЧ приймача за допомогою осцилографа. На роз'єм XS2 під час використання приладу як генератора хитної частоти подають пилкоподібну напругу.

Генератор, що задає, пов'язаний з вихідним повторювачем на транзисторі VT4 через конденсатор C12, гранично мала ємність якого зменшує вплив навантаження на частоту, що генерується, та зниження амплітуди вихідної напруги на частоті вище 30 МГц. Для часткового усунення зниження амплітуди на низькій частоті конденсатор C12 зашунтовано ланцюгом R11C14. Простий емітерний повторювач з високим вихідним опором на біполярному транзисторі виявився найбільш підходящим рішенням для такого широкосмугового приладу. Вплив навантаження на частоту можна порівняти з витоким повторювачем на польовому транзисторі, а залежність амплітуди від частоти набагато менша. Застосування додаткових буферних ступенів тільки погіршувало розв'язку. Для забезпечення гарної розв'язки в діапазонах ДХ-КХ транзистор VT4 повинен мати високий коефіцієнт передавання струму, а в діапазонах НКХ - гранично малі міжелектродні ємності.

Вихід повторювача з'єднаний із затискачем XT1.4, призначеним здебільшого для підключення частотоміра, що призводить до деякого зниження вихідної напруги. Внутрішній опір цього виходу на КХ-діапазонах - близько 120 Ом, вихідна напруга понад 1 В. На діодах VD2, VD3, транзисторі VT3 і світлодіоді HL1 реалізовано індикатор наявності ВЧ-напруги на виході повторювача.

З движка змінного резистора R18, що слугує регулятором вихідної напруги, сигнал надходить на дільник R19R20, який, окрім додаткової

роз'язки генератора і навантаження, забезпечує вихідний опір коаксіального виходу (роз'єм XW1) на КХ-діапазонах, близький до 50 Ом. На НКХ він знижується до 20 Ом.

Відхід частоти під час зміни положення рушія R18 з верхнього за схемою положення в нижнє досягає 70...100 кГц на частоті 100 МГц без навантаження, а в разі під'єданого навантаження 50 Ом - не більше 2 кГц (на тій самій частоті).

Для вимірювання вихідної напруги на роз'ємі XW1 передбачено детектор, виконаний на резисторах R15, R17, діоді VD4 і конденсаторі C17. Разом із зовнішнім цифровим вольтметром або мультиметром у режимі вольтметра, під'єднаним до контактів ХТ 1.3 (плюс) і ХТ1.1 (мінус), він утворює мілівольтметр ефективного значення вихідної напруги генератора. Для отримання більш лінійної шкали на діод VD4 подана постійна напруга зміщення 1 В, яку встановлюють багатооборотним підлаштуванням резистором R17.

Зовнішній вольтметр повинен мати межу вимірювання 2 В. У цьому випадку в старшому розряді його індикатора буде постійно виведена одиниця, а в молодших розрядах - виміряна вихідна напруга в мілівольтах. Мінімальна вимірювана напруга - близько 20 мВ. Вище 100 мВ показання будуть дещо завищені. При напрузі 200 мВ похибка доходить до 20 %.

Живлять генератор від стабілізованого джерела постійної напруги 7...15 В або від акумуляторної батареї. У разі нестабілізованого блоку живлення генерований високочастотний сигнал неминуче буде модульований частотою 100 Гц.

Стабільність параметрів генератора залежить від ретельної установки елементів на плату. Більшість деталей встановлено на друкованій платі з фольгованого з двох боків ізоляційного матеріалу, зображений на рисунку 2.5.

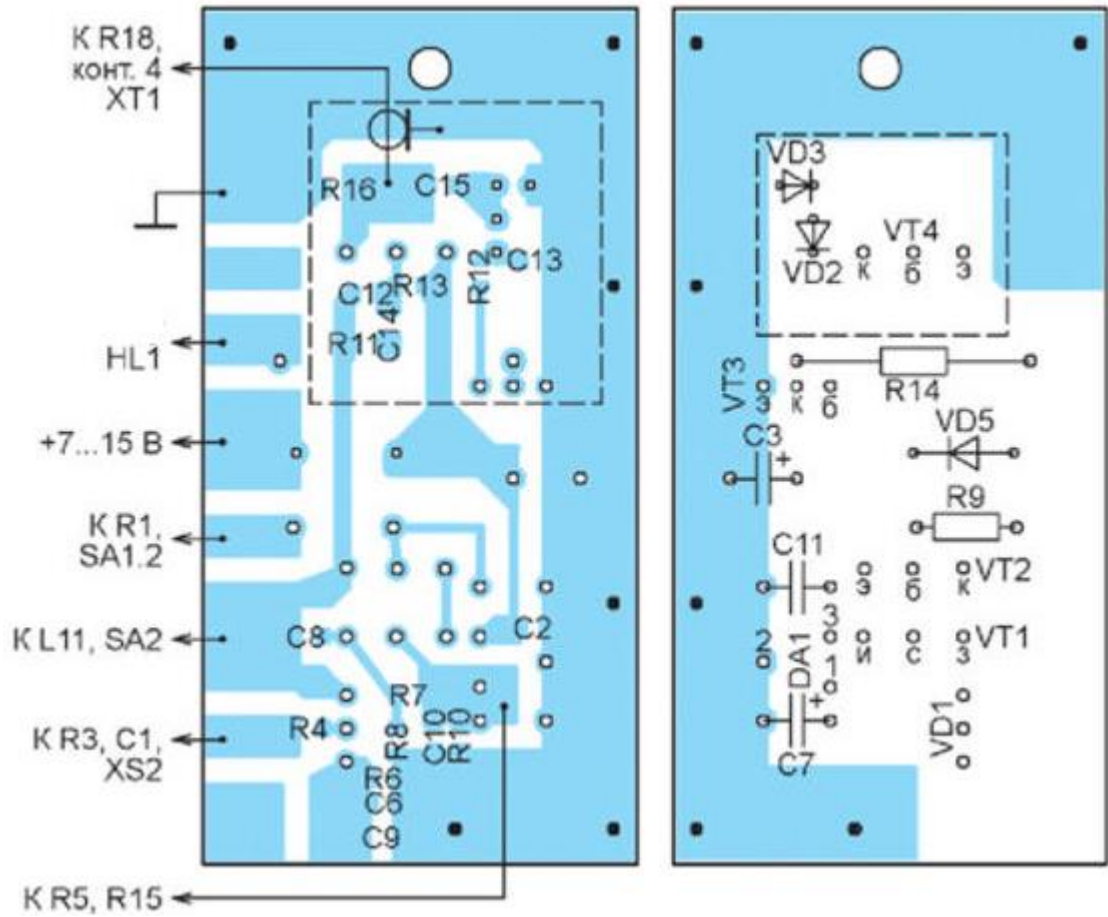


Рисунок 2.5 – Розташування елементів генератора на друкованій платі
Друкована плата представлена на рисунку 2.6.

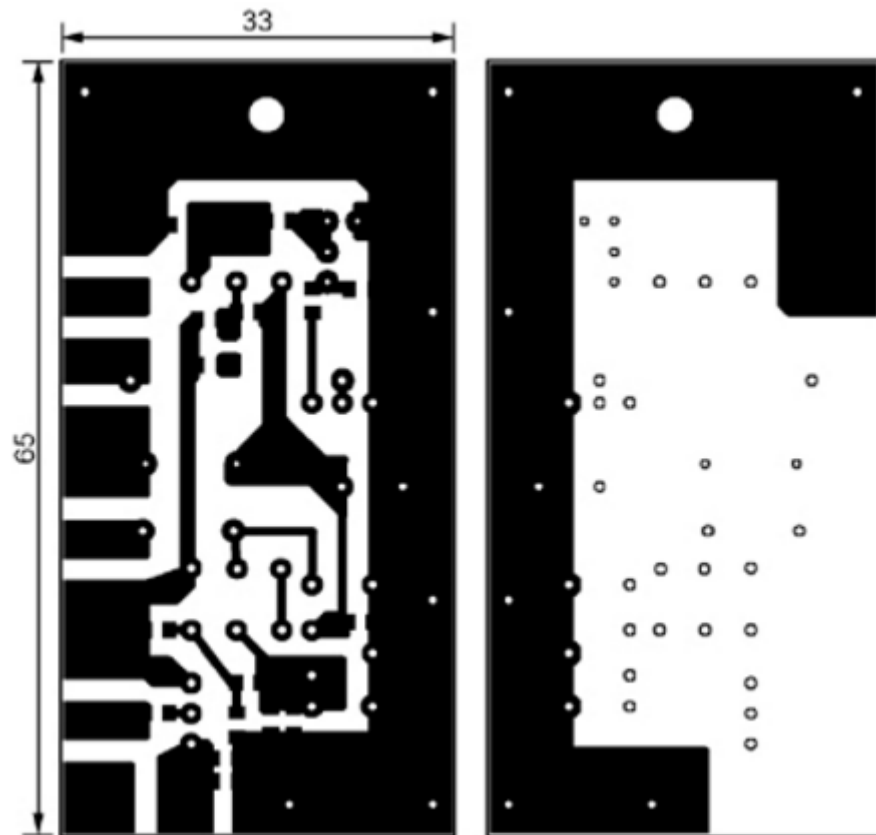


Рисунок 2.6 – Друкована плата генератора

Майданчики фольги загального дроту з двох боків плати з'єднують між собою дротяними перемичками, впаяними в отвори, що показані залитими. Елементи вихідного повторювача після монтажу закривають з двох боків плати металевими екранами, контури яких показані штриховими лініями. Ці екрани мають бути надійно, пайкою по периметру, з'єднані з фольгою загального дроту. В екрані, що знаходиться з боку друкованих провідників, над контактним майданчиком, з яким з'єднаний емітер транзистора VT4, зроблено отвір, крізь який проходить припаяний до цього майданчика мідний штир. Надалі до нього припаюють центральну жилу коаксіального кабелю, що йде до змінного резистора R18 і конденсатора C18. Обплетення кабелю з'єднують з екраном повторювача.

У генераторі застосовано переважно постійні резистори і конденсатори для поверхневого монтажу типорозміру 0805. Резистори R19 і R20 - МЛТ-0,125. Конденсатор С3 - оксидний з низьким ЕРС, С7 - оксидний танталовий К53-19 або аналогічний. Котушки індуктивності L1-L10 - стандартні дроселі, переважно вітчизняні серій ДПМ, ДП2. Порівняно з імпортними, вони мають значно менше відхилення індуктивності від номінальної та більшу добротність.

За відсутності дроселя потрібного номіналу котушку L10 можна виготовити самостійно, намотавши вісім витків дроту діаметром 0,08 мм на резистор МЛТ-0,125 опором не менше 1 МОм. Як індуктивність L11 застосовано відрізок жорсткого центрального дроту від коаксіального кабелю довжиною близько 75 мм.

Трисекційні конденсатори змінної ємності з редуктором надзвичайно поширені, але якщо такого немає, можна застосувати і двосекційний. У цьому разі корпус конденсатора з'єднують із корпусом приладу, а кожен секцію під'єднують через окремий вимикач, причому одну із секцій - через розтягувальний конденсатор. Керувати приладом з таким змінним конденсатором помітно складніше.

Перемикач SA1 - ПМ 11П2Н, також застосовні аналогічні перемикачі серії ПГЗ або П2ГЗ. Вимикач SA2 - МТ1. Змінний резистор R18 - СПЗ-96, причому замінювати його змінним резистором іншого типу не рекомендується. Якщо змінного резистора зазначеного на схемі номіналу не знайшлося, то можна замінити його на той, що має менший номінал, але водночас потрібно збільшити опір резистора R16 так, щоб загальний опір паралельно з'єднаних резисторів R16 і R18 залишився незмінним. Змінний резистор R5 - будь-якого типу, R17 - багатооборотний підлаштування 3296.

Діоди ГД407А можна замінити на ДЗ11, Д18, а діод 1 N4007 - на будь-який випрямний. Замість варикапної матриці КВС111А допускається застосувати КВС111Б, замість 3AR4UC10 - будь-який світлодіод червоного світіння.

Задавальний генератор малочутливий до типів застосованих транзисторів. Польовий транзистор КП303І може бути замінений на КП303Г-КП303Ж, КП307А-КП307Ж, а з коригуванням друкованої плати - на ВF410В-ВF410D, КП305Ж. Для транзисторів із початковим струмом понад 7 мА резистор R7 не потрібен. Біполярний транзистор КТ3126А можна замінити будь-яким НВЧ-транзистором структури р-п-р з мінімальними міжелектродними ємностями. Як заміну транзистора КТ368АМ можна рекомендувати SS9018І.

Роз'єм ХW1 - типу F. У нього легко вставляється будь-який кабель, а за необхідності можна просто вставити дріт. Затискна колодка ХТ1 - WP4-7 для підключення акустичних систем. Роз'єми ХS1 і ХS2 - стандартні монофонічні гнізда під штекер діаметром 3,5 мм.

2.2.2 Детектор електро-магнітних стоячих хвиль

У якості детектора стоячих хвиль у роботі пропонується застосувати схему, представлену на рисунку 2.2.

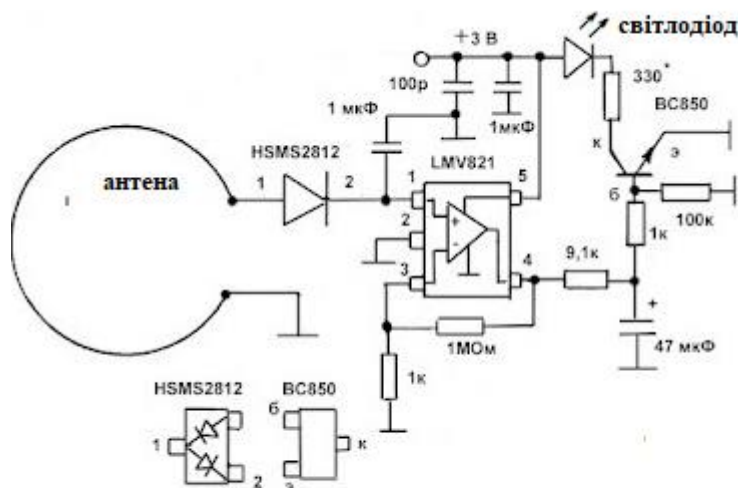


Рисунок 2.2 – Електрична схема детектора генератора стоячих хвиль.

Схема представляє собою індикатор НВЧ із аналоговим вимірювачем рівня. На схемі три операційні підсилювачі (ОП) постійного струму з різним коефіцієнтом посилення, реалізовані на 3-х каскадах, які можна замінити 4-х каскадним, використовуючи мікросхему LMV824 (4-і ОП в одному корпусі). Застосувавши живлення від 3 до 4,5 вольт можна обійтися без ключового каскаду на транзисторі. Таким чином, можна використати одну мікросхему, нвч діод (типу 608А або ДКС7М) і 4 світлодіода. Враховуючи умови сильних електромагнітних полів, в яких буде працювати індикатор, доцільно застосувати по всіх входах, ланцюгах зворотного зв'язку і живлення ОУ блокувальні і конденсатори, що фільтрують. У включеному стані на всіх виводах мікросхеми, крім п'ятого, напруга повинна дорівнювати 0. Якщо ця умова не виконана, з'єднується перший вивід мікросхеми через резистор 39 кОм з мінусом (землею).

2.3 Моделювання фільтрів нижніх та верхніх частот генератора високочастотних коливань

2.3.1 Моделювання фільтра нижніх частот генератора високочастотних коливань

Важливим питанням нормального функціонування генератора високих коливань є необхідність відсікати завади, які надходять від гармонік, що збуджуються додатковими частотами коливань. Для цього в роботі промодельовано можливість додаткового застосування фільтрів нижніх та верхніх частот. На рисунку 2.3 представлено схему модель активного фільтра нижніх частот.

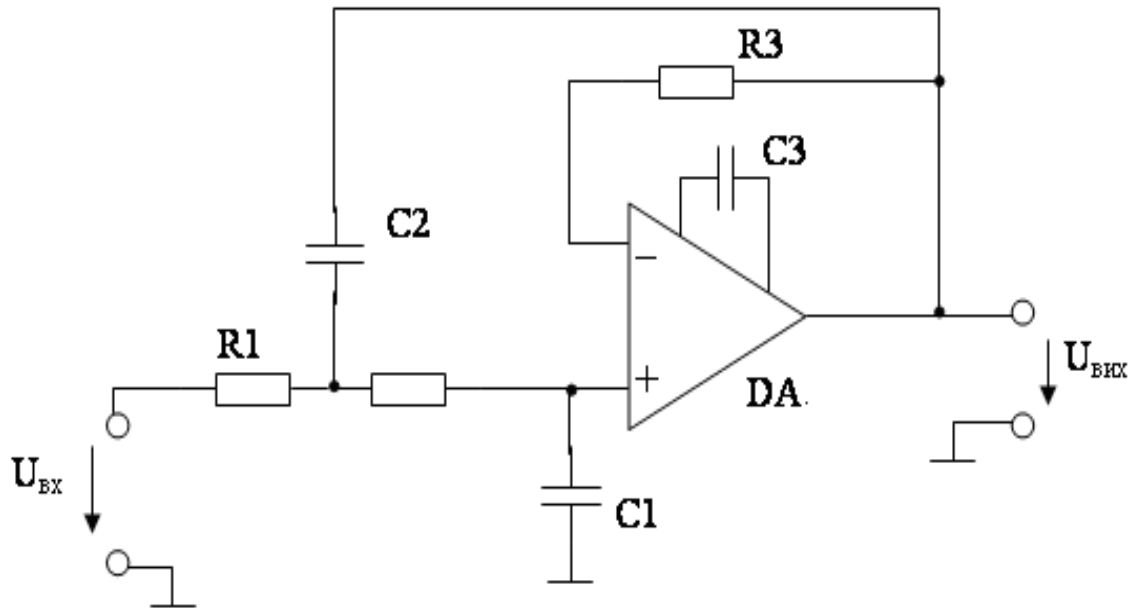


Рисунок 2.3 – Схема моделі активного фільтра нижніх частот

Аналіз функціонування схеми із застосуванням комп'ютерної програми Мігросар 5.0 представлено на рисунку 2.4 [4-7].

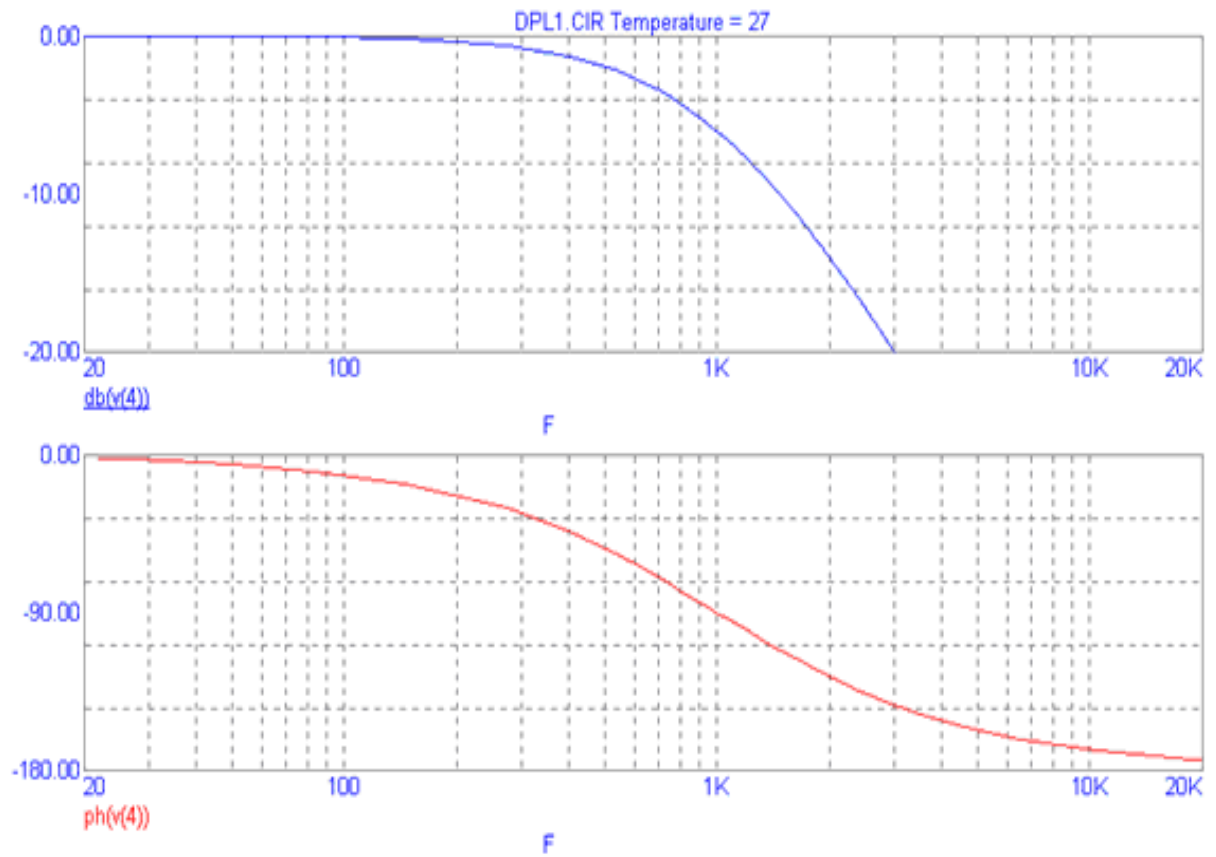


Рисунок 2.4 – АЧХ та ФЧХ активного ФНЧ

2.3.2 Моделювання фільтра верхніх частот генератора високочастотних коливань

На рисунку 2.5 представлено схему модель активного фільтра нижніх частот[4-7].

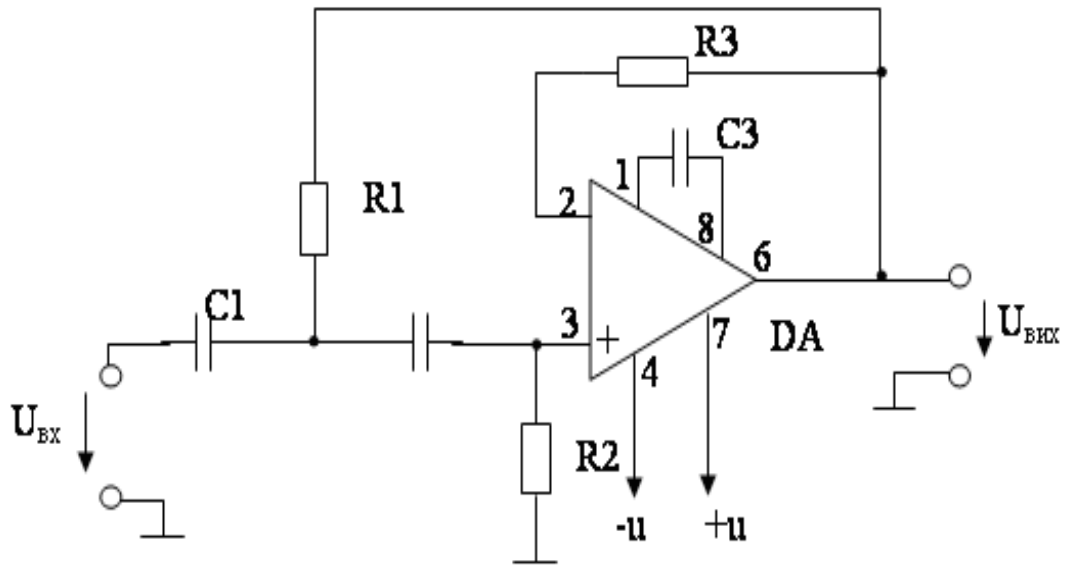


Рисунок 2.5 - Схема моделі активного фільтра верхніх частот

На рисунку 2.6 представлено аналіз функціонування схеми активного фільтра нижніх частот

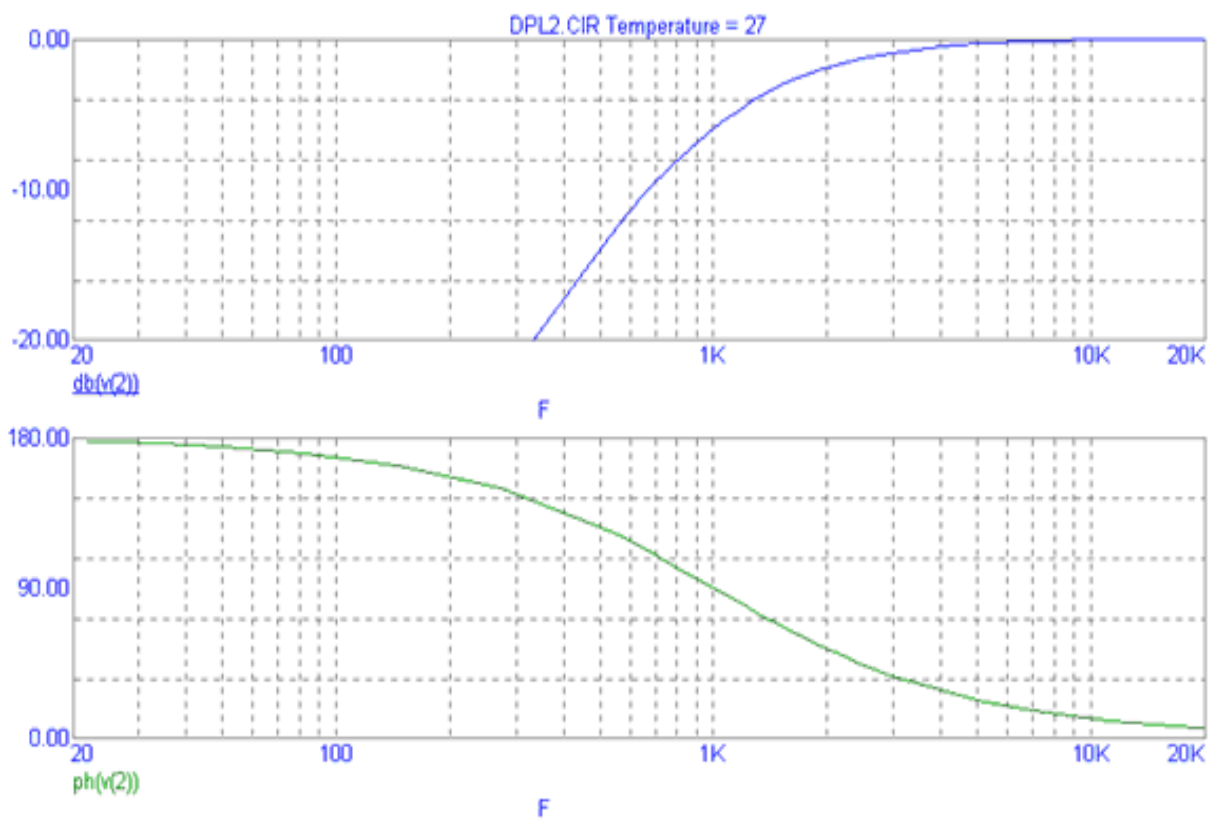


Рисунок 2.6 – АЧХ та ФЧХ активного ФВЧ

2.4 Подальше вдосконалення схеми генератора

Для подальшого вдосконалення схеми генератора шуму пропонується використати Генератор електромагнітного випромінювання з перебудовуваною частотою в діапазоні стимульованого рентгенівського випромінювання і отримання більш високих частот з виходом на режим випромінювання в діапазоні гамма-частот, що містить газорозрядну камеру, заповнену газовим середовищем, здатною до вимушеного розсіювання Мандельштамма-Бріллюена, торцевих сторін одна променевідбивна пластина спрямована опуклою поверхнею в центр газорозрядної камери, а інша спрямована увігнутою поверхнею в центр газорозрядної камери, на площах яких усередині секцій у центрі цих променевідбивних пластин змонтовані термоспіралі-керуючі катоди, а всередині газорозрядна камера розділена двома по осі камери на дві секції, причому ці променевідбивні пластини закріплені на зовнішній поверхні керамічної трубки і спрямовані своїми увігнутими сторонами до торців газорозрядної камери і на їх площах змонтовані структури розрядників, а на торцевих сторонах самої керамічної трубки закріплені кільцеві електроди цьому керуючі катоди для двох секцій підключені до джерела живлення з регулюванням розжарення через реостат, або через трансформатор. Схему генератора представлено на рисунку 2.7

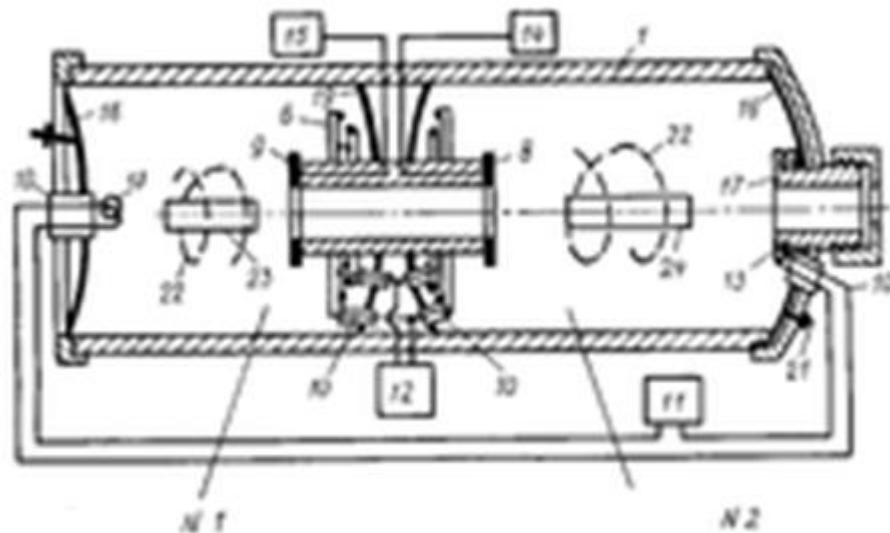


Рисунок 2.7 вкористати Генератор електромагнітного випромінювання з перебудовуваною частотою стимульованого випромінювання

Генератор електромагнітного випромінювання з частотою, що перебудовується, в діапазоні стимульованого рентгенівського випромінювання функціонує на принципі газорозрядного пристрою із поздовжнім ефектом Доплера для групи атомів, що рухаються в одному напрямку, і навпаки, посилення поздовжнього ефекту Доплера для групи атомів, що рухаються з протилежно і компенсації поперечного ефекту доплера за рахунок розсіювання атомів коротким імпульсом стоячої світлової хвилі для уповільнення процесів коливальних рухів атомів (зменшити ефект віддачі) і збереження анізотропії напрямку руху іонів, і отримання спрямованого надвипромінювання на умовах утворення квазіавтоколивальних процесів і дисперсії, і солітонів у зв'язаних хвилях з урахуванням ВРМБ, причому для посилення рентгенівського випромінювання за рахунок утворення оптичних солітонів затінення (солітонів з негативною енергією), а для посилення гамма-випромінювання іонно-звукових солітонів затінення, що включає джерела спрямованого монохроматичного випромінювання в оптичному, який відрізняється тим, що газорозрядна камера, заповнена газовим середовищем, здатною до вимушеного розсіювання Мандельштам-Брілюена (ВРМБ) [8-10], розділена променевідбиваючою пластинною з отвором по осі газорозрядної

камери на дві секції, причому на цій променевво-відбиваючої пластини в її центральній поверхні променевідбивної пластини змонтована термоспіраль - керуючий катод, а з торцевих сторін газорозрядна камера обладнана променевідбиваючими пластинами опукло-сферичної форми і своїми увігнутими поверхнями спрямовані до центру газорозрядної камери, і на поверхні яких всередині секцій змонтовані структури розрядників, підключені П-подібна високовольтна напруга, а в центрі променевідбиваючої пластини з однієї з торцевих сторін газорозрядної камери через ізолятор виведений всередину секції №1 керуючий електрод-анод першої секції, представленої пластиною, встановленої перпендикулярно осі газорозрядної камери, а з іншого торцевої сторони газорозрядної камери променевідбивної пластини є отвір, обладнане керамічною трубкою, на торці якої змонтований керуючий електрод-анод другої секції кільцевої форми, причому променевідбивна пластина, що розділяє газорозрядну камеру на дві секції, також виконана опукло-сферичної форми і спрямована своєю увігнутою поверхнею в опуклою поверхнею в секцію №2, термоспіраль-керуючий катод для двох секцій підключена до джерела живлення з регулюванням струму розжарення, а керуючі електроди кожної секції підключені до самостійних пристроїв, що забезпечують роботу електродів, що управляють, в режимі поперемінного включення негативної напруги з регулюванням за частотою і за часом дії.

Корпус 1 газорозрядної камери виконаний циліндричної форми та виготовляється зі скла або кераміки, променевідбиваючі пластини 2, 4, 5 виготовлені з металу опукло-сферичної форми (штамбування). В отвір променеотражаючої пластини 2 вмонтована керамічна трубка 3, на виступаючу частину якої, що знаходиться всередині секції №1 і секції №2, намотана і закріплена термоспіраль 13 (за конструкцією прямий катод) і представлена як керуючий катод (для секції №1 і №2), з'єднана з джерелом живлення 11, який представлений трансформатором розжарення через регулюючий пристрій струмом розжарення або реостатом, або через

регулювання напруги, що надходить на трансформатор розжарення. Вимоги до катода та джерела живлення ті ж, що й у газотронах: вольфрамова спіраль, низька напруга та високий струм. На увігнутих поверхнях променевідбивних пластин 4, 5 через ізолятори 10 кріпляться структури розрядників 6, підключені до пристрою 12, що забезпечує високовольтну напругу прямокутними імпульсами. Пристрій 12 може бути представлений трансформатором малої розгортки, але обов'язково забезпечувати подачу імпульсів прямокутної форми і забезпечувати на розрядниках випромінювання в сантиметровому діапазоні НВЧ-випромінювання. У центрі на осі променевідбивна пластина 4 обладнана ізолятором 10, через який проходить провід і прикріплений до керуючого анода 8 секції №1 і представлена круглою пластиною діаметром, рівним діаметру внутрішнього кола керамічної трубки 3. Керуючий електрод 8 з'єднаний з пристроєм 14, представлений одноперіодного випрямлення, включеного в ланцюг змінного струму за допомогою газотрону з фільтром, що шунтує, і конденсатором, що гасить позитивну напругу (див. /21/). У променеотражаючій пластині 5 по осі є отвір, який жорстко вмонтована керамічна трубка 7 і є ізолятором, і на торці цієї трубки змонтований керуючий електрод 9 для секції №2 і представлений кільцевою пластиною, з'єднаною з пристроєм 15. Пристрій 15, напруги на керуючому електроді 9 представлено схемою випрямляча з використанням тиратрону, які застосовуються в ланцюгах змінного струму з частотою до 10 кГц (див. /21/). Змінюючи частоту напруги живлення, змінюється відповідно і час роботи електродів 8, 9. Секція №1 визначена конструкцією генератора електромагнітного випромінювання з частотою стимульованого випромінювання в оптичному діапазоні. Секція №2 визначена конструкцією генератора електромагнітного випромінювання з частотою стимульованого випромінювання, що перебудовується, у високочастотному акустичному діапазоні. 22 - Самостійний розряд зі стримером у вигляді спірального витка. 23 - плазмовий стовпчик, утворений

стиском плазми швидко наростаючим магнітним полем у стримері самостійного розряду 22.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) розроблено структурну схему генератора стоячих хвиль високої потужності із широким діапазоном переналаштовуваної частотия;

2) у якості детектора електромагнітних виль використано індикатор НВЧ із аналоговим вимірювачем рівня на мікросхемі LMV824 (4-і ОП в одному корпусі). Застосувавши живлення від 3 до 4,5 вольт можна обійтися без ключового каскаду на транзисторі. Таким чином, можна використати одну мікросхему, або її закордонний аналог MC33174.

3) розроблено моделі основних функціональних вузлів блоку фільтрів для багатосмугових підсилювачів низької та високої частоти;

4) проведено моделювання блоку фільтрів для багатосмугових підсилювачів низької частоти в редакторі Мігросар 5.0, яке показало достатньо стабільні показники параметрів керування схемою;

5) запропоновано подальше удосконалення схеми генератора на із застосуванням газорозрядного пристрою із поздовжнім ефектом Доплера, що дасть можливість розширити діапазон генерації частоти майже до рентгенівського діапазону.

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці генератора стоячих хвиль високої потужності

3.1 Характеристика потенційних шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Під час роботи на виробництві на людину можуть впливати один, або низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Безпека того чи іншого технологічного процесу може бути визначена за їх кількістю і за ступенем небезпеки кожного з них зокрема. Безпека праці на виробництві визначається ступенем безпеки окремих технологічних процесів.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються на фізичні, хімічні, біологічні й психофізіологічні. Останні за характером впливу на людину підрозділяються на фізичні й нервово-психічні перевантаження, а інші - на конкретні небезпечні й шкідливі виробничі фактори. До небезпечних виробничих факторів відносяться фактори, вплив яких призводить до травм, до шкідливих – фактори, які спричиняють захворювання [11].

В процесі роботи на підприємстві на працівника можуть впливати такі небезпечні й шкідливі виробничі фактори:

- машини, що рухаються, автотранспорт і механізми;
- рухомі незахищені елементи механізмів, машин і виробничого обладнання;
- падаючі вироби техніки, інструмент і матеріали під час роботи;
- ударна хвиля (вибух посудини, що працює під тиском пари рідини);
- струмені газів і рідин, що стікають, із посудин і трубопроводів під тиском;

- підвищене ковзання (через зледеніння, зволоження й замаслювання поверхонь, по яких переміщується робочий персонал);
- підвищені запыошеність й загазованість повітря;
- підвищена чи знижена температура поверхонь техніки, обладнання й матеріалів;
- підвищена чи знижена температура, вологість і рухомість повітря;
- підвищений рівень шуму, вібрації, ультра- та інфразвука;
- підвищена напруга в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- гострі кромки, задирки й шорсткість на поверхнях обладнання й інструментів;
- відсутність чи нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- знижена контрастність об'єктів в порівнянні з фоном;
- пряма блискість (прожекторне освітлення територій виробництв, світло фар автотранспорту) і відбита блискість (від розлитої води й інших рідин на поверхні територій виробництв);
- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень ультрафіолетової й інфрачервоної радіації;
- хімічні речовини (токсичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні, що впливають на репродуктивну функцію людини);
- хімічні речовини, що проникають в організм через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкірні покриви і слизові оболонки;
- патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, гриби, найпростіші) і продукти їхньої життєдіяльності;
- перевантаження (статичні й динамічні) і нервово-психічні чинники (емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів, розумова перенапруга, монотонність праці).

Рівні небезпечних і шкідливих виробничих факторів не повинні перевищувати граничнодопустимих значень, встановлених у санітарних нормах, правилах і нормативно-технічній документації.

Розглянемо більш детально небезпечні та шкідливі фактори, які характерні для підприємств, що спеціалізуються на виготовленні приладів мікро- та наноелектроніки.

Небезпечні фактори:

1. Балони з киснем. Обладнання, яке працює під тиском, повинне мати запобіжні пристрої, які не допускають підвищення тиску в обладнанні вище дозволеного.

2. Печі. Всі гарячі частини обладнання, трубопроводів, посудин, дотик до яких може викликати опіки, повинні мати теплову ізоляцію.

3. Електричне виробниче обладнання. Рухомі частини виробничого обладнання, до яких можливий доступ працюючих, повинні мати механічні захисні огорожі. Огородження, дверцята і кришки повинні бути забезпечені пристроями для надійного утримання їх в закритому (робочому) положенні і в разі необхідності заблоковані для їх відключення при знятті огороження. Всі електродвигуни, щити, оболонки кабелів повинні мати надійні заземлення, приєднані до стаціонарного корпусу заземлення. При виконанні ремонтних робіт на обертових механізмах кабелі живлення повинні бути від'єднані і на них має бути накладене переносне заземлення [12].

Шкідливі фактори:

1. Підвищений рівень шуму. Шум має шкідливий вплив на організм людини. При його тривалому впливі знижується гострота слуху, змінюється кров'яний тиск, послаблюється увага, погіршується зір, відбувається зміна в дихальних центрах, порушується координація руху. Інтенсивний шум є причиною порушень роботи серцево-судинної системи, нормальної функції шлунку та ряду інших порушень в організмі людини. Оскільки шкідлива дія шуму залежить і від його частотного складу, поріг буде неоднаковим для

різних шумів. Пороги шкідливої дії шуму приймаються за нормативи шуму, тобто за гранично допустимі рівні шуму на виробництві. В якості таких прийняті наступні нормативи: для низькочастотного шуму граничні значення - 90-100дБ, для середньо частотного шуму - 85-90дБ, а для високочастотного - 75-85дБ. Для надійного контролю правильності вимірювання параметрів шуму введено додатковий критерій для судження про те, чи не перевищує шум допустимих рівнів. Таким критерієм є чіткість сприйняття мовлення, виголошеного з нормальною гучністю в працюючому цеху на відстані 1,5м від випробуваного. Гарною розбірливістю (і, як наслідок, допустимим рівнем шуму) вважається правильне повторення не менше 40 з 50 багатозначних чисел (22, 44, 78 і т. д.).

2. У повітрі робочої зони можливий підвищений вміст шкідливих речовин, таких як кислоти, основи та розчинники. Їх концентрацію у повітрі значно зменшує вентиляція та спеціальні витяжки, або витяжні шафи.

Основні методи боротьби з пилом:

- Зволоження водою до допустимих меж;
- Вентиляційний пристрій, що уловлює пил від місць утворення з очищенням повітря перед викидом в атмосферу;
- Застосування засобів індивідуального захисту (спецодяг, респіратори, захисні окуляри).

3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Задля безпечної роботи на виробництві співробітники повинні мати заглушки (для цехів із підвищеним рівнем шуму), шапочку (для підтримання достатньої чистоти виробництва), респіратори та протигази (для уникнення

впливу шкідливих парів на організм), халати та фартухи, резинові рукавиці (для електроізоляції) та кислотостійкі рукавиці.

На роботах із шкідливими та небезпечними умовами праці згідно зі ст.8 Закону України «Про охорону праці» робітникам видається безоплатно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту, а також мийні та знешкоджуючі засоби:

- халат бавовняний (білий або світлих тонів);
- ковпак (шапочка, косинка) бавовняний (білий або світлих тонів);
- взуття шкіряне (тапочки);
- рукавички хірургічні гумові;
- рукавички гумові;
- нарукавники поліетиленові;
- протигаз фільтруючий;
- коробки фільтруючі марки „Г”;
- мило туалетне;
- рушники (серветки) з паперу (одноразового використання);
- рушник із бавовняної тканини [11].

Вимоги безпеки перед початком роботи:

1. Привести в порядок спецодяг. Робочий одяг не повинний мати звисаючих кінців, чи кінців, що розвіваються, має бути наглухо застебнутий, звисаючі кінці косинок, хусток мають бути підібрані, манжети рукавів повинні щільно обхоплювати руки біля кистей. Волосся має бути закрито щільно облягаючим головним убором. Робота в легкому взутті (тапочках, босоніжках) не допускається. Перевірити і одягти засоби індивідуального захисту. Покласти власний одяг у шкафчик.

2. Впевнитись в тому, що освітлення (загальне чи місцеве) забезпечує чітку видимість поділок на контрольно-вимірювальних приладах, а також поверхонь деталей, що оброблюються.

3. Впевнитись у повній працездатності робочого устаткування.

Задля підтримання рівня безпеки на виробництві під час виконання робіт забороняється:

1. Працювати з незакріпленими деталями;
2. Чистити устаткування під час його роботи;
3. Працювати на несправному устаткуванні, з несправним інструментом, самостійно виконувати його ремонт;
4. Знімати загороджувальні щитки на частинах устаткування, що рухаються;
5. Працювати з інструментом, правила експлуатації якого невідомі;
6. Працювати з інструментом і на устаткуванні, застосування якого не передбачено технологічним процесом;
7. Працювати без необхідних засобів індивідуального захисту;
8. Користуватися для виконання виробничих процесів протипожежним інвентарем із протипожежних стендів;
9. Чистити робочий одяг стисненим повітрям;
10. Одягатися, роздягатися, митися на робочому місці.

З метою підвищення безпеки роботи на виробництві проводиться ретельний контроль працездатності та справності вентиляцій, печей та іншого робочого обладнання, яке знаходиться в експлуатації. Проте на будь-якому виробництві можливі надзвичайні випадки. Вимагається припинити роботу в наступних випадках:

1. Виявлення несправності устаткування і інструмента;
2. Припинення подачі електроенергії;
3. Відключення загального чи місцевого освітлення;
4. Відключення систем загальнообмінної чи місцевої витяжної вентиляції;
5. Пошкодження засобів індивідуального захисту;
6. Погіршення самопочуття;
7. Одержання травми [13].

3.3 Виробнича санітарія

Роботи, що виконуються на виробництві належать до категорій:

– Іб(легка) – робота виконується сидячи, стоячи або в русі з незначними фізичними навантаженнями – 140-174Вт.

– Іа(середньої тяжкості) – робота виконується в русі при переміщенні вантажів до 1кг або сидячи чи стоячи з фізичними навантаженнями – 175-232Вт.

Важливим показником, який впливає на здоров'я людей, що працюють на підприємстві, є мікроклімат. Мікроклімат підприємства не відповідає усім діючим нормам. Показниками, які характеризують мікроклімат, є:

– Температура повітря (контролюється за допомогою гігроскопічного психрометра). У теплу пору року температура перевищує допустиму через непрацездатність ряду вентиляційних пристроїв. Зростання температури вище допустимих значень негативно впливає на продуктивність праці людини. У холодну пору року температура повітря робочої зони знаходиться у межах оптимальних значень (18-23°C).

– Швидкість руху повітря знаходиться у межах норми (0,1-0,2м/с).

– Відносна вологість повітря у виробничих приміщеннях нижче оптимального значення влітку та дещо перевищує допустиме значення відносно вологості у холодну пору року (75-77%).

– Інтенсивність теплового випромінювання працюючого від нагрітих поверхонь технологічного обладнання, освітлювальних приладів, інсоляції на постійних і тимчасових робочих місцях не повинна перевищувати 35Вт/м при опроміненні 50% поверхні тіла та більше, 70Вт/м при опроміненні 25-50% поверхні тіла та 70Вт/м при розмірах опромінюваної поверхні не більше 25% поверхні тіла. Джерелом теплового випромінювання є печі.

Інтенсивність теплового випромінювання на виробництві перевищує норми через відсутність якісної теплоізоляції [11-13].

Мета обладнання приміщення системою вентиляції залежить від конкретних умов. У різних цехах для різних етапів виробництва приладів використовуються системи вентиляції для різних цілей:

- Виведення надлишків тепла, тобто підтримання припустимої температури повітря.
- Виведення шкідливих речовин, тобто підтримання гранично припустимих концентрацій цих речовин у повітрі робочої зони.
- Виведення залишків вологи, тобто підтримання припустимої відносної вологості повітря.

У теплу пору року на виробництві гостро постає питання кондиціонування повітря. Через нестачу кондиціонерів місцевого призначення температура робочих зон перевищує допустиму норму, а відносна вологість нижче бажаного рівня, що може впливати як на працездатність, так і на здоров'я персоналу.

1. Для цехів, де виділяються шкідливі речовини, повітрообмін визначають за кількістю шкідливих газів, парів, пилу, що надходять у робочу зону, з метою розбавлення їх припливним повітрям до гранично допустимих концентрацій:

$$L = \frac{U}{k_1 - k_2}, \quad (3.1)$$

де U – кількість шкідливої речовини, що надходить у повітря цеху, мг/год; k_1 – гранично допустима концентрація шкідливої речовини, що надходить у повітря цеху, мг/м³; k_2 – концентрація тієї ж речовини у припливному повітрі, мг/м³.

В повітрі знаходяться випари оксидів азоту та вуглецю. З довідникових значень знайдемо значення повітрообміну:

$$L = \frac{75}{5-25} + \frac{163}{20-52} = -8,8 \quad (3.2)$$

Отже, повітрообмін цеху знаходиться у критичному стані, про що свідчить від'ємне значення розрахованого параметру.

Зорові роботи у приміщенні об'єкту належать до класу найвищої точності (найменший розмір об'єкта менше 0,15мм). Природне освітлення робочих місць здійснюється через віконні прорізи, що відповідає боковому освітленню. Норма бокового освітлення для даного класу робіт – 3,5%. Фактичні значення бокового освітлення відповідають нормі (4%).

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 норма освітленості робочих місць при комбінованому штучному освітленні для зорових робіт найвищої точності становить 2000лк. Фактичне значення освітленості робочих місць при штучному освітленні відповідає нормі.

Основні засоби техніки безпеки – герметизація апаратури і устаткування, наявність припливний витяжній вентиляції в приміщенні проведення робіт і витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням (рис. 4.1).

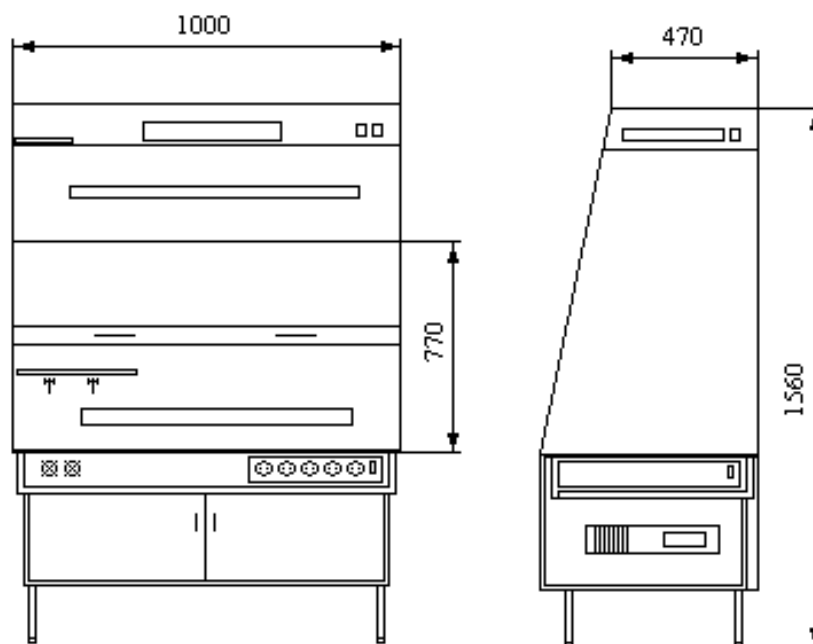


Рисунок 4.1 – Витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням

3.4 Електробезпека

В організації, що експлуатує будь-які види електротехніки має бути забезпечено їх утримання у справному стані. Відповідальність за це несе інженер з охорони праці або фахівець, що виконує функції по забезпеченню охорони праці.

Експлуатація такого устаткування повинна проводитися відповідно до інструкцій, правил і норм безпеки, вимог охорони праці та ін. Електричне обладнання повинне своєчасно проходити технічне планове обслуговування, ремонт, профілактичні випробування та інші види обслуговування, що забезпечують його справну роботу.

До роботи на електричному обладнанні допускаються особи, які мають необхідну групу електробезпеки, пройшли медичний огляд і не мають

протипоказань за станом здоров'я, що пройшли інструктаж з правил експлуатації і техніки безпеки. У компанії обов'язково повинні проводитися інструктажі з охорони праці та техніки безпеки для всього електротехнічного і неелектротехнічного персоналу, крім того, для всіх працівників повинні бути розроблені відповідні інструкції. Персонал, що працює з електричним обладнанням, повинен бути забезпечений засобами електрозахисту і спецодягом, а самі електричні установки - укомплектовані засобами захисту і всім необхідним для пожежогасіння.

Перевірку дотримання даних вимог підприємствами проводять органи енергонагляду, державної інспекції праці та ін.

Заходи попередження ураження людей електрострумом включають огорожу і ізоляцію будь-яких частин електричного обладнання та установок, що знаходяться під напругою. Також на підприємствах повинно бути організовано, де це можливо і де необхідно відповідно до правил і норм, застосування малої напруги. Обов'язковою мірою є заземлення або занулення всіх металевих конструкцій і кабелів, а також використання засобів індивідуального та колективного електрозахисту. Також до організаційних заходів відносяться заходи по допуску до роботи з електрикою і нагляду під час роботи фахівців на електроустановках.

Заземленню або зануленню підлягають такі конструкції і елементи:

- металеві корпуси технічних засобів і обладнання;
- електроприводи;
- вторинні обмотки трансформаторів;
- каркаси щитів управління, шаф та ін.;
- пересувні електричні установки та обладнання;
- інші кабельні та металеві конструкції.

Заземлення та занулення повинні проходити інструментальну перевірку відразу після монтажу, при експлуатації - не рідше 1 разу на рік, а також після проведеного ремонту.

Забезпечення заходів електробезпеки на підприємстві регламентується Міжгалузевими правилами охорони праці, Правилами улаштування електроустановок та іншими нормативними актами, затвердженими державними органами [11-13].

3.5 Протипожежна безпека

Співробітники, відповідальні за забезпечення пожежної безпеки приміщень призначаються замовленням директора установи.

Особи, призначені за заявою, є відповідальними за забезпечення пожежної безпеки приміщень або ділянок території.

Відповідальні за пожежну безпеку зобов'язані в кінці робочого дня проводити щоденний огляд закріплених за ними об'єктів.

При огляді слід контролювати прибирання приміщень:

- корзини для збору відходів повинні бути пустими;
- електроприлади, що знаходяться в приміщенні знеструмлені, штепсельні вилки витягнуті з електричних розеток;
- вікна закриті і зафіксовані;
- проходи та виходи із приміщень вільні та обладнані знаками охоронної безпеки та планами евакуації;
- електричне освітлення, за виключенням чергового освітлення відключене;
- вхідні двері закриті;
- автоматична сигналізація включена і функціонує;
- первинні засоби пожежогасіння повинні знаходитися в спеціально відведених місцях і доступ до них повинний залишатися вільним.

Якщо при огляді виявлено порушення дійсних правил, слід негайно повідомляти про порушення, що пред'являються відповідальним за запобіжну безпеку або керівнику установи.

Для запобігання виникненню пожеж від електричного струму, висвітлення, нагріву струмоведучих частин, дугового розряду та ін. необхідно дотримуватися "Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів", інструкції по експлуатації електричних приладів. Всі приміщення повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння відповідно до норм і правил пожежної безпеки. Засоби пожежотушіння повинні розміщатися в пожежних шафах і обов'язково позначені відповідним знаком пожежної безпеки. Всі наявні первинні засоби пожежогасіння повинні постійно утримуватися в справному стані і регулярно, відповідно до технічних умов експлуатації, випробовуватися на придатність до використання [12].

Співробітники установи зобов'язані виконувати правила пожежної безпеки.

Для запобігання пожежі в приміщеннях будівлі забороняється:

- використовувати нагрівальні електроприбори для опалення приміщень;
- приготування та розігрівання їжі поза спеціально відведеними місцями, узгоджених з Державною протиповітряною службою;
- використовувати електричні прилади, споживана потужність яких перевищує допустиму потужність електромережі;
- залишати без нагляду будь-які прилади та пристрої, що знаходяться під напругою;
- підключати електроприбори без стандартних штепсельних роз'ємів;
- використовувати несправні електричні вимикачі, розетки, штепсельні роз'єми з розбитими корпусами, обгорілі і контактами;
- з'єднання, які нагріваються в місцях контакту;

- світильники без колпаків;
- здійснювати монтаж мереж без дотримання вимог "Правил пристроїв електроустановок";
- використовувати для захисту електромережі некалібровані плавкі вставки або автоматичні вимикачі, струм спрацьовування яких перевищує максимально допустиме значення для електромережі.

Всі перемикання та ремонтні роботи в електромережах повинні виконуватися спеціалістами, що мають допуск до роботи та групу електричної безпеки не нижче третьої.

Підключати до електричних мереж несправні електроприлади заборонено.

Забороняється:

- виконувати нагрів труб опалення, водопостачання та каналізації паяльними лампами або іншим способом із застосуванням відкритого вогню. Нагрівання слід виконувати - гарячою водою, паром, розігрітим піском або іншими пожежобезпечними способами;
- зберігати ємності з горючими, легкозаймистими рідинами, балони з горючими газами, горючі предмети та матеріали на шляхах евакуації, а саме в коридорах, на сходових клітках, у вестибюлі, в тамбурах евакуаційних виходів, а також в підвалах, на горищах, в технічних приміщеннях електрощитових, в вентиляційних камерах;
- зберігати на місцях проведення ремонтних і реконструкційних робіт пиломатеріали в кількості, що перевищує добову потребу, по залишати закінчення робочого дня легкозаймисті відходи;
- захаращувати шляхи евакуації меблями, матеріалами, обладнанням коридорів, сходові клітки, вестибюлі, тамбури евакуаційних виходів з будинку, доступ до первинного засобів пожежогасіння, електророзподільні щити і пристрої, що вимикають;

- закривати на важко відкриті засуви двері евакуаційних виходів в період перебування в будівлі людей;
- проводити перепланування і перепрофілювання приміщень, зводити на території різного роду споруди та прибудови без дотримання протипожежних вимог і без узгодження з органами державного пожежного нагляду;
- використовувати наявні засоби пожежогасіння не за прямим призначенням;
- зберігати горючі рідини, вогнезахисні предмети та матеріали, горючі гази в приміщеннях установи за виключенням спеціально обладнаних місць, де їх застосування передбачено технологічним процесом. При експлуатації цих приміщень необхідно керуватися спеціальними вказівками. Забезпечення пожежної безпеки при проведенні господарських та пожежостійких робіт регулюється окремою інструкцією. Вимикати автоматичні засоби протипожежної охорони, систему оповіщення про пожежі, автоматичні пристрої виявлення пожеж або автоматичну пожежну сигналізацію, установку автоматичного пожежогасіння суворо заборонено. При необхідності таких відключень, робити це тільки з письмового дозволу керівника, з прийняттям необхідних заходів протипожежного захисту, в достатній мірі компенсуючих зниження протипожежної захищеності будівлі [11-13].

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

- 1) розроблено структурну схему генератора стоячих хвиль високої потужності із широким діапазоном переналаштовування частоти;
- 2) як детектор електромагнітних виль використано індикатор НВЧ із аналоговим вимірювачем рівня на мікросхемі LMV824 (4-і ОП в одному корпусі). Застосувавши живлення від 3 до 4,5 вольт можна обійтися без ключового каскаду на транзисторі. Таким чином, можна використати одну мікросхему, або її закордонний аналог MC33174.
- 3) розроблено моделі основних функціональних вузлів блоку фільтрів для багатосмугових підсилювачів низької та високої частоти;
- 4) проведено моделювання блоку фільтрів для багатосмугових підсилювачів низької частоти в редакторі Мігросар 5.0, яке показало достатньо стабільні показники параметрів керування схемою;
- 5) запропоновано подальше удосконалення схеми генератора із застосуванням газорозрядного пристрою із поздовжнім ефектом Доплера, що дасть можливість розширити діапазон генерації частоти майже до рентгенівського діапазону.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

- 1) система може бути використана в подальших розробках систем енергозабезпечення;
- 2) макетний варіант системи може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Перелік посилань

1. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. Видавництво «Політехніка», 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с.: іл. Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с.: іл.
2. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник. 2-ге вид. – К.: Каравела, 2007. – 296 с
3. Lei Lin, Benkang Chang. New apparent distance-detecting equation for low-lighting level imaging system // Optical Engineering. 1998 Vol.37. №7 p. 1902–1913.
4. Ткачук В. М. Радіопередавальні пристрої : навчальний посібник / В. М. Ткачук, С. М. Цирульник, Т. А. Петренко. Вінниця : Т. П. Барановська, 2015. 188 с.
5. Antognetti, P.; Massobrio, G.: Semiconductor device Modeling with SPICE. New York: McGrawwHill, 1988.
6. Calcutt D., Cowan F., Parchizadeh H. 8051 Microcontrollers: An Applications Based Introduction. Oxford: Newnes, 2004.
7. Micropower Voltage Reference Precision, Single Supply Op Amp URL : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/lt-journal-article/ltmag_v05n4_dec95.pdf (дата звернення: 10.01.2023).
8. Giordano, Nicholas. College Physics: Reasoning and Relationships (англ.). — Cengage Learning, 2009. — P. 421—424.
9. Possel, Markus Waves, motion and frequency: the Doppler effect. Einstein Online, Vol. 5. Max Planck Institute for Gravitational Physics, Potsdam, Germany (2017).

10. Kozyrev, Alexander B.; van der Weide, Daniel W. (2005). "Explanation of the Inverse Doppler Effect Observed in Nonlinear Transmission Lines". *Physical Review Letters*. **94** (20).

11. Бегун В. В., Науменко І. М. Безпека життєдіяльності : Навч. посібник. Київ : МОНУ, 2004. 328 с.

12. Охорона праці. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей / Укл. В. Г. Рижков Запоріжжя, 2005. 43 с.

13. Безпека життєдіяльності. Методичні вказівки до практичних занять та контрольні завдання для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл. В. Г. Рижков. Запоріжжя, 2005. 24 с.