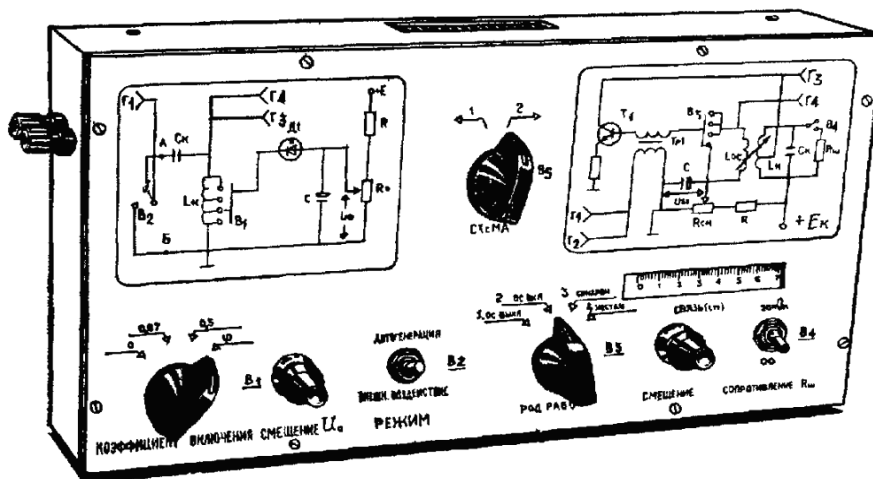


СИГНАЛИ ТА ПРОЦЕСИ В РАДІОТЕХНІЦІ

Лабораторний практикум



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

А. Ю. Воловик, Д. В. Гаврілов, А. О. Семенов,
М. А. Шутило, О. П. Червак

СИГНАЛИ ТА ПРОЦЕСИ В РАДІОТЕХНІЦІ

Лабораторний практикум

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.3(075)
ББК 31.27-01я73
В72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № __ від _____ 2014 р.)

Рецензенти:

А. П. Бондарев, доктор технічних наук, професор

В. С. Осадчук, доктор технічних наук, професор

Воловик А. Ю.

В72 Сигнали та процеси в радіотехніці: лабораторний практикум /
А. Ю. Воловик, Д. В. Гаврілов, А. О. Семенов, М. А. Шутило,
О. П. Червак. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 97 с.

У лабораторному практикумі наведені тринадцять лабораторних робіт першої та другої частин курсу “Сигнали та процеси в радіотехніці”, який охоплює такі розділи: детерміновані сигнали, спектральний аналіз сигналів, лінійні та нелінійні радіотехнічні кола, проходження детермінованих і випадкових сигналів крізь радіотехнічні кола, процеси генерування, модуляції та детектування радіосигналів.

Лабораторний практикум призначений для студентів бакалаврського напрямку 6.050901 – “Радіотехніка” усіх форм навчання і може бути корисним для студентів суміжних спеціальностей.

УДК 621.3(075)
ББК 31.27-01я73

ЗМІСТ

Передмова	4
Лабораторна робота №1. Дослідження спектрів керуючих сигналів.....	6
Лабораторна робота №2. Дослідження спектрів радіосигналів.....	11
Лабораторна робота №3. Дослідження спектрів імпульсних сигналів.....	19
Лабораторна робота №4. Проходження керуючих сигналів через лінійні кола	24
Лабораторна робота №5. Дослідження проходження амплітудно-модульованого сигналу через коливний контур	34
Лабораторна робота №6. Проходження радіоімпульсів через вибірккові кола	42
Лабораторна робота №7. Дослідження проходження амплітудно-модульованого сигналу через коливальний контур	49
Лабораторна робота №8. Нелінійне резонансне підсилення та помноження частоти	55
Лабораторна робота №9. Амплітудна модуляція зміщенням	64
Лабораторна робота №10. Детектування АМ-коливань	69
Лабораторна робота №11. Стаціонарні та нестаціонарні процеси у автогенераторі. Схоплення частоти	74
Лабораторна робота №12. Генератори гармонійних коливань з негативним опором (генератор на тунельному діоді.....	83
Лабораторна робота №13. RC-генератор гармонічних коливань	87
Література	94
Глосарій.....	95

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Сигнали і процеси в радіотехніці» являє собою одну з базових дисциплін, яка забезпечує підготовку радіоінженерів. До складу цієї дисципліни входить низка фундаментальних розділів сучасної радіоелектроніки. На опанування дисципліни суттєвим чином впливає зміст та методика виконання лабораторного практикуму.

Розробки лабораторних робіт, які пропонуються у цьому посібнику, базуються на уніфікованих навчальних стендах, розроблених у Харківському інституті радіоелектроніки. Вони пройшли випробовування часом і зарекомендували себе як з найкращої сторони. Реалізація типових лабораторних установок потребує відносно небагато радіовимірювальних приладів і що саме головне однакових для усіх запропонованих лабораторних робіт. Така концепція дозволяє проводити заняття фронтальним методом, утворювати при потребі достатню кількість робочих місць та ефективно використовувати наявне лабораторне обладнання.

Кожна лабораторна робота виконується на лабораторному столі, де розташовані та закріплені типові радіовимірювальні прилади: генератор стандартних сигналів (ГСС), зазвичай використовується як генератор високочастотних коливань; генератор звукових та ультразвукових частот слугує у якості генератора низькочастотних коливань, мілівольтметри; електронний осцилограф; набір з'єднувальних провідників та кабелів. Загальний вигляд робочого місця показано на нижченаведеному рисунку.



При комплектації лабораторії радіовиміральною апаратурою бажано застосовувати типові прилади близькі за технічними характеристиками. Окремі вимірвальні прилади, такі як генератори шуму, корелометри, вимірвачі дисперсії доцільно монтувати за спрощеними схемами усередині лабораторних макетів. Слід зауважити, що при виконанні багатьох лабораторних робіт використовується лише частина радіовимірвальних приладів, а інші складають резерв.

Типова лабораторна установка складається з двох блоків: базового та змінного. В базовому блоці розташовані джерела некерованої постійної напруги 12,6 В при струмі навантаження до 1 А та 6,3 В при струмі навантаження до 0,5 А; мікроамперметр та підсилювально-формуючі схеми. Мікроамперметр використовується у якості вольтметра постійної напруги, який увімкнено до роз'єднувача (межі вимірювання вказані та регулюються на передній панелі пристрою, а також у якості індикатора в схемах вимірювання змінного блоку. Для цього мікроамперметр безпосередньо увімкнено до двох контактів роз'єднувача. За допомогою підсилювально-формуючих схем при дії на вході гармонічної напруги стає можливим отримувати імпульсні послідовності зі шпаруватістю, близької до двох, причому тривалість переднього та заднього фронту імпульсів становить не більше 0,1 мкс. Конструкція блоку передбачає увімкнення радіо-вимірвальних приладів до різних точок досліджуваної схеми на лівій (гнізда Г1 та Г2) та правій (Г3, Г4, Г5) бокових панелях змінного пристрою.

Змінний блок дозволяє виконувати від однієї до трьох лабораторних робіт, базовий блок використовують при виконання усіх робіт. Електричні пристрої з'єднують за допомогою штепсельного роз'єму, механічно – за допомогою направляючих та заціпок.

Лабораторна установка розрахована на увімкнення до електричної мережі напругою 220 В; її увімкнення виконується за допомогою тумблера, розташованого на передній панелі базового блоку; при цьому загорається індикаторна лампочка. Запобіжники знаходяться на задній панелі пристрою. Споживана потужність приблизно 15 Вт, габарити 360 x 300 x 200 мм, середня маса 3 кг.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Дослідження спектрів керуючих сигналів

Мета роботи: вивчення спектрального складу періодичної послідовності імпульсів при різних частотах слідування і тривалості імпульсів.

1.1 Основні позначення та розрахункові формули

Періодична функція

$$I(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\Omega_1 t) + b_n \sin(n\Omega_1 t)) \quad (1.1)$$

або

$$I(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n (a_n \cos(n\Omega_1 t - \varphi_n)), \quad (1.2)$$

де $\Omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi F_1$ (T-період сигналу) - кутова частота першої гармоніки.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(t) dt,$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(t) \cos n\Omega_1 t dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(t) \sin n\Omega_1 t dt, \quad (1.3)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (1.4)$$

Ряд (1.2) описує періодичний сигнал в вигляді суми постійної складової $\frac{a_0}{2}$ і гармонічних складових з амплітудами і початковими фазами φ_n . Цей ряд можна записати також в комплексній формі

$$I(t) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{m\Omega_1 t},$$

де $A_n = A_n e^{j\varphi_n}$ - комплексні амплітуди.

Сукупність амплітуд, фаз і частот гармонічних складових називають відповідно спектром амплітуд, фаз, і частот. Амплітудно-частотний і фазочастотний спектри можна представити графіками.

Якщо період сигналу $T \rightarrow \infty$, тоді періодичний сигнал стає неперіодичним, а лінійчастий (дискретний) спектр стає суцільним. Спектральна характеристика суцільного спектра $S(\gamma\Omega)$ знаходиться за прямим інтегральним перетворенням Фур'є

$$S(\gamma\Omega) = I(t)e^{-\gamma\Omega} dt.$$

Обернене перетворення Фур'є визначає сигнал по спектральній густині

$$I(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\gamma\Omega)e^{\gamma\Omega} dt.$$

Між лінійчастим спектром періодичної послідовності імпульсів і суцільним спектром одиночного імпульсу існує зв'язок

$$A_n = \frac{2}{T} S(\gamma\Omega).$$

1.2 Опис лабораторного макета

Макет складається з базового блока і змінного пристрою. Базовий блок використовується при виконанні всіх лабораторних робіт і має блок живлення і вбудовані вимірювальні прилади. Лабораторний макет дозволяє виконувати лабораторні роботи №1, 2, 3, 4.

В змінному пристрої розташовані формувачі керуючих радіосигналів (схема 1), послідовний коливальний контур (схема 2), аперіодичні RL і RC-кола (схема 3). Підключення схем до вхідних і вихідних клем макета здійснюється перемикачем S3.

Всі органи керування розташовані на передній панелі макета.

При виконанні робіт №1 і №2 використовується прилад по схемі 1 (рис. 1.1.). Прилад містить генератор прямокутних імпульсів GN, подільник частоти, одновібратор G1, формувач керуючих сигналів F, частотний модулятор та ключ і дозволяє отримувати на виході керуючі сигнали різної форми зі змінними параметрами, а також АМК, ЧМК і радіоімпульси з прямокутною обвідною. Період керуючих сигналів плавно змінюється потенціометром 'Період' і дискретно перемикачем S1. Тривалість імпульсів встановлюється потенціометром 'τ', форма сигналів - перемикачем S2, потенціометром 'Форма' і 'τ'.

1.3 Домашнє завдання

1. Розрахувати і побудувати графіки амплітудно-частотного спектра (АЧС) періодичної послідовності прямокутних відео-імпульсів. Розрахунок вести до другого нуля обвідної спектра. Параметри сигналів задані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри сигналів

№ бригади	1	2	3	4	5	6
Тривалість імпульса, мкс	10	5	2,5	4	2	5
Величина періода T , мкс	103	56	23	40	20	46

По результатам розрахунку визначити ширину спектра сигналу.

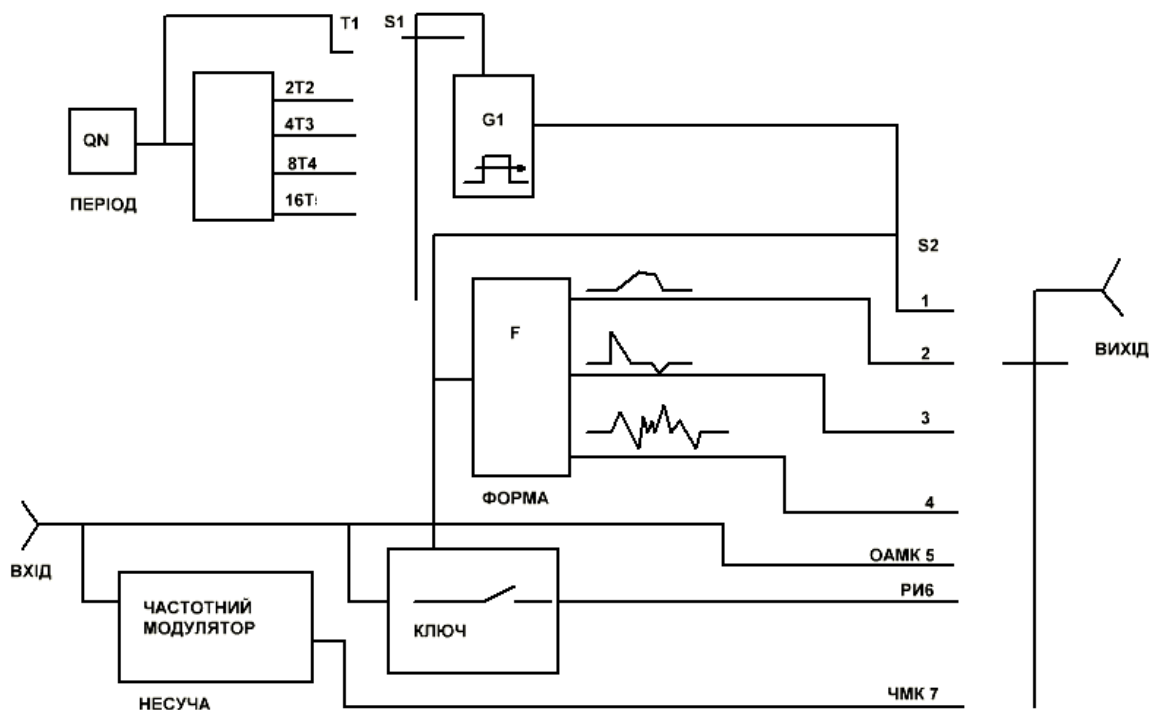


Рисунок 1.1 – Схема лабораторного макета

1.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Встановити період слідування імпульсів 100 мкс.

1.1. Перемикач $S3$ встановити в положення 1, тим самим до вхідного і вихідного гнізд змінного блоку вмикається схема 1. Підключити до вихідних гнізд блоку Y -вхід осцилографа і пробник аналізатора спектра.

1.2. Встановити перемикач S2 в положення 1. Виконати синхронізацію осцилографа, вибрати зручний коефіцієнт підсилення і швидкість горизонтальної розгортки для огляду і перевірки параметрів досліджуваної послідовності імпульсів.

1.3. Потенціометром "Період" і перемикачем S1 встановити період надходження імпульсів 100 мкс (виміряти осцилографом).

1.4. Перемикаючи S2 в положення 2, 3, 4, впевніться, що період сигналів іншої форми той самий (100 мкс). Форма сигналів змінюється потенціометрами "Форма" і " τ ".

2. Дослідити спектри періодичних сигналів різної форми з однаковими періодами.

2.1. Перемикаючи S2 в положення 2, 3, 4 і обертаючи потенціометри "Форма" і " τ ", подати на вхід аналізатора періодичні послідовності імпульсів різної форми з однаковим періодом. Спостерігаючи спектри сигналів, встановити, що спільного і різного в спектрах цих сигналів

2.2. По спектрограмам визначити частоту першої гармоніки і відстань між спектральними складовими.

3. Дослідити характер спектра при зміні величини періоду T слідування імпульсів.

3.1. Перемикач S2 в положення 1. Шляхом ділення частоти слідування імпульсів в 2, 4, 8, 16 раз (перемикач S1) збільшити період в ту саму кількість разів (тривалість імпульсів не зміниться). Спостерігати зміну характеру спектра.

3.2. Зробити те ж, що в 3.1. при одному з наступних положень (2, 3, 4) перемикача S2.

3.3. За результатами експерименту зробити висновок про перетворення періодичного сигналу в не періодичний, а дискретного спектру - в суцільний.

4. Дослідити спектр послідовності прямокутних імпульсів, заданих в домашньому завданні.

4.1. На вхід аналізатора спектра подати послідовність прямокутних імпульсів (S2 в положенні 1) з параметрами, вказаними в таблиці 1. Потрібний період слідування встановлюється перемикачем S1 і потенціометром "Період", тривалість імпульсу - потенціометром " τ ".

4.2. Спостерігати і замалювати спектрограму. Зрівняти спектр з розрахованим в домашньому завданні.

5. Вияснити залежність ширини спектра від тривалості імпульсу. Для цього, змінюючи тривалість імпульсу τ , спостерігати зміни ширини спектра.

1.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

1. Блок-схему досліджень.
2. Експериментальні осцилограми спектрів.
3. Розрахунки і графіки, передбачені домашнім завданням.
4. Співставлення експериментальних і розрахункових даних.

1.6 Питання для самоперевірки

1. Запишіть і поясніть фізичний зміст рада Фур'є для періодичного керуючого сигналу.
2. Запишіть і поясніть фізичний зміст інтегрального перетворення Фур'є для неперіодичного сигналу.
3. Які властивості мають спектри періодичних сигналів?
4. Як впливає зміна тривалості імпульсів і періоду повторення на спектр послідовності імпульсів?
5. Як змінюється спектр періодичного сигналу, якщо період повторення спрямувати в нескінченність?
6. Який зв'язок існує між суцільним спектром неперіодичного сигналу і лінійчастим спектром відповідного періодичного сигналу?
7. Як зв'язані між собою тривалість імпульсу і ширина спектру?

Література

Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 17-55.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Дослідження спектрів радіосигналів

Мета роботи: дослідження амплітудних спектрів періодичної послідовності імпульсів з різними частотами і тривалості.

2.1 Короткі теоретичні відомості

Аналітичний вираз даного АМК можна також представити у вигляді:

$$a(t) = A_0 [1 + M \cos(\Omega t + \varphi_0)] \cos(\omega_0 t + \Theta_0).$$

Величина $M = \frac{kS_0}{A_0} = \frac{\Delta A_m}{A_0}$ називається коефіцієнтом (глибиною)

модуляції. Це є відношення максимального приросту амплітуди ΔA_m до початкове середнього (див. рис.2.1). Для збереження форми огинаючої АМК глибина модуляції не повинна перевищувати 100% ($M \leq 1$).

Для визначення спектра АМК в його аналітичному виразі потрібно розкрити квадратну дужку і виконати тригонометричне перетворення.

Якщо прийняти $\varphi_0 = 0$, $\theta_0 = 0$, то отримаємо:

$$a(t) = A_0 \cos \omega_0 t + \frac{A_0 M}{2} \cos(\omega_0 + \Omega) + \frac{A_0 M}{2} \cos(\omega_0 - \Omega).$$

Відповідно, ОАМК має три спектральні складові:

- 1) з частотою несучого коливання ω_0 і амплітудою A ;
- 2) з частотою $\omega_0 + \Omega$ і амплітудою $\frac{MA_0}{2}$;
- 3) з частотою $\omega_0 - \Omega$ і амплітудою

Спектральна діаграма ОАМК представлена на рисунку 2.1 Спектр ОАМК по характеру дискретний, ширина спектра (відстань по частоті між крайніми частотами ΔF) дорівнює подвійній частоті модулюючого сигналу в даному випадку 2Ω . На рисунку 2.1 зображений спектр модулюючого сигналу, він складається в даному випадку з однієї спектральної лінії.

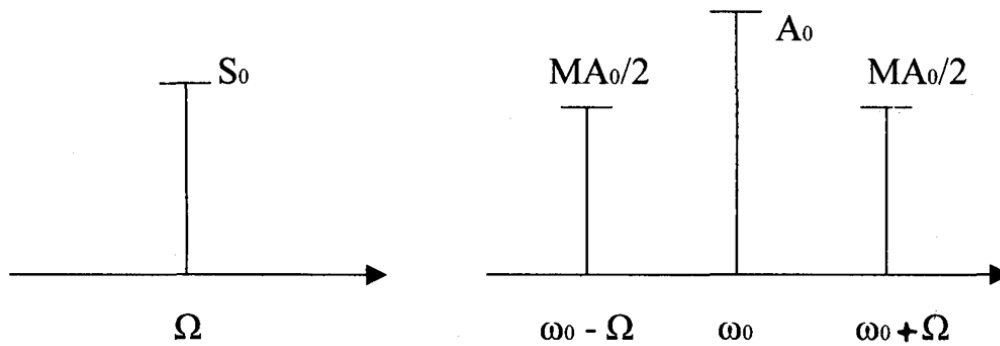


Рисунок 2.1 – Спектральна діаграма ОАМК

Із порівняння спектрів модулюючого (керуючого) і модульованого (радіосигналу) можна зробити висновок про зв'язок спектрів цих сигналів - одній спектральній лінії спектра керуючого сигналу, розміщеній поблизу нуля, відповідає дві спектральні лінії, розміщені симетрично відносно складової з несучою частотою ω_0 . Відповідно, весь спектр здвигається в сторону високих частот на величину частоти несучого коливання. Якщо модулюючим сигналом буде складний сигнал, наприклад, послідовність прямокутних імпульсів, розглянута в першій частині роботи, то закономірність побудови спектра радіосигналу по спектру відеосигналу буде така ж.

Нехай складний керуючий сигнал представлений у вигляді суми гармонік:

$$a(t) = A_0 \left\{ \begin{aligned} & j_0(m) \cos \omega_0 t + j_1(m) [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] + \\ & + j_2(m) [\cos(\omega_0 + 2\Omega)t - \cos(\omega_0 - 2\Omega)t] + \\ & + j_3(m) [\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t] + K \end{aligned} \right.$$

$$S(t) = \sum_{n=1}^{\infty} S_n \cos(n\Omega_1 t + \varphi_n).$$

S_n - амплітуди гармонік; φ_n - початкові фази; Ω_1 - частота першої гармоніки; n - порядковий номер гармонік.

Тоді модульоване коливання буде містити

$$a(t) = A_0 \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_0 M_n}{2} \cos(\omega_0 \pm n\Omega_1).$$

тобто в спектрі радіосигналу міститься несуче коливання з частотою ω_0 і дві симетричні полоси що складають з частотами $\omega_0 \pm n\Omega_1$. Огинаючі спектра модулюючого сигналу і спектра радіосигналу співпадають по формі. Частоти спектра модулюючого сигналу здвигаються в область високих частот на частоту несучого коливання.

В якості прикладу розглянемо спектри послідовності прямокутних відеоімпульсів (модулюючого сигналу) і послідовність прямокутних радіоімпульсів (радіосигнала). Вони показані на рис. 2.2, а і 2.2, б.

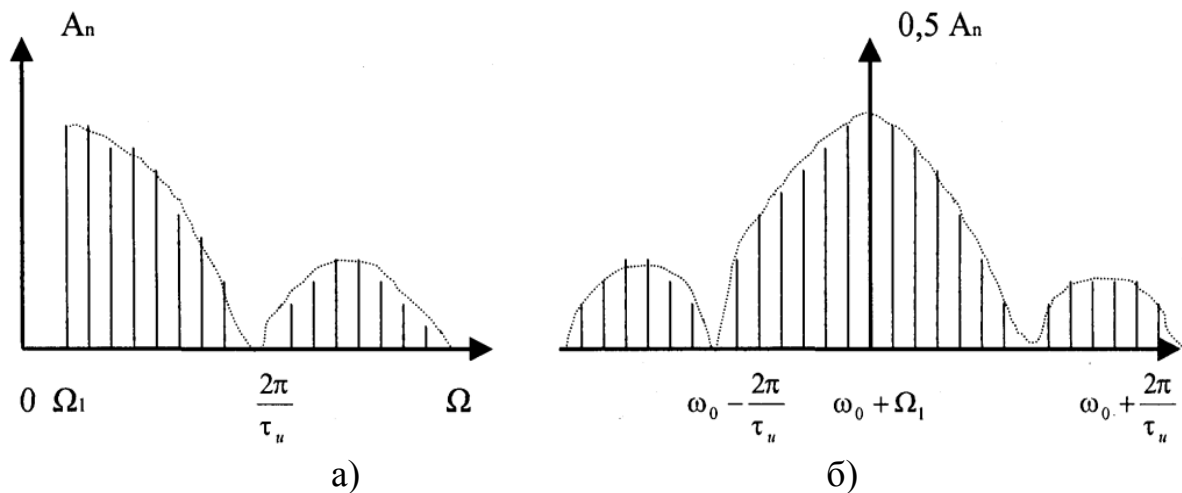


Рисунок 2.2 – Спектри послідовності прямокутних: а) відеоімпульсів (модулюючого сигналу), б) радіоімпульсів (радіосигнала)

Аналітичне зв'язок спектрів модулюючого і радіосигнала можна отримати також обчисливши спектральну густину неперіодичного радіосигнала через інтеграл Фур'є. Нехай радіосигнал з АМ запишеться в загальному вигляді:

$$a(t) = A(t) \cos \omega_0 t,$$

$$S_0(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) \cos \omega_0 t e^{-j\omega t} dt.$$

Перетворимо $\cos \omega t$ по формулі Ейлера:

$$\cos \omega_0 t = \frac{e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2}.$$

Тоді інтеграл розіб'ється на два і запишеться:

$$S_0(j\omega) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) e^{j(\omega - \omega_0)t} dt + A(t) e^{j(\omega + \omega_0)t} dt.$$

Кожний з інтегралів представляє собою спектральну густину огибаючої $A(t)$ для частот $\omega - \omega_0$ (область додатних частот) і $\omega + \omega_0$ (область від'ємних частот). Відповідно:

$$S_0(j\omega) = \frac{1}{2}S_0(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}S_0(\omega + \omega_0).$$

Радіосигнали - вузькополосні сигнали, спектр групується поблизу частоти несучого сигнала ω_0 , а різниця $\omega - \omega_0 = \Omega$. Таким чином, для отримання спектра радіосигнала потрібно в виразі для спектра керуючого сигнала замінити частоту Ω на $\omega - \omega_0$ і вдвічі зменшити величину спектральної густини.

Якщо по закону модулюючої напруги змінюється частота несучого коливання $\omega(t) = \omega_0 + kS(t)$, то таке коливання буде частотно - модульованим. Де ω_0 - середнє значення частоти несучого коливання.

Аналитичний вираз ЧМК можна записати, використовуючи зв'язок між фазою і частотою:

$$\varphi(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt},$$

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt.$$

Відповідно:

$$a(t) = A_0 \cos \int \omega(t) dt.$$

При модуляції високочастотного коливання по гармонічному закону сигналом $S(t) = S_0 \cos \Omega t$ аналітичний вираз ЧМК запишеться у вигляді:

$$a(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + \Theta_0 + \int_0^t S_0 \cos \Omega t dt \right] = A_0 \cos [\omega_0 t + \Theta_0 + m \sin \Omega t].$$

де $m = \frac{kS_0}{\Omega}$ називається індексом частотної модуляції. Величина $kS_0 = \omega q$ є амплітудою відхилення частоти від середнього значення і називається девіацією частоти. Відповідно:

$$m = \frac{\omega q}{\Omega}.$$

Індекс модуляції на відміну від коефіцієнта модуляції при АМ може бути значно більшим одиниці. Для визначення спектральної складової ЧМК при гармонічній модуляції перетворимо її до вигляду:

$$a(t) = A_0 \cos(m \sin \Omega t) \cos \omega_0 t - A_0 \sin\left(\frac{m \sin \Omega t}{\sin \omega_0 t}\right).$$

функції $\cos(m \sin \Omega t)$, $\sin(m \sin \Omega t)$ розкладаються в ряди по Беселевим функціям:

$$\begin{aligned} \sin(m \sin \Omega t) &= 2j_1(m) \sin \Omega t + 2j_3(m) \sin 3\Omega t + K, \\ \cos(m \sin \Omega t) &= j_0(m) + 2j_2(m) \cos 2\Omega t + 2j_n(m) \cos 4\Omega t + K. \end{aligned}$$

Тут $j_n(m)$ - Беселева функція n -го порядку від аргумента m .
Тоді

$$\begin{aligned} a(t) &= A_0 [j_0(m) \cos \omega_0 t - 2j_1(m) \sin \Omega t \sin \omega_0 t + \\ &+ 2j_2(m) \cos 2\Omega t \cos \omega_0 t - 2j_3(m) \sin 3\Omega t \sin \omega_0 t + K]. \end{aligned}$$

чи

$$a(t) = A_0 \begin{cases} j_0(m) \cos \omega_0 t + j_1(m) [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] + \\ + j_2(m) [\cos(\omega_0 + 2\Omega)t - \cos(\omega_0 - 2\Omega)t] + j_3(m), \\ [\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t + K] \end{cases}$$

Відповідно, спектр ЧМК складається з несучого коливання з амплітудою $j_0(m)A_0$ і частотою ω_0 і нескінченно великого числа бокових коливань з амплітудами $j_n(m)A_0$ і частотами відмінними від несучої на $n\Omega$ (n - номер бокової).

Із викладеного видно, що величина амплітуд бокових визначається величиною m .

При малих m ($m \ll 1$) можна вважати, що

$$\sin(m \sin \Omega t) \approx m \sin \Omega t, \quad \cos(m \sin \Omega t) \approx 1.$$

То спектр ЧМК запишеться:

$$\begin{aligned} a(t) &\cong A_0 [\cos \omega_0 t - m \sin \Omega t \sin \omega_0 t] = \\ &= A_0 \left[\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t - \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right]. \end{aligned}$$

Відповідно, в цьому випадку спектр ЧМК як і при АМК має три складові, а ширина спектра гак як і при АМК рівна 2Ω . При великих m ($m \gg 1$) питання зводиться до вияснення залежності Беселевої функції $j_n(m)$ від порядкового номера n_{\max} . Виявляється, що найвищий номер m_{\max} бокової частоти, амплітудою якої необхідно рахуватись, приблизно рівний індексу модуляції.

Відповідно, ширина спектра ЧМК в цьому випадку дорівнює:

$$\Delta F = 2n_{\max} \Omega \approx 2m\Omega = 2\omega q.$$

2.2 Опис лабораторної установки

Для проведення лабораторної роботи необхідно наступні прилади:

1. Аналізатор спектра СА-8.
2. Осцилограф С1-13.
3. Задаючий генератор ГЗ-33.
4. Лабораторний макет.

Макет призначений для отримання відеосигналу різної форми радіосигналів: частотно-модульованого і радіоімпульсів з амплітудною модуляцією.

Частина макета, призначена для отримання радіосигналів містить формувач прямокутних радіоімпульсів і частотний модулятор для отримання ЧМК. На передню панель виведені гнізда подачі модулюючої напруги $U_{\text{мод}}$, гнізда зняття вихідної напруги $U_{\text{вих}}$, перемикач П2 для підключення до входу макета різних радіосигналів, ручка встановлення дорівнює несучої.

Блок-схема досліджень приведена на рисунку 2.3.

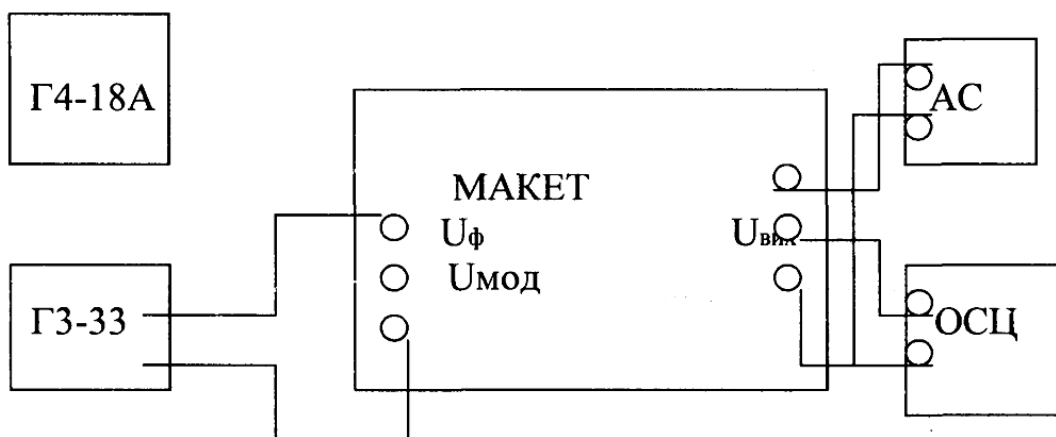


Рисунок 2.3 – Блок-схема досліджень

2.3 Домашнє завдання

1. Вивчити розділи:

1). Амплітудно - модульовані коливання.

2). Частотно - модульовані коливання.

2. Розрахувати і побудувати спектр послідовності прямокутних радіоімпульсів, отриманих в результаті модуляції послідовністю відеоімпульсів з параметрами вказаними в домашньому завданні першої частини лабораторної роботи. Прийняти $f_{mc}=5$ МГц.

3. Розрахувати і побудувати спектр ЧМК.

Дані для розрахунків приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані для розрахунків

Номер бригади	1	2	3	4	5
f_{mc} МГц	5	5	5	5	5
Індекс модуляції	3	4	5	3	2
Мінімальна амплітуда A_0	1	1	1	1	1

2.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Дослідити спектр ОАМК. Для цього від генератора Г4-18А подати на вхід аналізатора спектра і осцилографа ОАМК отримане шляхом модуляції сигналу Г4-18А з частотою несучого 5 МГц. Глибину модуляції ОАМК встановити $M=50\%$:

а) спостерігати і замальовувати спектрограму. Визначити відстань бокових від несучих;

б) зробити висновок про переніс спектра модулюючого сигналу в область високих частот;

в) визначити амплітуду бокових коливань.

2. Дослідити спектр послідовності прямокутних радіоімпульсів. Для цього поставити перемикач П2 в положення ЧМ, встановити по аналізатору спектра частоту несучого сигналу $f_{mc}=5$ МГц. Подати на вхід аналізатора спектра і осцилографа прямокутні імпульси шляхом перемикачання П2 в положення 1. Параметри модулюючих імпульсів встановити заданими в домашньому завданні (порядок встановлення той же, що й в п.3 першої частини лабораторної роботи);

а) спостерігати спектр керуючого сигналу;

б) подати на вхід аналізатора спектра і осцилографа радіоімпульс шляхом переключення П2 в 5 положення.

Подати і замальовати спектрограму. Відлік значень частот гармонік і характерних точок спектра ведеться за допомогою лічильників

аналізатора спектра. Відлік амплітуд - в відносних одиницях;

- в) визначити ширину спектра і відстань між гармоніками;
- г) відмітити зв'язок між спектрами керуючого і радіосигналу.

3. Дослідити спектр ЧМК.

Для виконання цього пункту потрібно ручкою "Встановлення несучої" частотного модулятора макета встановити несучу частоту $f_{mc}=5$ МГц (за допомогою мітки аналізатора спектра);

а) на клеми " U_{mod} " макета подати модулюючий сигнал від ГЗ-33 з частотою 15 кГц і амплітудою 4В. Спостерігати і замалювати спектрограму;

б) плавно змінюючи амплітуду модулюючого сигналу від 1 до 10 В, спостерігати і пояснити залежність ширини спектра від амплітуди модулюючого сигналу;

в) замалювати спектрограми при значеннях амплітуди 1В і 10В;

г) змінити частоту модулюючого сигналу від 1 до 20 кГц при постійній амплітуді 4В, спостерігати і пояснити значення залежності ширини спектра від частоти модулюючого сигналу;

д) замалювати спектрограму при значеннях модулюючої частоти 1 кГц і 20 кГц.

2.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити.

1. Блок-схеми досліджень.
2. Розрахунки і графіки, передбачені домашнім завданням.
3. Таблиці і графіки зняті в результаті експерименту.
4. Порівняння результатів розрахунків і експерименту.
5. Висновки по лабораторній роботі.

2.6 Питання для самоперевірки

1. Дати визначення АМ і ЧМ сигналів.
2. Що таке коефіцієнт модуляції?
3. Як визначається ширина спектра АМ коливання?
4. Як по спектру керуючого сигналу побудувати спектр радіосигналу?
5. Що таке індекс модуляції при ЧМ?
6. Як залежить індекс модуляції від частоти модулюючого сигналу?
7. Чому дорівнює ширина спектра ЧМК при $m \gg 1$ і $m \ll 1$.

Література: [1, с. 38 -67; 2, с. 13- 25; 3, с. 43-57].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Дослідження спектрів імпульсних сигналів

Мета роботи: дослідження амплітудних спектрів періодичної послідовності імпульсів з різними частотами і тривалостями.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Амплітудним спектром періодичного коливання називають функцій, що відображав залежність амплітуд гармонік від частоти.

Періодичне коливання, що відповідав умовам Діріхле, можна представити рядом Фур'є.

$$S_{\tau}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega_1 t + b_n \sin n\Omega_1 t), \quad (3.1)$$

де $\Omega_1 = 2\pi/T$ - кутова частота періодичного коливання;

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_T(t) dt, \quad (3.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_T(t) \cos n\Omega_1 t dt, \quad (3.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_T(t) \sin n\Omega_1 t dt. \quad (3.4)$$

Вирази (3.2), (3.3), (3.4) існують в довільно вибраному інтервалі часу, що дорівнює періоду T . Інтегрування проводять від 0 до T або від $-T/2$ до $T/2$.

Ряд Фур'є (3.1) показує, до періодичне коливання можна розкласти на постійну складову $a_0/2$ і сукупність гармонічних коливань з кратними частотами

$$\lambda_n(t) = a_n \cos n\Omega_1 t + b_n \sin n\Omega_1 t = A_n \cos(n\Omega_1 t - \Psi_n) \quad (3.5)$$

де

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \operatorname{tg} \Psi_n = \frac{b_n}{a_n}, \quad (3.6)$$

Зворотне перетворення

$$a_n = A_n \cos \psi_n, \quad b_n = A_n \sin \psi_n.$$

З врахуванням (3.5) ряд (3.1) приймає вигляд

$$S_T(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega_1 t - \Psi_n).$$

Цей ряд можна також представити в комплексній формі

$$\dot{S}_T = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{A}_n e^{jn\Omega_1 t},$$

де $\dot{A}_n = A_n e^{-j\psi_n}$ - комплексні амплітуди.

Оскільки комплексна амплітуда $\dot{A}_n = A_n e^{-j\psi_n} = A_n \cos \psi_n - jA_n \sin \psi_n = a_n - jb_n$ то, використавши (3.3) і (3.4). одержимо формулу для розрахунку коефіцієнтів ряду Фур'є

$$\dot{A}_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_T(t) e^{-jn\Omega_1 t} dt. \quad (3.7)$$

Безліч коефіцієнтів комплексного ряду Фур'є, що розглядається як функція частоти, називають комплексним спектром періодичного коливання.

Якщо період $T \rightarrow \infty$, то дискретна змінна $n\Omega$ перетворюється в безперервну змінну ω , частота Ω - в нескінченно малу величину $d\omega$, а комплексна амплітуда - в безперервну функцію частоти ω :

$$\dot{A}(\omega) = \frac{d\omega}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_T(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3.8)$$

Оскільки $d\omega$ - величина нескінченно мала, то $\dot{A}(\omega)$ також нескінченно мала. Отже, неперіодичне коливання можна розкласти на нескінченне число гармонічних коливань з нескінченно малими амплітудами. На практиці користуватись нескінченно малими величинами незручно, то му спектр неперіодичного коливання описується функцією спектральної густини

$$S(j\omega) = \pi \frac{\dot{A}(\omega)}{d\omega} = \int_{-\infty}^{\infty} S_T(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (3.9)$$

що визначається на всій осі частот ω від $-\infty$ до ∞ .

Вираз (3.9) називають прямий перетворенням Фур'є.

Зворотне перетворення Фур'є визначає сигнал за спектральною густиною

$$S_T(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

3.2. Опис лабораторної установки

Лабораторний макет включає формувачі імпульсних сигналів (схема 1) (рис. 3.1), послідовний коливальний контур (схема 2) і аперіодичні LR- та RC-кола (схема 3). Під'єднання схем до входних та вихідних клем здійснюється за допомогою перемикача S3.

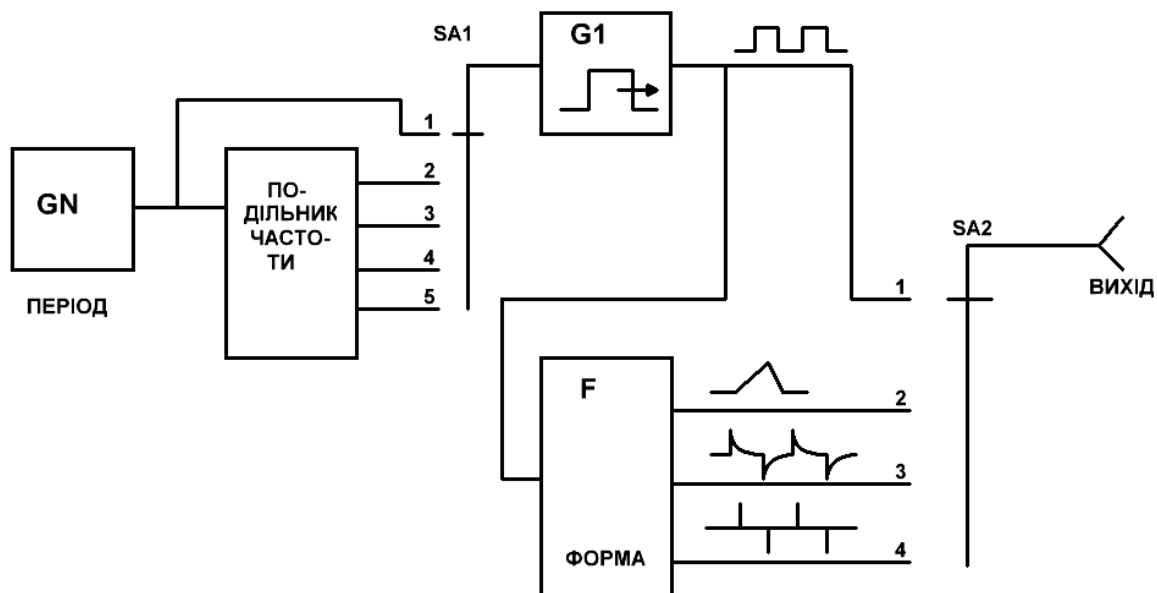


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного макета

Схема складається з генератора прямокутних імпульсів GN, подільника частоти, одновібратора G1, формувача сигналів F. Період сигналів плавно регулюється ручкою "Період" і дискретно перемикачем S1. Тривалість імпульсів змінюється ручкою " t_i ", форма сигналів - перемикачем S2, ручками " t_i " і "Форма".

3.3. Домашнє завдання

Розрахувати і побудувати графіки амплітудного спектра періодичної послідовності прямокутних імпульсів. Розрахунок вести до другого нуля огинаючої спектра. Параметри сигналів приведені в табл. 7.1.

Таблиця 3.1 – Параметри сигналів

№ бригади	1	2.	3	4	5	6
Тривалість імп., мкс	10	5	2,5	4	2	5
Період, мкс	100	50	25	40	20	40

За результатами розрахунків визначити ширину спектра сигналу.

3.4. Лабораторне завдання та методичні вказівки

3.4.1. На виході генератора GN одержати прямокутні імпульси з періодом 100 мкс. Для цього необхідно:

- перемикачем S3 вибрати схему 1 макета;
- під'єднати до виходу макета осцилограф та аналізатор спектра;
- встановити перемикач S2 в положення 1. Здійснити синхронізацію осцилографа, вибрати зручний розмір зображення і частоту горизонтальної розгортки;
- ручкою "Період" і перемикачем S1 встановити період імпульсів 100 мкс (перевірити осцилографом);
- перемикаючи S2 в положення 2; 3; 4, впевнитись, що період сигналів іншої форми залишився 100 мкс. Форма сигналів змінюється ручками "Форма" і " t_i ".

3.4.2. Дослідити спектри періодичних сигналів різної форми з однаковими періодами:

- перемикаючи S2 в положення 2; 3, 4 і обертаючи ручки "Форма" і " t_i ", подати на вхід аналізатора спектра періодичні послідовності імпульсів різної форми з однаковим періодом. Спостерігаючи спектри сигналів, встановити, що в них спільне і різне;
- по спектрограмах визначити частоту першої гармоніки і відстань по осі частот між сусідніми спектральними складовими;

3.4.3. Дослідити, як змінюється спектр при зміні періоду імпульсів. Для цього необхідно:

- перемкнути S2 в положення 1. Шляхом поділу частоти імпульсів в 2; 4; 8; 16 раз (перемикач S1 встановити відповідно в положення 2; 3; 4, 5) збільшувати період в таке ж число раз (тривалість імпульсів при цьому не змінюється). Спостерігати, як при цьому змінюється спектр;
- зробити те ж саме при одному з наступних положень (2; 3; 4) перемикача S2;
- за результатами експерименту зробити висновок про перетворенні періодичного сигналу в неперіодичний, а дискретного спектра в суцільний.

3.4.4. Дослідити спектр послідовності прямокутних імпульсів, які задані в домашньому завданні. При цьому:

- на вхід аналізатора спектра подати послідовність прямокутних імпульсів (S2 в положенні 1) з параметрами, вказаними в табл. 3.1. Необхідний період встановлюється перемикачем S1 і ручкою "Період", тривалість імпульсу - ручкою " t_i ";
- зарисувати одержану спектрограму, порівняти спектр з розрахованим в домашньому завданні.

3.4.5. Вияснити, як залежить спектр від тривалості імпульсу, цього, змінюючи тривалість імпульсу t_i , спостерігати зміну ширини спектра.

3.5. Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

1. Короткі теоретичні відомості.
2. Схеми досліджень.
3. Осцилограми спектрів.
4. Розрахунки і графіки, передбачені домашнім завданням.
5. Порівняльна характеристика експериментальних і розрахункових даних.
6. Висновки.

3.6. Питання для самоперевірки

1. Ряд Фур'є, його фізична суть.
2. Інтегральне перетворення Фур'є.
3. Властивості спектрів періодичних сигналів.
4. Залежність спектра від тривалості і періоду імпульсів.
5. Як зміниться спектр періодичного сигналу, якщо період повторення збільшити до нескінченності?
6. Який зв'язок існує між суцільним спектром неперіодичного сигналу і дискретним спектром періодичного сигналу?
7. Як пов'язані між собою тривалість імпульсу і ширина спектра?

Література

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электроники. -М.: Энергоатомиздат, ч.1, 2. 1987.
2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. и др. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 1975.
3. Зернов П.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. -Л.: Энергия. 1972.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника". -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Высшая школа, 1988.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. -М.: Энергия. 1986.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Проходження керуючих сигналів через лінійні кола

Мета роботи: Дослідження процесів проходження керуючих сигналів через лінійні кола. Процеси диференціювання та інтегрування сигналів.

4.1 Основні позначення, розрахункові формули і означення

При аналізі передачі складних сигналів через лінійні радіотехнічні кола використовується принцип суперпозиції. Відповідно до цього відгук на виході лінійного кола на сумарний вплив дорівнює сумі відгуків на кожен вплив.

Шляхом гармонійного аналізу вхідного впливу можна визначити його спектральну характеристику, тим самим складний вхідний вплив аналітично представляється сукупністю найпростіших впливів (гармонік). Для визначення відгуку кола (вихідного сигналу) необхідно ще знати передаточну функцію кола. Передаточна функція кола – це відношення комплексних амплітуд вихідного сигналу до вхідного при гармонійному сигналі на вході:

$$\dot{K}(j\Omega) = \frac{\dot{U}_{вих}(j\Omega)}{\dot{U}_{вх}(j\Omega)}.$$

Оскільки $\dot{K}(j\Omega)$ – величина комплексна, то модуль передаточної функції $K(\Omega)$ визначає амплітудно-частотну характеристику кола, а аргумент $\varphi(\Omega)$ – фазочастотну характеристику. Ідеальні кола мають рівномірну АЧХ $K(\Omega) = const$ і лінійну ФЧХ $\varphi(\Omega) = -\Omega \cdot t_0$.

Метод аналізу передачі сигналів через лінійні кола, заснований на гармонійному розкладанні сигналів і визначенні передаточної функції, називається спектральним і включає наступні етапи:

- якщо вхідний вплив $S_{вх}(t)$, то його спектральна щільність визначається виразом $\dot{S}_{вх}(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{вх}(t) e^{-j\Omega t} dt$;
- передаточна функція кола – $\dot{K}(j\Omega)$;
- спектр вихідного сигналу $\dot{S}_{вих}(j\Omega) = \dot{S}_{вх}(j\Omega) \cdot \dot{K}(j\Omega)$;
- вихідний сигнал знаходиться на основі зворотному

перетворення Фур'є

$$S_{вих}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_{вих}(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_{вх}(j\Omega) \cdot \dot{K}(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega.$$

Замість перетворення Фур'є для обчислення вихідної напруги можна використовувати перетворення Лапласа:

$$S_{вих}(t) = \frac{1}{2\pi j} \cdot \int_{\varepsilon-j\infty}^{\varepsilon+j\infty} S_{вих}(P) e^{Pt} dP, \text{ де } \dot{S}_{вих}(P) = S_{вх}(P) \cdot \dot{K}(P).$$

Якщо вхідний вплив представляють у виді сукупності стрибків (імпульсів) напруги, то вихідний сигнал (відгук кола) визначається за методом інтеграла накладення. При цьому необхідно знати перехідну (імпульсну) характеристику кола. Перехідна характеристика кола $\eta(t)$ – це відгук кола на одиничний стрибок напруги (чи струму).

Представимо вхідний вплив у виді суми стрибків малої величини, що запізнюються по відношенню один до одного $\Delta\tau$ і стрибка при $t = 0$ (рис. 4.1).

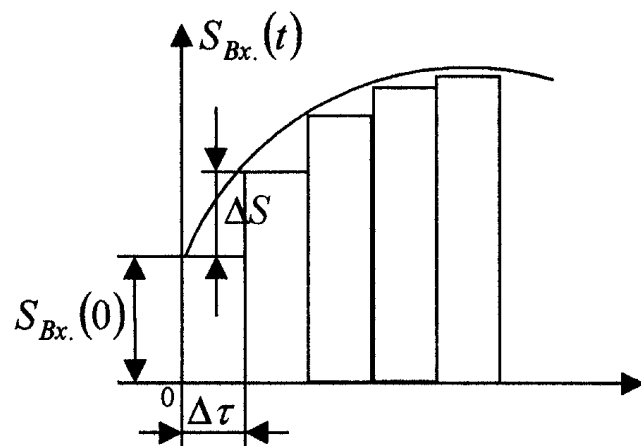


Рисунок 4.1 – Представлення вхідного сигналу у вигляді сукупності стрибків

Реакція кола на перший стрибок дорівнює відгуку кола на одиничний стрибок [тобто перехідній характеристиці $\eta(t)$], помноженої на висоту стрибка $S_{вх}(0) \cdot h(t)$, реакція на зміщений стрибок – $\Delta S_{вх} \eta(t - \Delta\tau)$. Тут ΔS – висота стрибка, $\eta(t - \Delta\tau)$ – перехідна характеристика, зміщена убік запізнювання на $\Delta\tau$. Отже, для розглянутого моменту часу $t = K \cdot \Delta\tau$

відгук кола

$$S_{\text{вих}}(t) \approx S_{\text{вх}}(0) \cdot \eta(t) + \sum_{K=1}^n \Delta S_{\text{вх}} K \cdot \eta(t - K \cdot \Delta \tau).$$

При $n \rightarrow \infty$ і $\Delta \tau \rightarrow 0$ отримаємо наступний вираз у вигляді інтегралу Дюамеля

$$\begin{aligned} S_{\text{вих}}(t) &= S_{\text{вх}}(0) \cdot \eta(t) + \lim \sum_{K=1}^n \frac{\Delta S_{\text{вих}}}{\Delta \tau} \cdot \eta(t - K \cdot \Delta \tau) \Delta \tau = \\ &= S_{\text{вх}}(0) \cdot \eta(t) + \int_0^t S_{\text{вх}}(\tau) \cdot \eta(t - \tau) dt; \end{aligned}$$

або $S_{\text{вих}}(t) = S_{\text{вх}}(0) \cdot \eta(t) + \int_0^t S'_{\text{вх}}(\tau) \cdot \eta(t - \tau) d\tau.$

Якщо представити вхідний сигнал сукупністю великого числа коротких імпульсів (див. рис. 4.2), то реакцію кола визначають через імпульсну характеристику.

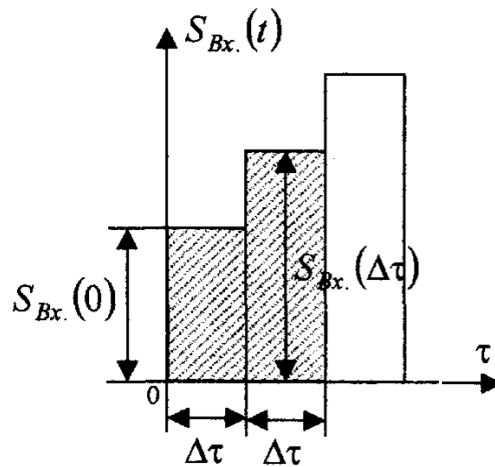


Рисунок 4.2 – Представлення вхідного сигналу у вигляді сукупності імпульсів

Імпульсна характеристика $q(t)$ – це відгук кола на одиничний δ - імпульс. Реакція кола на перший імпульс дорівнює реакції на одиничний імпульс (тобто імпульсній характеристиці $q(t)$), помноженій на площу імпульсу $S_{\text{вх}}(0) \Delta \tau \cdot q(t)$; реакція кола на другий імпульс $S_{\text{вх}}(\Delta \tau) \Delta \tau \cdot q(t - \Delta \tau)$, де через $S_{\text{вх}}(\Delta \tau) \Delta \tau$ позначено площу другого імпульсу, $q(t - \Delta \tau)$ – імпульсна характеристика, що відповідає моменту $\Delta \tau$.

Відгук кола для моменту $t = n \cdot \Delta \tau$ становитиме

$$S_{Bux} \approx \sum_{K=0}^n S_{Bx}(K \cdot \Delta\tau) \Delta\tau \cdot q(t - K \cdot \Delta\tau).$$

Коли виконати граничний перехід при $n \rightarrow \infty$ і $\Delta\tau \rightarrow 0$, то отримаємо $S_{Bux} = \lim \sum_{K=0}^n S_{Bx}(K \cdot \Delta\tau) \Delta\tau \cdot q(t - K \cdot \Delta\tau) = \int_0^t S_{Bx}(\tau) \cdot q(t - \tau) d\tau$.

Передаточна функція є спектральною (частотною) характеристикою, а перехідна й імпульсна характеристики – часові характеристики. Усі ці характеристики зв'язані між собою:

- імпульсна характеристика і передаточна функція:

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{K}(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega,$$

де імпульсна характеристика визначена як відгук кола на δ – функцію спектральним методом;

- імпульсна і перехідна характеристика - $q(t) = \eta'(t)$; $q(t) = \eta(0) \cdot \delta(t) + \eta'(t)$, тобто імпульсна характеристика дорівнює похідній від перехідної;
- перехідна характеристика і передатна функція:

$$\eta(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\Omega} \cdot \dot{K}(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega.$$

Виходячи з цього зв'язку можна визначити одну характеристику через іншу. Нехай, наприклад, передаточна функція RC - кола (див. рис.

4.3) має вигляд $\dot{K}(j\Omega) = \frac{R}{R + \frac{1}{j\Omega C}} = \frac{j\Omega C \cdot R}{1 + j\Omega C \cdot R}$.

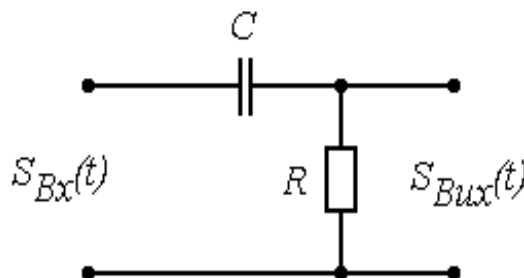


Рисунок 4.3 – Схема найпростішого RC- кола

Перехідна характеристика

$$\eta(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\Omega} \cdot K(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\Omega} \cdot \frac{j\Omega C \cdot R}{1 + j\Omega C \cdot R} e^{j\Omega t} dn;$$

або в операторній формі:

$$\eta(t) = \frac{1}{2\pi j} \cdot \int_{C-j\infty}^{C+j\infty} \frac{1}{P} \cdot \frac{PC \cdot R}{1 + PC \cdot R} e^{Pt} dP = \sum res(t) = e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Імпульсна характеристика:

$$q(t) = \eta(0) \cdot \delta(t) + \eta'(t) = 1 \cdot \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Застосуємо розглянуті методи аналізу для визначення вихідної напруги у RC - колі, якщо на вході діє прямокутний імпульс. Прямокутний імпульс можна представити у вигляді різниці двох однакових стрибків, зміщених у часі на величину t_0 (див. рис. 4.4)

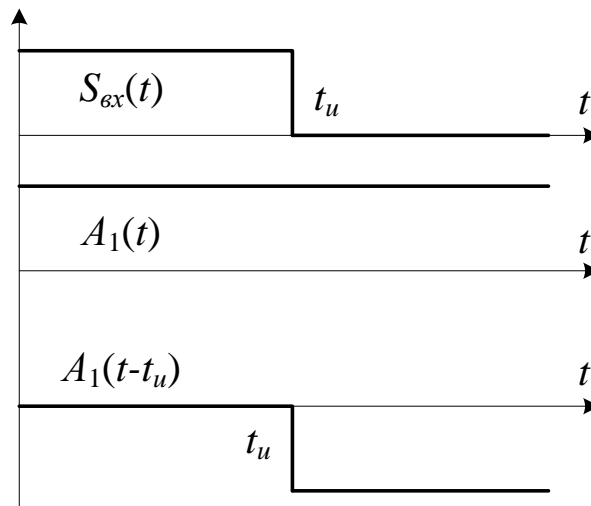


Рисунок 4.4 – Представлення прямокутного імпульсу через різницю стрибків

Тобто $S_{Bx}(t) = A_1(t) - A_1(t - t_u)$, де A_1 - амплітуда імпульсу (величина стрибка напруги); t_u - тривалість імпульсу. Тоді напруга на опорі легко знаходиться через перехідну характеристику $h(t)$ $U_r(t) = A \cdot h(t) - A \cdot h(t - t_u)$.

Для даного кола $h(t) = e^{-\frac{t}{RC}}$, тоді

$$U_n(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} \cdot 1(t) - Ae^{-\frac{t-t_u}{RC}} \cdot 1(t-t_u)$$

Такий же результат вийде і при аналізі спектральним методом. Легко можна знайти і напругу на ємності.

Форма сигналів на елементах кола залежить від співвідношення постійної часу кола $RC = \tau_0$ тривалості імпульсу t_u . Для випадку $\tau_0 \ll t_u$ і $\tau_0 \gg t_u$ графіки сигналів R і C побудовані на рис. 4.5а та 4.5б відповідно. Аналогічні розрахунки можна провести і для RL - кіл.

Кола RC і RL при відповідному знятті вихідної напруги і визначених умов застосовуються для одержання сигналу, приблизно пропорційного похідній від вхідного сигналу, тобто як *диференціальні* кола (рис. 4.5а) чи для одержання сигналу, пропорційного інтегралу вхідного сигналу, тобто як *інтегровальні* кола (рис. 4.5б).

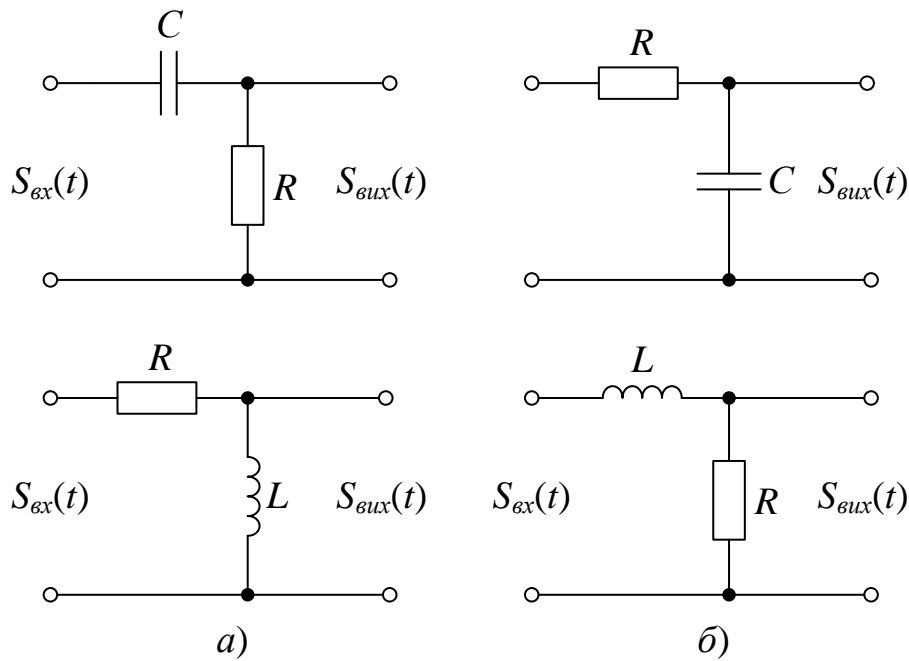


Рисунок 4.5 – Електричні схеми диференціальних та інтегровальних кіл

Для RC -кола запишемо за законом Кірхгофа

$$R_i(t) + \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt = S_{Bx}(t); \quad i(t) = C \frac{dU_c}{dt}$$

Нехай напруга знімається з опору R і виконується співвідношення $RC = \tau_0 \ll t_i$. У момент $t = 0$ напруга на ємності дорівнює нулю, і вся напруга прикладена до опору. По закінченні перехідного процесу, який

триває $(3\div 5)\tau_0$, при нашій умові конденсатор зарядиться майже до повної вхідної напруги $U_c(t) \approx S_{Bx}(t)$. Напруга на опорі буде дорівнювати

$$U_R(t) = RC \frac{dU_c(t)}{dt} \approx RC \frac{dS_{Bx}(t)}{dt} = \tau_0 \frac{dS_{Bx}(t)}{dt}.$$

Отже, на виході кола, що диференціює, при $\tau_0 \ll t_i$ буде сигнал у формі коротких імпульсів (див. рис. 4.6а). Чим менше τ_0 в порівнянні з тривалістю імпульсу t_i тим *краще диференціювання*. В ідеальному випадку вихідний сигнал являє собою два δ - імпульси. Умову *задовільного диференціювання* можна одержати з спектральної точки зору. Вона записується у вигляді $\Omega\tau_0 \ll 1$. Ця умова повинна виконуватись для всіх частот головної частини спектра. Якщо головна частина спектра прямокутного імпульсу містить частоти в смузі $[0, 2\pi/t_i]$, то умова запишеться: $\tau_0(2\pi/t_i) \ll 1$, або $\tau_0 \ll t_i$. Отже, **чим довший імпульс** (нижче частоти головної частини спектра) **тим краще він диференціюється** при тій самій сталій часу τ_0 .

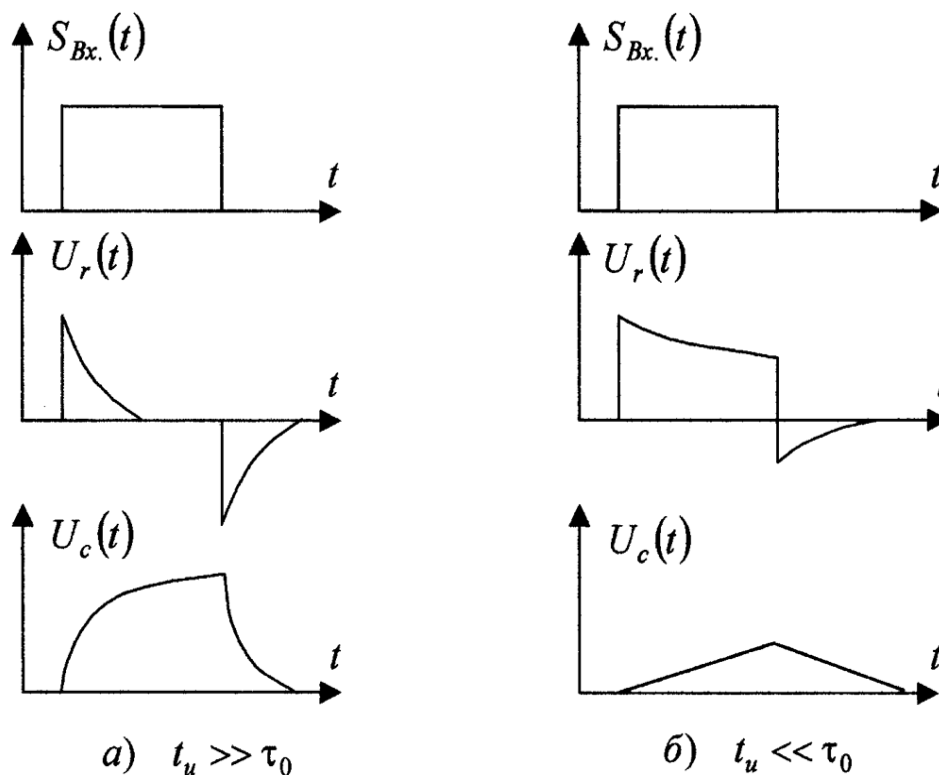


Рисунок 4.6 – Форма сигналів на виходах диференціальних та інтегровальних кіл

Кола (рис. 4.5, б) при виконанні умови $\tau_0 \gg t_i$ застосовуються для інтегрування сигналів. На їх виході можна одержати напругу

$$S_{вих}(t) \approx \frac{1}{\tau_0} \cdot \int S_{вх}(t) dt .$$

У цьому випадку на ємності до моменту закінчення імпульсу перехідний процес не встигає закінчитися, і напруга на ній наростає лише до малої величини (рис. 4.6,б).

З частотної точки зору умова задовільного інтегрування запишеться як $\Omega\tau_0 \gg 1$, тобто при тій же τ_0 **краще інтегрується короткий імпульс**.

Кола RC і RL взаємозамінні, тому що струм в індуктивності під час перехідного процесу змінюється за тим законом, що і напруга на ємності.

4.2 Опис лабораторної установки

Прилади й апаратура, використовувані в роботі:

- генератор імпульсів Г5-54;
- осцилограф С1-73;
- генератор сигналів Г3-109;
- макет.

Макет містить найпростіші RL – і RC –кола (рис. 4.5), у яких передбачена регулювання постійної часу кола τ_0 , шляхом зміни параметрів елементів R , L , C .

4.3 Домашнє завдання

1. Повторити розділ "Проходження сигналів через лінійні кола".
2. Розрахувати передаточну функцію і побудувати її графік для заданого кола.
3. Розрахувати і побудувати імпульсну і перехідну характеристику заданого кола.
4. Розрахувати відгук кола при дії на вхід прямокутного імпульсу.
5. Повторити розділ "Диференціювання та інтегрування сигналів".
6. Зобразити напругу на виході ідеального і реального диференціального кола при дії на вході прямокутного імпульсу.
7. Зобразити напругу на виході ідеального і реального інтегрувального кола при дії на вході прямокутного імпульсу.

4.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Зняти і побудувати амплітудно-частотну характеристику заданого кола. Для цього треба від Г3-109 подати сигнал амплітудою 2В. Змінюючи частоту від нуля до 200 кГц, відзначати напругу на виході кола.

Результати вимірювань звести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

F,										
U, В										

Порівняти результати експерименту з розрахунком.

2. Зняти імпульсну характеристику заданого кола. Для цього треба подати від генератора імпульсів Г5-54 імпульси на вхід кола. Спостерігати імпульсну характеристику на екрані осцилографа, замалювати її в масштабі напруги і часу. Порівняти з розрахунковою.

Примітка: Для зняття імпульсної характеристики тривалість імпульсу t_i повинна бути мала, а період повторення T великий у порівнянні з постійною часу кола: $\tau_0 \approx (5-10)t_i$; $T \gg \tau_0$.

3. Зняти перехідну характеристику заданого кола. Для цього подати імпульси від Г5-54 на вхід кола. Підібрати $t_i \approx (5-10) \tau_0$. Спостерігати і замалювати перехідну характеристику. Порівняти з розрахунковою.

Примітка: При $t_i \gg \tau_0$ відгук кола на передній фронт імпульсу збігається з перехідною характеристикою.

4. Досліджувати проходження прямокутних імпульсів через кола RL і RC (рис.3.5). Подати від Г5-54 прямокутні імпульси тривалістю 100 мкс. амплітудою $(1 \div 10)$ В. Замалювати в масштабі напруги і часу по 3 - 4 характерних осцилограмам напруги на кожному з елементів кола при різних τ_0 . Відзначити взаємозамінність кіл RL і RC .

5. Вибрати кола, здатні диференціювати. Підібрати постійну кола так, щоб вийшло задовільне диференціювання імпульсу $t_i = 100$ мкс. Встановити тривалість імпульсу $t_i = 1000$ мкс.; $t_i = 10$ мкс. Простежити зміну форми вихідного сигналу при зміні тривалості імпульсу (τ_0 не змінюється).

6. Вибрати інтегрувальні кола. Підібрати постійну кола так, щоб вийшло задовільне інтегрування імпульсу $t_i = 100$ мкс. Змінюючи тривалість імпульсу $t_i = 10$ мкс, $t_i = 1000$ мкс, простежити за зміною форми вихідної напруги (τ_0 не змінюється).

Примітка: Осцилограми напруги повинні бути зображені в масштабі напруги і часу.

4.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

- 1) розрахунки, виконані при підготовці;
- 2) графіки, одержані в результаті розрахунків і експерименту

(зображуються на одному малюнку);

- 3) таблиці вимірювань, осцилограми;
- 4) електричні схеми досліджуваних кіл.

4.6 Питання для самоперевірки

1. Які кола називаються лінійними?
2. Що таке принцип накладення (суперпозиції)?
3. Дайте визначення передаточної функції кола, перехідної та імпульсної характеристик.
4. Як одержати експериментально АЧХ кола за допомогою генератора сигналів і вольтметра?
5. Як зняти експериментально імпульсну і перехідну характеристику?
6. Вказати можливі схеми диференціальних RL і RC кіл.
7. Дайте визначення постійної часу кола.
8. Записати умову задовільного диференціювання з часової та частотної точок зору.
9. Вказати можливі схеми інтегровальних RL і RC кіл.
10. Записати умову задовільного інтегрування з часової і частотної точок зору.

Література: [1, с. 38 -67; 2, с. 13- 25; 3, с. 43-57].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження проходження амплітудно-модульованого сигналу через коливний контур

Мета роботи: Вивчити вплив частотних властивостей поодинокого коливного контуру на форму згинаючої модуляції амплітудно-модульованого коливання (АМК).

5.1 Теоретичні відомості

Амплітудно-модульоване коливання (АМК) при тональній модуляції можна уявити у вигляді:

$$e(t) = E_0 (1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t \quad (5.1)$$

де E_0 - амплітуда несучого коливання (модуляція відсутня); Ω - частота модулюючого коливання; ω_0 - частота несучого коливання; M - коефіцієнт глибини модуляції.

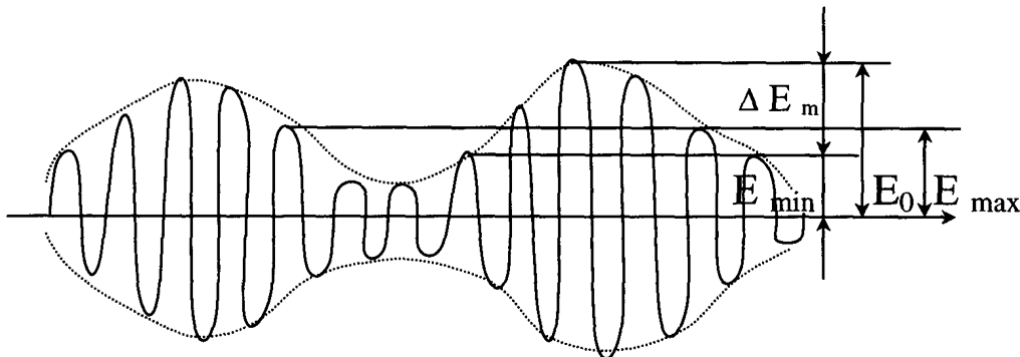


Рисунок 5.1 – Амплітудно-модульоване коливання при тональній модуляції

Залежність (5.1) можна уявити у вигляді суми гармонічних коливань:

$$M = \frac{\Delta E_m}{E_0} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}},$$

$$e(t) = E_0 \cos \omega_0 t + \frac{ME}{2} (\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t). \quad (5.2)$$

Цей вираз показує, що у випадку модуляції частотний спектр АМК містить три гармонічні високочастотні коливання. Вираз (2) показує, також, що амплітуда бічних складових ($0,5ME_0$) не перевищує половини амплітуди несучого коливання.

Частотний спектр тонального АМК зображений на рис. 5.2.

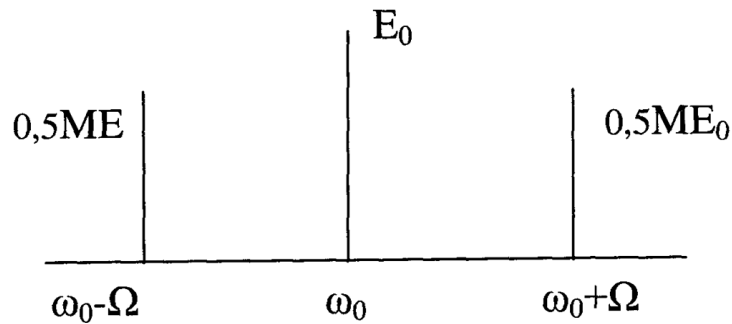


Рисунок 5.2 – Частотний спектр тонального АМК

Основна корисна інформація при АМК міститься в бічних складових модульованого сигналу. Енергія цих складових залежить від величини коефіцієнта модуляції бічних складових M .

Розглянемо особливості проходження АМК через коливні системи.

Нехай АМК $e(t) = E_0(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$ із глибиною модуляції M прикладено до послідовного контуру (рис. 5.3). Де

$\varphi = \arctan \xi = \arctan \left(\frac{2\Omega}{\omega_p} Q \right)$, $I_0 = E_0/R$ - амплітуда струму несучої частоти;

$M' = \frac{M}{\sqrt{1 + \xi^2}}$ - глибина модуляції струму.

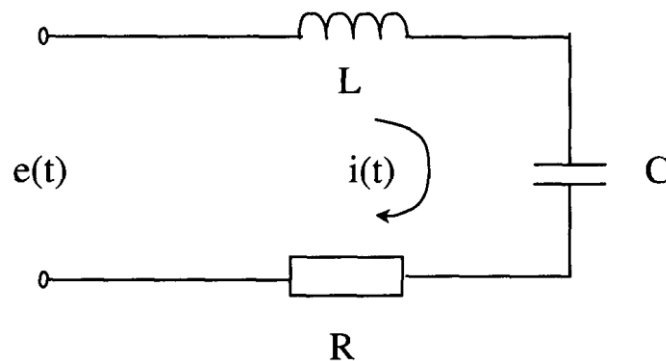


Рисунок 5.3 – Амплітудно-модульоване коливання із глибиною модуляції M прикладеного до послідовного контуру

На верхній бічній частоті струм запізнюється на кут відносно е.р.с., а на нижній бічній частоті навпаки, струм випереджує е.р.с. на такий само кут. Крім цього, амплітуда бічних складових струму послаблена по відношенню із струмом несучого коливання в $\sqrt{1 + \xi^2}$ разів.

Закон зміни огинаючої амплітуди струму співпадає із зміною амплітуди е.р.с., однак, через нерівномірності резонансної кривої контуру мають наступні різниці між огинаючими струму й е.р.с. :

1. Глибина модуляції струму M' менше, ніж глибина модуляції е.р.с.

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1+a^2}}$$

2. Огинаюча амплітуда струму запізнюється на кут φ відносно огинаючої е.р.с..

Коефіцієнт,

$$D = \frac{M'}{M} = \frac{1}{\sqrt{1+a^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\Omega}{\omega_p}q\right)^2}},$$

який визначає зменшення глибини модуляції струму відносно е.р.с. називається коефіцієнт демодуляції. Графік залежності від частоти модуляції співпадає з правою віткою резонансної кривої. З підвищенням частоти модуляції Ω коефіцієнт демодуляції падає. При передачі складного сигналу верхнім частотам відповідають менші коефіцієнти демодуляції. Чим вище частота, тим більше послаблення. Так як напруга на виході детектора приймача пропорційна коефіцієнт модуляції, то отримується відносно послаблення верхніх частот повідомлення. Таким чином, залежність $D(\Omega)$ визначає ступінь лінійних частотних спотворень передаваного повідомлення.

Картина змінюється при настройці контуру коли $\omega_p \neq \omega_0$. Цей випадок зображений на рис. 5.5.

Векторна діаграма струму зображена на рис. 5.6.

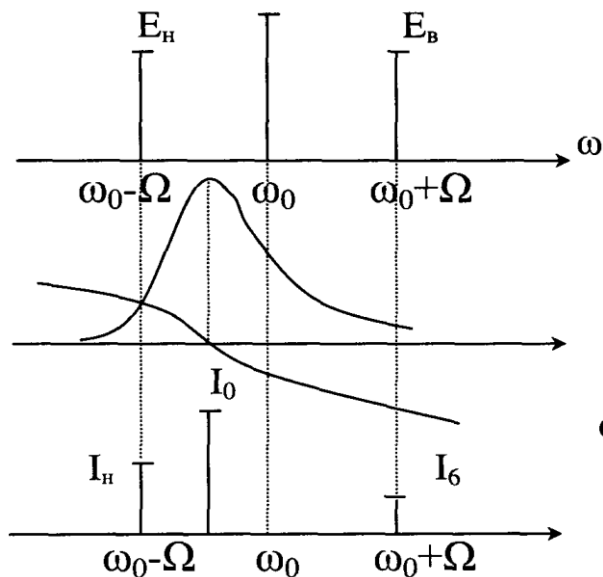


Рисунок 5.5 – Спектр при настройці контуру коли $\omega_p \neq \omega_0$

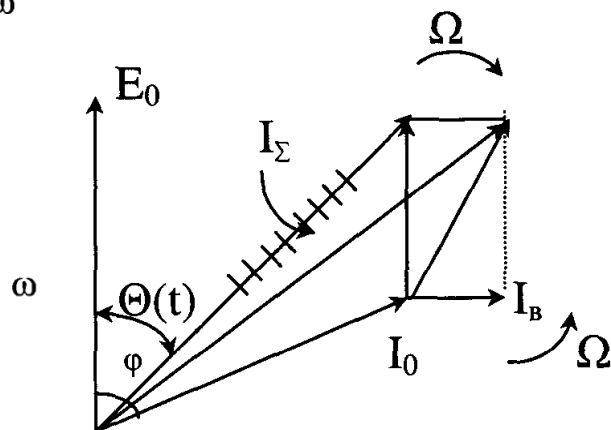


Рисунок 5.6 – Векторна діаграма струму

Припустимо, що несуча частота більше резонансної частоти. В цьому випадку вектор складової струму несучої частоти I_0 буде відставати від вектора напруги E_0 на кут φ , тому що на частоті $\omega_0 > \omega_p$ контур володіє індуктивним опором. Вектори бічних складових струму мають відповідні фазові зсуви. Амплітуда струму нижньої бічної частоти (рис. 5.5) виходить більше амплітуди струму на верхній бічній частоті. Обертання векторів бічних частот у часі відносно вектора несучого коливання призводить до того, що модуль сумарного вектора буде безперервно змінюватись як по довжині, так і по напрямку. В результаті огибаюча струму в колі спотворюється.

Для відновлення передаваного повідомлення на виході радіолінії, що робить з АМ, вживається амплітудний детектор, що являє собою нелінійний прилад. Напруга на виході детектора пропорційна згинаючій модульованого коливання. Тому через порушення симетрії амплітуд та фаз коливань бічних частот, при неточній настройці контуру на несучу частоту $\omega_p \neq \omega_0$ виникає нелінійне спотворення передаваного повідомлення. Ці спотворення виявляються через виникнення нових спектральних складових у спектрі вихідного сигналу.

Викладені міркування стосуються спотворень, які випробовує струм. На практиці в якості відгуку резонансного кола частіше використовують напругу на реактивних елементах коливної системи.

Напруга на індуктивності або на ємності пов'язані з аналогічною характеристикою струму співвідношенням:

$$U_L = I \cdot j\omega L; U_C = I \frac{1}{j\omega C}.$$

Звідси випливає, що огибаюча напруги $U_L(t)$ або $U_C(t)$ будуть розрізнятися від огибаючої струму $i(t)$. Однак, якщо вхідний вплив має порівняно вузький спектр, цими відмінностями можна знехтувати, тому що множники ωL і $1/\omega C$ у вузькій смузі частот змінюється незначно.

Отриманні вище результати нескладно розповсюдити на будь-яку коливну систему. Якщо резонансна крива такої системи симетрична відносно несучої частоти ω_0 , то права вітка цієї кривої може розглядатись як залежність коефіцієнта демодуляції від частот модуляції $D=f(\Omega)$.

Зупинимось на деяких особливостях проходження через двоконтурну систему при сильному зв'язку контурів. Якщо $K > K_{кр}$ і на вхід системи подається АМК, то при частотах модуляції Ω відповідних підйомам резонансної кривої, коефіцієнт демодуляції буде більше 1. Це означає, що глибина модуляції вихідного сигналу буде більше вхідного. В цьому випадку можлива перемодуляція, в результаті чого на виході детектора виникають великі нелінійні спотворення.

5.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається наступних приладів:

а) низькочастотного генератора ГЗ- 33 (ГЗ-102);

б) високочастотного генератора Г4-18 (Г4-102);

в) електронного осцилографа С1-72, С1-73;

г) макета коливного контуру;

д) лампового вольтметра ВЗ-38. Блок-схема дослідження приведена на рис. 5.7.

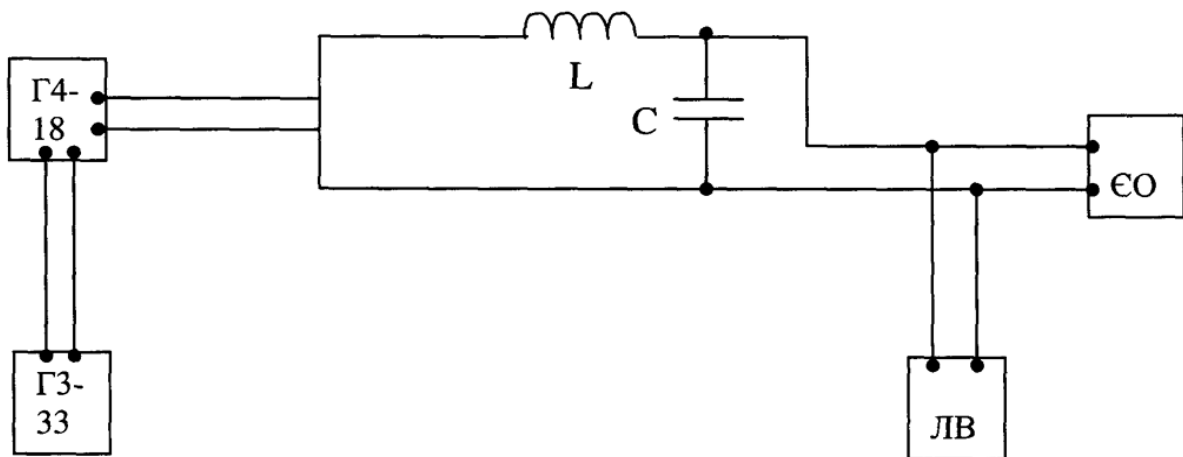


Рисунок 5.7 - Блок-схема дослідження

Для отримання АМК необхідно подати низькочастотну напругу з виходу генератора ГЗ-33 на гнізді "Внешн. мод." генератора Г4-18. Частота несучої залежить від настроювання Г4-18, а частота зміни амплітуди ВЧК - від настроювання генератора ГЗ-33. Коефіцієнт модуляції визначається по модулеметру "m %" на генераторі Г4-18 при умові, що стрілка несучої встановлена на відмітці "К".

5.3 Домашнє завдання

1. Повторити "Амплітудне - модульовані коливання".
2. Повторити основні характеристики коливних систем.
3. Вивчити проходження АМК через коливні системи.

5.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки до виконання роботи

1. Зібрати схему для дослідження.
2. Зняти резонансну криву контуру $E_c = \psi(t)$ (для вимірювання

крім лампового вольтметра використовується також електронний осцилограф).

3. Побудувати резонансну криву, по ній визначити резонансну частоту f_p , смугу пропускання $2\Delta f$, а добротність контуру Q .

4. Подати на вхід контуру АМК з несучою частотою, що дорівнює резонансній частоті контуру, що модулює частоту F послідовно встановлювати її 1.5, 10, 15кГц. Замалювати з екрана осцилографа огинаючі модульованого коливання кожної моделюючої частоти F , підтримуючи на вході контуру $M=50\%$.

5. По отриманим осцилограмам розрахувати коефіцієнти модуляції та коефіцієнти демодуляції D для всіх модулюючих частот F . Результати експериментів та обчислень занести до таблиці 1.

6. По формулі

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Omega}{\omega_p} - Q \right)^2}}$$

розрахувати значення для різних модулюючих частот та результати обчислень занести до таблиці 5.1.

7. На одному з графіків побудувати залежність коефіцієнта демодуляції від частоти модуляції $F = 2\pi/\Omega$ розрахованого по осцилограмам та по формулі.

8. Послідовно подати на вхід контуру ВЧ коливання з несучою, що дорівнює f_p $2\Delta f$, яке промодулювати частотами 10 кГц, 15 кГц. Замалювати з екрана осцилографа осцилограмми огинаючої для кожної частоти модуляції F , підтримуючи на вході контуру $M=50\%$. Звернути увагу на спотворення форми огинаючої.

Таблиця 5.1 – Результати обчислень

F, кГц	
E_{\max}	
E_{\min}	
M'	
$D_{\text{експ.}}$	
$D_{\text{розн.}}$	

5.5 Вказівки до звіту

У звіті представляються:

1. Схема дослідження.
2. Осцилограми, графіки, результати обчислень, таблиці.
3. Висновки та пояснення отриманих результатів.

5.6 Питання для самоперевірки

1. Що називається коефіцієнтом модуляції (глибиною модуляції) для АМК?
2. Як визначити глибину модуляції АМК по осцилограмам?
3. Як визначити спектр АМК по відомому спектру моделюючої напруги?
4. Чому дорівнює ширина спектра АМК?
5. Векторне представлення найпростішого АМК?
6. Рівняння та вигляд резонансної кривої для послідовного коливного контуру.
7. Як по рівнянню резонансної кривої визначити смугу пропускання $2\Delta\omega$ та добротність контуру Q ?
8. Що називається коефіцієнтом модуляції ?
9. Чим пояснити демодуляцію АМК при його проходженні через резонансну систему ?
10. Як залежить коефіцієнт демодуляції від частоти модуляції, від добротності контуру?
11. Особливості проходження АМК через двоконтурну коливну систему.
12. Які спотворення (лінійні та нелінійні) АМК утворюються при його проходженні через коливний контур при точній настройці його на несучу частоту.
13. Які спотворення АМК утворюються при проходженні його через коливний контур при растройці його відносно несучої частоти.

Література

1. И. С. Гоноровский, РТЦиС, 1971, с. 111-110, 245-251.
2. И. С. Гоноровский, РТЦиС, т. 1, 1966, с. 131-141, 251-256.
3. И. С. Гоноровский, РТЦиС, 1964, с. 82-89, 314-318.
4. Н. В. Зернов, В. Г. Карпов. Теория радиотехнических цепей, 1972, стр. 579-584, 552-555, 558-560.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Проходження радіоімпульсів через вибіркові кола

Мета роботи: дослідження спотворень радіоімпульсів з прямокутною обвідною та гармонічним заповненням при їх проходженні через вибіркові кола у вигляді послідовного, паралельного та системи зв'язаних коливальних контурів.

6.1 Основні позначення, розрахункові формули і означення

Для знаходження відгуку вибіркового лінійного кола на вхідне діяння у вигляді радіоімпульсу з прямокутною обвідною та немодульованим гармонічним заповненням необхідно розглядати процеси на передньому фронті та на зрізі радіоімпульсу. Для цього використовують різні методи:

- класичний, оснований на принципі накладання вільних та вимушених складових, що дозволяє отримати наочну фізичну інтерпретацію результатів;
- наближений спектральний, за допомогою якого можливо знаходити комплексну обвідну вихідного колювання;
- метод інтеграла Дюамеля для обвідних.

Аналіз усталеного режиму у послідовному коливальному контурі при вмиканні гармонічної е.р.с. $e(t) = E \cos(\omega_0 t + \theta_0)$ приводить до наступних результатів для струму у контурі:

а) при $\omega_0 = \omega_p$

$$i(t) = (E/R) (1 - e^{-t/\tau}) \cos(\omega_0 t + \theta_0);$$

б) при $\omega_0 \neq \omega_p$

$$i(t) = E/[R \sqrt{1 + (\Delta\omega\tau)^2}] [\cos(\omega_0 t + \theta_0 - \varphi) - e^{-t/\tau} \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \varphi)],$$

де $\varphi = \arctg \Delta\omega\tau$, $\tau = 2L/R$.

При збіжності частот вимушених і вільних колювань процес встановлення має аперіодичний характер. Час зростання колювань від 0 до $0.9(E/R)$ при $\omega_0 = \omega_p$ визначається умовою $(E/R)(1 - e^{-t_n/\tau}) = 0.9 (E/R)$ і дорівнює $t_n = 2.3\tau = 4.6Q/\omega_p$; де Q – добротність коливального контуру.

При значних розладнаннях процес встановлення обвідної приймає коливальний характер. Це пояснюється биттям вимушених та вільних колювань, частоти яких у даному разі не співпадають. Частота биття визначається величиною розладнання $|\Delta\omega|$. Після припинення дії зовнішньої гармонічної е.р.с. у колі існуватимуть лише експоненційно спадаючі вільні колювання.

У зв'язаних коливальних колах характер процесу встановлення при $\omega_0 = \omega_{p1} = \omega_{p2}$ залежить також від коефіцієнта зв'язку між коливальними

контурами. Так, напруга на ємності другого контуру при вмиканні гармонічної е.р.с. визначається виразом

$$U_{c2}(t) = E \frac{AQ}{1+A^2} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \left(\cos\left(\frac{A}{\tau}t\right) + \frac{1}{A} \sin\left(\frac{A}{\tau}t\right) \right) \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0),$$

де $A = KQ$ – фактор зв'язку (K – коефіцієнт зв'язку).

Процес встановлення обвідної при $K < 1$ є аперіодичним, а при $K > 1$ приймає коливальний характер. Биття коливань спостерігається також і при вимкненні гармонічної е.р.с., якщо зв'язок між контурами стає більшим за критичний. Це пояснюється тим, що вільні коливання мають у своєму складі дві згасаючі складові з частотами близькими до частот зв'язку

$$\omega_1 \approx \omega_0 / \sqrt{1+K}; \omega_2 \approx \omega_0 / \sqrt{1-K}.$$

Частота биття визначається частотами зв'язку $\Omega_6 = \omega_1 - \omega_2$.

6.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка дозволяє досліджувати проходження АМ-сигналів, радіоімпульсів з прямокутною обвідною та немодульованим гармонічним заповненням через послідовний, паралельний та зв'язані коливальні кола. У змінному пристрої лабораторної установки знаходяться внутрішній генератор радіоімпульсів, конденсатор змінної ємності C_1 і C_2 , котушка індуктивності, пристрій для регулювання зв'язку між контурами, допоміжні опори та органи керування, які розташовані на передній панелі. Передня панель змінного пристрою показана на рис. 6.1.

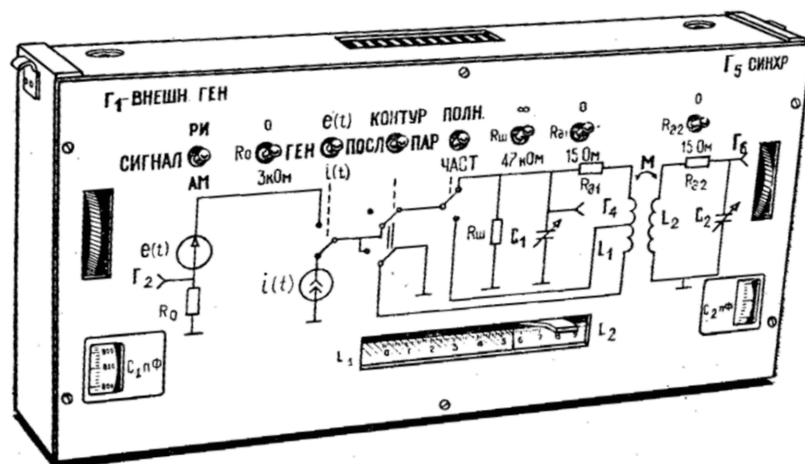


Рисунок 6.1 - Передня панель пристрою для виконання лабораторної роботи №6

Електрична схема першого контуру комутується тумблером "Контур", який дозволяє досліджувати послідовний і паралельний контур у позиції "Посл." та "Пар.". Ручки регулювання номіналів ємностей C_1 та C_2 розташовані на передній панелі змінного пристрою. Відлік ємностей у пФ можна виконувати по шкалам C_1 і C_2 .

Зв'язок між контурами регулюється шляхом зміни віддалі між котушками L_1 та L_2 . Відлік встановленої віддалі між котушками у міліметрах можна проводити по шкалі, яка теж розташована на передній панелі змінного пристрою.

Вибір вхідної дії виконується тумблером "Сигнал", який має два положення "PI" та "AM". У положенні "PI" на вхід досліджуваного вибіркового кола надходить сигнал від внутрішнього генератора радіоімпульсів. У положенні "AM" на вхід досліджуваного вибіркового кола надходить сигнал від зовнішнього генератора коливань, який підключається до гнізда Г1.

Параметри вхідного сигналу можна спостерігати та вимірювати у гніздах Г3. Досліджувані кола можуть заживлюватись від джерела з малим внутрішнім опором, якщо тумблер "Ген." поставлено у положення "e(t)", або від джерела струму з великим внутрішнім опором, якщо тумблер "Ген." поставлено у положення "i(t)".

Тумблери " R_0 ", " $R_{ш}$ ", " $R_{д1}$ ", " $R_{д2}$ " дозволяють перемикаючи величини вимірювального опору R_0 , опору шунта паралельного контуру $R_{ш}$, додаткових опорів $R_{д1}$, $R_{д2}$ у першому та другому контурі, відповідно.

У змінному пристрої передбачено також часткове та повне вмикання першого контуру. Вид вмикання першого контуру визначає тумблер "Увмкн.", який має два положення "Повн." та "Частк.". Гніздо Г2 увімкнено до вимірювального опору і дозволяє вимірювати параметри напруги, яка виділяється на опорі R_0 .

Напругу на ємності першого контуру подано для дослідження до гнізда Г4, а другого – до Г6, розташованого на правій боковій стінці змінного пристрою. До гнізда Г5 надходить імпульсний сигнал зовнішньої синхронізації осцилографа при дослідженні проходження радіоімпульсів через вибіркові кола

6.3 Домашнє завдання

Ознайомтеся з учбовим матеріалом наступних розділів:

- частотні характеристики послідовного коливального кола [1, с.267-269, 283-290] ;
- частотні характеристики паралельного коливального кола [1, с. 269-272, 283-290] ;

- багатоконтурні частотно-вибіркові системи [1, с.274-276, 283-290].

2. Зобразіть ескізи осцилограм на виході послідовного та паралельного коливального кола при діянні радіоімпульсу з прямокутною обвідною та немодульованим гармонічним заповненням для двох випадків:

а) при $\omega_0 = \omega_p$; б) при $\omega_0 \neq \omega_p$.

3. Намалюйте ескізи осцилограм вихідної напруги для системи зв'язаних коливальних кіл для трьох випадків:

- зв'язок менший критичного;
- зв'язок є критичним;
- зв'язок більший за критичний.

6.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Визначити параметри вхідної послідовності радіоімпульсів.

1.1. Підготувати прилади та установку до роботи. Підключити генератор високочастотних коливань до гнізда Г1, а вхід осцилографа до гнізда Г3, вхід зовнішньої синхронізації осцилографа з'єднати з гніздом Г6. Встановити тумблер "Сигн." у положення "РІ", тумблер "Ген." – у положення "e(t)", тумблер "Контур" -у положення "Посл.", тумблер „”Увмкн. ”- у положення "Повн.", тумблер " R_ш"- у положення "∞", тумблери " R_ш" і " R_{д1}"- у положення "0". Встановити максимальну віддаль між котушками(зв'язок між контурами практично відсутній).

1.2. Отримати нерухому осцилограму радіоімпульсу, використовуючи при цьому органи керування розгорткою осцилографа.

1.3. Визначити період заповнення, тривалість та період повтору радіоімпульсів. Для цього при каліброваній розгортці осцилографа вимірюваний часовий інтервал визначають добутком трьох величин: довжини інтервалу часу на екрані по горизонталі у поділках шкали, значення величини часу на одну поділку шкали заданого положення перемикача " Час/ поділка" та значення множника розгортки.

2. Дослідити проходження радіоімпульсів через послідовний коливальний контур, настроєний на частоту гармонічного заповнення f_0 , при різних додаткових опорах : а) $R_{д1} = 0$; б) $R_{д1} = 15$ Ом.

2.1.. Отримати нерухому осцилограму напруги на ємності послідовного контуру, який підключено до входу осцилографа – гніздо Г4.

2.2. Змінюючи ємність кола, настроїти контур на частоту заповнення по максимуму амплітуди радіоімпульсів напруги на ємності.

2.3. Не змінюючи підсилення осцилографа, замалювати осцилограми на ємності для двох значень добротності контуру. Добротність контуру можна змінювати тумблером " R_{д1}", вмикаючи або вимикаючи додатковий опір у перший контур. Визначити тривалість фронту радіоімпульсу.

3. Дослідити проходження радіоімпульсів через послідовний коливальний контур, резонансна частота, якого не співпадає з частотою заповнення вхідних радіоімпульсів, при додаткових опорах а) $R_{д1}=0$; б) $R_{д1}=15\text{ Ом}$.

3.1. Змінюючи ємність $C1$ розстроїти контур. Замалювати осцилограми для двох значень добротності контуру.

3.2. Виміряти період коливань биття.

3.3. Визначити частоту настройки кола, для цього слід встановити частоту зовнішнього генератора рівній резонансній частоті кола. При цьому тумблер "Сигн." повинен знаходитись у положенні "АМ".

3.4. Розрахувати період коливань биття та порівняти його зі значеннями, знайденими експериментально.

4. Визначити експериментально добротність послідовного кола, для двох значень додаткових опорів: а) $R_{д1}=0$; б) $R_{д1}=15\text{ Ом}$.

4.1. Підключити гармонічну дію до послідовного кола. При цьому При цьому тумблер "Сигн." повинен знаходитись у положенні "АМ".

4.2. Визначити резонансну частоту кола за максимумом осцилограми напруги на ємності та частотам $f1$ і $f2$, які відповідають границям смуги пропускання (на рівні 0.707), на яких розмах осцилограми зменшується на 30%.

4.3. Розрахувати добротність кола як $Q = f0 / (f2-f1)$.

5. Отримати та замалювати осцилограми напруги на паралельному коливальному колі, яке настроєне на частоту заповнення радіоімпульсів струму, при опорах шунтів а) $R_{ш}=\infty$; б) $R_{ш}=47\text{ кОм}$. Виміряти тривалість фронту. Перевести тумблер „Контур” у положення "Парал.", тумблер "Ген." – у положення "i(t)", встановити $R_0=0$.

6. Отримати та замалювати осцилограми напруги на паралельному коливальному колі, при розбіжності частоти заповнення радіоімпульсу і резонансній частоті кола. Знайти період биття коливань по осцилограмі та шляхом розрахунків, визначивши попередньо частоту настройки кола за допомогою зовнішнього генератора. Дослідження провести при а) $R_{ш}=\infty$; б) $R_{ш}=47\text{кОм}$.

7. Визначити експериментально добротність паралельного кола при різних значеннях $R_{ш}$ для радіоімпульсу струму.

8. Отримати та замалювати осцилограми напруги на паралельному коливальному колі при діянні радіоімпульсу е.р.с. При цьому При цьому тумблер "Ген." повинен знаходитись у положенні "e(t)".

9. Дослідити спотворення, які виникають при діянні радіоімпульсу з прямокутною обвідною та немодульованим заповненням на зв'язані коливальні кола, які настроєні на частоту заповнення, при різних коефіцієнтах зв'язку: меншого, більшого та того, що дорівнює критичному значенню.

9.1. Перевести тумблер "Контур" у положення "Посл.". Підключити вхід осцилографа до гнізда Г6. Отримати нерухому осцилограму радіоімпульсу напруги на ємності другого кола при слабкому зв'язку, встановивши при цьому віддаль між котушками приблизно 5 см.

9.2. Настроїти контури у резонанс на частоту заповнення радіоімпульсу, при цьому слід добиватись зміною ємностей С1 та С2 максимальної амплітуди радіоімпульсу на ємності другого контуру.

9.3. Замалювати у одному масштабі осцилограми напруги на ємності другого контуру для різних коефіцієнтів зв'язку.

9.4. Визначити по осцилограмам тривалість фронту та період биття для заданих випадків.

9.5 При сильному зв'язку за допомогою генератора гармонічних коливань (тумблер "Сигн." у положенні "АМ") визначити частоти екстремумів амплітудно-частотної характеристики зв'язаних кіл. Використовуючи отримані дані розрахувати частоту биття.

10. Отримати та замалювати осцилограми напруги на ємності другого кола системи зв'язаних кіл для зв'язку меншого, більшого та критичного, при діянні радіоімпульсів на розстроєні контури.

6.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

- 1) назву лабораторної роботи та її мету;
- 2) головні означення та розрахункові формули;
- 3) індивідуальне завдання на лабораторну роботу;
- 4) принципові схеми досліджень;
- 5) результати виконання домашнього завдання;
- 6) результати експериментальних досліджень;
- 7) осцилограми досліджуваних напруг;
- 8) висновки та загальну оцінку одержаних результатів.

6.6 Питання для самоперевірки

1. Чим визначається швидкість та час наростання амплітуди коливань струму у послідовному коливальному колі при увімкненні гармонічної е.р.с. з частотою, рівній резонансній частоті кола?

2. Наведіть та поясніть часові діаграми напруги на ємності, індуктивності та опірності послідовного кола, настроєного у резонанс на частоту заповнення вхідного радіоімпульсу напруги при різних значеннях добротності кола?

3. Як пояснити, що початкова швидкість наростання амплітуди коливань струму у послідовному коливальному колі при увімкненні

гармонічної е.р.с. з частотою, яка дорівнює резонансній частоті контуру, не залежить від величини втрат у колі?

4. Які спотворення радіоімпульсу струму з'являються при подачі радіоімпульсу на послідовний коливальний контур, який розстроєний відносно частоти заповнення ?

5. Поясніть процес появи коливень биття за допомогою векторної діаграми.

6. Наведіть та поясніть часові діаграми радіоімпульсів на паралельному коливальному контурі при різних внутрішніх опорах е.р.с., якщо контур настроєний у резонанс на частоту заповнення радіоімпульсів.

7. Як впливає зміна значення опору, який шунтує паралельний контур, на спотворення форми радіоімпульсів напруги на контурі при діянні радіоімпульсу струму з частотою заповнення : $f_0=f_p$ та $f_0 \neq f_p$?

8. Які спотворення з'являються при проходженні радіоімпульсів з прямокутною обвідною та не модульованим заповненням через зв'язані кола та як вони залежать від добротності кіл, коефіцієнта зв'язку та частоти настройки.?

9. Як експериментально визначити тривалість фронту та період биття?

10. Як визначити комплексну обвідну коливання на вході вибіркового кола за допомогою наближеного спектрального методу?

Література: [1, с. 228-238; 3, с. 287-290 ; 4, с. 202-211].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

Дослідження проходження амплітудно-модульованого сигналу через коливальний контур

Мета роботи: вивчення впливу частотних властивостей коливального контуру на форму обвідної амплітудно-модульованого коливання.

7.1. Основні позначення, розрахункові формули і означення

Модель амплітудно-модульованого коливання (АМК) при тональній модуляції можна описати наступним чином

$$S(t) = A_0 [1 + M_s \cos(\Omega t + \gamma)] \cos(\omega_0 t + \Theta_0). \quad (7.1)$$

Якщо це коливання надходить до лінійного кола з комплексним коефіцієнтом передачі $\dot{K}(\omega) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$, то вихідний сигнал $y(t)$ відповідно до спектрального методу можна визначати як

$$y(t) = A_0 K(\omega_0) \left[1 + M_s \frac{K(\omega + \Omega)}{K(\omega_0)} \cos(\Omega t + \gamma - \varphi) \right] \times \cos(\omega_0 t + \Theta_0). \quad (7.2)$$

Порівнюючи вихід (7.2) та вхідне діяння (7.1) приходимо до наступних висновків:

1. Обвідна відгуку так як і обвідна вхідного діяння змінюється за гармонічним законом
2. Коефіцієнт глибини модуляції відгуку дорівнює $M_y = M_s \frac{K(\omega + \Omega)}{K(\omega_0)}$.
3. Має місце відносна зміна коефіцієнта модуляції, яку можна описати виразом $D(\Omega) = \frac{M_y}{M_s} = \frac{K(\omega + \Omega)}{K(\omega_0)}$.
4. Обвідна відгуку запізнюється по відношенню до обвідної вхідного коливання на кут $\varphi = \varphi(\omega_0 + \Omega)$.

При діянні АМ – коливання на послідовний коливальний контур, який настроєний у резонанс з несучою частотою, відносна зміна глибини модуляції струму визначається за формулою $D(\omega) = \frac{M_i}{M_u} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}}$.

Обвідна струму запізнюється відносно обвідної напруги на кут

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(2Q \frac{\Omega}{\omega_0} \right).$$

При $K(\omega_0 + \Omega)/K(\omega_0) \geq 1$ має місце збільшення глибини модуляції відгуку. Така ситуація можлива, наприклад, у системі зв'язаних контурі при рівні зв'язку більшого за критичний. Якщо резонансна частота коливального кола та несуча частота вхідного діяння не співпадають, то з'являються спотворення обвідної відгуку та паразитна кутова модуляція.

7.2 Опис лабораторної установки

Лабораторні роботи №6 та №7 виконуються на одній і тій же лабораторній установці, опис якої подано у методичних вказівках до лабораторної роботи №6.

7.3 Домашнє завдання

1. Розрахувати залежність відносної зміни коефіцієнта модуляції напруги на конденсаторі послідовного коливального кола від частоти модуляції для двох значень добротності : а) Q_1 ; б) Q_2 . Прийняти, що контур настроєно у резонанс на несучу частоту f_0 , а частота модуляції змінюється від 100 Гц до 8 кГц. Зобразити розраховані залежності.

2. Розрахувати залежність відносної зміни коефіцієнта модуляції напруги на паралельному контурі від частоти модуляції для випадку коли до контуру підводиться АМ- модульований струм. Прийняти, що контур настроєно на несучу частоту АМ- струму. Розрахунки виконати для двох значень добротності а) Q_1 ; б) Q_2 . Зобразити отримані залежності.

3. Розрахувати залежність відносної зміни коефіцієнта модуляції струму у спільній ланці паралельного контуру від частоти модуляції для випадку коли до контуру підводиться АМ- е.р.с. Прийняти, що контур настроєно на несучу частоту АМ- е.р.с. f_0 , а частота модуляції змінюється від 100 Гц до 8 кГц. Зобразити розраховані залежності. Розрахунки виконати для двох значень добротності а) Q_1 ; б) Q_2 . Зобразити отримані залежності.

4. Розрахувати та зобразити залежність відносної зміни коефіцієнта модуляції напруги на конденсаторі другого контуру системи двох індуктивно-зв'язаних контурів від частоти модуляції для трьох випадків, коли рівень зв'язку : а) менший критичного; б) дорівнює критичному ; в) більший критичного. Прийняти, що контури настроєно у резонанс на несучу частоту АМ- е.р.с.

7.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Зняти залежність коефіцієнта глибини модуляції напруги на ємності послідовного контуру від частоти модуляції при діянні АМ - е.р.с. з коефіцієнтом глибини модуляції 30% і частотою заповнення, що дорівнює резонансній частоті кола, для наступних випадків : а) $R_{д1} = 0$; б) $R_{д1} = 15 \text{ Ом}$.

1.1. Підготувати прилади та установку до роботи. Підключити генератор високочастотних коливань до гнізда Г1. Вихід генератора низькочастотних коливань з'єднати зі входом "Зовнішн. мод." генератора високочастотних коливань. Встановити частоту ГВЧ, що дорівнює f_0 , вихідну напругу 0.1-0.3 В, вид роботи – "Зовнш. мод.". Встановити вихідний опір ГНЧ рівним 600 Ом, $F=100 \text{ Гц}$. На лабораторній установці поставити перемикачі "Контур" у положення "Посл.", тумблер "Сигн." – у положення "АМ", тумблер „Ген.”- у положення "i(t)", " $R_0 = 0$;" " $R_{ш} = \infty$ " ; " $R_{д1} = 0$ ". Підключити вхід осцилографа до гнізда Г3. Використовувати зовнішню синхронізацію розгортки осцилографа низькочастотним коливанням частоти модуляції (ГНЧ).

1.2. Отримати АМ - е.р.с. з заданими параметрами. Змінюючи стрибками та плавно вихідну напругу генератора ГНЧ, встановити по осцилограмі вхідної напруги коефіцієнт модуляції 30% і підтримувати це значення незмінним за допомогою регулятора виходу ГНЧ.

1.3. Зміною ємності контуру настроїти контур на задану частоту несучої по осцилограмі напруги на конденсаторі, попередньо увімкнувши вхід осцилографа до гнізда 4.

1.4. Виміряти осцилографічним методом коефіцієнт глибини модуляції на ємності контуру за формулою $M = (U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}}) / (U_{\text{макс}} + U_{\text{мін}})$, де $U_{\text{макс}}$ і $U_{\text{мін}}$ - максимальний та мінімальний розмах осцилограми по вертикалі. Вимірювання провести на 4-5 частотах модуляції, частоту вибирати у межах 100 Гц – 8 кГц. У процесі вимірювань рекомендується розмір осцилограми по вертикалі підтримувати незмінним. Результати вимірювань занести до таблиці.

2. Розрахувати та побудувати відносну зміну коефіцієнта модуляції напруги на конденсаторі послідовного контуру від частоти модуляції за даними п.1 лабораторного завдання.

3. Визначити експериментально добротність контуру при : а) $R_{д1} = 0$; б) $R_{д1} = 15 \text{ Ом}$.

3.1. Для цього потрібно усунути модуляцію, встановивши потенціометр регулятора виходу ГВЧ у граничне ліве положення. Виміряти по осцилограмі за допомогою масштабної сітки розмах напруги на ємності при резонансі у мм. Потім визначити смугу пропускання контуру на рівні 0.707, зафіксувавши при цьому частоти f_1 та f_2 , на яких розмах осцилограми зменшується на 30%. Добротність контуру

розрахувати за формулою $Q = f_0 / (f_2 - f_1)$.

4. Зняти залежність коефіцієнта модуляції напруги на паралельному контурі від частоти модуляції при діянні АМ- стуму для : а) $R_{ш} = \infty$; б) $R_{ш} = 47$ кОм при $M = 30\%$ та $f_0 = f_p$.

4.1. Встановити частоту несучої рівною робочої частоти лабораторної установки, а частоту модуляції рівною 1000 Гц. Перевести перемикач "Контур" у положення "Парал.", встановити $R_0 = 0$ та потрібне значення $R_{ш}$, тумблер "Ген." перевести у положення "i(t)". Підключити вхід осцилографа до гнізда Г3.

4.2. По осцилограмі струму у спільній ланці (гніздо Г3) встановити коефіцієнт глибини модуляції $M_{вх} = 30\%$ та підтримувати це значення незмінним за показами регулятора виходу ГНЧ.

4.3. Змінюючи ємність конденсатора С2 настроїти контур у резонанс за максимумом напруги на контурі, попередньо увімкнувши вхід осцилографа до гнізда Г4.

4.4. Виміряти коефіцієнт модуляції напруги на контурі осцилографічним методом для 4-5 частот модуляції у діапазоні 100 Гц – 8 кГц.

5. Розрахувати та побудувати залежність відносної зміни глибини модуляції напруги на паралельному контурі від частоти модуляції за результатами п.4 лабораторного завдання.

6. Визначити добротність паралельного контуру для різних значень $R_{ш}$

7. Зняти залежність коефіцієнта модуляції струму у спільній ланці паралельного контуру від частоти модуляції.

7.1. Встановити частоту несучої рівною робочій частоті лабораторної установки, $R_0 = 3$ кОм. Тумблер "Ген." перевести у положення "i(t)". Підключити вхід осцилографа до гнізда Г4.

7.2. По осцилограмі напруги на контурі (Г4) установити коефіцієнт модуляції е.р.с. $M_{вх} = 30\%$ та підтримувати його незмінним за показами модулометра ГВЧ, використовуючи при цьому регулятор виходу ГНЧ.

7.3. Змінюючи ємність С3 настроїти контур у резонанс на частоту несучої за мінімумом струму у спільній ланці, попередньо увімкнувши вхід осцилографа до гнізда Г2.

7.4. Виміряти коефіцієнт глибини модуляції струму у спільній ланці осцилографічним методом для 4-5 частот модуляції у діапазоні 100-Гц- 8 кГц.

8. Розрахувати та побудувати залежність відносної зміни коефіцієнта модуляції струму у спільній ланці паралельного контуру за результатами п.7 лабораторного завдання.

9. Зняти залежність зміни коефіцієнта модуляції на ємності другого контуру системи індуктивно-зв'язаних контурів від частоти модуляції для випадків, коли величина коефіцієнта зв'язку : а) менша критичного; б)

дорівнює критичному ; в) більша критичного.

9.1. Встановити частоту несучої рівною робочій частоті лабораторної установки. Перевести тумблер "Контур" у положення "Посл." Підключити вхід осцилографа до гнізда Гб.

9.2. У відсутності модуляції при слабкому зв'язку (найбільшій відстані між контурами) зміною ємності конденсаторів С1 та С2 настроїти систему індуктивно-зв'язаних контурів у резонанс, встановивши такі значення ємності конденсаторів, при яких будь-яка їх зміна призводить до зменшення напруги на виході.

9.3. Визначити віддаль між індуктивними котушками, яка відповідає критичному коефіцієнту зв'язку. Шляхом зменшення віддалі між ними, зафіксувати значення I, при якому напруга на конденсаторі другого контуру буде максимальною. Так визначають оптимальний коефіцієнт зв'язку, але оскільки контури однакові, то значення оптимального і критичного коефіцієнтів зв'язку будуть співпадати.

9.4. Встановити за показами модулометра ГВЧ $M_{вх} = 30\%$ та потрібний коефіцієнт зв'язку. Провести вимірювання коефіцієнта модуляції напруги на ємності другого контуру.

10. Розрахувати та побудувати залежність відносної зміни коефіцієнта модуляції напруги на ємності другого контуру від частоти модуляції за результатами п.9 лабораторного завдання.

7.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити :

1. Принципові схеми досліджень.
2. Результати домашніх розрахунків, які повинні бути зведені до таблиць.
3. Результати вимірювань, зведені у таблиці.
4. Експериментальні та розрахункові графіки відносної зміни коефіцієнтів глибини модуляції від частоти модуляції для різних параметрів досліджуваних кіл.
5. Висновки та оцінку отриманих результатів.

7.6 Питання для самоперевірки

1. Які спотворення спостерігаються при проходженні сигналів з неперервною амплітудною модуляцією і як їх оцінюють?
2. Як залежить коефіцієнт модуляції струму у послідовному контурі та коефіцієнт модуляції на реактивних елементах контуру від частоти модуляції та добротності контуру, якщо на контур діє АМ - напруга з несучою частотою рівною резонансній частоті контуру ?
3. Як залежить коефіцієнт модуляції струму у спільній ланці

паралельного контуру і напруга на ньому від частоти модуляції та добротності контуру при дії на нього АМ - напруги, АМ – струму ? Вважайте, що частота несучої співпадає з резонансною частотою контуру.

4. Чому збільшення добротності послідовного контуру і частоти модуляції призводять до зменшення коефіцієнта модуляції струму та запізненню його обвідної?

5. Поясніть чим визначається затримка повідомлення у поодинокому коливальному контурі, смуга пропускання якого достатня для задовільного проходження спектру обвідної.

6. У яких випадках можлива перемодуляція ?

7. Як залежить коефіцієнт модуляції струму у другому контурі системи двох індуктивно-зв'язаних контурів від частоти модуляції, добротності контурів, та коефіцієнту зв'язку?

8. Чи можливо, використовуючи систему зв'язаних контурів, збільшити коефіцієнт модуляції АМ - коливань?

Література: [1, с. 238-244; 245- 252; 3, с. 286-289; 4, с. 198-212].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

Нелінійне резонансне підсилення та помноження частоти

Мета роботи: дослідження нелінійного резонансного підсилення та помноження частоти. В роботі знімаються коливальні характеристики нелінійного елемента – транзистора при різних зміщеннях, знаходиться коефіцієнт підсилення у режимі подвоєння і потроєння частоти.

8.1 Основні позначення, розрахункові формули і означення

Принципова схема нелінійного резонансного підсилювача наведена на рис. 8.1. Режим роботи нелінійного елемента в схемі підсилювача показано на рис. 8.2.

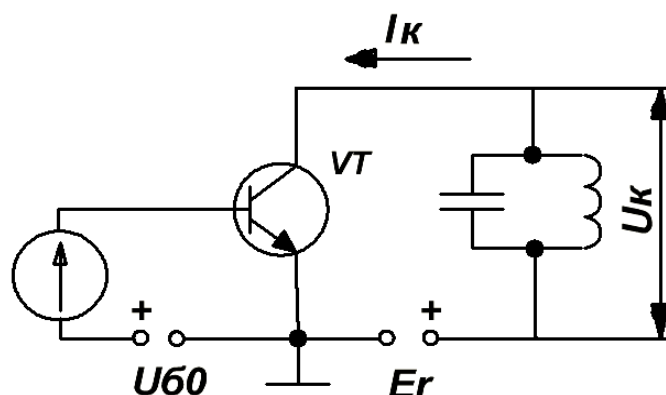


Рисунок 8.1 – Принципова схема нелінійного резонансного підсилювача

Нехай на вході підсилювача прикладена напруга

$$U_{\bar{b}} = U_{\bar{b}0} + U_{\bar{b}m} \cos \omega_0 t, \quad (8.1)$$

де $\omega_0 = \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

При цьому струм, що протікає у колекторному колі транзистора,

$$i_k = I_{k0} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{kn} \cos n \omega_0 t; \quad (8.2)$$

напруга на колекторі, якщо контур настроєний в резонанс на одну з гармонік,

$$U_k = E_k - I_{kn} Z_{\text{екр}} \cos \omega_p t = E_k - U_{km} \cos \omega_p t, \quad (8.3)$$

де Z_{exp} - еквівалентний опір паралельного контуру при резонансі; U_{km} - амплітуда напруги на колекторі при резонансі.

Кусково-лінійна апроксимація характеристики транзистора $i_k(U_{\delta})$

$$i_k = \begin{cases} S(u_{\delta} - U_0) & \text{при } u_{\delta} \geq U_0 \\ 0 & \text{при } u_{\delta} < U_0 \end{cases} \quad (8.4)$$

дозволяє знайти амплітуди гармонічних складових струму як функції кута відсічки θ :

$$I_{kn} = S U_{\delta m} \beta_n(\theta) = I_{\max} \alpha_n(\theta) \quad (8.5)$$

де $\alpha_n(\theta)$ і $\beta_n(\theta)$ - коефіцієнти розкладу косинусоїдального імпульсу в ряд Фур'є. Кут відсічки знаходять зі співвідношення

$$\cos \theta = \frac{U_0 - U_{\delta 0}}{U_{\delta m}} \quad (8.6)$$

Коефіцієнти розкладу $\alpha_n(\theta)$ досягають найбільших значень при кутах відсічки

$$\theta_{opt} = \frac{120^\circ}{n} \quad (8.7)$$

а коефіцієнти $\beta_n(\theta)$ - при

$$\theta'_{opt} = \frac{180^\circ}{n} \quad (8.8)$$

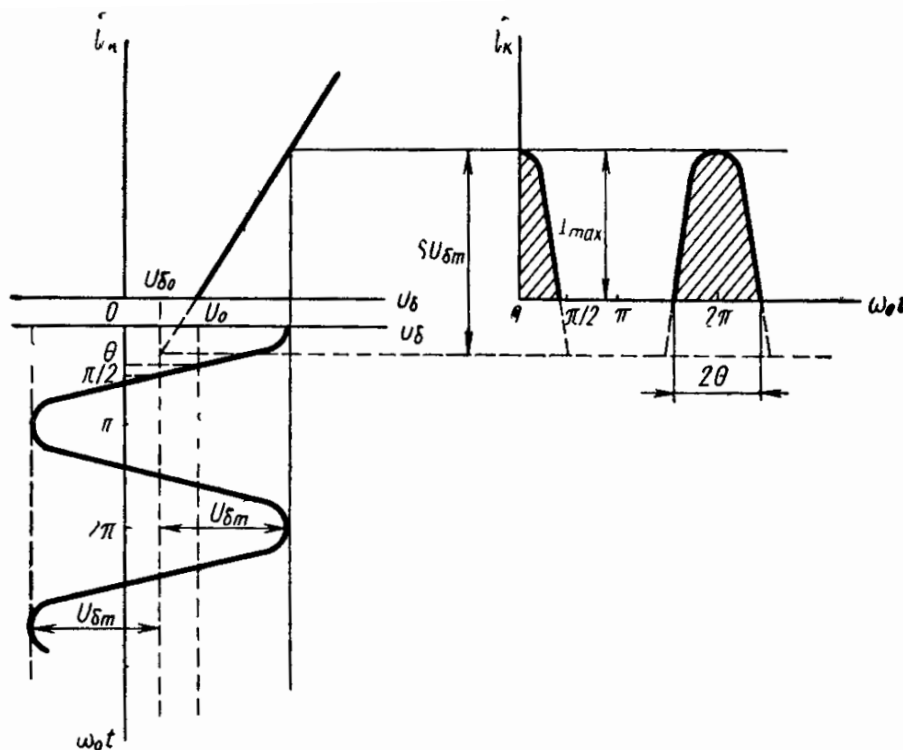


Рисунок 8.2 - Графіки, які пояснюють режим роботи нелінійного резонансного підсилювача

При аналізі нелінійних кіл зі змінним навантаженням квазілінійним методом вводяться характеристики і параметри нелінійного елемента для деякої гармоніки. Так, параметром транзистора по першій гармоніці в схемі рис. 8.1 є середня крутизна

$$S_{cp} = \frac{I_{k1}}{U_{\delta m}} = \frac{S}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \quad (8.9)$$

Коефіцієнт підсилення нелінійного резонансного підсилювача по першій гармоніці

$$K_{k1} = \frac{U_{km}}{U_{\delta m}} = S_{cp} Z_{екв} \quad (8.10)$$

Залежність амплітуди першої гармоніки колекторного струму I_{k1} чи амплітуди напруг на контурі U_{km} від амплітуди вхідної напруги $U_{\delta m}$ називається **коливальною характеристикою**.

Залежність коефіцієнта підсилення нелінійного резонансного підсилювача по першій гармоніці K_{n1} від амплітуди напруги збудження $U_{\delta m}$ називається **амплітудною характеристикою підсилювача**.

Часова діаграма колекторного струму $i_k(t)$ недонапруженого режиму має вигляд, показаний на рис. 8.2; в перенапруженому режимі спостерігаються провали в імпульсах колекторного струму. Критичний режим являє собою граничний випадок недонапруженого режиму. Напруженість режиму можна охарактеризувати з допомогою так званого **коефіцієнта використання** колекторної напруги чи коефіцієнта напруженості режиму

$$\xi = \frac{U_{km}}{E_k} \quad (8.11)$$

У критичному режимі $\xi_{кр} = 0,85 \div 0,95$, в недонапруженому $\xi < \xi_{кр}$, в перенапруженому $\xi > \xi_{кр}$.

При означенні режиму роботи підсилювача можна приблизно вважати, що мінімальна напруга на колекторі дорівнює нулю, тобто $\xi = 1$:

$$I_{k1} Z_{экр} \approx E_k; \quad I_{k1} = \frac{E_k}{Z_{экр}}.$$

Коливальні характеристики підсилювача при різних кутах відсічки

мають вигляд:

1) при $\theta > \frac{\pi}{2}$

$$I_{k1} = \begin{cases} SU_{\delta m} & \text{при } U_{\delta m} \leq U_{\delta o} - U_o \\ \frac{SU_{\delta m}}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta) & \text{при } U_{\delta o} - U_o < U_{\delta m} \leq U_{\delta mkp} \\ \frac{E_k}{Z_{\text{экр}}} & \text{при } U_{\delta m} > U_{\delta mkp} \end{cases}$$

2) при $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$I_{k1} = \begin{cases} \frac{SU_{\delta m}}{2} & \text{при } U_{\delta m} \leq U_{\delta mkp} \\ \frac{E_k}{Z_{\text{экр}}} & \text{при } U_{\delta m} > U_{\delta mkp} \end{cases}$$

3) при $\theta < \frac{\pi}{2}$

$$I_{k1} = \begin{cases} 0 & \text{при } U_{\delta m} \leq U_o - U_{\delta o} \\ \frac{SU_{\delta m}}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta) & \text{при } U_o - U_{\delta o} < U_{\delta m} \leq U_{\delta mkp} \\ \frac{E_k}{Z_{\text{экр}}} & \text{при } U_{\delta m} > U_{\delta mkp} \end{cases}$$

8.2. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка дозволяє виконувати лабораторні роботи №9, 10, та 11. У змінному пристрої розташовані нелінійний підсилювач, навантаження і режим якого можна змінювати та досліджуваний послідовний амплітудний детектор. Усі органи керування роботою лабораторно установки виведено на передню панель, яка зображена на рис.

8.3 Вибір досліджуваної схеми виконується тумблером T_2 .

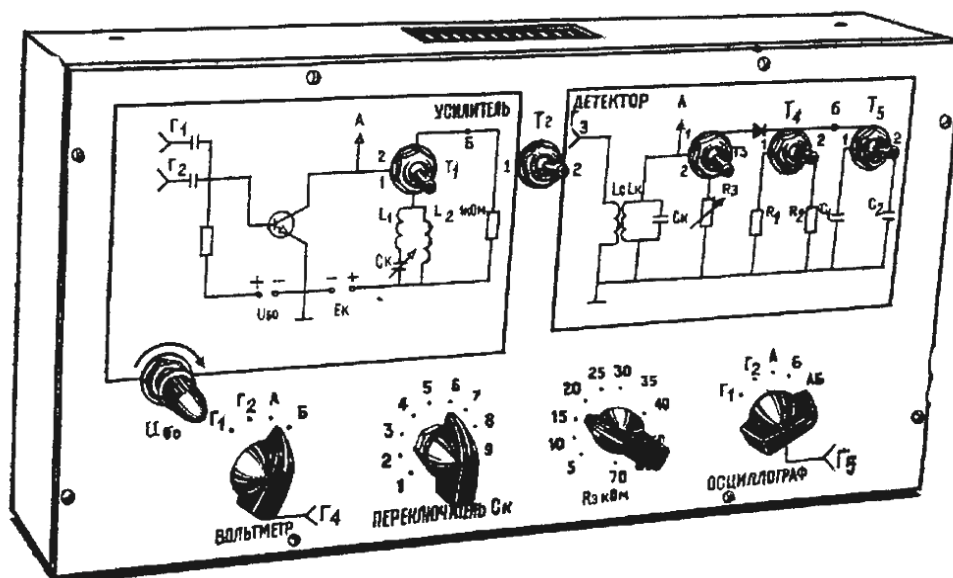


Рисунок. 8.3 - Передня панель установки для виконання лабораторних робіт № 9, 10, 11

При дослідженні нелінійного підсилення зовнішня високочастотна напруга від генератора високої частоти подається до гнізда Γ_1 . Постійну напругу зміщення на базі транзистора КТ-315 нелінійного підсилювача можна змінювати потенціометром U_{00} . Постійна напруга вимірюється вольтметром базового пристрою з верхньою межею 2 В. У колі емітера транзистора увімкнено опір 620 Ом. Характеристика транзистора $i_k(U_{00})$, яка знята для цього режиму, наведена на рис. 8.4. За допомогою тумблера T_1 комутується навантаження у колекторній ланці транзистора: у положенні 1 вмикається паралельний коливальний контур, у положенні 2 – активний опір $R=1$ кОм. Перемикач C_K дозволяє встановити значення ємності контуру, яке прийняте при виконанні домашнього завдання, відповідно до номера бригади. Гнізда Γ_4 і Γ_5 лабораторної установки використовуються для підключення вольтметра та електронного осцилографа, які дозволяють вимірювати та спостерігати напругу у різних точках схем. Необхідні для цього комутації виконуються за допомогою перемикачів ” Вольтметр” і ” Осцилограф”.

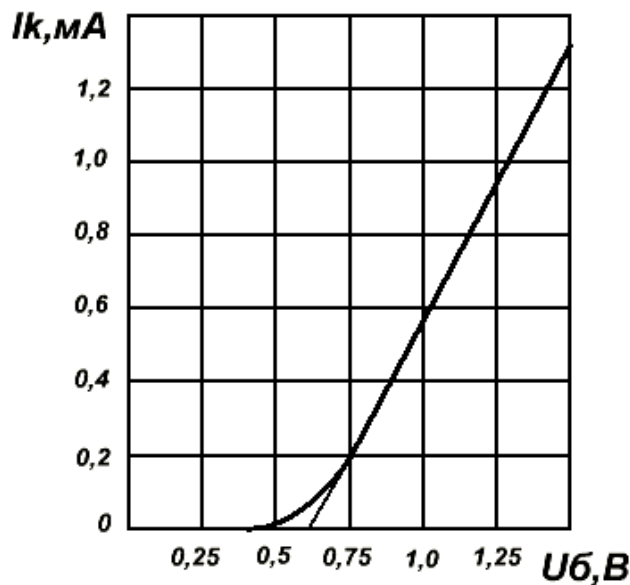


Рисунок 8.4 – Графік характеристики транзистора

8.3 Домашнє завдання

1. Зобразити принципову схему транзисторного нелінійного резонансного підсилювача.

2. Перезняти на кальку вольт-амперну характеристику $I_k(U_{\delta})$ (рис.9.4) транзистора КТ-315. Виконати кусочно-лінійну апроксимацію цієї характеристики.

3. Для заданих параметрів контуру (f_p^*, C_k^*, Q^*, p^*) розрахувати еквівалентний опір контуру при резонансі.

4. Розрахувати коливальні характеристики $U_{km}(U_{\delta m})$ для трьох різних значень напруги зміщення на базі: а) $U_{\delta o} = 0,4 B$; б) $U_{\delta o} = 0,6 B$; в) $U_{\delta o} = 0,8 B$, використовуючи результати, отримані при виконанні п. 2 і 3 домашнього завдання, і значення коефіцієнтів розкладу косинусоподібного імпульсу, наведені в додатку 4.

5. Знайти по ідеалізованим коливальним характеристикам значення вхідної напруги, що відповідає критичному режиму, для вказаних трьох значень напруги зміщення. Знайти коефіцієнти підсилення нелінійного резонансного підсилювача в критичному режимі.

6. Використовуючи апроксимовану характеристику нелінійного елемента, розрахувати значення $U_{\delta m}$ нелінійного підсилювача, що відповідають заданим значенням кута відсічки і напруги зміщення для наступних випадків: а) $\theta = 180^\circ, U_{\delta o} = 0,8 B$; б) $\theta = 120^\circ, U_{\delta o} = 0,8 B$; в) $\theta = 60^\circ, U_{\delta o} = 0,4 B$.

Розрахуйте найбільше значення коефіцієнта підсилення нелінійного резонансного підсилювача в режимі подвоєння і потроєння частоти.

8.4 Лабораторне завдання та методичні вказівки

1. Дослідити резистивний нелінійний підсилювач. Отримати і замалювати осцилограми вихідної напруги при: а) $\theta = 180^\circ, U_{\text{вх}} = 0,8 \text{ В}$; б) $\theta = 120^\circ, U_{\text{вх}} = 0,8 \text{ В}$; в) $\theta = 90^\circ, U_{\text{вх}} = 0,6 \text{ В}$; г) $\theta = 60^\circ, U_{\text{вх}} = 0,4 \text{ В}$.

1.1. Підготувати прилади і установку до роботи. Зібрати схему досліджень.

Встановити частоту коливань генератора рівною резонансній частоті контуру.

1.2. Змінюючи вихідну напругу генератора високої частоти, встановити по вольтметру розраховане при виконанні домашнього завдання значення амплітуди вхідної напруги, що відповідає заданому куту відсічки¹.

Встановити по вольтметру базового приладу напругу зміщення, що забезпечує заданий кут відсічки.

1.3. Отримати і замалювати осцилограми напруги на виході нелінійного резистивного підсилювача.

2. Зняти коливальні характеристики нелінійного резонансного підсилювача при: а) $U_{\text{вх}} = 0,8 \text{ В}$; б) $U_{\text{вх}} = 0,6 \text{ В}$; в) $U_{\text{вх}} = 0,4 \text{ В}$.

2.1. Встановити тумблер T_1 в положення „1”, ввімкнувши паралельний контур в навантажувальне коло підсилювача.

2.2. При $U_{\text{вх}} = 0,8 \text{ В}$ і $U_{\text{зм}} = 0,2 \text{ В}$, змінюючи частоту генератора, встановити по максимуму вихідної напруги підсилювача частоту генератора рівною резонансній частоті контуру.

2.3. Зняти залежність $U_k(U_{\text{зм}})$ при заданих значеннях напруги зміщення, змінюючи напругу збудження до 1 В. Знайти значення $U_{\text{зм}}$, що відповідає критичному режиму.

3. Використовуючи коливальні характеристики, розрахувати амплітудні характеристики нелінійного резонансного підсилювача.

4. Дослідити резонансний нелінійний підсилювач в режимі множення частоти. Отримати і замалювати осцилограми напруги на виході резонансного нелінійного підсилювача в режимі подвоєння і потроєння частоти, зрівняти з осцилограмами напруги на виході резистивного нелінійного підсилювача при тих же умовах. Знайти коефіцієнт підсилення в режимі подвоєння і потроєння частоти.

¹ При цьому врахувати, що мілівольметр проградуєвано в ефективних (діючих) значеннях гармонійної напруги: $U = U_m / \sqrt{2}$

4.1. Встановити $U_{\omega_0} = 0,6 \text{ В}$ і $U_{\omega} \approx U_{\omega_{кр}}$. Зменшуючи частоту генератора, добитися, щоб частота другої гармоніки струму співпадала з резонансною частотою контуру.

Змінюючи напругу зміщення, добитися максимуму напруги на виході резонансного нелінійного підсилювача, працюючого в режимі множення частоти.

Замалювати осцилограму вихідної напруги помножувача і заміряти його значення. Знайти коефіцієнт підсилення помножувача.

4.2. Увімкнути активне навантаження тумблером Т1, подивитись і замалювати осцилограми напруги на виході для режимів нелінійного елемента, що використовувались в п. 4.1.

4.3. Встановити $U_{\omega_0} = 0,4 \text{ В}$. Дослідити нелінійний підсилювач в режимі потроєння частоти по методиці, описаній в п. 4.1. і 4.2.

8.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

1. Результати розрахунків, отримані при виконанні домашнього завдання;
2. Принципіальну схему нелінійного резонансного підсилювача;
3. Графіки коливальних і амплітудних характеристик, отриманих експериментально і розрахунковим методом;
4. Осцилограми напруг на виході нелінійного резистивного підсилювача при різних кутах відсічки і напруг на виході подвоювача і потроювача частоти;
5. Результати експериментального знаходження коефіцієнтів підсилення подвоювача і потроювача частоти;
6. Висновки і оцінку отриманих результатів.

8.6 Питання для самоперевірки

1. Поясніть принцип роботи нелінійного резонансного підсилювача.
2. Як залежить кут відсічки колекторного струму від напруги зміщення і амплітуди збудження ?
3. Зобразіть часові діаграми колекторного струму і напруги на контурі в недонапруженому і перенапруженому режимах нелінійного резонансного підсилювача. Чим пояснюються існуючі відмінності ?
4. Як знайти амплітуди першої, другої і третьої гармонік колекторного струму, якщо відомі амплітуда імпульсу колекторного струму і крутизна апроксимуючої прямої при кусково-лінійній апроксимації?

5. Чим визначається напруженість режиму нелінійного резонансного підсилювача?
6. Чому рівний коефіцієнт підсилення нелінійного резонансного підсилювача в критичному режимі при $\theta = 90^\circ$?
7. Як змінюється коливальна характеристика при зменшенні (збільшенні): а) E_k , б) $U_{\text{бо}}$, в) $Z_{\text{екв}}$?
8. Зобразіть часові діаграми колекторного струму і напруг на базі і колекторі в схемах подвоювача і потроювача частоти.
9. Поясніть залежність режимів роботи нелінійного резонансного підсилювача від живлячих напруг.
10. Як потрібно вибрати кут відсічки колекторного струму в помножувачах частоти при роботі:
 - а) з постійною величиною імпульсу колекторного струму;
 - б) з постійною амплітудою збудження?
11. Як пояснити, що при однаковому куті відсічки в режимі подвоєння к.к.д. нижче, чим в режимі підсилення?
12. Чому не використовуються високі кратності множення частоти?

Література: [1, с.283-298, 300-304; 3, с. 333-336; 4, с. 86-87, 188-194, 333-336; 5, с.337-351; 6, с. 62-68, 72-79].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

Амплітудна модуляція зміщенням

Мета роботи: дослідження фізичних процесів при амплітудній модуляції зміщенням. В роботі знімаються статичні і динамічні модуляційні характеристики транзисторного підсилювача з базовою модуляцією.

9.1 Основні позначення, розрахункові формули і означення

Для отримання АМ - коливань при модуляції зміщенням до входу модулюючого підсилювача, схема якого приведена на рис. 9.1, підводяться:

- постійна напруга зміщення $U_{\text{б0}}$, яка визначає робочу точку;
- низькочастотний сигнал модуляції, який керує зміною середньої крутизни нелінійного елемента – транзистора;
- високочастотне коливання з амплітудою $U_{\text{бт}}$ і частотою $\omega_o = \omega_p$, для якого нелінійний елемент може розглядатися як підсилювач зі змінним параметром S_{cp} , що керує напругою модуляції.

Режим транзистора при отриманні гармонічної модуляції зміщенням показано на рис. 9.2.

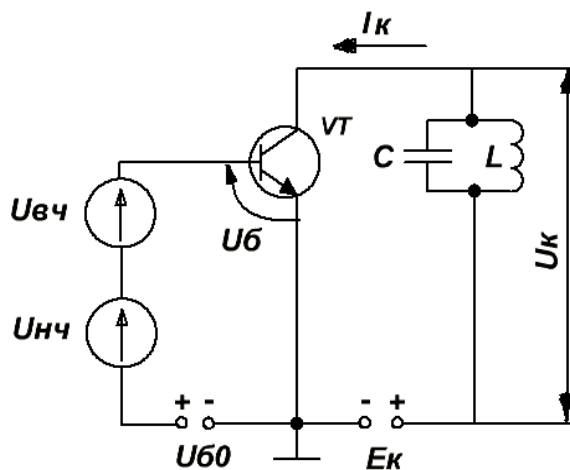


Рисунок 9.1 – Принципова схема транзисторного підсилювача з модуляцією зміщенням

Для оцінки якості відтворення модулюючого сигналу огинаючою АМ-коливанням зручно користуватись статичними і динамічними модуляційними характеристиками.

Статичну модуляційну характеристику знімають без модуляції.

Вона являє собою залежність першої гармоніки колекторного струму I_{k1} чи напруги на контурі $U_{km} = I_{k1}Z_{exp}$ від модуляційного фактора, наприклад, напруги зміщення $U_{\delta o}$, при постійній амплітуді високочастотних коливань $U_{\delta m}$. Методика розрахунку статичної модуляційної характеристики нелінійного елемента наступна: надаючи зміщенню на базі $U_{\delta o}$ різні значення від $U_{\delta o} - U_{\delta m}$ до $U_{\delta o} + U_{\delta m}$, розраховують

$$I_{k1} = SU_{\delta m} = SU_{\delta m}\gamma_1(\theta) = SU_{\delta m}\frac{1}{\pi}(\theta - \sin\theta\cos\theta), \quad (9.1)$$

де S – крутизна лінійно-зростаючої ділянки апроксимуючої функції; $\gamma_1(\theta)$ – коефіцієнт розкладу косинусоїдального імпульсу струму в ряд Фур'є.

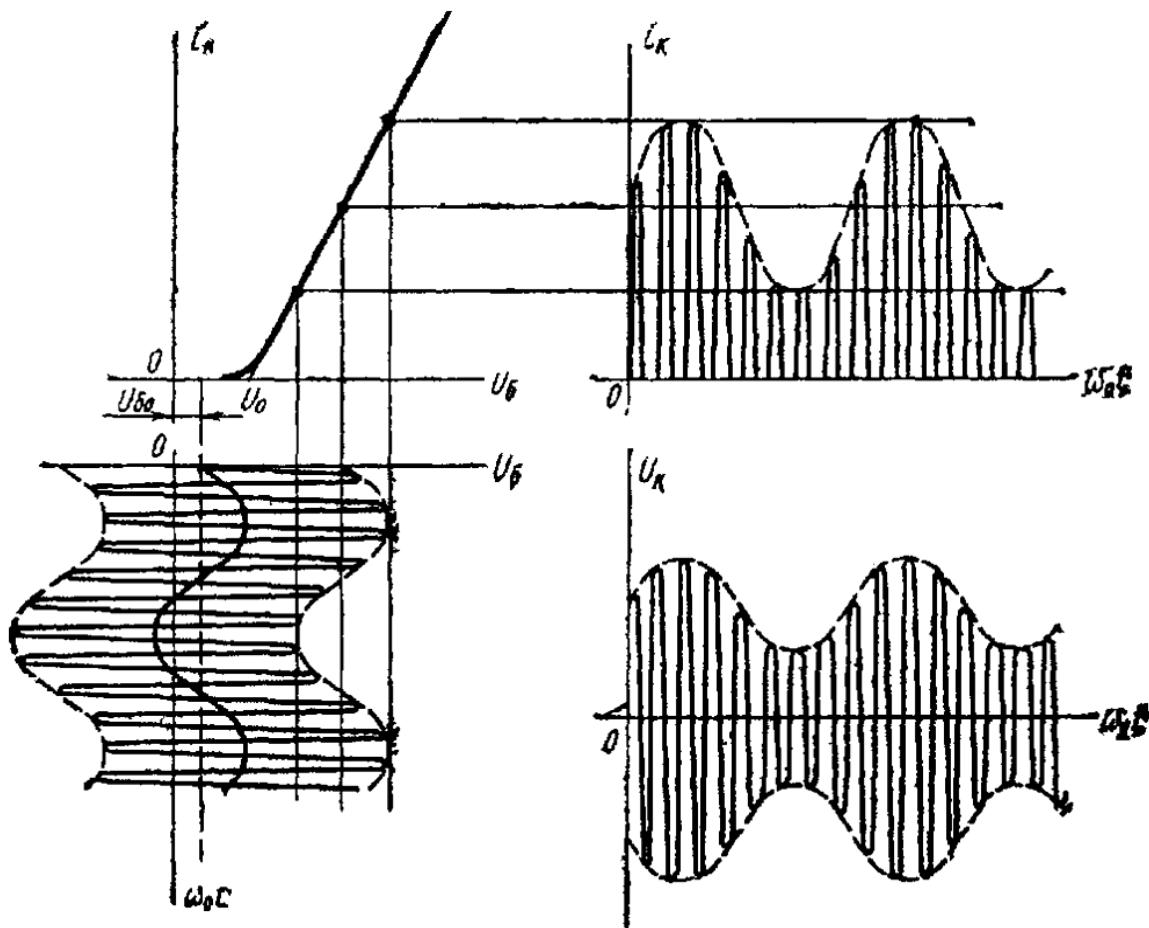


Рисунок 9.2 – Графіки, що пояснюють режим роботи транзистора при отриманні гармонічної модуляції зміщенням

Статична модуляційна характеристика використовується для вибору режиму модуляційного підсилювача. Робочу точку нелінійного елемента вибирають по середині лінійної ділянки цієї характеристики. По статичній модуляційній характеристиці можна визначити коефіцієнт нелінійних спотворень огинаючої АМ-коливань.

Динамічна модуляційна характеристика показує залежність коефіцієнта модуляції напруги на контурі M від амплітуди модулюючої напруги U_{Ω} .

9.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота №9 виконується на тій же лабораторній установці, що і робота № 8. При дослідженні модуляції зміщенням зовнішнє високочастотне гармонічне коливання від ГВЧ підводиться до гнізда Γ_1 , низькочастотне коливання модуляції ГНЧ – до гнізда Γ_2 .

9.3 Домашнє завдання

1. Навести принципову схему, що дозволяє виконати базову модуляцію у транзисторному підсилювачі.

2. Розрахувати і побудувати статичну модуляційну характеристику транзисторного підсилювача з базовою модуляцією зміщенням при дії на вході високочастотного коливання з частотою $f = f_p^*$ і амплітудою: а) $U_{\delta m} = 0,7$ В; б) $U_{\delta m} = 0,4$ В.

Використовувати кусково-лінійну апроксимацію зображеної на рис. 9.4 характеристики транзистора.

3. Вибрати робочі точки на побудованих модуляційних характеристиках.

4. Розрахувати і побудувати по статичним модуляційним характеристикам залежності коефіцієнта модуляції напруги на контурі від амплітуди модулюючої напруги.

9.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Зняти статичну модуляційну характеристику транзисторного підсилювача з модуляцією зміщенням при дії на вході високочастотного коливання з частотою $f = f_p^*$ і амплітудою: а) $U_{\delta m} = 0,7$ В; б) $U_{\delta m} = 0,4$ В.

1.1. Під'єднати ГВЧ до гнізда Γ_1 , а ГНЧ до гнізда Γ_2 , вхід осцилографа - до гнізда Γ_5 , зовнішній вольтметр - до гнізда Γ_4 . Встановити тумблери T_1 і T_2 у положення 1, перемикачі ” Вольтметр ” та ” Осцилограф” – положення А. Перемикачем S_K виставити значення ємності контуру, яке приймалось при виконанні домашнього завдання у відповідності до номера бригади. Встановити вихідну напругу генератора низькочастотних коливань рівною нулю.

1.2. Змінюючи частоту генератора при $U_{\delta o} = 0,8$ і $U_{\delta m} = 0,4$, добитися, щоб частота високочастотних коливань співпадала з резонансною частотою контуру, фіксуючи частоту по максимуму напруги на контурі.

1.3. Зняти і побудувати залежність U_{km} від U_{ω_0} при заданих амплітудах високочастотних коливань.

2. Зняти динамічну модуляційну характеристику – залежність коефіцієнта модуляції напруги на контурі M від амплітуди модулюючої напруги U_{Ω} , при $f = f_p^*$, частоті модуляції $F = 1 \text{ кГц}$ і амплітуді високочастотних коливань: а) $U_{\omega_m} = 0,7 \text{ В}$; б) $U_{\omega_m} = 0,4 \text{ В}$, вибравши робочу точку на середині лінійної ділянки відповідної статичної модуляційної характеристики.

2.1. Встановити необхідне зміщення, частоту модуляції, амплітуду і частоту високочастотних коливань.

Встановити амплітуду сигналу модуляції приблизно $0,2 \text{ В}$. Отримати нерухому осцилограму АМ - напруги на контурі.

2.2. Змінюючи амплітуду модулюючої напруги, зняти залежність M від U_{Ω} . Коефіцієнт модуляції вимірювати по осцилограмі напруги на контурі, визначивши максимальний A і мінімальний B розміри осцилограми по вертикалі і розрахувавши $M = (A - B) / (A + B)$

3. Замінивши контур опором $R = 1 \text{ кОм}$, прослідкувати і замалювати осцилограми колекторного струму $i_k(t) = u_k(t) / R$ при $f = f_p^*$, частоті модуляції $F = 1 \text{ кГц}$, амплітуді високочастотних коливань U_{ω_m} і амплітуді модулюючої напруги, що відповідає $M = 50\%$.

9.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову схему транзисторного підсилювача з модуляцією зміщенням;
2. Результати розрахунків, отриманих при виконанні домашньої роботи;
3. Результати експериментального дослідження, зведені до таблиці;
4. Графіки статичних і динамічних модуляційних характеристик, отриманих розрахунковим шляхом і експериментально;
5. Висновки і оцінку результатів експерименту.

9.6 Питання для самоперевірки

1. Зобразіть принципову схему транзисторного підсилювача з базовою модуляцією.
2. Поясніть фізичні процеси при модуляції зміщенням. Наведіть часові діаграми, які показують отримання АМ-коливань в транзисторному підсилювачі з базовою модуляцією.

3. Чому режим роботи модулюючого підсилювача для отримання АМ-коливань повинен бути суттєво нелінійним?
4. Дайте означення статичної модуляційної характеристики.
5. Чим потрібно керуватись при виборі робочої точки модулюючого підсилювача?
6. Пояснити різницю експериментальної і розрахункової статичних модуляційних характеристик.
7. Чи можна при модуляції зміщенням отримати $M=100\%$ без спотворень огинаючої АМ-коливань?
8. Як впливає на АМ – коливання збільшення напруги зміщення модулюючого підсилювача?
9. Як змінюється коефіцієнт модуляції і якість відтворення низькочастотного сигналу зі збільшенням амплітуди високочастотного коливання?
10. Як впливає на статичну та динамічну модуляційні характеристики зміна опору навантаження модулюючого підсилювача?
11. Чи можна отримати хорошу якість відтворення низькочастотного сигналу огинаючої АМ-коливань при аперіодичному навантаженні модулюючого підсилювача?
12. Як вплине розладнання навантажувального контуру модулюючого підсилювача відносно частоти високочастотного коливання на вихідній напрузі?

Література: [1, с.321-323; 3, с. 341-342; 4, с. 223-227; 5, с. 452-454; 6, с. 79-87].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

Детектування АМ-коливань

Мета роботи: дослідження процесів, що проходять при детектуванні амплітудно-модульованих коливань діодним детектором. В роботі знімаються детекторні характеристики, виміряється вхідна напруга детектора, відслідковуються осцилограми напруг при різних параметрах навантаження.

10.1 Основні позначення, розрахункові формули і означення

Детектування – це процес, зворотній модуляції: при детектуванні АМ-коливання відновлюється низькочастотний сигнал, що керує амплітудою високочастотних коливань. Детектор повинен містити нелінійний (параметричний) перетворювач, що виконує трансформацію спектра сигналу, і фільтр нижніх частот, що виділяє низькочастотні компоненти. Принципіальна схема досліджуваного діодного детектора подана на рис.10.1.

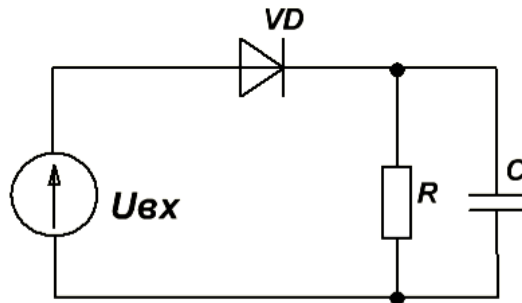


Рисунок 10.1 – Принципова схема досліджуваного діодного детектора

Постійна часу $\tau = RC$ - фільтра нижніх частот вибирається так, щоб забезпечити неспотворене відтворення огибаючої АМ-коливань і необхідне згладжування високочастотних пульсацій: $2\pi/\omega_0 \ll RC \ll 2\pi/\Omega$, де ω_0 - несуча частота АМ-коливань; Ω - найбільша частота в спектрі модулюючого сигналу.

Важливими характеристиками амплітудних детекторів є характеристики детектування, під якими розуміють залежності постійної складової струму I_D чи напруги на виході детектора $U_D = I_D R$ від амплітуди високочастотних коливань чи зміни модулюючого параметра.

При аналізі роботи діодного детектора слід врахувати, що до діода прикладена напруга $u = u_{вх} - u_D$.

Режим роботи діодного детектора визначається амплітудою високочастотних коливань U : для слабких сигналів, найбільша амплітуда

яких не перевищує 0,1-0,2 В, має місце квадратичне детектування; для сильних сигналів, амплітуда яких не менше 1В, режим детектування лінійний.

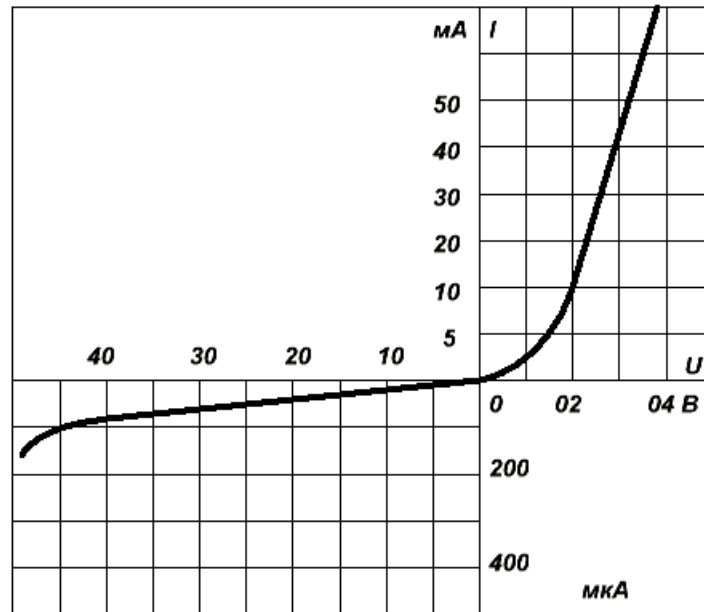


Рисунок 10.2 – Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода

При детектуванні слабких сигналів можна вважати, що $u_D \approx 0, u = u_{ex}$, а вольт-амперна характеристика діода наближено апроксимується степеневим поліномом

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 \quad (10.1)$$

У цьому випадку характеристика детектування має квадратичний характер:

$$I_D = a_2 U^2 / 2 \quad (10.2)$$

При квадратичному детектуванні коливань, амплітуда яких змінюється по закону

$$u(t) = U_{m0} (1 + M \cos \Omega t) \quad (10.3)$$

виникають нелінійні спотворення; на виході детектора з'являється коливання з частотою 2Ω і амплітудою $(a_2 M^2 / 4) U_{m0}^2$, коефіцієнт нелінійних спотворень пропорційний глибині модуляції:

$$k_2 = \frac{I_{2\Omega}}{I_{\Omega}} = \frac{M}{4} \quad (10.4)$$

При аналізі роботи діодного детектора в режимі сильних сигналів

виконується кусково-лінійна апроксимація вольт-амперної характеристики діода

$$i(u) = \begin{cases} Su \text{ при } u > 0; \\ 0 \text{ при } u < 0. \end{cases} \quad (10.5)$$

В цьому випадку збільшення амплітуди коливань викликає збільшення вихідної напруги U_D , а отже і зміщення, причому кут відсічки θ залишається величиною постійною, що залежить тільки від параметрів схеми:

$$\theta = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{SR}}. \quad (10.6)$$

Характеристика детектування лінійна

$$U_D = U \cos \theta. \quad (10.7)$$

Коефіцієнт передачі детектора

$$K_D = \frac{U_D}{U} = \cos \theta, \quad (10.8)$$

а вихідний опір лінійного діодного детектора по першій гармоніці

$$R_{ex} = R/2. \quad (10.9)$$

10.2 Опис лабораторної установки

Лабораторну роботу виконують на установці, опис якої подано у лабораторній роботі № 8.

При дослідженні процесу детектування зовнішнє діяння з частотою f_0 , що дорівнює резонансній частоті вхідного кола ланки детектора f_p , слід подавати до гнізда Γ_3 . За допомогою тумблера T_3 до контуру $L_K C_K$ підключають детектор (положення 1) або еквівалентний опір заступу R_E (положення 2). Значення опору R_E змінюють перемикачем " R_E кОм ". Опір R_E підключають до контуру при вимірюванні вхідного опору детектора. Тумблери T_4 і T_5 дозволяють змінювати опір та ємність навантаження детектора.

10.3 Домашнє завдання

1. Зобразити принципову схему послідовного діодного детектора.
2. Оцінити значення ємності навантаження, при якій можливе неспотворене детектування АМ-коливання з частотою модуляції $F = 400$ Гц і несучою частотою $f_0 = f_p^*$. Прийняти $R = R_1$.

3. Зобразити якісно часові діаграми вхідної АМ-напруги $u_{ex}(t)$, напруги на діоді $u(t)$ і напруги на навантаженні $u_{внх}(t)$ при: а) вірно вибраній величині ємності навантаження C ; б) надто великій ємності навантаження; в) при відсутності ємності навантаження.

4. Виконати кусково-лінійну апроксимацію вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода, що зображена на рис. 11.2.

5. Визначити коефіцієнт передачі діодного детектора в режимі лінійного детектування.

6. Розрахувати вхідний опір послідовного діодного детектора, якщо: а) $R = R_1^*$; б) $R = R_2^*$.

10.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Зняти залежність низькочастотної напруги на виході детектора від амплітуди напруги несучої на вході детектора (на контурі L_k, C_k) при постійній глибині модуляції $M = 30\%$, частоті модуляції $F = 400$ Гц і несучій частоті $f_0 = f_p^*$ для двох випадків: а) $R = R_1^*$, $C = C_1^*$; б) $R = R_2^*$, $C = C_2^*$.

2. Отримати на вході детектора АМ - сигнал з параметрами $f_0 = f_p^* = 400$ Гц, $M = 30\%$ і $U_{m0} = 1B$, використовувати внутрішню модуляцію ГВЧ. Змінюючи частоту, добитися резонансу в контурі L_k, C_k . Врахувати, що при резонансі напруга на вході детектора досягає максимуму.

Зняти залежність $u_{внх}(t)$ від U_{m0} , змінюючи напругу на вході детектора за допомогою вихідного атенюатора ГВЧ і вимірювачем виходу ГВЧ.

3. Зняти залежність низькочастотної напруги на виході детектора від коефіцієнта модуляції на вході при $U_{m0} = 1B$ для двох випадків: а) $R = R_1^*$, $C = C_1^*$; б) $R = R_2^*$, $C = C_2^*$.

4. Продивитись і замалювати осцилограми напруг $u_{ex}(t)$, $u_{внх}(t)$, $u(t)$ для слідуєчих випадків: а) $R = R_1^*$, $C = C_1^*$; б) $R = R_2^*$, $C = C_2^*$; в) $R = R_2^*$, $C = C_1^*$; г) $R = R_1^*$, $C = C_2^*$.

5. Виміряти вхідну напругу послідовного діодного детектора методом заміщення для двох значень опору навантаження: а) $R = R_1^*$, б) $R = R_2^*$.

На вході детектора в точці А встановити немодульовану напругу. Під'єднати еквівалент вхідного опору детектора, підібрати величину так, щоб напруга в точці А була б рівною першочергово виставленому значенню.

10.5 Вказівки до звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову схему транзисторного підсилювача з модуляцією зміщенням.
2. Розрахунки, графіки і малюнки, отримані при виконанні домашньої роботи.
3. результати експериментального дослідження у вигляді таблиць і графіків.
4. Осцилограми напруг в різних точках схеми і при різних параметрах навантаження, узгоджені по часу і напрузі.
5. Висновки і оцінку результатів експерименту.

10.6 Питання для самоперевірки

1. Чим визначається режим роботи діодного детектора?
2. Чому прийнято розділяти детектування слабких і сильних сигналів?
3. Наведіть принципіальну схему послідовного діодного детектора, поясніть призначення усіх елементів схеми.
4. Чим слід керуватись при виборі параметрів навантаження діодного детектора?
5. В чому переваги лінійного детектування перед квадратичним?
6. Як буде змінюватись кут відсічки зі зміною опору навантаження при детектуванні сильних сигналів?
7. Чим визначається значення вхідного опору діодного детектора?
8. Дайте визначення детекторної характеристики.
9. Зобразіть детекторні характеристики при різних параметрах навантаження.
10. Якими причинами обумовлена поява нелінійних спотворень на виході детектора АМ - сигналів ?

Література: [1, с. 300-311; 3. с. 342-347; 4, с. 2333-241; 5,с. 337-343, 470-478; 6, с. 95-100].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

Стаціонарні та нестаціонарні процеси у автогенераторі. Схоплення частоти

Мета роботи: дослідження м'якого і жорсткого режимів самозбудження LC -автогенератора та поведінки генератора при зовнішній гармонічній дії. В роботі знімають коливальні характеристики нелінійного елемента, залежності амплітуди генеруючих коливань від коефіцієнта зворотного зв'язку для м'якого і жорсткого режимів самозбудження; досліджують процес встановлення коливань в генераторі і вплив амплітуди зовнішньої дії на полосу захоплення.

11.1 Основні позначення, розрахункові формули і означення

Принципова схема досліджуваного автогенератора подана на рис. 11.1. Він являє собою транзисторний автогенератор з контуром у колі колектора з трансформаторним зворотнім зв'язком. В стаціонарному режимі комплексний коефіцієнт передачі у замкнутому колі автогенератора дорівнює одиниці:

$$\underline{S}_{cp} \underline{\beta} \underline{Z}_{ек} = 1 \quad (11.1)$$

де $\underline{S}_{cp} = S_{cp} e^{j\varphi_s}$ - середня крутизна нелінійного елемента (крутизна по першій гармоніці), яка дорівнює відношенню амплітуди першої гармоніки колекторного струму до амплітуди напруги на базі транзистора:

$$\underline{S}_{cp} = \frac{\dot{I}_{k1m}}{\dot{U}_{бm}} ;$$

де β - комплексний коефіцієнт зворотного зв'язку, дорівнює

$$\beta = \beta e^{j\varphi_\beta} = j\omega M / (j\omega L + R) = M / L \left(1 - j \frac{R}{\omega L} \right);$$

де $\underline{Z}_{ек}$ - еквівалентний опір коливального контуру.

Умову стаціонарності коливань у автогенераторі (11.1) можна записати у вигляді двох умов:

баланс амплітуд

$$\underline{S}_{cp} \underline{\beta} \underline{Z}_{ек} = 1; \quad (11.2)$$

баланс фаз

$$\varphi_s + \varphi_\beta + \varphi_z = n2\pi; \quad (11.3)$$

де $n = 1, 2$,

Умова (12.3) дозволяє визначити частоту коливань генератора. Для схеми (рис.11.1) $\varphi_s = 0$, так як перша гармоніка колекторного струму співпадає по фазі з напругою на базі, $\varphi_\beta \approx 0$ так як $R/\omega L \ll 1$, отже, $\varphi_z \approx 0$ і частота генеруючих коливань співпадає з резонансною частотою контуру $\omega_z = \omega_p = 1/\sqrt{LC}$.

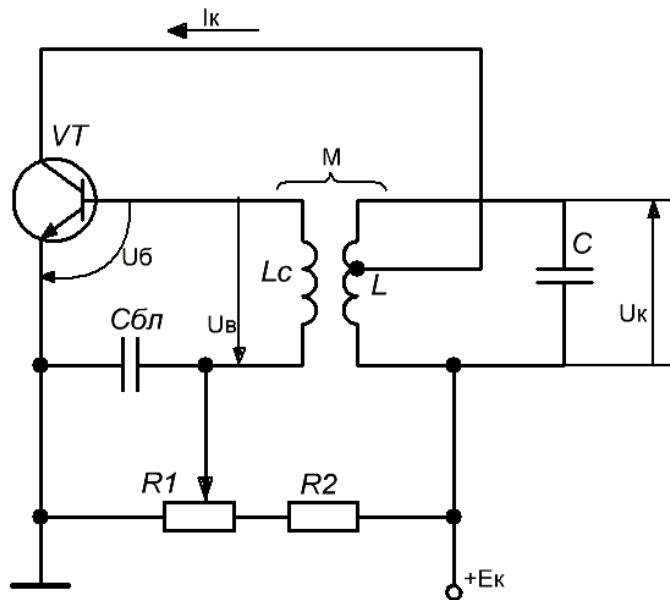


Рисунок 11.1 - Принципова схема досліджуваного LC – генератора

Амплітуду коливань генератора визначають за умов (11.2). Баланс амплітуд має місце в точці перетину коливальної характеристики

$$I_{k1m} = S_{cp}(U_{\delta m})U_{\delta m} \quad (11.4)$$

і прямого зворотного зв'язку

$$I_{k1m} = U_{\delta m} / \beta Z_{ек}. \quad (11.5)$$

У м'якому режимі така точка перетину одна і відповідає стійким стаціонарним коливанням. У жорсткому режимі таких точок перетину дві, стійким коливанням відповідає точка, для якої крутизна коливальної характеристики менша крутизни характеристики зворотного зв'язку. Процес встановлення коливань в автогенераторі при м'якому режимі

самозбудження описується нелінійним диференціальним рівнянням - рівнянням Ван-дер-Поля. Рішення такого рівняння методом повільно змінюваних амплітуд дозволяє отримати закон зміни амплітуди коливань у процесі встановлення

$$U = \frac{U_z}{\sqrt{1 + \left(\frac{U_z^2}{U_0^2} - 1 \right) e^{-2|\alpha_0|t}}} \quad (11.6)$$

де U_z - амплітуда коливань в стаціонарному режимі; U_0 - початкова амплітуда коливань;

$$2\alpha_0 = \omega_0 \left(\frac{M}{M_{кр}} - 1 \right) / Q \quad (11.7)$$

де $M_{кр}$ - значення взаємної індуктивності, при якій виконується умовне самозбудження; Q - добротність контуру.

Вважаючи $\frac{U_z}{U_0} \gg 1$ і визначивши час встановлення коливань t_y як час, протягом якого амплітуда наростає до $0,9U_z$, отримаємо

$$t_y = \frac{1}{2,3|\alpha_0|} \lg 2 \frac{U_z}{U_0}. \quad (11.8)$$

Відношення U_z/U_0 , що визначається флуктуаційними процесами, звичайно буває порядку 10^5 - 10^7 . Аналіз виразу (11.6) показує, що амплітуда генеруючих коливань у стаціонарному режимі не залежить від початкових умов, а час встановлення залежить від амплітуди і параметрів елементів схеми. Дія зовнішньої гармонічної е.р.с. на автогенератор призводить до примусової синхронізації (схопленню) частоти автогенератора в деякій смузі частот. Ширина смуги захоплення $\Delta\omega$ пропорційна відношенню амплітуди зовнішньої е.р.с. E_{cm} до амплітуди коливань на базі транзистора $U_{\delta m}$:

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{E_{cm}}{U_{\delta m} Q}. \quad (11.9)$$

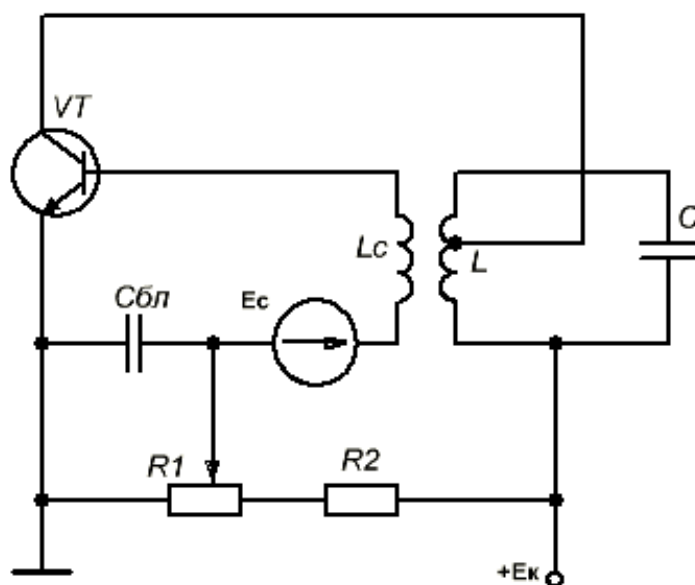


Рисунок 11.2 – Принципова схема LC – автогенератора при зовнішній дії

11.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка дозволяє виконувати лабораторні роботи №11 та 12. Передня панель пристрою зображена на рис. 11.3. При виконанні лабораторної роботи №11 перемикач "Схема" встановлюють у положення 2. У змінному пристрої знаходяться транзисторний LC-генератор та низка допоміжних вузлів, які дозволяють досліджувати роботу генератора. Необхідні для цього комутації виконуються перемикачем "Род работы", який має чотири положення: 1 - "ОС - вимк.", 2- "ОС - увімк.", 3 - "Синхронізація", 4- "Нестационарний". При розімкненому зворотному зв'язку (положення -1) можна знімати коливальну характеристику автогенератора. Причому розімкнення ланки зворотного зв'язку не змінює режиму роботи схеми. У положенні - 2 може бути проведено дослідження генератора у стаціонарному режимі. У положенні – 3 можна досліджувати автогенератор при зовнішній дії, яке подається через допоміжний трансформатор $Tr1$ з коефіцієнтом трансформації, близьким до одиниці. При дослідженні автогенератора у нестационарному режимі (положення - 4) ланка колектора LC- генератора підключається до генератора прямокутних імпульсів. В установці можна спостерігати нестационарні процеси у часі і на фазовій площині.

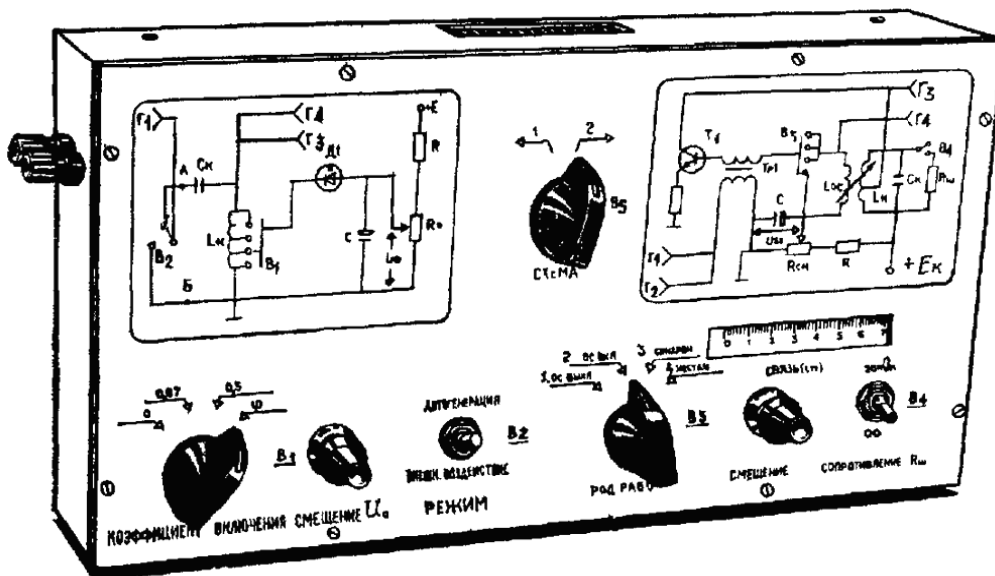


Рисунок 11.3 - Передня панель установки для виконання лабораторних робіт № 11 та 12

Тривалість прямокутних імпульсів та частота повторення підібрані так, що перехідні процеси у автогенераторі, обумовлені комутацією напруги живлення колекторної ланки, встигають закінчитися до наступної комутації. Ручкою " $U_{\text{бо}}$ - зміщення" можна плавно змінювати напругу зміщення, яка вимірюється вольтметром базового пристрою зі шкалою 1 В. В установці величина коефіцієнта зворотного зв'язку змінюється за рахунок пересування котушки зв'язку $L_{\text{ос}}$ ручкою, що розташована на правій боковій панелі установки. За допомогою тумблера "Спротивление $R_{\text{ш}}$ ", паралельно коливальному контуру може бути підключена шунтуюча опірність. Гніздо Γ_1 використовується для вмикання зовнішньої дії, гніздо Γ_2 - для його вимірювання за допомогою вольтметра. До гнізд Γ_3 та Γ_4 підводяться змінна напруга з колектора транзистора та напруга зворотного зв'язку. До гнізда Γ_5 підводиться імпульсний сигнал, який використовується для зовнішньої синхронізації та керування яскравістю осцилографа. Гніздо Γ_6 , яке розташоване на лівій боковій панелі змінного пристрою, використовують при спостережанні фазових портретів автогенератора, до них підводиться про диференційована колекторна напруга. Інші елементи комутації відносяться до лабораторної роботи №13

11.3 Домашнє завдання

1. Зобразити принципову схему LC-автогенератора, який використаний в роботі.
2. Визначити значення взаємної індуктивності контуру M , необхідну для самозбудження схеми при зсуві 0,8 і 0,6 В. Вольт-амперна

характеристика транзистора зображена на рис. 8.4. Параметри контуру L^* , f^* , p^* , Q^* повинні бути приведені в таблиці завдань, що складається викладачами з урахуванням реальних параметрів установок.

3. Розрахувати коливальні характеристики і залежність при зсувах 0,8 і 0,6 В методом трьох ординат, користаючись характеристикою транзистора КТ-315 (рис. 8.4)*.

4. Визначити критичні значення коефіцієнтів зворотного зв'язку, необхідні для виникнення і зриву коливань, по коливальних характеристиках чи залежностям $S_{cp}(U_{\delta m})$, розрахованим для зсуву 0,8 і 0,6 В. Використовувати ті ж параметри контуру, що й у п. 2.

5. Розрахувати відносну й абсолютну ширину смуги захоплення для відношень амплітуд зовнішньої е.р.с. до амплітуди автоколивань на базі транзистора автогенератора, рівних 0,2; 0,4; 0,6; 0,8.

6. Визначити час установлення коливань в автогенераторі при $U_{\delta o} = 0,8$ В і $M=1,5 M_{кр}$. Параметри контуру автогенератора відповідають приведеним у п.2.

11.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Зняти коливальні характеристики нелінійного елемента при розімкненому зворотному зв'язку для трьох зміщень 0,8; 0,6 і 0,4 В.

1.1. Налаштувати схему в резонанс зміною частоти генератора, попередньо установивши зміщення $U_{\delta o} = 0,8$ і $U_{\delta} = 100$ мВ.

1.2. Зняти залежність $U_k(U_{\delta})$ при заданих значеннях напруги зміщення, змінюючи напругу збудження U_{δ} від 0 до 1 В.

2. Визначити експериментально коефіцієнти зворотного зв'язку, що відповідають різним відстаням між котушками.

2.1. Налаштувати схему в резонанс зміною частоти генератора, попередньо установивши $U_{\delta o} = 0,8$ В, $U_{\delta} = 100$ мВ.

2.2. Змінюючи амплітуду вихідної напруги генератора високої частоти, домогтися, щоб напруга на контурі, вимірювана вольтметром, дорівнювала 1 В.

2.3. Зняти залежність напруги зворотного зв'язку U_{β} від відстані між котушками l . При $U_k = 1$ В значення напруги зворотного зв'язку U_{β} у вольтах чисельно дорівнює коефіцієнту зворотного зв'язку. Побудувати графік залежності $\beta(l)$.

2.4. На графіку коливальних характеристик побудувати сімейство прямих зворотного зв'язку, що відповідають різним значенням коефіцієнта зворотного зв'язку β . Для цього відкласти значення напруги зворотного

* Можна використати для виконання розрахунків будь-який метод, що придатний для розрахунку спектру струму в нелінійному колі, наприклад методом куту відсічки або тригонометричних функцій кратних аргументів, попередньо виконавши необхідну апроксимацію (шматково-лінійно або поліноміальну) характеристику транзистора.

зв'язку по осі абсцис U_β , а $U_k=1$ В - по осі ординат; через відзначені точки і початок координат провести лінії постійних значень коефіцієнта зворотного зв'язку β .

2.5. Володіючи експериментально знятими коливальними характеристиками і сімейством прямих зворотного зв'язку, розрахувати і побудувати залежність $U_k(\beta)$ для твердого і м'якого режимів самозбудження в режимі генерації.

3. Зняти залежність амплітуди генеруємих коливань від коефіцієнта зворотного зв'язку при $U_{\beta_0}=0,8; 0,6$ і $0,4$ В.

3.1. Зняти залежність $U_K(l)$, фіксуючи напругу на контурі автогенератора при зменшенні і збільшенні відстані між котушками. Помітити відстані, що відповідають виникненню і зриву коливань в автогенераторі. Якщо при максимальному коефіцієнті зворотного зв'язку автогенератор не збуджується, варто домогтися виникнення коливань, змінюючи напругу зміщення, а потім установити необхідне зміщення і зняти залежність $U_K(l)$, зменшуючи відстань між котушками.

3.2. Побудувати $U_K(\beta)$, користуючись графіком $\beta(l)$, отриманим у п.1 лабораторного завдання.

4. Дослідити дію зовнішньої гармонійної е.р.с. на автогенераторі при $E_c=0,2U_\beta; E_c=0,4U_\beta, E_c=0,6U_\beta, E_c=0,8U_\beta$ (див. рис. 12.2).

4.1. Установити $U_{\beta_0}=0,6$ В і $\beta=1,5\beta_{кр}$ при $E_c=0$. Виміряти напругу на базі транзистора U_β .

4.2. Визначити абсолютну ширину смуги захоплення для: $E_c=0,2U_\beta; E_c=0,4U_\beta, E_c=0,6U_\beta, E_c=0,8U_\beta$. Змінюючи частоту генератора високої частоти, по осцилограмі вихідної напруги визначити частоти, що відповідають границям смуги захоплення. Поза смугою захоплення має місце режим биття, що помітно по осцилограмі напруги на контурі.

4.3. Повторити дослідження в тім же порядку, зашунтувавши контур автогенератора опором $R_{ш}=10$ кОм. Після закінчення дослідження опір шунта відключити.

5. Дослідити автогенератор у нестационарному режимі при $U_{\beta_0}=0,8$ В. Замалювати тимчасові діаграми напруги на контурі при різних значеннях β .

5.1. Установити зсув і максимальний коефіцієнт зворотного зв'язку. синхронізувати зображення на екрані осцилографа. Одержати нерухому осцилограму напруги на контурі в нестационарному режимі.

5.2. Зняти залежність часу встановлення коливань від β при $\beta > \beta_{кр}$. Виміряти час установлення при декількох значеннях. Для вимірювання варто визначити число високочастотних коливань у проміжку часу, протягом якого їхня амплітуда збільшується до 0,9 стаціонарного значення. Замалювати осцилограму напруги на контурі при $\beta > \beta_{кр}$.

5.3. Зняти залежність часу затухання від β при $\beta < \beta_{кр}$. Для

вимірювання часу затухання варто визначити число високочастотних коливань у проміжку часу, протягом якого їхня амплітуда загасає до 0,1 початкового значення. Замалювати осцилограму напруги на контурі при $\beta < \beta_{кр}$.

5.4. Повторити дослідження в тім же порядку, зашунтувавши контур автогенератора опором $R_{ш} = 10\text{кОм}$.

6. Досліджувати нестационарний режим автогенератора на фазовій площині. Замалювати фазові траєкторії, що відповідають зсувам $U_{\delta o} = 0,8; 0,6; 0,4\text{ В}$ і різним значенням β . Встановити зсув і коефіцієнт зворотного зв'язку.

11.5 Вказівки до звіту

Звіт повинний містити:

- 1) принципіві схеми для експериментального дослідження автогенератора;
- 2) розрахунки, проведені при виконанні домашнього завдання;
- 3) таблиці, графіки й осцилограми, отримані при виконанні лабораторного завдання;
- 4) висновки й оцінку отриманих результатів.

11.6 Питання для самоперевірки

1. У чому сутність квазілінійного методу?
2. Як враховується нелінійність елементів схеми при квазілінійному методі?
3. Які характеристики і параметри нелінійного елемента по першій гармоніці використовуються в цьому методі?
4. Дайте визначення коливальної (амплітудної) характеристики.
5. Поясніть методіку експериментального зняття коливальних (амплітудних) характеристик автогенератора.
6. Чим визначається можливий режим самозбудження автогенератора?
7. Приведіть коливальні й амплітудні характеристики, що відповідають різним напругам зміщення на базі транзистора автогенератора.
8. Які умови стаціонарності коливань в автогенераторі?
9. Як визначаються амплітуда генеруємих коливань і їхня стійкість по коливальним (амплітудним) характеристикам?
10. Охарактеризуйте особливості твердого і м'якого режимів самозбудження.
11. Поясніть залежність амплітуди генеруємих коливань від коефіцієнта зворотного зв'язку у твердому і м'якому режимах

самозбудження.

12. Як зміниться вид залежності амплітуди генеруємих коливань від коефіцієнта зворотного зв'язку, якщо контур автогенератора зашунтувати активним опором?

13. Намалюйте, поясніть залежність амплітуди генеруємих коливань від величини шунтуючого опору і значення ємності контуру (при фіксованих значеннях взаємної індуктивності, напруги зміщення).

14. Поясніть явище захоплювання частоти при дії зовнішнього збудження на автогенераторі.

15. Зобразіть і поясніть залежність частоти биттів від частоти зовнішнього збудження.

16. Намалюйте і поясніть залежність частоти генерації від частоти зовнішнього збудження.

17. Як змінюється ширина смуги захоплення зі збільшенням амплітуди зовнішньої е.р.с., амплітуди автоколивань і добротності контуру?

18. Від чого залежить час встановлення коливань в автогенераторі?

19. Як залежить час встановлення коливань в автогенераторі від добротності контуру, величини взаємної індуктивності, початкової амплітуди коливань?

20. Зобразити фазовий портрет автогенератора в м'якому і твердому режимах.

Література: [1, с. 323-345, 353-357; 3, с. 449-459; 4, с. 321- 336; 5, с. 355-382, 505-510; 6, с. 145-157, 165-168, 213-216; 7; 8, с. 675, 676, 694-713].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

Генератори гармонійних коливань з негативним опором (генератор на тунельному діоді)

Мета роботи: дослідження автогенератора з внутрішнім зворотним зв'язком. У роботі експериментально перевіряється умова самозбудження автогенератора на тунельному діоді, досліджується явище регенерації за рахунок негативного внутрішнього опору діода і знімається залежність амплітуди генеруємих коливань від постійної напруги, прикладеної до діода.

12.1 Основні позначення, розрахункові формули і визначення

Принципова схема досліджуваного автогенератора гармонійних коливань на тунельному діоді дана на рис. 11.3, вольт-амперна характеристика використаного тунельного діода приведена на рис. 12.1. При установці робочої точки на спадаючій ділянці характеристики внутрішній опір діода виявиться негативним. Еквівалентна схема контуру, шунтованого негативним опором R_i , показана на рис. 12.2. Можна показати, що умови $R_i < 0$; $|R_i| < R_{ep}$ є умовами виникнення коливань у схемі.

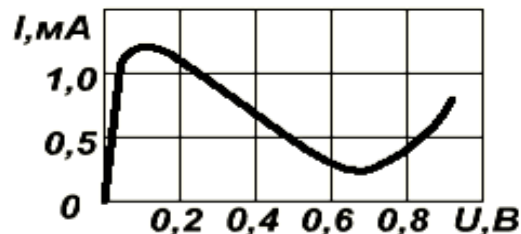


Рисунок 12.1 - Вольт-амперна характеристика тунельного діода

Умова стаціонарності коливань у автогенераторі з внутрішнім зворотним зв'язком має вигляд

$$|R_{icp}(u)| = R_{екр},$$

де відповідно до квазілінійної теорії $R_{icp} = I_1/U$ - внутрішній опір нелінійного елемента по першій гармоніці чи середній опір діода; $R_{екр}$ - еквівалентний опір контуру при резонансі.

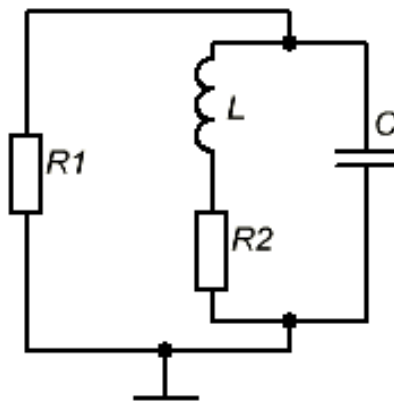


Рисунок 12.2 - Еквівалентна схема автогенератора на тунельному діоді

12.2 Опис лабораторної установки

Лабораторну роботу виконують на тій же лабораторній установці що й роботу №11. При виконанні роботи тумблер "Схема" слід перевести у положення - 2.

Лабораторна установка дозволяє досліджувати роботу автогенератора у недозбудженому режимі при гармонічній зовнішній дії та в автоколивальному режимі. У першому випадку тумблер "Режим" повинен знаходитись у положенні "Зовнішня дія". При цьому гніздо Г1, до якого підводиться гармонічний сигнал від зовнішнього генератора, підключається до точок А і Б схеми, як це показано на рис. 11.3. При дослідженні автогенератора точки А і Б закорочують тумблером "Режим".

Тунельний діод за змінним струмом підключають паралельно контуру. Коефіцієнт включення контуру зі сторони діода можна встановлювати рівним 0; 0.07; 0.5 та 1 за допомогою перемикача "Коефіцієнт вмикання". Робоча точка діода визначається постійною напругою зміщення U_0 , величина якої може регулюватись у межах від 0 до 1 В за допомогою потенціометра "Зміщення". Ця наруга вимірюється вольтметром базового пристрою. В установці гнізда Г3 Г4 підключаються до індуктивності контуру. До цих же гнізд для індикації вихідної напруги можна підключати вольтметр та осцилограф.

12.3 Домашнє завдання

1. Розрахувати резонансну частоту й еквівалентну добротність регенованого контуру при напрузі на тунельному діоді: а) $U_0 = 0\text{В}$, б) $U_0 = 0,05\text{В}$, в) $U_0 = 0,4\text{В}$, г) $U_0 = 0,8\text{В}$.

Власні параметри контурів C^*, L^*, R^* , коефіцієнт включення контуру з боку діода $p=0,07$. Внутрішній опір діода в робочій точці визначити по вольт-амперній характеристиці, приведеній на рис. 12.1.

2. Зобразити принципову схему досліджуваного автогенератора на тунельному діоді.

3. Розрахувати значення негативного опору, яке потрібно підключити паралельно до контуру для самозбудження схеми при: а) $p = 0,07$; б) $p = 0,5$; в) $p=1$.

12.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Дослідити явище регенерації за рахунок негативного внутрішнього опору тунельного діода. Зняти залежність еквівалентної добротності регенованого послідовного контуру від напруги живлення діода при $f=f_p$, $U=1$ мВ, $p=0,07$. Розрахувати значення опору, що шунтує контур.

1.1. Установити частоту зовнішнього генератора рівній резонансній частоті послідовного контуру. Визначити добротність контуру, враховуючи, що при $U_{вх}=1$ мВ напруга на індуктивності U_L у мВ при резонансі чисельно дорівнює добротності контуру.

1.2. Установити $p=0,07$. Плавно змінюючи постійну напругу U_0 , зняти залежність $U_L(U_0)$. Відзначити точки, у якій U_L максимально і мінімально, а також точки, у яких величина U_L дорівнює значенню, отриманому в п. 1.1.

1.3. У всіх цих точках знайти добротність контуру і розрахувати значення опору, що шунтує контур.

2. Зняти залежність амплітуди генеруємих коливань від зміщення при: а) $p=0,07$; б) $p = 0,5$. Зафіксувати осцилограми вихідної напруги при трьох значеннях U_0 (0,2; 0,3; 0,4 В). Перевести перемикач "Рід роботи" у положення "Автогенерація". Установити задане p . При виконанні варто спочатку збільшити U_0 від 0 до 0,8 В, а потім зменшити від 0,8 В до 0, відзначаючи точки виникнення і зриву коливань.

3. Зняти залежність частоти генеруємих коливань від зміщення при: а) $p=0,5$; б) $p=1$.

12.5 Вказівки до звіту

Звіт повинний містити:

- 1) принципову схему досліджуваного автогенератора;
- 2) розрахунки, пророблені при виконанні домашнього завдання;
- 3) таблиці, графіки й осцилограми, отримані при виконанні лабораторного завдання;
- 4) порівняння даних розрахунку й експерименту, висновки по виконаній роботі.

12.6 Питання для самоперевірки

1. Зобразити і пояснити залежність диференціального внутрішнього опору тунельного діода від значення прикладеної до нього постійної напруги.
2. Пояснити залежність еквівалентної добротності контуру, зашунтованого діодом, від значення постійної напруги, прикладеної до діода.
3. По експериментальним даним п.1 відновити вольт-амперну характеристику тунельного діода.
4. Як залежить значення негативного опору, необхідного для самозбудження схеми, від коефіцієнта підключення контуру до тунельного діода і власної добротності контуру?
5. Зобразити залежність середнього внутрішнього опору тунельного діода від амплітуди перемінної напруги на діоді при виборі робочої точки на середині падаючої ділянки вольт-амперної характеристики.
6. Чому виникнення і зриви коливань в автогенераторі на тунельному діоді відбуваються при різних значеннях напруги?
7. Як залежить амплітуда генеруємих коливань від коефіцієнта включення контуру з боку діода і власної добротності контуру?
8. Чому при наближенні до точок зриву коливань при збільшенні коефіцієнта підключення контуру до тунельного діода погіршується форма генеруємих коливань?

Література: [1, с. 345-347; 3, с. 446; 5, с. 388-392; 6, с. 176- 183, 728-730].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13

RC-генератор гармонічних коливань

Мета роботи: дослідження умов самозбудження і стаціонарного режиму RC- генератора; аналіз поведінки кола з коефіцієнтом підсилення підсилювача, більшим і меншим критичного, при зовнішній гармонічній дії.

13.1 Основні позначення, розрахункові формули та означення

У роботі досліджується найбільш поширений тип RC - генератора з мостом Віна і нульовим фазовим зсувом в колі зворотного зв'язку на частоті генерації. Його еквівалентна узагальнена схема наведена на рис.13.1. RC – генератор містить: підсилювач з комплексним коефіцієнтом передачі

$$\underline{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_{\beta}}{\dot{U}_{\text{вих}}} = Ke^{j\varphi_k} \quad (13.1)$$

та Г-подібний чотириполюсник в колі зворотного зв'язку з комплексним коефіцієнтом передачі

$$\underline{\beta}(\omega) = \frac{\dot{U}_{\beta}}{\dot{U}_{\text{вих}}} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)} = \beta e^{i\varphi_{\beta}}. \quad (13.2)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку досягає найбільшого значення $\beta_{\text{max}}=1/3$ на частоті $\omega= 1/ RC$.

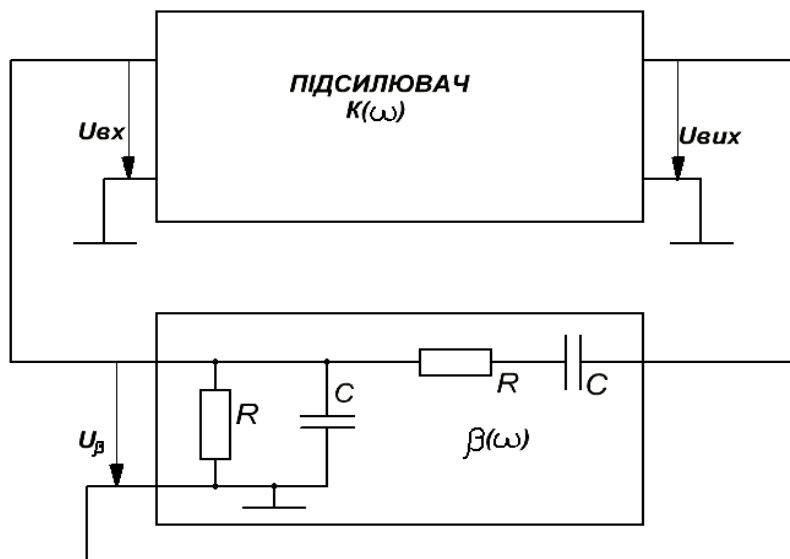


Рисунок 13.1 – Еквівалентна узагальнена схема RC – генератора

При $K(\omega) = K$ диференціальне рівняння, що описує стан кола при невеликих відхиленнях від стану спокою, має вигляд

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\alpha \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (13.3)$$

де $x = U_{\text{ex}}$, $2\alpha = (3 - K) / RC$.

Воно дозволяє одержати умову самозбудження автогенератора. Корені характеристичного рівняння кола

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (13.4)$$

приймають різні значення при зміні значення коефіцієнта підсилення K . Траєкторія їхнього руху на комплексній площині p при зміні коефіцієнта підсилення K від нуля до нескінченності називається *кореневим годографом*. Корені приймають значення $p_{1,2} = \pm j\omega_0$, тобто попадають на уявну вісь, при критичному коефіцієнті підсилення $K=3$. Генерація можлива, якщо $\text{Re}[p_1] > 0$ і $\text{Re}[p_2] > 0$, тобто при

$$K > K_0 = 3. \quad (13.5)$$

Інженерний критерій стійкості Найквіста дозволяє вирішити питання про можливість виникнення коливань у ланцюзі з зовнішнім зворотним зв'язком по амплітудно-фазовій характеристиці кола з розімкнутим колом зворотного зв'язку, якщо відключені ділянки ланцюга замінені еквівалентними опорами. Розмикання ланцюга зворотного зв'язку приведе до схеми, зображеної на рис. 13.2. Амплітудно-частотну і фазочастотну характеристики розімкнутого тракту можна легко зняти експериментально. Виключивши частоту і зробивши перехід до полярної системи координат, одержимо амплітудно-фазову характеристику розімкнутого тракту, чи годограф Найквіста. Критерій стійкості Найквіста формулюється у такий спосіб: якщо АФХ розімкнутого ланцюга охоплює точку з координатами $(x, y) = (1, j0)$, то коло із замкнутим зворотним зв'язком нестійке. Це формулювання справедливе у випадку, якщо коло з розімкнутим зворотним зв'язком стійке. Дослідження самозбудження RC -генератора за допомогою критерію Найквіста приводить до умови (13.5).

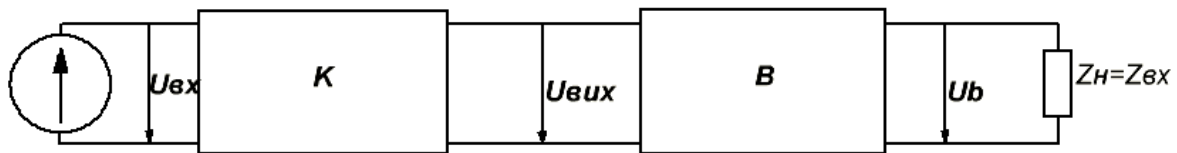


Рисунок 13.2 - Еквівалентна схема розімкненого тракту RC – генератора

Для одержання в стаціонарному режимі квазігармонічних коливань у підсилювач RC- генератора введений інерційний нелінійний від’ємний зворотний зв’язок, глибина якого зростає при зростанні амплітуди генеруємих коливань. При дії зовнішньої гармонічної е.р.с. на досліджуване коло (рис. 13.3) потрібно виділити два випадки.

1. Коло являє собою недозбуджений автогенератор. Таке коло називають ще *регенерованим підсилювачем*. При малих входних сигналах, тобто в лінійному режимі, вибірні властивості такого підсилювача описуються нормованою частотною характеристикою:

$$n = \frac{U_{вих}}{U_{вих\ max}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0\delta}\right)^2}} \quad (13.6)$$

де $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, $\delta = 3 - K$.

Смуга пропускання розглянутого регенованого підсилювача збігається зі смугою пропускання одиночного LC-контуру, якщо останній має затухання δ .

2. Дія зовнішньої гармонійної е.р.с. на RC- генератор приводить до примусової синхронізації (захопленню) частоти автогенератора в деякій смузі частот. Ширина смуги захоплення пропорційна відношенню амплітуди зовнішньої е.р.с. до амплітуди автоколивань.

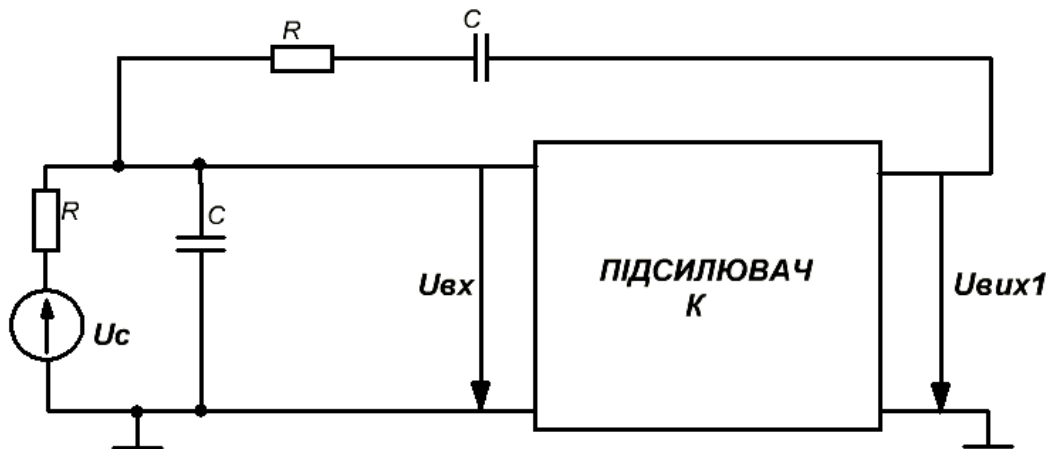


Рисунок 13.3 – RC-генератор при зовнішній дії

13.2 Опис лабораторної установки

У змінному пристрої лабораторної установки знаходяться підсилювач з регулятором коефіцієнта підсилення K та Γ - подібна ланка позитивного зворотного зв'язку (β -ланка). На рис. 13.4 показана передня панель змінного пристрою. Коефіцієнт підсилення регулюється потенціометром.

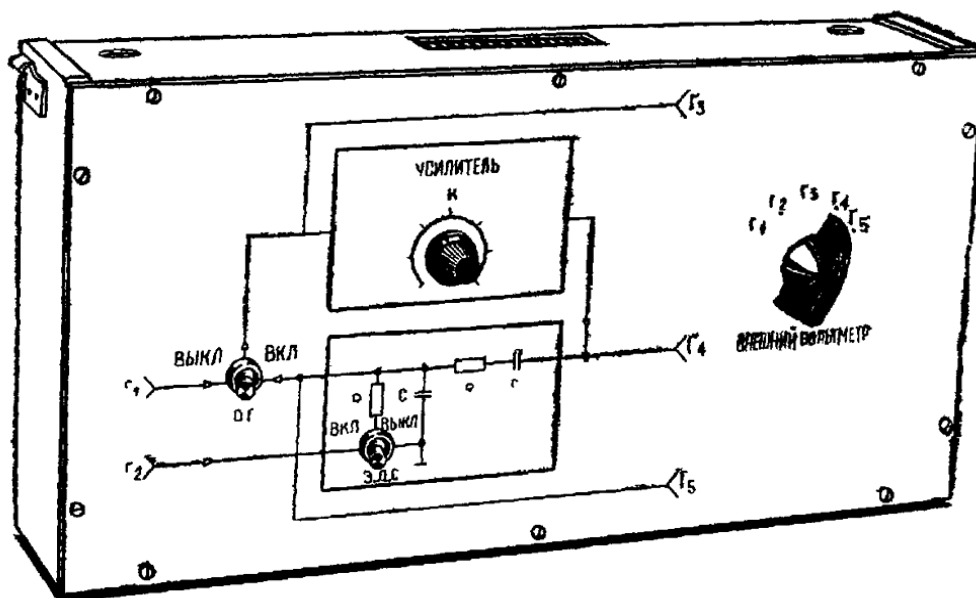


Рисунок 13.4 – Передня панель установки для виконання лабораторної роботи №13

Тумблер "ОС" дозволяє розривати коло зворотного зв'язку та підключати вхід підсилювача до гнізда $\Gamma 1$, до якого можна підводити зовнішнє діяння від генератора звукових та ультразвукових частот. При дослідженні регенеративного підсилювача та автогенератора у режимі

вимушеної синхронізації зовнішнє діяння, яке слід підвести до гнізда Г2, вмикають у β -ланку тумблером "е.р.с.". На правій боковій стороні існує гніздо Г6, до якого підключають зовнішній вольтметр. Перемикач "Зовнішній вольтметр" дозволяє одним вольтметром по чергово вимірювати напругу у різних точках схеми.

13.3 Домашнє завдання

1. Вивести диференціальне рівняння (13.3) для досліджуваного генератора. Записати для нього характеристичне рівняння і знайти його корені.
2. Розрахувати і побудувати на комплексній площині кореневий годограф досліджуваної системи при зміні K від 0 до 6. Розрахунки виконати для значень K , рівних 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6.
3. Розрахувати і побудувати залежність $\beta(\omega/\omega_0)$ і $\varphi_\beta(\omega/\omega_0)$, задаючись значеннями відношення ω/ω_0 .
4. Розрахувати і побудувати амплітудно-фазову характеристику розімкнутого кола, використовуючи результати розрахунків, отримані в п. 3. Частотні спотворення, внесені підсилювачем, не враховувати, тобто вважати $K = K(\omega)$. Розрахунки і побудови виконати для $K=3,2$ і $2,8$.
5. Знайти для заданих параметрів лабораторної установки $R = R^*$ і $C = C^*$.
6. Розрахувати залежність смуги пропускання регенованого підсилювача від K .

13.4 Лабораторне завдання і методичні вказівки

1. Провести дослідження RC- генератора за критерієм Найквіста при $K=3.2$ і $K=2.8$.

1.1. Зняти амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики розімкненого тракту при $U_{вх} = 100$ мВ. Для цього слід зібрати наступну схему : підключити лабораторний генератор до гнізда Г1; зовнішній вольтметр - до гнізда Г6; У - вхід осцилографа - до гнізда Г5; Х - вхід - до гнізда Г3. Розгортку осцилографа вимкнути. Розімкнути коло зворотного зв'язку тумблером "ОС". Тумблер "е.р.с." перевести у стан „Вимкн”.

Домогтися потенціометром "К" потрібного коефіцієнта підсилення на частоті $F=1$ кГц при $U_{вх} = 100$ мВ, при цьому на гнізді Г4 повинна з'явитись напруга $U_{вих} = K 100$ мВ. Зняти залежності $U_\beta(f)$ та $\varphi_{к\beta}(f)$ при $U_{вх} = 100$ мВ та двох значеннях K (3.2 і 2.8).

Амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики знімати одночасно. Доцільно зафіксувати частоти та фазові зсуви при $U_\beta = U_{макс}$, $0.7U_{макс}$, $0.5U_{макс}$, $0.2U_{макс}$. Напругу U_β фіксувати зовнішнім вольтметром;

зсув фаз $\varphi_{\kappa\beta}$ між напругами $U_{\text{вх}}$ та U_{β} визначати на основі спостережень фігур Лісажу.

1.2. На основі результатів спостережень п.1.1 побудувати годограф.

2. Зняти коливальну характеристику підсилювача $U_{\text{вих}} (U_{\text{вх}})$ при розімкненому колі зворотного зв'язку та $K > K_0$, $f = f_0$. Підключити У-вхід осцилографа для контролю форми вихідної напруги до гнізда Г4. Тумблери "ОС" та "е.р.с." оставити у попередньому стані. Змінювати $U_{\text{вх}}$ спочатку через 25 мВ, а потім - через 50 і 100 мВ. Результати представити у вигляді відповідних графіків.

3. Зняти пряму зворотного зв'язку $U_{\beta} = \beta U_{\text{вих}}$ при розімкненому колі зворотного зв'язку, тому ж значені K і f_0 . Змінюючи $U_{\text{вх}}$, встановити $U_{\text{вих}} = 300$ мВ і при цьому виміряти значення U_{β} .

Побудувати пряму зворотного зв'язку на графіку коливальної характеристики, відкладаючи $U_{\text{вих}} = 300$ мВ на осі ординат, значення U_{β} слід відкладати на осі абсцис, отриману точку з'єднати з початком координат відрізком прямої.

4. Виміряти амплітуду коливань, які генеруються при замкненому колі зворотного зв'язку та тому ж значені K . Коло зворотного зв'язку замкнути тумблером "ОС" та виміряти при цьому значення $U_{\text{вих}}$ і U_{β} .

5. Визначити частоту генерованих коливань у тому ж режимі методом порівняння на основі фігур Лісажу. З'єднати Х - вхід осцилографа з виходом лабораторного генератора. У-вхід повинен бути підключеним до гнізда Г4. Вимкнути розгортку осцилографа. Змінюючи частоту генератора, домогтися на екрані осцилографа найпростішої фігури Лісажу - еліпса, що відповідає рівності частот коливань, підведених до входів осцилографа.

6. Зняти частотні характеристики регенованого підсилювача при двох значеннях : $K < K_0$ і $U_c = 10$ мВ.

Для цього підключити лабораторний генератор до гнізда Г3. Тумблери "ОС" та "е.р.с." перевести у стан "Увімкн.", встановити $K < K_0$, попередньо слід добиватися відсутності генерації при $U_c = 0$.

Зафіксувати частоти, які відповідають значенням: $U_{\text{вих}} = U_{\text{макс}}$, $0.7U_{\text{макс}}$, $0.5U_{\text{макс}}$, $0.2U_{\text{макс}}$. На частоті квазірезонансу при $U_{\text{вих}} = U_{\text{макс}}$, виміряти $U_{\text{вх}}$ (гніздо Г3) та визначити відношення $K = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}$.

При цьому ж значені K виконати наступний пункт, а потім зменшити K і знову виконати пп. 6,7 для нового його значення. Результати представити у вигляді відповідних графіків.

7. Зняти амплітудні характеристики регенованого підсилювача при тих же значеннях K та f_0 , змінюючи U_c через кожні 10 мВ до появи нелінійних спотворень у напрузі $U_{\text{вих}}$.

8. Провести дослідження автогенератора у режимі вимушеної синхронізації, встановивши при цьому $K > K_0$. Зняти залежність смуги захвату від амплітуди зовнішньої е.р.с. для двох значень K більших за 3.

8.1 При U_c та $f=f_0$ встановити $K>K_0$, яке достатнє для появи генерації. Встановити певне значення U_c . Змінюючи частоту зовнішнього діяння поблизу частоти f_0 , фіксувати частоти, які відповідають межах смуги захвату. Поза цієї смуги з'являються биття, що повинно фіксуватися на осцилограмі вихідної напруги. Визначити смугу захвату для декількох значень U_c , змінюючи U_c від 0 до 100 мВ через кожні 10 мВ. Збільшити величину K та повторити дослідження. Результати представити у вигляді таблиць та відповідних графіків при різних значеннях K .

13.5 Вказівки до звіту

1. Звіт повинен містити:
2. Схему для експериментального дослідження системи по Найквісту;
3. Схему досліджуваного генератора;
4. Схему для досліджень явищ регенерації і захвату у генераторі;
5. Результати розрахунків і графіків, отримані при виконанні домашнього завдання;
6. Графіки і таблиці з експериментальними даними;
7. Висновки та оцінку результатів експерименту.

13.6 Питання для самоперевірки

1. Сформулюйте вимоги до коренів характеристичного рівняння стійкого і нестійкого кола.
2. Як за коефіцієнтами диференціального рівняння, що описує коло, вирішити питання про стійкість стану спокою ланцюга?
3. Сформулюйте критерій стійкості Михайлова.
4. Сформулюйте критерій стійкості Найквіста.
5. Чому розташування точки з координатами $(1, j0)$ відносно амплітудно-фазової характеристики розімкнутого тракту характеризує стійкість стану спокою кола із замкнутим зворотним зв'язком?
6. Як по заданій амплітудно-частотній і фазочастотній характеристикам побудувати амплітудно-фазову характеристику ланцюга?
7. Зобразіть схему для експериментального дослідження ланцюга по Найквісту.
8. Накресліть схему RC - генератора з трьохфазним колом зворотного зв'язку.
9. Побудуйте амплітудно-фазову характеристику розімкнутого тракту RC - генератора з трьохфазним колом зворотного зв'язку, вважаючи підсилювач ідеальним.
10. Побудуйте годограф Найквіста для LC -генератора гармонічних коливань із трансформаторним зворотним зв'язком.

11. Які параметри схеми визначають частоту генерації RC -генератора ?
12. Чому дорівнює згасання, внесене колом зворотного зв'язку, на частоті генерації в різних схемах RC -генераторів.
13. Як забезпечується синусоїдальна форма генеруємих коливань у RC -генераторах?
14. Поясніть явище регенерації.
15. Приведіть і поясніть частотні характеристики регенерованого підсилювача при різних значеннях K і амплітуди зовнішнього впливу.
16. Зобразіть і поясніть амплітудні характеристики регенерованого підсилювача.
17. Поясніть явище захоплення частоти.
18. Як залежить смуга захоплення від амплітуди зовнішньої е.р.с. і амплітуди коливань генератора ?

Література: [1, с. 204-213, 359-364; 3, с. 444-446; 5, с. 292- 307, 305-400; 6, с. 185-188; 8, с. 716-718; 12]

ЛІТЕРАТУРА

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: «Высшая школа» 1983. – 536 с.
3. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: В 2-х ч. 4.1,2: Пер с англ.- М.: Мир, 1988. – 336 с.
4. Лабораторный практикум по курсу « Радиотехнические цепи и сигналы » / Кашеев Б.Л. и др. - М.: Высшая школа. 1985. – 208 с.
5. Зиновьев А.Л. Филиппов Л.И. Введение в теорию сигналов и целей М.: Высшая школа. 1975. – 264 с.
6. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем / Под ред. Н.П. Бусленко. - М.: Мир, 1974.
7. Тихонов В.И, Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь. 1991 . – 608 с.
8. Бендат Дж. Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. - М.: Мир. 1989.
9. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука. 1967. – 780 с.
10. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. - М.: Сов. радио. 1971. – 326 с.

ГЛОСАРІЙ

автономний – self-contained
активний опір – active resistance
биття – beat
взаємна індуктивність – mutual inductance
вимушені коливання – forced oscillation
вільні коливання – free oscillation
внутрішній опір джерела – source resistance
вольтметр – voltmeter
вхідна напруга – input voltage
гармонічні коливання – harmonic oscillation
генератор гармонічної напруги – sinewave oscillator
гранична частота – cutoff
двополюсник – two-terminal device
джерело – source
добротність – quality factor
електричне коло – electric network.
електрорушійна сила – electromotance
ємність – capacitance
зв'язані контури – coupled circuits
змішаний – mixed
зсув фаз – phase shift
індуктивність – inductance
каскадний – cascade
коефіцієнт зв'язку – coupling coefficient
коефіцієнт згасання – damping coefficient
коефіцієнт передачі – transmission gain
коливальний контур – oscillatory circuit
комплексний вхідний опір – complex input impedance
конденсатор – capacitor
катушка – coil
ключ – switch
меандр – square waveform
напруга – voltage
непарний – odd
опір – resistance
опір навантаження – load resistance
осцилографа – oscilloscope
паралельний – parallel
парний – even
пасивний елемент – passive element
передатна характеристика – transfer characteristic

перехідний процес – transient
полюс – terminal
потужність – power
послідовний – series
похибка – error
провідність – conductance
реактивний опір – reactance
резонанс – resonance
релаксаційні коливання – relaxation oscillation
розстройка – mistuning
смуга пропускання – pass band
стала часу кола – time constant of circuit
стояча хвиля – standing wave
стрибок – step
струм – current
струм короткого замикання – short-circuit current
схема заміщення – equivalent circuit
трансформатор – transformer
трансформаторний зв'язок – transformer coupling
узгоджуючий пристрій – matching unit
фазометр – phasemeter.
характеристичний опір – characteristic impedance
частота – frequency
чотириполюсник – four-terminal device

Навчальне видання

Андрій Юрійович Воловик
Дмитро Володимирович Гаврілов
Андрій Олександрович Семенов
Микола Артемович Шутило
Оксана Петрівна Червак

**Сигнали та процеси в радіотехніці
Лабораторний практикум**

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук
Оригінал-макет підготовлено Д. Гавріловим

Підписано до друку
Формат 29,7x42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад 300 прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
Науково-методичний відділ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.