

Міністерство освіти і науки України

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

**МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ І ПРОЦЕСІВ
В РАДІОТЕХНІЦІ
В СЕРЕДОВИЩАХ MATHCAD ТА
ELECTRONICS WORKBENCH
Частина 1**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол №7 від 13.05.2021 р.)
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

**Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021**

Рецензенти: *В. П. Смирнов*, старший викладач,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Т. Н. Наритник, канд.техн.наук, професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

За редакцією укладачів

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.)
за поданням Вченої ради Радіотехнічного факультету (протокол № 02/2021 від 22.02.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Укладачі: *ГУССВА Олена Володимирівна*, канд.техн.наук, доцент
ПАВЛОВ Олег Ігорович, старший викладач

Моделювання сигналів і процесів в радіотехніці в середовищах MathCAD та ELECTRONICS WORKBENCH Частина I

Моделювання сигналів і процесів в радіотехніці в середовищах MathCAD та Electronics Workbench. Частина I [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / Уклад.: О. В. Гусєва, О.І.Павлов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл 3.72 Мбайт). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 128 с.

Розглянуто приклади виконання комп'ютерного моделювання проходження сигналів з амплітудною та частотною модуляцією через лінійні частотно-вибіркові кола. Запропоновано застосувати для математичного моделювання програмне середовище Mathcad, а для схемного моделювання – прикладне середовище Electronics Workbench. Наведено програми, що докладно відтворюють перетворення часових і частотних параметрів сигналів, які відбуваються у частотно-вибіркових колах, та схемні моделі, що відтворюють реальні лабораторні роботи.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю «Телекомунікації і радіотехніка».

© О. В. Гусєва, О. І. Павлов, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, (РТФ) 2021

Зміст

ПЕРЕДМОВА	5
ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРАКТИКУМІВ ТА ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛІВ	7
Завдання 1. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КЕРУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ І РАДІОСИГНАЛІВ З АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ	10
1.1. Основні теоретичні відомості	10
1.2. Математичне моделювання	13
1.3. Домашнє завдання	27
1.4. Завдання комп'ютерного практикуму	28
1.4.1. Використані пристрої, прилади та вбудовані функції EWB	28
1.4.2. Виконання досліджень	29
1.5. Використана література	35
1.6. Контрольні питання	35
Завдання 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-МОДУЛЬОВАНИХ КОЛИВАНЬ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВІ КОЛА	37
2.1. Основні теоретичні відомості	37
2.2. Математичне моделювання	43
2.3. Домашнє завдання	51
2.4. Експериментальні дослідження	52
2.4.1. Використані пристрої, прилади та вбудовані функції EWB	52
2.4.2. Виконання досліджень	53
2.5. Використана література	63
2.6. Контрольні питання	63
Завдання 3. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДУЛЬОВАНИХ ЗА КУТОМ КОЛИВАНЬ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ПРОХОДЖЕННЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНІ ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВІ КОЛА	65
3.1. Основні теоретичні відомості	65
3.2. Математичне моделювання	74
3.3. Домашнє завдання	81
3.4. Експериментальні дослідження	82
3.4.1. Використані пристрої, прилади та вбудовані функції EWB	82
3.4.2. Виконання досліджень	82
3.5. Використана література	90
3.6. Контрольні питання	90
Перелік посилань	91
Додатки	92

А. Таблиця значень функцій Бесселя I роду аргументу М.....	93
Б. Опис програми комп'ютерного моделювання радіотехнічних та радіоелектронних кіл ELECTRONICS WORKBENCH.....	94
Б.1. Загальна характеристика	94
Б.2. Короткий опис програми ELECTRONICS WORKBENCH	95
Б.2.1. Призначення кнопок панелі інструментів	95
Б.2.2. Система меню. Основні команди.....	96
Б.2.3. Короткий опис елементної бази EWB 5.12.....	98
Б.3. Моделювання схем	103
Б.3.1. Вибір компонентів з бібліотеки компонентів і їх переміщення	103
Б.3.2. З'єднання елементів у схемі	103
Б.3.3. Установка значень параметрів елементів	104
Б.3.4. Активація роботи схеми	104
Б.4. Прилади, що застосовуються в комп'ютерних практикумах.....	105
Б.4.1. Осцилограф.....	105
Б.4.2. Функціональний генератор	108
Б.4.3. Вимірювач АЧХ і ФЧХ.....	109
Б.4.4. Вольтметр	110
Б.4.5. Джерело гармонічних коливань напруги.....	111
Б.4.6. Джерело сигналів з тональною АМ.....	111
Б.4.7. Джерело тональних ЧМ сигналів	112
В. Математичні засоби EWB для дослідження характеристик сигналів та кіл.....	113
В.1. Частотні характеристики сигналів	114
В.2. Часові характеристики сигналів.....	116
В.3. Частотні характеристики кіл.....	117
В.4. Команди графічного вікна	118
В.5. Редагування графіків	119
В.6. Робота з вертикальними курсорами.....	120
Г. Деякі корисні схеми.....	122
Г.1. Схеми тонального амплитудного модулятора	122
Г.1.1. Глибина модуляції $m \leq 1$	122
Г.1.2. Глибина модуляції $m > 1$	124
Г.2. Зв'язані коливальні контури	126

ПЕРЕДМОВА

В умовах електронного дистанційного навчання дуже важливо надати студентам інструменти, які допоможуть їм досконало опанувати теоретичний матеріал радіотехнічних дисциплін та нададуть можливість безпосередньо розв'язувати задачі щодо створення моделей сигналів та радіотехнічних об'єктів і оптимізації їх параметрів, не удаючись до тонкощів програмування.

Одним з найпростіших у застосуванні програмних засобів, що орієнтовані у напрямку радіотехніки та радіоелектроніки, є Electronics Workbench (у подальшому викладенні – EWB). Простота його застосування поєднується з наявністю у ньому потужної бібліотеки, яка містить моделі більшості елементів радіотехнічних кіл та вимірювальних пристроїв, а також низки функцій, що втілюють стандартні методи аналізу радіотехнічних пристроїв.

Іншим популярним і поширеним серед студентів, вчених, інженерів та технічних спеціалістів, є математичне програмне середовище MathCAD, яке містить сотні операторів і вбудованих функцій для розв'язку різноманітних технічних завдань. MathCAD надає користувачеві інструменти для роботи з формулами, числами, графіками та текстами, він забезпечений простим в освоєнні графічним інтерфейсом.

Саме ці два програмних середовища пропонуються для використання під час електронного дистанційного вивчення навчальної дисципліни «Основи теорії телекомунікації і радіотехніка» (у подальшому викладі ОТТКіРТ) студентами радіотехнічного факультету Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» напряму підготовки 172 «Телекомунікації і радіотехніка».

Навчальна дисципліна ОТТКіРТ вивчається на другому році бакалаврської підготовки і містить лекційну частину, практичні заняття, лабораторні роботи, низку самостійних робіт і заходів контролю якості засвоєння навчального матеріалу.

Цикл комп'ютерних практикумів, що розглядаються в наведеному курсі, включає в себе три роботи, що охоплюють основні розділи теоретичного курсу «Спектральний аналіз і радіотехнічні сигнали в лінійних колах» [1,2].

Моделювальні завдання комп'ютерних практикумів, для проведення яких призначений даний Навчальний посібник, практично повторюють зміст лабораторних робіт [3], але дозволяють значно розширити коло дослідницьких питань та поглибити набуті знання з теорії сигналів та процесів в радіотехніці.

Кожне моделювальне завдання містить:

- теоретичні відомості з теми дослідження, які необхідні для розуміння і грамотного виконання завдань практикуму;
- приклади математичного моделювання сигналів і процесів в MathCADi;
- домашнє завдання для підготовки до роботи;
- опис послідовності виконання дослідницьких задач в EWB;
- посилання на літературу для поглибленого вивчення матеріалу;
- контрольні питання, що додаються до кожного завдання, і дозволяють студенту зробити самоперевірку підготовки до виконання роботи.

Виконання кожного комп'ютерного практикуму починається з виконання домашніх завдань.

Перед виконанням моделювальних завдань необхідно набути навичок роботи з програмним середовищем EWB. Короткий опис можливостей EWB та способів моделювання радіотехнічних пристроїв наведено у Додатках Б-Г.

За необхідності, з метою оптимізації навчального процесу, завдання комп'ютерних практикумів можна виконувати очно, очно-дистанційно або дистанційно, що надає можливість оптимізувати навчально-виховний процес (з точки зору досягнення високої якості освіти).

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРАКТИКУМІВ ТА ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛІВ

В умовах електронного дистанційного навчання безпосереднє спілкування з викладачем під час проведення комп'ютерного практикуму (далі – КП) відбувається в середовищі Zoom. Запрошення надсилається на групову адресу в Telegram-канал за 5-10 хвилин до початку КП.

Посібник розміщено на Google Диску у розділі Lab https://drive.google.com/drive/folders/1kv_ACi1m0P_Ty8tfaozPZgQQJv3ULFqe?usp=sharing.

1. Під час підготовки до КП студенти мають детально ознайомитися з теорією завдань, які розв'язуються протягом виконання КП. Метою підготовки є:

- теоретичне вивчення основних процесів, що відбуваються у конкретному елементі або пристрої;
- набуття навичок графічного відображення параметрів процесів, що вивчаються у роботі;
- ознайомлення з методиками вимірювання параметрів досліджуваних процесів.

Основні теоретичні відомості у короткому викладі наведено у розділі «Теоретичні відомості» кожного завдання. У разі необхідності більш ґрунтовного вивчення наведених питань, слід звернутися до навчальної та методичної літератури, перелік якої наведено у кінці опису завдання.

Рівень засвоєння теорії слід контролювати за допомогою контрольних запитань, які наведені в практикумі.

2. Перед початком кожного КП викладач з'ясовує ступінь підготовленості студентів шляхом проведення контрольної роботи, яка виконується протягом 15 хв. Завдання на виконання контрольної роботи студенти отримують, і виконані завдання відсилають, через Telegram канал. Через 10 хв. після здачі контрольних робіт викладач об'являє отримані оцінки.

Для допуску до виконання КП, студент повинен:

- засвоїти теоретичний матеріал за темою КП;
- мати уяву про фізичні процеси в досліджуваних колах, про очікувані результати; вміти пояснити їх;
- надіслати викладачу виконане домашнє завдання (спосіб надіслання обговорюється перед виконанням першого КП);
- вміти відповісти на контрольні питання щодо КП;
- успішно написати контрольну роботу.

3. КП виконуються кожним студентом індивідуально протягом часу, що передбачений розкладом.

4. Дослідження процесів у радіотехнічних пристроях виконується за допомогою вбудованого радіоелектронного вимірювального обладнання (генератори, вольтметри, осцилограф тощо) з бібліотеки EWB за стандартними методиками (Додаток В). Принципи дії радіовимірювальних пристроїв та основні методики вимірювань мають бути засвоєні під час вивчення дисципліни «Основи метрології та радіовимірювань».

5. Виконання КП починається із завантаження програми EWB та відповідної схеми з бібліотеки LIB.

6. Засобами EWB встановлюються параметри сигналів та елементів схеми, що зазначені у описі виконуваного КП.

7. У разі одержання даних у вигляді таблиці та графіків, слід вказати розмірність одержаних величин. У разі одержання даних у вигляді кривих, слід, скориставшись курсорами, визначити екстремальні та інші характерні точки одержаних залежностей і занести їх до протоколу. При знятті кривих відліки необхідно брати не менше ніж в 8–10 точках, приділяючи окрему увагу ділянкам кривих поблизу екстремальних значень досліджуваної функції.

8. Залежності, що одержані під час виконання завдань КП, переносяться у протокол виконання КП за допомогою будь-якого скріншоту (наприклад, Lightshot, <https://app.prtscr.com/>). Завдання вважається виконаним, коли усі пункти протоколу заповнені.

9. Звіт про виконане завдання складається у вигляді протоколу досліджень (розміщено на Google Диску у розділі Lab https://drive.google.com/drive/folders/1kv_ACi1m0P_Ty8tfaozPZgQQJv3ULFqe?usp=sharing). У звіті повинні бути:

- результати виконання домашніх завдань;
- результати вимірювань у вигляді таблиць і графіків одержаних залежностей, а також усі необхідні формули і розрахунки. На графіках мають бути чітко визначені експериментально отримані точки. Позначення та написи на графіках повинні розкривати зміст одержаних результатів.
- висновки повинні містити короткий об'єктивний аналіз одержаних результатів, критичне співставлення теоретичних та експериментальних даних, їх фізичний зміст.

10. Протоколи з виконаного КП оформлюються, надсилаються викладачеві (у визначений спосіб) та захищаються в день його виконання.

Захист відбувається «тет-а-тет» в середовищі Zoom в режимі «online» протягом 5-10 хвилин.

Як виняток (з дозволу викладача), протоколи можуть бути представлені до початку наступного заняття і захищені після його закінчення.

11. Оцінка з результатів виконання КП складається з оцінювання «активності»:

- 1) виконання домашнього завдання;
- 2) результату контрольної роботи;
- 3) результатів виконання завдань КП;
- 4) результатів захисту.

Оцінка активності кожного пункту складає 100%. Підсумкова оцінка розраховується як середнє за вказаними показниками.

Семестровий залік з комп'ютерних практикумів виставляється на підставі заліків за **усіма** КП.

12. Студенти, що пропустили КП, допускаються до заняття з іншою групою або виконують КП за вказівкою викладача у встановлений ним час поза розкладом.

13. Якщо КП проводять два викладачі, група може бути розділена на дві підгрупи, кожна з яких буде спілкуватися переважно зі своїм викладачем.

14. Студенти можуть бути розбиті на окремі бригади по 2 студенти в кожній. Тоді кожна бригада виконує завдання КП разом. Захищати результати КП вони можуть також разом.

Завдання 1. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КЕРУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ І РАДІОСИГНАЛІВ З АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Мета — експериментальне дослідження амплітудно-частотного спектру періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів, перевірка кількісних співвідношень між основними параметрами цієї послідовності та її спектра. Визначення якісних зв'язків між формою відеоімпульсів і характером обвідної амплітудно-частотного спектра. Дослідження амплітудно-частотного спектра радіосигналів з амплітудною модуляцією.

1.1. Основні теоретичні відомості

1.1.1. Задачею спектрального аналізу сигналу $s(t)$ є визначення його спектральної густини $\dot{S}(\omega)$ (для неперіодичних сигналів) або загального члена \dot{C}_n експоненційного ряду Фур'є (для періодичних сигналів), а також представлення $\dot{S}(\omega)$ або \dot{C}_n у вигляді відповідних пар графіків: амплітудно-частотного спектра (АЧС) і фазо-частотного спектра (ФЧС). Згідно з теорією, це завдання розв'язується за допомогою прямого перетворення Фур'є:

$$\dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt = S(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (1.1)$$

або за формулою для коефіцієнтів ряду Фур'є:

$$\dot{C}_n = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-jn\Omega t} dt = C_n \cdot e^{j\psi_n}, \quad (1.2)$$

де ω — поточна частота у суцільному спектрі неперіодичного сигналу; T — період повторення (якщо сигнал періодичний); $\Omega = 2\pi/T$; n — номер гармоніки дискретного спектру періодичного сигналу; $S(\omega)$, C_n , $\varphi(\omega)$, ψ_n — модулі і фази відповідних комплексних функцій $\dot{S}(\omega)$ і \dot{C}_n .

В формулах (1.1), (1.2), що найбільш зручні для теоретичних викладок, неперервні (ω) або дискретні ($n\Omega$) частоти можуть приймати як додатні так і від'ємні значення. Оскільки від'ємні частоти є хоч і зручною, але, все ж таки, абстракцією, результати спектрального аналізу представляють лише в області додатних частот, що еквівалентно переходу від експоненційної до тригонометричної форми інтегралу та ряду Фур'є.

Для такого представлення результатів аналізу (1.1), (1.2) достатньо подвоїти модуль $S(\omega)$, C_n на усіх частотах, окрім нульової (постійна складова).

В силу подібності інтегралів (1.1), (1.2), існує однозначний зв'язок між спектром $\dot{S}(\omega)$ одиночного імпульсу $s(t)$ і спектром \dot{C}_n нескінченної періодичної послідовності $s(t + kT)$ (k — будь-яке ціле число) таких імпульсів:

$$\dot{C}_n = \frac{1}{T} \dot{S}(jn\Omega) = \frac{1}{T} S(jn\Omega) \cdot e^{j\varphi(n\Omega)}, \quad (1.3)$$

Із (1.3) зрозуміло, що модуль $S(\omega)$ спектральної густини одиночного імпульсу з точністю до коефіцієнту $1/T$, а фаза $\varphi(\omega)$ — безпосередньо, повторюють обвідні дискретних амплітудно-частотних (C_n) і фазо-частотних (ψ_n) спектрів періодичної послідовності таких імпульсів. Враховуючи цю схожість, а також знаючи, чим відрізняються один від одного $\dot{S}(\omega)$ і \dot{C}_n , можливо прийти до висновку, що, як при теоретичному, так і при апаратурному спектральному аналізі, байдуже, спектр якого сигналу досліджувати — одиночний імпульс або періодичну послідовність імпульсів. Знаючи, наприклад, \dot{C}_n , завжди можна записати або графічно представити $\dot{S}(\omega)$, і навпаки. Вибір кращого шляху аналізу визначається специфікою задачі, яка роз'ясується.

1.1.2. Апаратурний спектральний аналіз простіше реалізується для періодичних сигналів. Тому, в цьому практикумі експериментально досліджуються амплітудно-частотні спектри саме таких сигналів. Але це не зменшує загальності результатів.

Оскільки сигнал може бути адекватно представлений як у часовій (функція $s(t)$), так і у частотній (залежність амплітуд і фаз гармонік від частоти) областях, тому будь-які зміни форми і спектра сигналу однозначно пов'язані між собою. Для інженера-радиста вкрай важливо не тільки вміти розраховувати, але й представляти собі якісно (відчувати) зв'язок між спотвореннями спектра і форми сигналу. Отримати уявлення про такий зв'язок дозволяє цей практикум.

Найбільш зручним для здійснення мети роботи сигналом є періодична послідовність прямокутних відеоімпульсів з тривалістю одного імпульса τ , періодом повторення T (частотою повторення $F = 1/T$) і амплітудою U . Зручність такого сигналу полягає в тому, що форма піддається дозованим (достатньо просто розраховуваним) спотворенням, які є типовими для радіотехнічної практики і виникають під час проходження імпульсів через найпростіші RC або LC кола.

Тому, в якості джерела досліджуваних сигналів, в практикумі використовується функціональний генератор прямокутних імпульсів (додаток

Б.4.2) і найпростіші чотириполіусники, що забезпечують задане спотворення форми (і спектра) досліджуваних сигналів. Форма цих імпульсів контролюється осцилографом, а їхні АЧС — графічною функцією *Fourier* з меню *Analysis* програми EWB (додаток В.1).

1.1.3. Адекватність представлень сигналів у часовій і частотній областях робить можливим дwoяке визначення поняття «радіосигнал». З часової точки зору радіосигнал—це коливання виду

$$a(t) = A(t)\cos[\psi(t)] = A(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0],$$

хоча б один з параметрів якого (амплітуда, фаза, частота) змінюється за часом за законом керувального сигналу. З частотної точки зору радіосигнал — це такий сигнал, енергія якого зосереджена у смузі частот в околі деякої носійної частоти ω_0 , значення якої перевищує ширину частотного спектру керувального сигналу.

Найчастіше поняття «радіосигнал» притаманне вузькосмуговим у відносному сенсі сигналів, для яких дієва (технічна) ширина спектра є набагато меншою за носійну частоту $\Delta\omega \ll \omega_0$. У часовій області це відповідає сигналам з «параметрами, що повільно змінюються». На практиці зустрічаються також радіосигнали, які не відповідають цьому критерію.

Радіотехнічний процес, який реалізує формування радіосигналу, називається *модуляцією*. Його також можливо визначити дwoяко. З часової точки зору — це процес керування одним або декількома параметрами носійного коливання у відповідності до необхідного (заданого) закону. Із спектральної точки зору — це процес зсуву спектра керувального сигналу вздовж осі частот в область носійної частоти ω_0 зі збереженням інформації, що вкладена в керувальний сигнал. Це твердження вірне тільки для сигналу з одною бічною смугою (ОБС). Для АМ – утворення двох смуг та додавання носійного коливання, для кутової модуляції – повна зміна форми спектра.

1.1.4. Найпростішим видом модуляції є амплітудна модуляція (АМ), при якій за законом керувального сигналу $s(t)$ змінюється приріст амплітуди носійного коливання A_0 . Аналітичний вираз, що описує АМ-коливання, має вигляд:

$$a(t) = (A_0 + \Delta A_0)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) = [A_0 + k \cdot s(t)]\cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.4)$$

де k — коефіцієнт пропорційності.

У випадку тональної АМ керувальний сигнал має вигляд

$$s(t) = U \cdot \cos(\Omega t + \theta),$$

а радіосигнал (1.4) записують наступним чином:

$$\begin{aligned}
 a(t) &= A_0 \cdot [1 + m \cdot \cos(\Omega t + \theta)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\
 &= A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0 m}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \theta] + \frac{A_0 m}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \theta],
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

де m — коефіцієнт (глибина) модуляції, що характеризує ступінь відносної зміни амплітуди носійного коливання ($m = kU/A_0$). Для неспотвореної АМ необхідно, щоб $0 \leq m \leq 1$.

У загальному випадку спектри керувального сигналу і АМ-коливання пов'язані співвідношенням:

$$\dot{S}_a(j\omega) = \frac{1}{2} e^{j\varphi_0} \dot{S}_A(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} e^{-j\varphi_0} \dot{S}_A(\omega + \omega_0), \tag{1.6}$$

де $\dot{S}_A(\omega)$ — спектр обвідної АМ-коливання, який має форму спектра керувального сигналу.

У АМ-коливань форма обвідної співпадає з формою керувального сигналу, а спектр вдвічі ширше за спектр керувального сигналу (див.(1.5), ширина спектру АМ-коливання визначається подвоєною максимальною частотою спектра керувального сигналу). У спектрі АМ радіосигналу амплітуди і фази окремих пар бокових коливань взаємно незалежні, оскільки кожна спектральна складова керувального сигналу здійснює незалежну модуляцію носійного коливання, тобто утворює свою пару бічних коливань навколо того ж самого коливання носійної частоти.

Різновидом АМ є балансна АМ (БАМ), для якої радіосигнал записують у вигляді:

$$a(t) = k \cdot s(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{1.7}$$

Оскільки математичний апарат спектрального аналізу однаково застосовується як до керувальних, так і до радіосигналів, тоді усі основні висновки теорії лишаються дійсними і в цьому випадку. Це стосується загальних властивостей спектрів, точності представлення сигналів за Фур'є, зв'язку між спектрами одиночних радіоімпульсів і їх періодичних послідовностей тощо. Саме тому, в цьому практикумі головна увага приділяється вивченню специфічних властивостей спектрів радіосигналів у порівнянні зі спектрами керувальних сигналів.

1.2. Математичне моделювання

Приклад 1. Для періодичної послідовності парних прямокутних імпульсів тривалістю $\tau = 5$ мкс, амплітудою $U_0 = 1$ В, з періодом повторення $T = 20$ мкс розрахувати та побудувати АЧС та ФЧС в діапазоні частот $0 \dots 30 \cdot F$

($F = 1/T = 10^6/20 = 0.05 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 0.05 \text{ МГц} = 50 \text{ кГц}$).

Введемо величину $M = T/\tau = 20/5 = 5$, яку називають *шпаруватістю* (застосовують *лише* для періодичної послідовності прямокутних імпульсів).

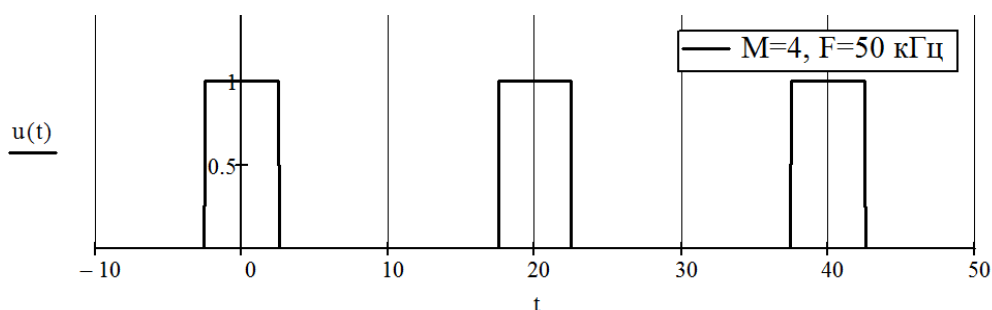
Заданий періодичний сигнал можна записати наступним чином

$$u(t) = U_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} [1(t - nT + \tau/2) - 1(t - nT - \tau/2)].$$

Програмування в Mathcad

$U_0 := 1 \text{ В}$ $T := 20 \text{ мкс}$ $M := 4$ $\tau := \frac{T}{M} = 5 \text{ мкс}$

$$u(t) := U_0 \cdot \sum_{n=0}^5 \left(\Phi\left(t - n \cdot T + \frac{\tau}{2}\right) - \Phi\left(t - n \cdot T - \frac{\tau}{2}\right) \right)$$



Тут період сигналу задається у мікросекундах, відповідно, частота сигналу буде мати розмірність МГц.

Постійна складова сигналу дорівнює

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^{\tau/2} U_0 dt = U_0 \frac{\tau}{T} = \frac{U_0}{M}.$$

Амплітуди гармонік

$$A_n = \frac{4}{T} \int_0^{\tau/2} U_0 \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt = \frac{4U_0}{T} \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{T} \tau\right)}{\frac{2\pi n}{T}} = 2U_0 \frac{\tau}{T} \text{sinc}\left(\pi n \frac{\tau}{T}\right) = \frac{2U_0}{M} \text{sinc}\left(\frac{\pi n}{M}\right).$$

Проміжний висновок. Амплітуди гармонік періодичної послідовності прямокутних імпульсів не залежать від частоти, а залежать від шпаруватості M – відношення періоду до тривалості імпульсу – і номеру гармоніки.

Амплітуди дорівнюють нулю, коли

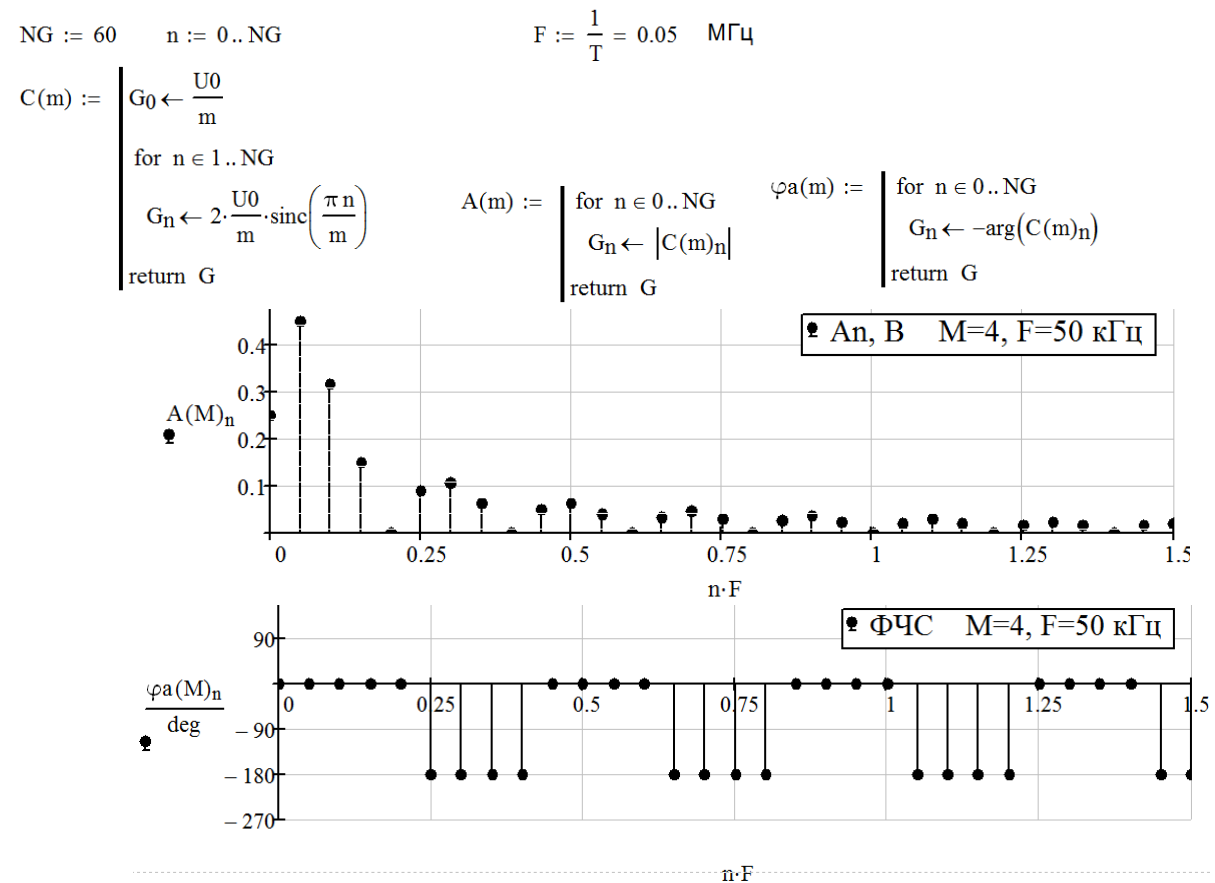
$$\text{sinc}\left(\frac{\pi n}{M}\right) = 0, \Rightarrow \frac{\pi n}{M} = k\pi, k = 1, 2, \dots$$

Звідки $n = kM$. Тобто кожна гармоніка, номер якої є кратним

шпаруватості, має нульову амплітуду.

У нас $M = 4$, тобто нулю дорівнюють амплітуди гармонік з номерами 4, 8, 12, Вони знаходяться на частотах $4 \cdot F = 200$ кГц, $8 \cdot F = 400$ кГц, $12 \cdot F = 600$ кГц,

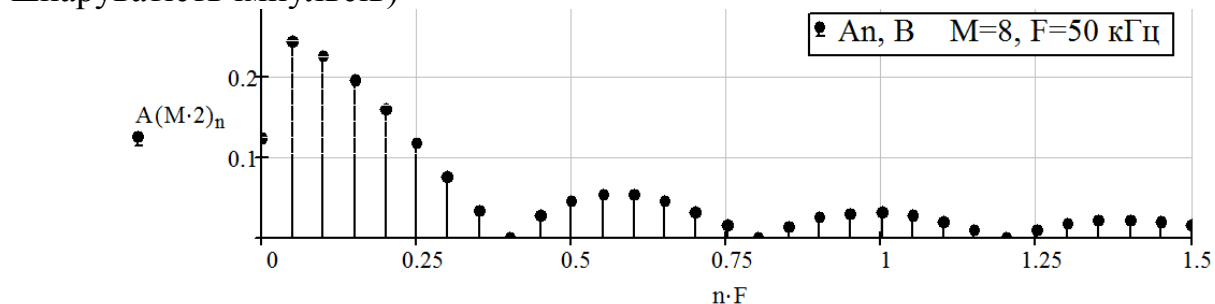
Програмування в Mathcad



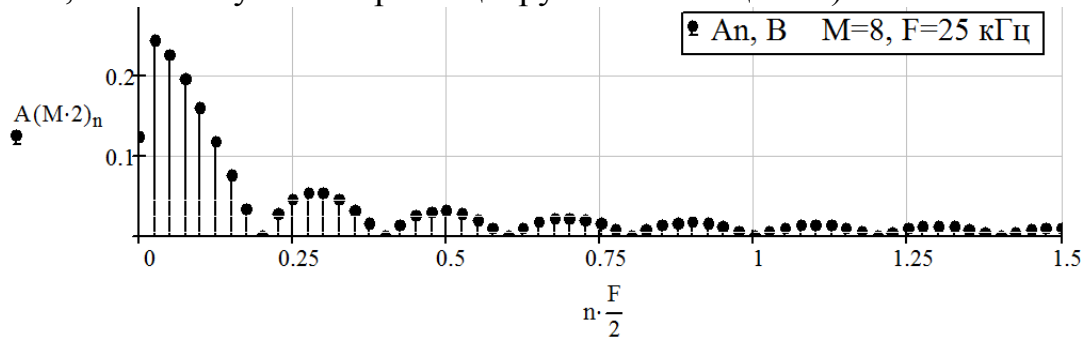
Тут сформовано дві функції-вектори $A(m)$ та $\varphi_a(m)$, що залежать від шпаруватості M . При побудові графіків по осі абсцис задається величина $n \cdot F$ (F – основна частота). Тоді для прямокутних імпульсів з іншими параметрами, отримаємо нові графіки АЧС та ФЧС, копіюючи ці графіки та змінюючи в них аргумент у $A(M)$ та $\varphi_a(M)$ при зміні M та/або множник у $n \cdot F$ при зміні F .

Програмування в Mathcad

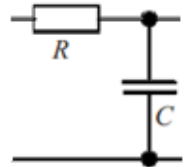
Зменшуємо в 2 рази тривалість імпульсів (тобто, збільшуємо в 2 рази шпаруватість імпульсів)



Збільшуємо в 2 рази період повторення (тобто, зменшуємо в 2 рази частоту повторення, та збільшуємо в 2 рази щпаруватість імпульсів)



Приклад 2. Розрахувати АЧС сигналу прикладу 1 на виході найпростішого фільтра нижніх частот (ФНЧ), в якому $R = 1$ кОм, $C = 0.2$ нФ; 2 нФ; 10 нФ. Визначити сигнал на виході ФНЧ.



Для початку треба визначити коефіцієнт передачі кола, його амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики (АЧХ та ФЧХ):

Коефіцієнт передачі напруги ФНЧ

$$K(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_K},$$

де $\tau_K = RC$ – постійна часу кола.

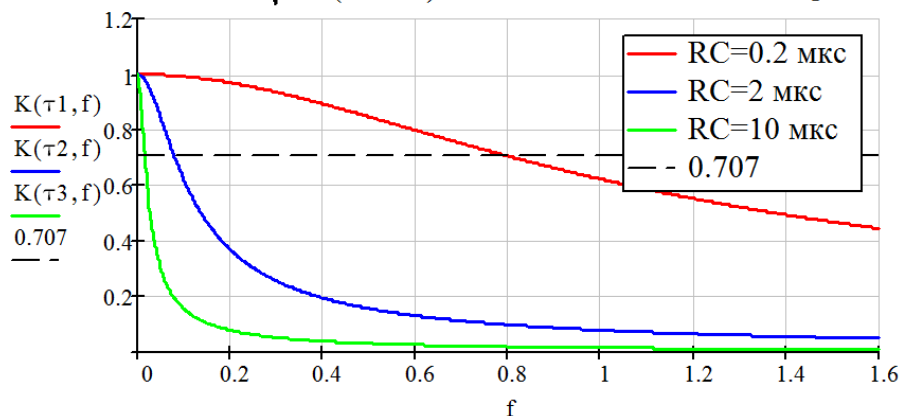
Тепер АЧХ ФНЧ $K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_K)^2}},$

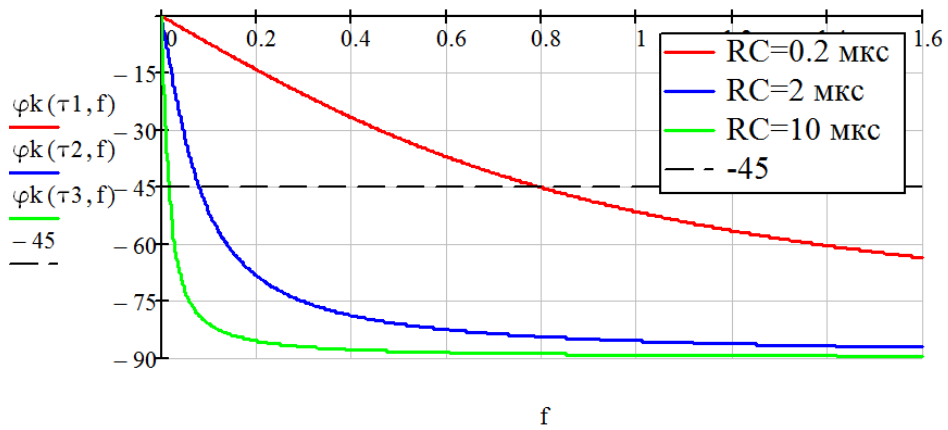
ФЧХ ФНЧ $\varphi_K(\omega) = -\arctg(\omega\tau_K).$

Програмування в Mathcad

$R := 1$ кОм $C1 := 0.2$ нФ $C2 := 2$ нФ $C3 := 10$ нФ +
 $\tau1 := R \cdot C1 = 0.2$ мкс $\tau2 := R \cdot C2 = 2$ мкс $\tau3 := R \cdot C3 = 10$ мкс

$Ki(\tau, f) := \frac{1}{1 + i \cdot \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$ $K(\tau, f) := \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2}}$ $\varphi_k(\tau, f) := \frac{-\text{atan}(\tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)}{\text{deg}}$





$$F_{gr1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_1} = 0.796 \text{ МГц}$$

$$F_{gr2} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_2} = 0.08 \text{ МГц}$$

$$F_{gr3} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_3} = 0.016 \text{ МГц}$$

Проміжний висновок. Із збільшенням постійної часу кола зменшується верхня гранична частота смуги пропускання, тобто звужується смуга пропускання ФНЧ. На нульовій частоті коефіцієнт передачі максимальний (дорівнює одиниці).

Оскільки реакцією кола на одиничну функцію є перехідна характеристика кола, тоді для визначення реакції ФНЧ на періодичну послідовність прямокутних імпульсів потрібно спочатку визначити його перехідну характеристику.

Скористайтесь операторним методом, отримаємо:

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{1/\tau_K}{p(p + 1/\tau_K)} \right] = (1 - e^{-t/\tau_K}) \cdot 1(t).$$

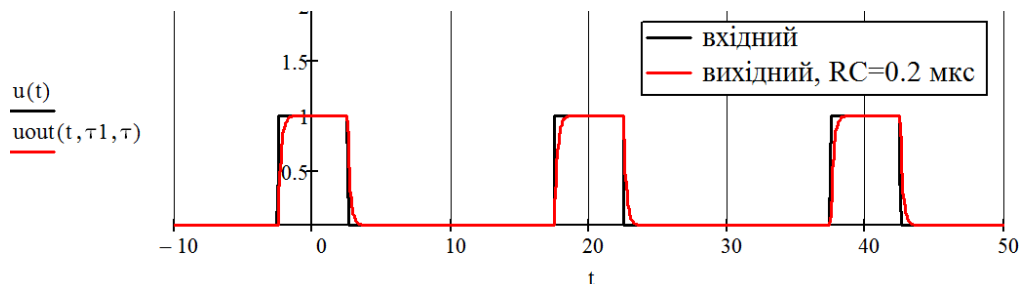
Тепер можна записати сигнал на виході ФНЧ

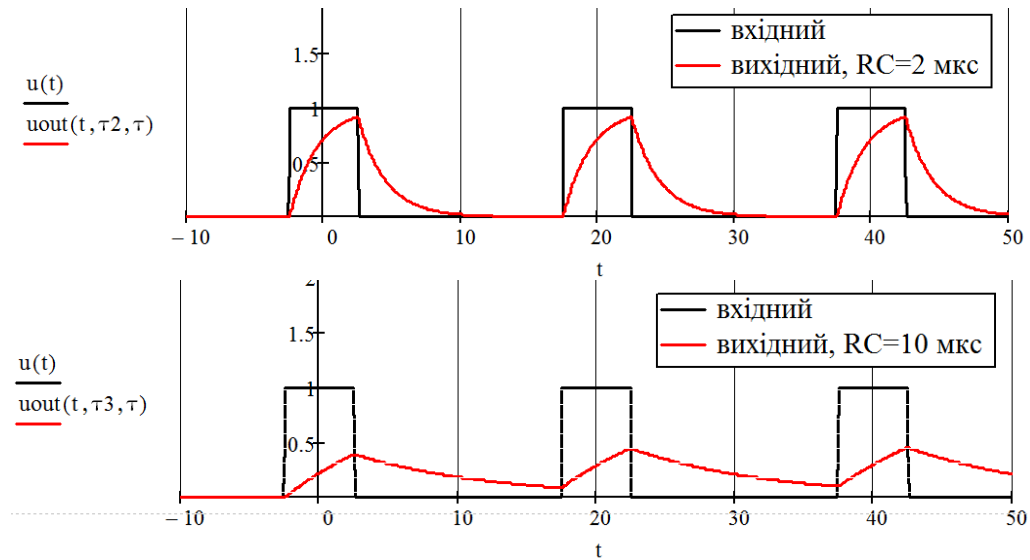
$$u(t) = U_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} [h(t - nT + \tau/2) - h(t - nT - \tau/2)].$$

Програмування в Mathcad

$$h(\tau_k, t) := \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \cdot \Phi(t)$$

$$u_{out}(t, \tau_k, \tau_s) := U_0 \cdot \sum_{n=0}^5 \left(h\left(\tau_k, t - n \cdot T + \frac{\tau_s}{2}\right) - h\left(\tau_k, t - n \cdot T - \frac{\tau_s}{2}\right) \right)$$





З останнього графіку стає зрозуміло, чому ФНЧ ще називають «інтегрувальним» колом.

Для визначення спектра вихідного сигналу скористаємося формулою

$$u_{\text{вих}}(t) = C_0 K(0) + \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \dot{C}_n \dot{K}(nF) \cdot e^{j2\pi nFt} \right].$$

Тоді амплітуди гармонік вихідного сигналу (АЧС) дорівнюють модулю добутку $\dot{C}_n \dot{K}(nF)$

$$A_{n \text{ вих}} = A_n K(nF);$$

початкові фази гармонік вихідного сигналу дорівнюють аргументу добутку $\dot{C}_n \dot{K}(nF)$

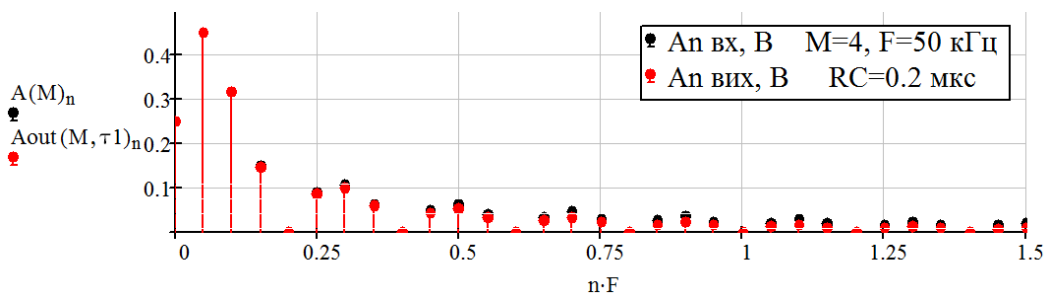
$$\varphi_{n \text{ вих}} = \varphi_n + \varphi_K(nF).$$

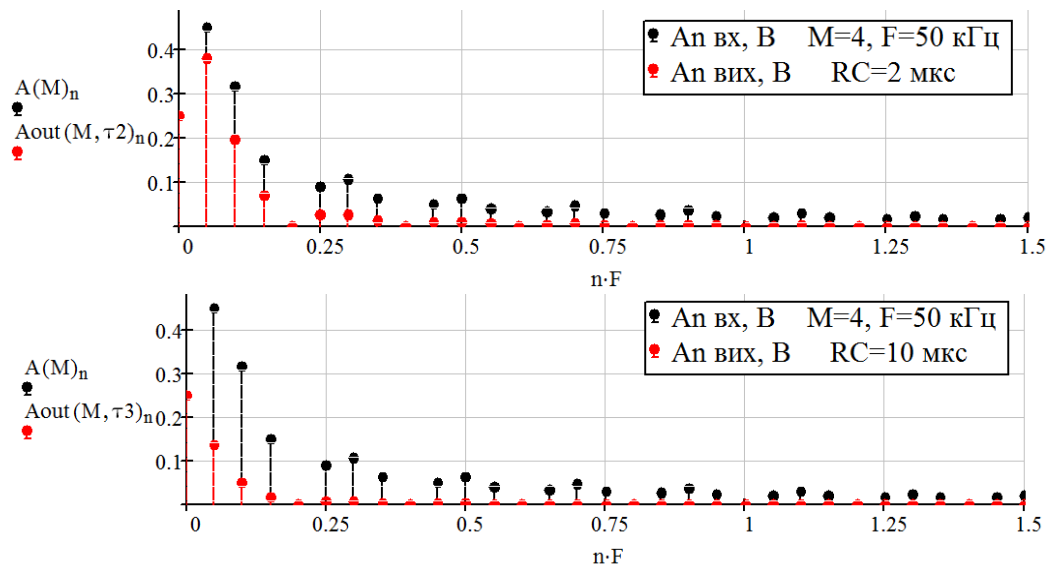
Програмування в Mathcad

```
Cout(m, τ) :=
  for n ∈ 0..NG
    Gn ← C(m)n · Ki(τ, n · F)
  return G
```

```
Aout(m, τ) :=
  for n ∈ 0..NG
    Gn ← |Cout(m, τ)n|
  return G
```

```
φout(m, τ) :=
  for n ∈ 0..NG
    Gn ← -arg(Cout(m, τ)n)
  return G
```



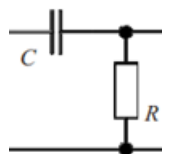


На цих графіках червоним кольором показано АЧС вихідного сигналу. Добре видно, як із звуженням смуги пропускання ФНЧ, зменшуються та зникають вищі гармоніки вихідного сигналу.

Висновок. Для передачі через ФНЧ періодичної послідовності прямокутних імпульсів з мінімальними спотвореннями потрібно мати достатньо малу постійну часу τ_k кола. Зазвичай, її визначають за потрібним (заданим) часом наростання переднього фронту вихідного сигналу. Тоді, відповідно до визначеної постійної часу ФНЧ τ_k , розраховується його верхня гранична частота смуги пропускання

$$f_{гр} = \frac{1}{2\pi\tau_k}.$$

Приклад 3. Розрахувати АЧС сигналу прикладу 1 на виході найпростішого фільтра верхніх частот (ФВЧ), в якому $R = 1$ кОм, $C = 0.2$ нФ; 2 нФ; 10 нФ. Визначити сигнал на виході ФВЧ.



Визначимо коефіцієнт передачі кола, його АЧХ та ФЧХ:

Коефіцієнт передачі напруги ФВЧ

$$K(j\omega) = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{j\omega\tau_k}{1 + j\omega\tau_k},$$

де $\tau_k = RC$ – постійна часу кола.

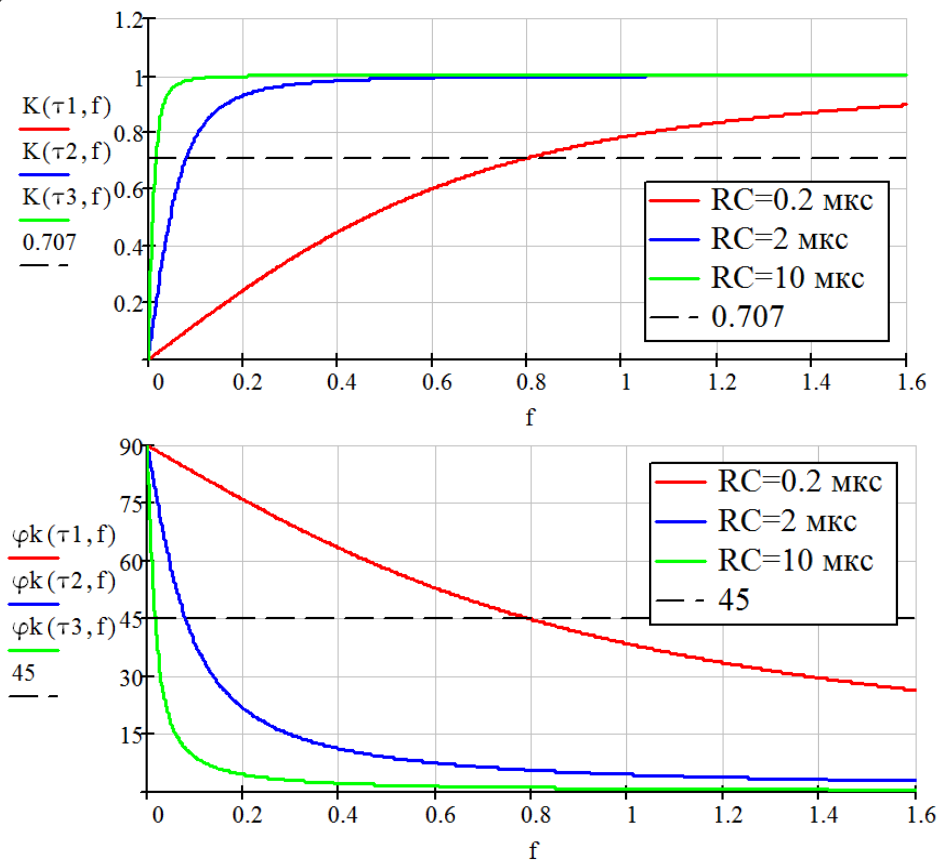
Тепер АЧХ ФВЧ $K(\omega) = \frac{\omega\tau_k}{\sqrt{1 + (\omega\tau_k)^2}},$

ФЧХ ФВЧ $\varphi_K(\omega) = \pi/2 - \text{arctg}(\omega\tau_k).$

Програмування в Mathcad

$$Ki(\tau, f) := \frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau}{1 + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau}$$

$$K(\tau, f) := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2}} \quad \varphi_k(\tau, f) := \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \text{atan}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)\right)}{\text{deg}}$$



Граничні частоти визначаються так само, як і для ФНЧ.

Проміжний висновок. Із збільшенням постійної часу кола зменшується нижня гранична частота смуги пропускання, тобто розширюється смуга пропускання ФВЧ. На нульовій частоті коефіцієнт передачі мінімальний (дорівнює нулю).

Для знаходження вихідного сигналу ФВЧ спочатку визначимо його перехідну характеристику.

Скористайтесь операторним методом, отримаємо:

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{1/\tau_K}{p + 1/\tau_K} \right] = e^{-t/\tau_K} \cdot 1(t).$$

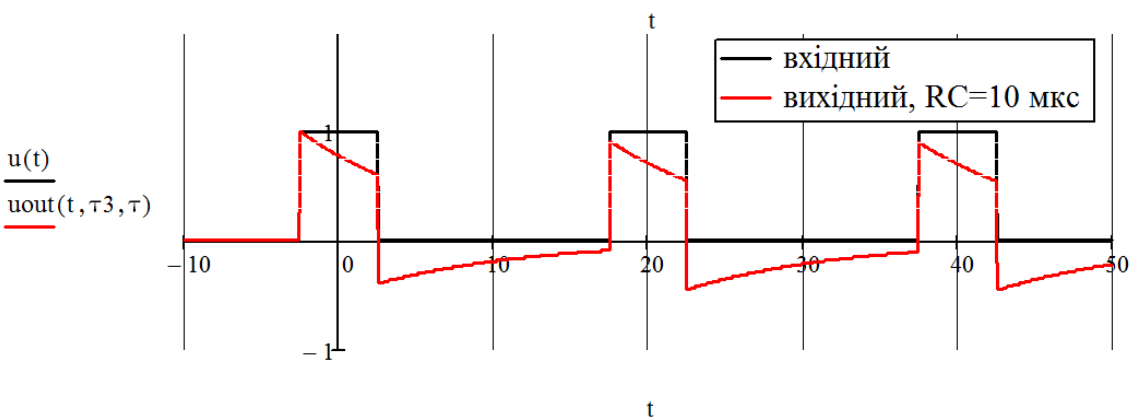
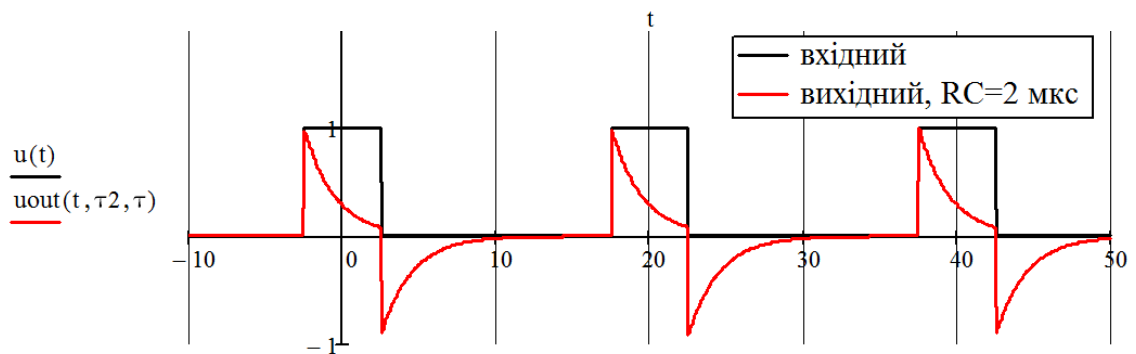
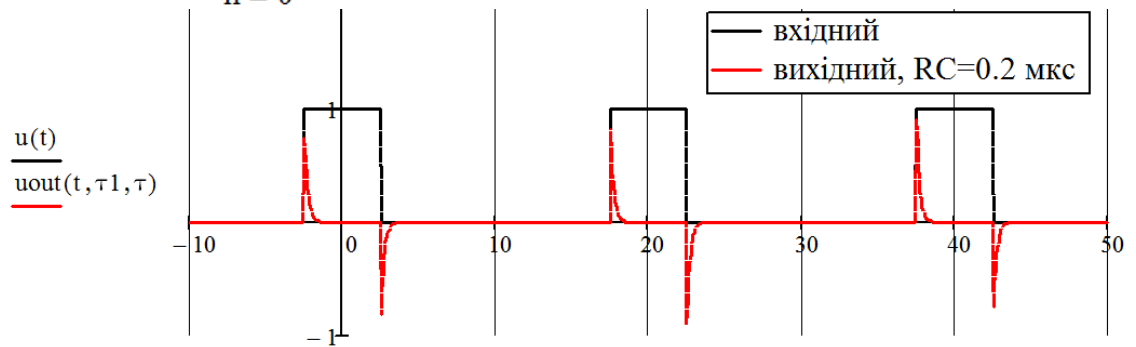
Сигнал на виході ФВЧ

$$u(t) = U_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} [h(t - nT + \tau/2) - h(t - nT - \tau/2)].$$

Програмування в Mathcad

$$h(\tau_k, t) := e^{-\frac{t}{\tau_k}} \cdot \Phi(t)$$

$$u_{out}(t, \tau k, \tau s) := U_0 \cdot \sum_{n=0}^5 \left(h\left(\tau k, t - n \cdot T + \frac{\tau s}{2}\right) - h\left(\tau k, t - n \cdot T - \frac{\tau s}{2}\right) \right)$$



З першого графіку зрозуміло, чому ФВЧ ще називають «диференціальним» колом.

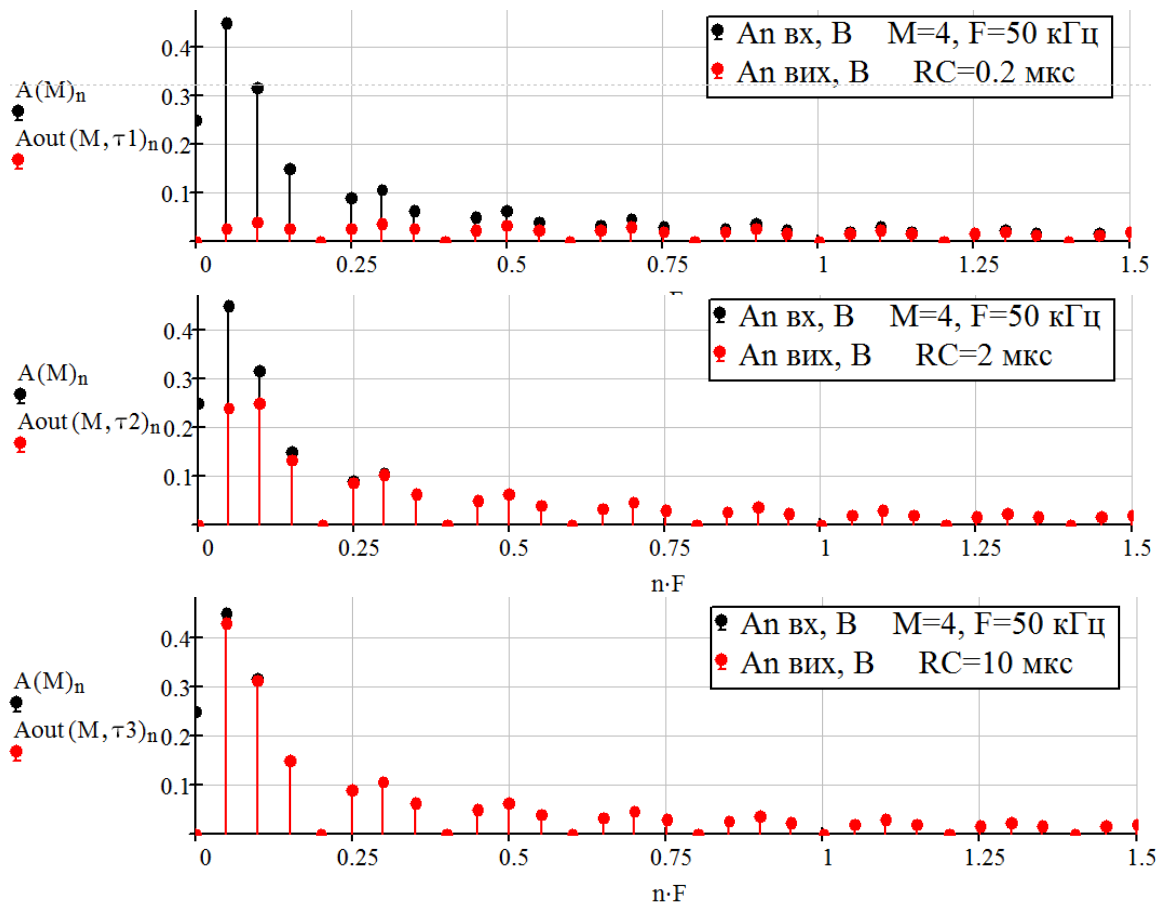
Визначимо спектр вихідного сигналу ФВЧ у такий же спосіб, як у прикладі 2.

Програмування в Mathcad

```
Cout(m, tau) :=
  for n ∈ 0..NG
    Gn ← C(m)n · Ki(tau, n · F)
  return G
```

```
Aout(m, tau) :=
  for n ∈ 0..NG
    Gn ← |Cout(m, tau)n|
  return G
```

```
phiout(m, tau) :=
  for n ∈ 0..NG
    Gn ← -arg(Cout(m, tau)n)
  return G
```



На цих графіках червоним кольором показано АЧС вихідного сигналу. Постійна складова зникла. Видно, як із розширенням смуги пропускання ФВЧ, зменшуються та зникають перші гармоніки вихідного сигналу.

Висновок. Для передачі через ФВЧ періодичної послідовності прямокутних імпульсів з мінімальними спотвореннями, потрібно мати достатньо велику постійну часу τ_k кола. Зазвичай, її визначають за потрібною (заданою) величиною «зколювання» (термін?) вершини імпульсів вихідного сигналу за час тривалості імпульсу. Тоді, відповідно до визначеної постійної часу ФВЧ τ_k , розраховується його нижня гранична частота смуги пропускання $f_{гр} = \frac{1}{2\pi\tau_k}$.

Приклад 4. Дослідити часові та частотні характеристики сигналу з тональною АМ, який має параметри: амплітуда носійного колювання $U_m = 1$ В, носійна частота $f_0 = 200$ кГц, частота керувального колювання $F = 10$ кГц. Дослідження виконати для трьох значень глибини модуляції $m = 0.5; 1; 2$.

Сигнал з тональною АМ для випадку $m \leq 1$ має вигляд

$$u_{AM}(t) = U_m \cdot (1 + m \cos \Omega t) \cdot \cos \omega_0 t, \quad (1.8)$$

де $\Omega = 2\pi F$, $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Вираз у круглих дужках називають обвідною АМ сигналу, який у

загальному випадку можна записати наступним чином:

$$f(t) = |1 + m \cos \Omega t|. \quad (1.9)$$

Коли $m \leq 1$, цей вираз (9) приймає звичний вигляд

$$f(t) = 1 + m \cos \Omega t$$

і є функцією з однією гармонічною складовою.

Для випадку $m > 1$ функція (1.9) має періодичний характер (Рис.1.1), але вже є полігармонічною. Її можна представити у вигляді розкладу в ряд Фур'є (тобто вона містить не одну гармонічну складову, а багато таких складових).

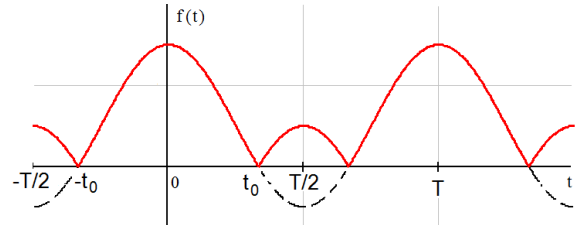


Рис.1.1. Огинаюча АМ сигналу з $m > 1$

Проміжний висновок. Сигнал з тональною АМ з $m > 1$ не є тональним у звичному розумінні, позаяк він містить багато гармонічних складових.

Розглянемо напочатку випадок $m \leq 1$.

Розкриваючи дужки в виразі (1.8), отримуємо

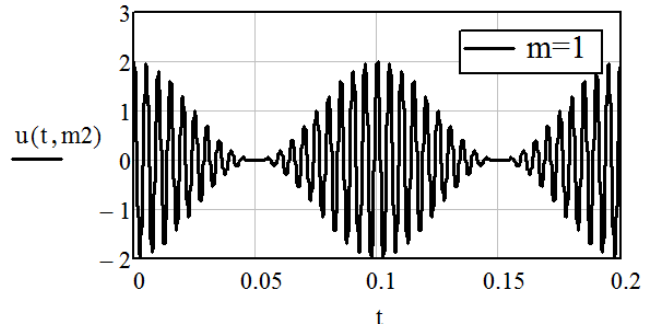
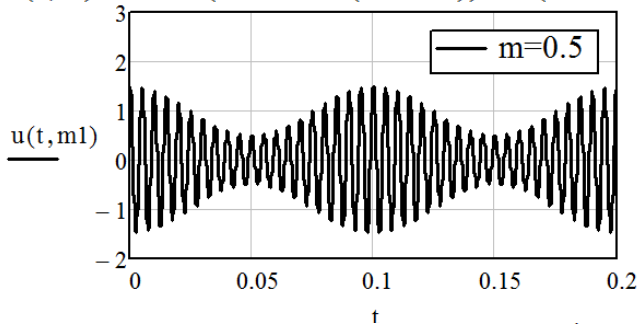
$$u_{AM}(t) = U_m \cdot \cos \omega_0 t + \frac{m \cdot U_m}{2} \cdot \cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{m \cdot U_m}{2} \cdot \cos(\omega_0 + \Omega)t. \quad (1.10)$$

Таким чином, сигнал з тональною АМ містить три частотних складових: на носійній частоті і на двох бічних частотах.

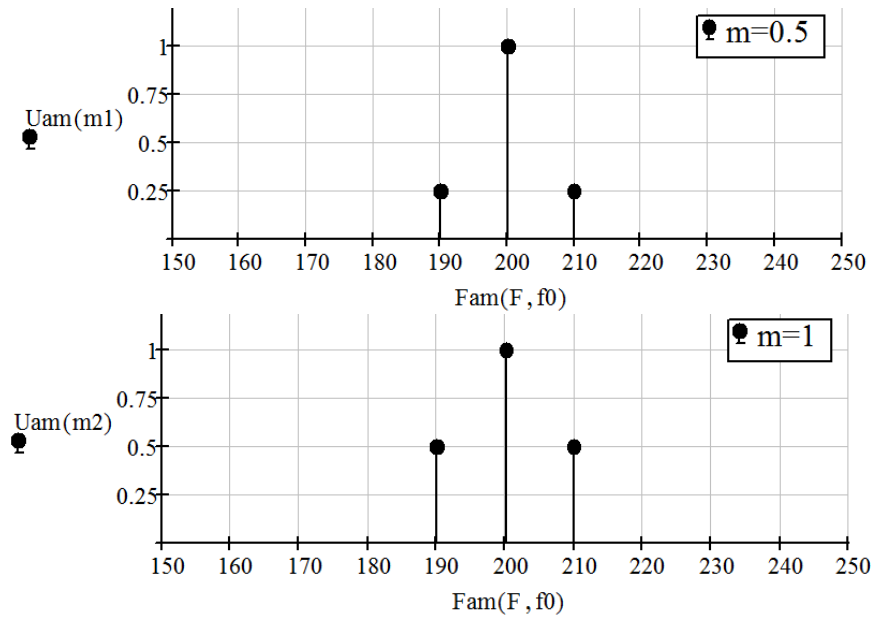
Програмування в Mathcad

$f_0 := 200$ кГц $U_m := 1$ В $F := 10$ кГц
 $m_1 := 0.5$ $m_2 := 1$ $m_3 := 2$ $T := \frac{1}{F} = 0.1$

$u(t, m) := U_m \cdot (1 + m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$



$$F_{am}(FF, ff_0) := \begin{pmatrix} ff_0 - FF \\ ff_0 \\ ff_0 + FF \end{pmatrix} \quad U_{am}(m) := \begin{pmatrix} U_m \cdot \frac{m}{2} \\ U_m \\ U_m \cdot \frac{m}{2} \end{pmatrix}$$



Розглянемо тепер випадок $m > 1$.

Для розкладу функції (1.9) в ряд Фур'є пропонується наступний алгоритм:

1) визначити координату точки t_0 (див. Рис.1.1) з рівняння

$$1 + m \cos \Omega t = 0;$$

2) розрахувати амплітуди складових ряду Фур'є функції (1.9)

$$f(t) = D_0 + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos(n\Omega t),$$

враховуючи, що функція (1.9) парна:

$$\begin{aligned} D_0 &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |1 + m \cos \Omega t| dt = \frac{2}{T} \int_0^{t_0} (1 + m \cos \Omega t) dt - \frac{2}{T} \int_{t_0}^{T/2} (1 + m \cos \Omega t) dt = \\ &= \frac{4t_0}{T} \cdot [1 + m \cdot \text{sinc}(\Omega t_0)] - 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} |1 + m \cos \Omega t| \cdot \cos n\Omega t \cdot dt = \\ &= \frac{4t_0}{T} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \text{sinc}(n\Omega t_0) + \\ + m \cdot \text{sinc}[(n-1)\Omega t_0] + \\ + m \cdot \text{sinc}[(n+1)\Omega t_0] \end{array} \right\} - m \cdot \text{sinc}[(n-1)\pi], \end{aligned}$$

Програмування в Mathcad

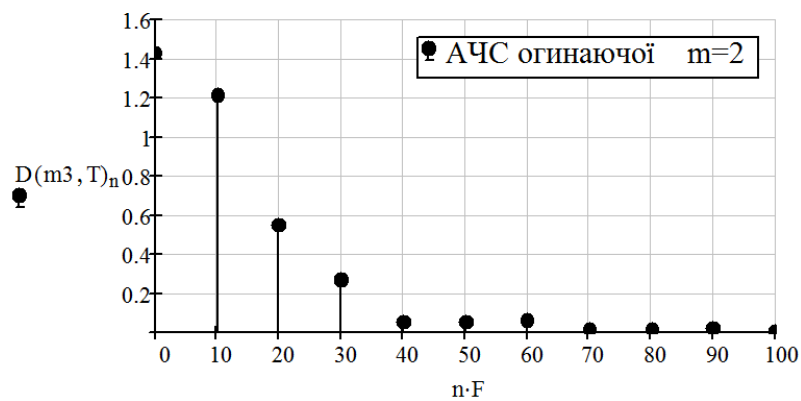
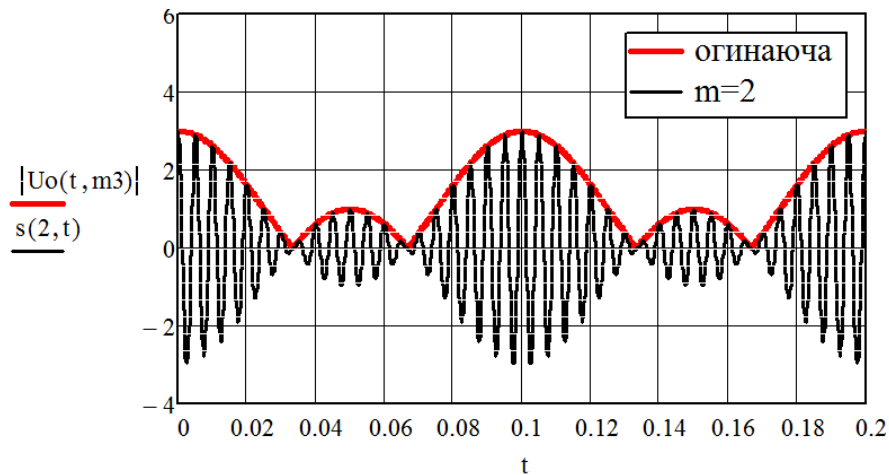
$$U_0(t, m) := 1 + m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)$$

$$c(m) := \begin{cases} 0.5 \cdot T & \text{if } m \leq 1 \\ \text{root}(U_0(x, m), x, 0, 0.5 \cdot T) & \text{otherwise} \end{cases}$$

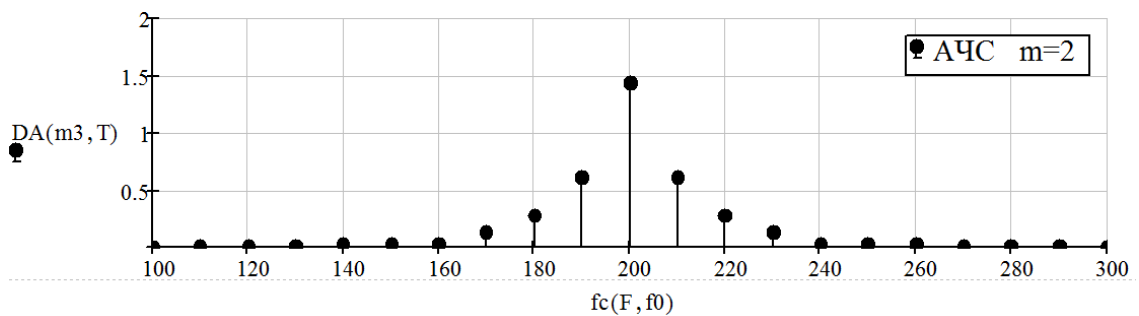
$$f(m, k) := \text{sinc}(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot c(m))$$

$$D(m, T) := \left\{ \begin{array}{l} G_0 \leftarrow \frac{4 \cdot c(m)}{T} + \frac{4 \cdot m \cdot c(m)}{T} \cdot f(m, 1) - 1 \\ \text{for } n \in 1..NG \\ \quad G_n \leftarrow \left\{ \frac{4 \cdot c(m)}{T} \cdot (2 \cdot f(m, n) + m \cdot f(m, n-1) + m \cdot f(m, n+1)) - m \cdot \text{sinc}[(n-1) \cdot \pi] \right\} \\ \text{return } G \end{array} \right.$$

$$s(m, t) := |U_0(t, m)| \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$



$$DA(m, T) := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } n \in 1..NG \\ \quad G_{NG-n} \leftarrow 0.5 \cdot D(m, T)_n \\ \quad G_{NG+n} \leftarrow 0.5 \cdot D(m, T)_n \\ G_{NG} \leftarrow D(m, T)_0 \\ \text{return } G \end{array} \right. \quad fc(FF, ff_0) := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } n \in 0..2 \cdot NG \\ \quad G_n \leftarrow ff_0 + (n - NG) \cdot FF \\ \text{return } G \end{array} \right.$$



Приклад 5. Дослідити АЧС радіосигналу

$$u(t) = s(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де $s(t)$ —періодична послідовність прямокутних додатних імпульсів з одиничною амплітудою, частотою повторення $F = 12.5$ кГц, шпаруватістю $M = 4$; носійна частота $f_0 = 400$ кГц.

Для отримання АЧС періодичної послідовності прямокутних імпульсів скористаємося формулами прикладу 1.

Програмування в Mathcad

```

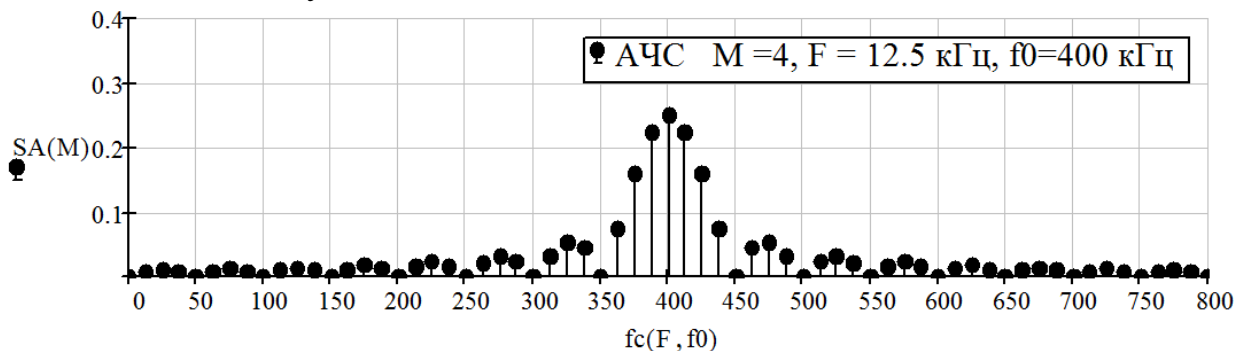
U0 := 1 В      NG := 50      F := 12.5 кГц      f0 := 400 кГц      M := 4
                T := 1/F = 0.08 мкс      τ := T/M = 0.02 мкс

A(m) := | G0 ← U0/m
        | for n ∈ 1..NG
        | Gn ← | 2·U0/m · sinc(π n / m) |
        | return G

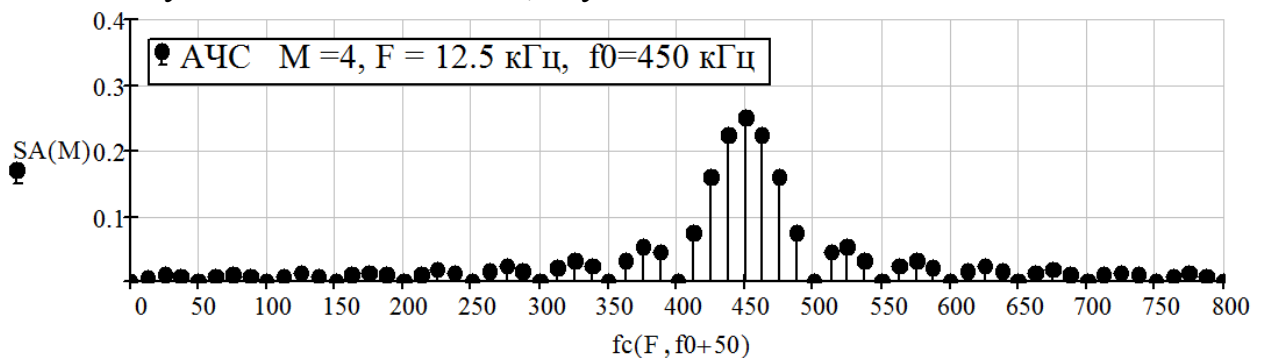
SA(m) := | for n ∈ 1..NG
        | GnG-n ← 0.5·A(m)n
        | GnG+n ← 0.5·A(m)n
        | GNG ← A(m)0
        | return G

fc(FF, ff0) := | for n ∈ 0..2·NG
        | Gn ← ff0 + (n - NG)·FF
        | return G
    
```

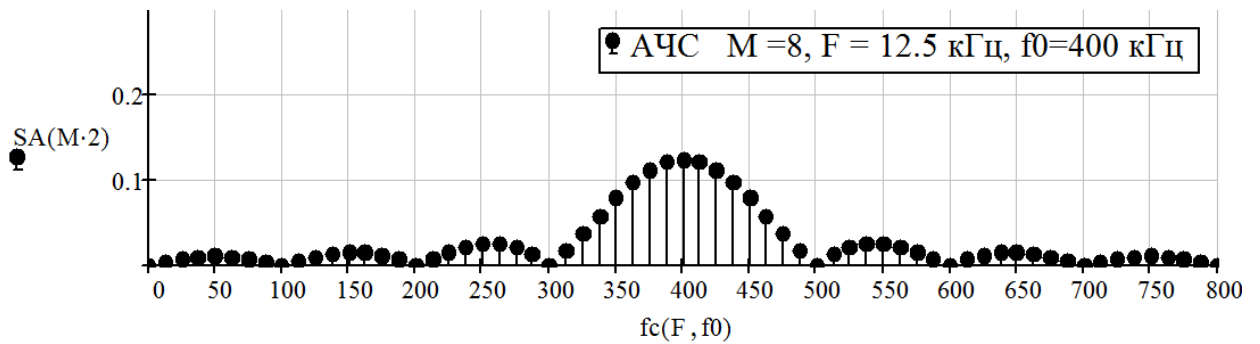
АЧС заданого сигналу



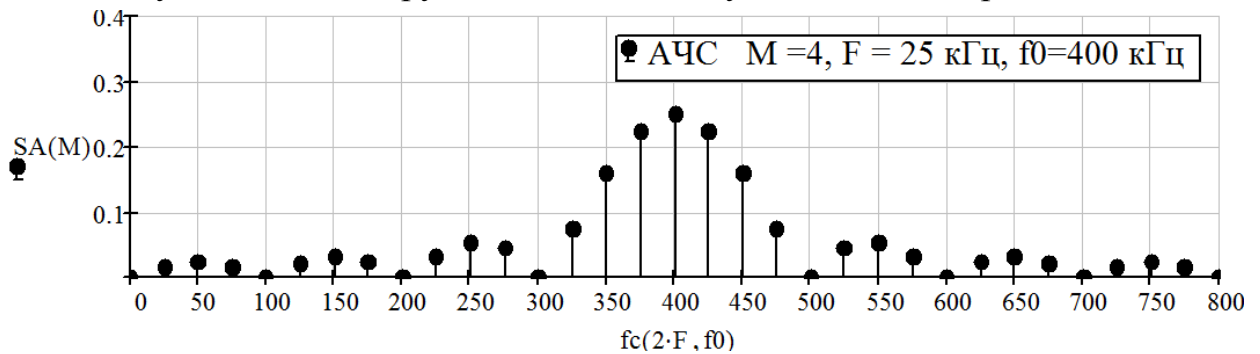
АЧС сигналу з носійною частотою, яку збільшено на 50 кГц



АЧС сигналу з керуючим сигналом, в якому тривалість імпульсів скорочено в 2 рази, тобто $M = 8$



АЧС сигналу з частотою керуючого сигналу, яку збільшено в 2 рази



1.3. Домашнє завдання

1. Записати загальний член тригонометричного ряду Фур'є для періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів (сигнал—парна функція часу) і за допомогою цього виразу розрахувати відношення амплітуди A_n/A_1 перших шістнадцяти гармонік спектра для $\tau = 10$ мкс, $F = 1/T = 20$ кГц ($T = 50$ мкс). Результати розрахунків звести у табл.1.1, передбачивши в ній графи для результатів експерименту і похибок вимірювань.

Таблиця 1.1. Результати розрахунку та експерименту

n	1	2	3	4	5	6	7	8
A_n/A_1 розрахунок								
A_n/A_1 Експеримент								
$\delta=(N/M-1), \%$								
n	9	10	11	12	13	14	15	16
A_n/A_1 розрахунок								
A_n/A_1 експеримент								
$\delta=(N/M-1), \%$								

2. Записати у аналітичному вигляді частотні характеристики найпростіших RC -фільтрів, які представлено на Рис. 1.2 (комплексний коефіцієнт передачі за напругою $\dot{K}(\omega)$, його АЧХ $K(\omega)$ і ФЧХ $\varphi_K(\omega)$), позначивши постійну часу кола як $\tau = RC$. Для $R = 1$ кОм, $C = 0.45; 2.7; 9$ нФ побудувати орієнтовні графіки цих характеристик для трьох значень τ ($\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$).

3. Використавши вираз АЧС вхідного сигналу (A_n з п.1) і АЧХ фільтрувальних кіл ($K(\omega)$ з п.2), записати АЧС ($A_{n\text{вих}}$) вихідних сигналів і побудувати їх орієнтовні графіки.

Згідно з принципом суперпозиції, який можна застосовувати до лінійних кіл, АЧС вихідного сигналу знаходиться з виразу $A_{n\text{вих}} = A_n \cdot K(n\Omega)$, $\Omega = 2\pi/T$.

Зробити висновки про вплив постійних часу фільтрувальних кіл на характер і ступінь спотворення вихідних спектрів у порівнянні з вхідними.

4. Записати радіосигнал $a(t)$ з тональною АМ у вигляді гармонічного колювання зі змінною амплітудою і у вигляді ряду Фур'є. Розрахувати АЧС цього сигналу для значень коефіцієнту модуляції $m = 0.5; 1; 2$, амплітуди носійного колювання $A_0 = 1$ В. Носійна частота $f_0 = 300$ кГц, модульовальна частота $F = 20$ кГц.

5. Записати у вигляді ряду Фур'є радіосигнал

$$a(t) = k \cdot s(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де $s(t)$ —періодична послідовність прямокутних додатних імпульсів з одиничною амплітудою; $F = 1/T$ — частота повторення імпульсів; τ —тривалість одного імпульсу.

Розрахувати АЧС цього сигналу для випадку: $f_0 = 300$ кГц, $k = 1$, $\varphi_0 = 0$, $F = 10$ кГц, $\tau = 10$ мкс. За результатами розрахунків побудувати АЧС для смуги частот $f = 0 \dots 600$ кГц. Продумати відповіді на питання, які зміни в АЧС (кількісні та якісні) з'являться при зміні основних параметрів сигналу (f_0 , F , τ).

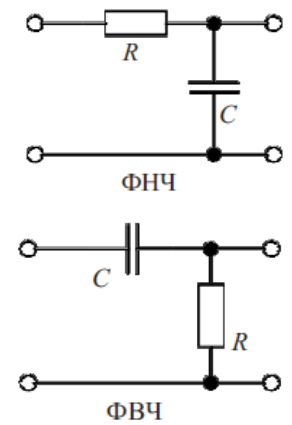


Рис. 1.2

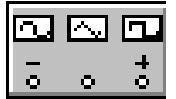
1.4. Завдання комп'ютерного практикуму

1.4.1. Використані пристрої, прилади та вбудовані функції EWB

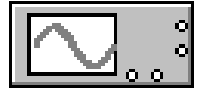
Тут наводиться короткий опис застосованих в дослідженнях пристроїв, більш докладний їх опис наведено у додатку Б.

В схемах використані три пристрої:

- функціональний генератор (Function generator) – ідеальне джерело напруги, яке виробляє сигнали синусоїдальної, трикутної або прямокутної форми (додаток Б.4.2). Середній вихід генератора при підключенні до схеми забезпечує загальну точку для відліку амплітуди змінної напруги. Для відліку напруги відносно нуля цей вихід заземлюють. Крайні лівий та правий виходи використовуються для підімкнення сигналу до схеми. Напруга на правому виході змінюється у додатному напрямку відносно загального виводу, на лівому виході – у від’ємному.



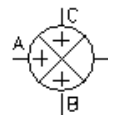
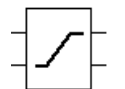
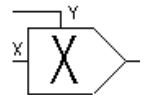
- осцилограф (Oscilloscope), що має чотири вхідних виводи: верхній правий вивід – спільний, нижній правий – вхід синхронізації, лівий та правий нижні виводи – входи каналу А (лівий) та каналу В (правий), відповідно (додаток Б.4.1).



Окрім того, застосовують ще п’ять приладів, що можуть потребувати попереднього налаштування:



- джерело змінної напруги синусоїдної форми (AC Voltage Source). В меню *Component Properties* джерела потрібно становити значення робочої частоти та **діючої** амплітуди коливань (додаток Б.4.5);
- джерело постійної напруги – батареї (Battery);
- аналоговий помножувач (Multiplier) для формування радіосигналу з тональною АМ..
- некерований обмежувач напруги (Voltage limited)
- тривхідний суматор напруги (Three-Way Voltage Summer).



Для дослідження АЧС сигналів використовується вбудована графічна функція *Fourier* з меню *Analysis* програми EWB (докладний опис наведено в додатку В.1).

1.4.2. Виконання досліджень

1. Метою першого пункту є дослідження змін АЧС періодичної послідовності прямокутних імпульсів при зміні параметрів імпульсів.

1,а) Запустити програмне середовище EWB. У бібліотеці, у папці *ОТТРТ_КР_ЛІВ*, знайти і відкрити **файл** *кр_11_1.ewb*. На робочому полі екрану з’явиться схема, яку наведено на Рис.1.3.

Схема містить дві пари перемикачів:

- перемикачі К1, які перемикаються натисканням на клавіатурі клавіши «1»,

дозволяють спостерігати або вхідний сигнал та його АЧС або вихідний сигнал та його АЧС.

- перемикачі К2, які перемикаються натисканням на клавіатурі клавіши «2», надають можливість використовувати або ФНЧ або ФВЧ.

Схеми обох фільтрів містять змінні ємності $C_{\text{нч}}$ та $C_{\text{вч}}$, значення яких зменшуються натисканням клавіши «С» для ФНЧ («D» для ФВЧ) – **латиниця**. Для збільшення значеннь ємностей потрібно натискати «Shift С» для ФНЧ («Shift D» для ФВЧ). Максимальне значення ємності $C_{\text{нч}}$ та $C_{\text{вч}}$ встановлено 9 нФ.

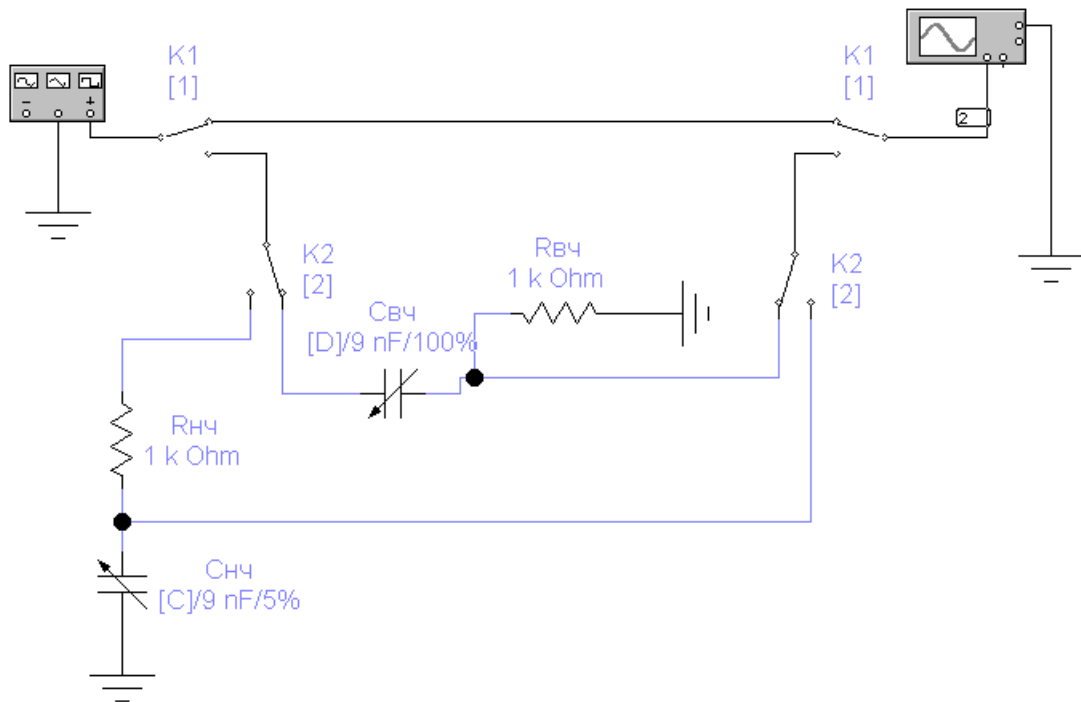


Рис.1.3. Схема для дослідження проходження АЧС періодичної послідовності прямокутних імпульсів

1,б) Отримати АЧС періодичної послідовності прямокутних імпульсів з $F = 20$ кГц, $\tau = 10$ мкс, $U = 1$ В.

Сформувані періодичну послідовність заданих прямокутних імпульсів. Для цього, підвівши курсор миші до зображення генератора, натиснути **праву** кнопку і відкрити його, обравши з меню *Open*. Натиснути зображення сигналу прямокутної форми. Встановити $Frequency = 20$ кГц, $Duty cycle = 20\%$, $Amplitude = 1$ В, $Offset = 1$ В.

Встановити перемикачі К1 у верхнє положення.

Підвівши курсор миші до зображення осцилографа, натиснути **праву** кнопку і відкрити осцилограф, обравши з меню *Open*. Натиснувши на зображенні осцилографа кнопку *Expand* (**лівою** кнопкою миші) одержуємо розширене зображення осцилографа. За допомогою **лівої** кнопки миши перетягти зображення осцилографа на вільне місце екрану.



Активувати схему, для цього підвести курсор миші до правого верхнього перемикача на екрані (над робочим полем) і натиснути **лівою** кнопкою миші «1» на ньому.

Отримати, відредагувати (за необхідністю) та скопіювати до протокола АЧС сформованого сигналу. Для цього вибрати в меню *Analysis* програми EWB графічну функцію *Fourier* (див. додаток В.1).

Відкриється вікно меню, в якому потрібно зі спадаючого переліку вибрати номер вузла (*Output node* – 2), в якому визначається АЧС, частоту F (*Fundamental frequency* – 20 кГц) та необхідну кількість досліджуваних гармонік (*Number of harmonics* – 30). Обрати лінійну шкалу. Натиснути кнопку *Simulate*.

Відкриється вбудований в EWB графічний редактор *Analysis Graphs*, який буде містити АЧС виду, що наведений на Рис. 1.4.

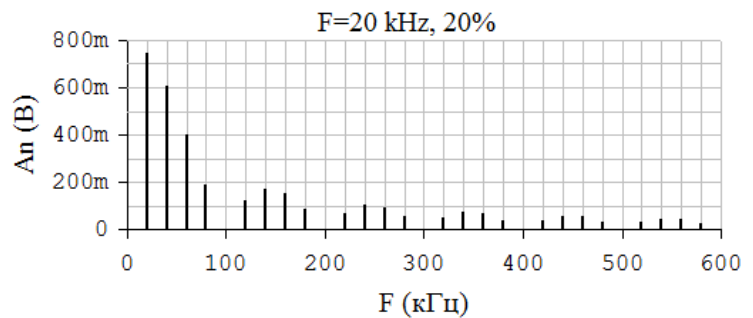


Рис. 1.4. АЧС сигналу

Зберегти отриманий АЧС у протоколі.

1,в) Визначити частоти перших трьох нулів обвідної. Це можна зробити за допомогою вертикальних курсорів графічного редактора (додаток В.6). Переконайтеся, що вони мають місце на частотах, які передбачено теорією. Записати ці частоти.

1,г) Визначити частотну відстань між сусідніми гармоніками спектра. Переконайтеся, що вона відповідає теоретично очікуваній. Записати цю величину.

1,д) Виміряти відносні амплітуди A_n/A_1 компонентів спектру за допомогою вертикальних курсорів графічного редактора. Вписати їх в табл. 1.1 і розрахувати відповідні відносні похибки вимірювань.

1,е) Зменшити в 2 рази частоту F повторення імпульсів і оцінити викликані цим зміни спостережуваного АЧС (абсолютні амплітуди гармонік, різниця частот між ними, положення нулів обвідної).

Для цього встановити параметри функціонального генератора $Frequency = 10$ кГц, $Duty\ cycle = 10\%$,

При дослідженні АЧС в вікні меню графічної функції *Fourier* встановити частоту F (*Fundamental frequency* – 10 кГц) та необхідну кількість досліджуваних гармонік (*Number of harmonics* – 60).

Записати результати вимірювань і порівняти їх з теоретично очікуваними. Зберегти в протоколі АЧС для цього випадку.

1,ж) Відновивши попередню частоту повторення $F = 20$ кГц, зменшити

у 2 рази (до $\tau = 5$ мкс) тривалість одного імпульсу.

Для цього встановити параметри функціонального генератора *Frequency* = 20 кГц, *Duty cycle* = 10%,

При дослідженні АЧС в вікні меню графічної функції *Fourier* встановити частоту F (*Fundamental frequency* – 20 кГц) та необхідну кількість досліджуваних гармонік (*Number of harmonics* – 30).

Провести і записати такі ж оцінки змін спектру (порівняно з п.1,б–д), що виконувалися у п.1,е. Порівняти отримані результати з теоретично очікуваними. Зберегти в протоколі АЧС для цього випадку.

2. Метою другого пункту є дослідження змін АЧС періодичної послідовності прямокутних імпульсів та пов'язаної зміни форми імпульсів під час проходження їх через простіші ФНЧ і ФВЧ.

Перевести перемикачі К1 в нижнє положення.

2,а) Дослідити зміну форми вихідних імпульсів та їх АЧС при проходженні послідовності прямокутних імпульсів через простіший ФНЧ (рис.1.2) з параметрами: $R_{\text{нч}} = 1$ кОм, $C_{\text{нч}} = 0.45; 2.7; 9$ нФ (5%. 30% та 100% від максимального значення 9 нФ).

Перемикачі К2 повинні знаходитися у зовнішньому положенні.

Сформувати періодичну послідовність прямокутних імпульсів з $F = 20$ кГц, $\tau = 10$ мкс, $U = 1$ В. Для цього, підвівши курсор миші до зображення генератора, натиснути **праву** кнопку і відкрити його, обравши з меню *Open*. Встановити *Frequency* = 20 кГц, *Duty cycle* = 10%, *Amplitude* = 1 В, *Offset* = 1 В.

Послідовно збільшуючи постійну часу фільтра (збільшуючи значення ємності $C_{\text{нч}}$ при натисканні на клавіатурі клавіши «С»), встановити по черзі значення $C_{\text{нч}}$ 5%, 30% та 100% від 9 нФ. Отримати за допомогою осцилографа вихідні імпульси, а за допомогою графічної функції *Fourier* – АЧС вихідного сигналу.

Зберегти в протоколі зміну форми вихідних імпульсів $U_{\text{вих}}(t)$ і відповідних їм АЧС. Зробити висновки про вплив відносного рівня верхніх частот спектра імпульсів на крутість і тривалість їх фронтів.

2,б) Дослідити зміну форми вихідних імпульсів та їх АЧС при проходженні послідовності прямокутних імпульсів через простіший ФВЧ (рис.1.2) з параметрами: $R_{\text{вч}} = 1$ кОм, $C_{\text{вч}} = 9; 2.7; 0.45$ нФ (100%. 30% та 5% від максимального значення 9 нФ).

Перемикачі К2 перевести у внутрішнє положення.

Послідовно зменшуючи постійну часу фільтра (зменшуючи значення

ємності $C_{вч}$ при натисканні на клавіатурі комбінації клавіш «Shift D»), встановити по черзі значення $C_{вч}$ 100%, 30% та 5% від 9 нФ. Отримати за допомогою осцилографа вихідні імпульси, а за допомогою графічної функції *Fourier* – АЧС вихідного сигналу.

Зберегти в протоколі еволюцію форми вихідних імпульсів $U_{вих}(t)$ і відповідних їм АЧС. Зробити висновки про вплив відносного рівня нижніх частот спектра імпульсів на ступінь «сколювання» їх вершин.

3. Метою третього пункту є дослідження спектрів радіосигналів з тональною АМ.

3,а) В бібліотеці, у папці *ОТТРТ_КР_LIB*, знайти і відкрити **файл** *кр_11_2.ewb*. На робочому полі екрану з'явиться схема, яку наведено на Рис.1.5.

В блоці формувача обвідної керувального сигналу містяться два набори однакових пристроїв: Г1, Г2 – джерела змінної напруги синусоїдної; Б1, Б2 – джерела постійної напруги; ОН1, ОН2 – некеровані обмежувачі напруги та Su – тривхідний суматор напруги. Другий набір потрібен для формування обвідної в режимі перемодуляції ($m > 1$).

Окрім того, в схемі застосовано аналоговий помножувач для формування радіосигналу з тональною АМ.

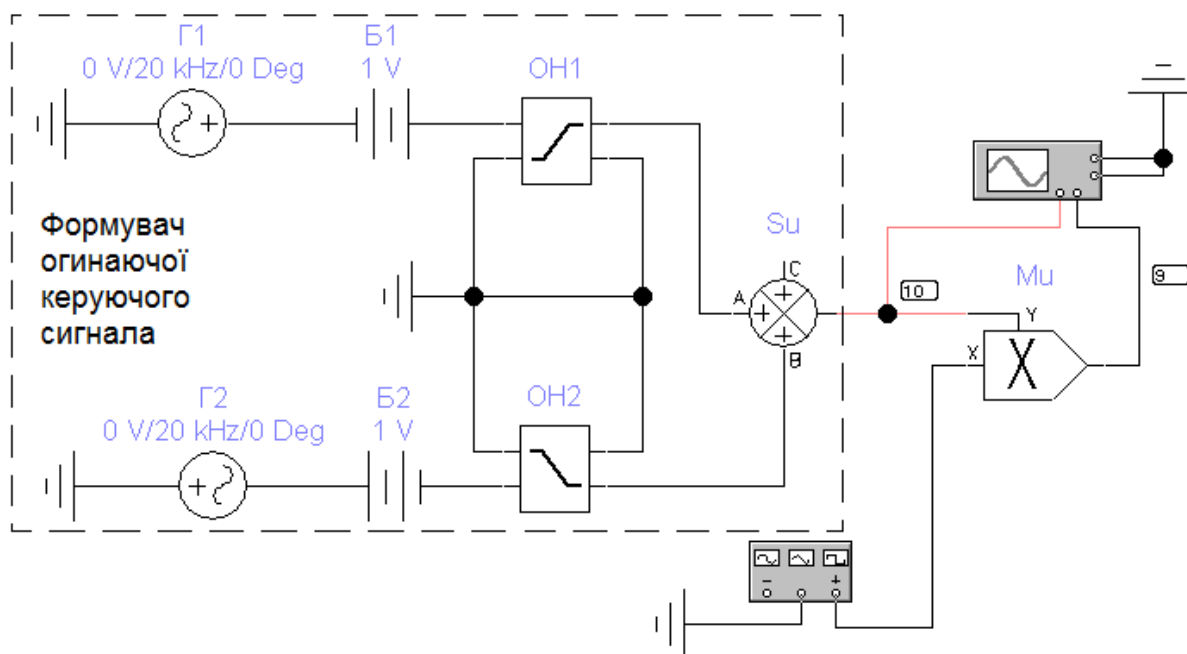


Рис. 1.5. Схема для дослідження проходження АЧС тональних АС сигналів

В схемі на Рис.1.5 носійна частота f_0 регулюється зміною частоти функціонального генератора, частота керувального сигналу F та глибина модуляції m — зміною частоти та рівня виходу джерел Г1 і Г2 (потрібно пам'ятати, що в них задається дієве значення напруги, яке в $\sqrt{2}$ разів менше за

амплітудне значення). Візуальний контроль радіосигналу та його обвідної виконуються за допомогою осцилографа, АЧС радіосигналу – за допомогою графічної функції – *Fourier*.

3,б) Провести вимірювання для значень глибини модуляції: $m = 0; 0.5; 1$.

Встановити носійну частоту $f_0 = 300$ кГц та амплітуду носійного коливання 1 В. Для цього, підвівши курсор миші до зображення функціонального генератора, натиснути **праву** кнопку і відкрити його, обравши з меню *Open*. Натиснути зображення сигналу синусоїдної форми. Встановити *Frequency = 300* кГц, *Amplitude = 1* В, *Offset = 0* В.

Встановити частоту $F = 20$ кГц та рівень напруги, що відповідає одному з значень m . Для цього в джерелах Г1 і Г2 зробити **однакові** зміни:

- підвівши курсор миші до джерела по черзі, натиснути **праву** кнопку миші і викликати меню параметрів джерела *Component Properties*.
- в ньому встановити частоту *Frequency = 20* кГц та рівень напруги згідно до табл.1.2.

Таблиця 1.2

M	0	0.5	1
рівень напруги <i>Voltage</i> (V)	0	0.3535	0.707

Спостерігати на осцилографі осцілограми отриманих радіосигналів, а графічному редакторі *Fourier* – його АЧС. Для цього в окні меню «Fourier analysis», вказати номер вузла (*Output node = 9*), в якому визначається АЧС, частоту F (*Fundamental frequency = 20* кГц) та необхідну кількість досліджуваних гармонік (*Number of harmonics = 20*). Обрати лінійну шкалу. Натиснути кнопку *Simulate*.

Зберегти в протоколі в одному масштабі осцилограми сигналів і їх АЧС для трьох значень глибини модуляції $m = 0; 0.5; 1$. Порівняти отримані результати з теоретично очікуваними.

3,в) Оцінити відстань на осі частот між боковими і носійною частотами спостережуваних спектрів, використовуючи вертикальні курсори. Порівняти отримані результати з теорією.

3,г) Змінюючи носійну частоту ($f_0 = 250$ кГц; 350 кГц) при $m = \text{const}$ і $F = \text{const}$, спостерігаючи за змінами АЧС. При цьому параметр *Frequency* функціонального генератора повинен дорівнювати 250 кГц або 350 кГц, відповідно.

Зробити висновок про вплив величини носійної частоти на спектр (на абсолютну і відносну ширину спектра). Порівняти отримані результати з теоретично очікуваним впливом.

3,д) Повернути значення носіної частоти $f_0 = 300$ кГц. Для двох значень частоту модуляції $F = 10$ кГц; 30 кГц при $m = 1$, спостерігати за змінами АЧС.

Встановлюючи нове значення частоти модуляції, зміни потрібно робити в обох джерелах Г1 і Г2

При цьому у вікні меню «*Fourier analysis*» потрібно вносити зміни: *Fundamental frequency* – 10 кГц або *Fundamental frequency* – 30 кГц.

Зробити висновок про вплив частоти модуляції на спектр сигналу. Порівняти отримані результати з теорією.

3,е) Встановити $m > 1$ (наприклад, $m = \sqrt{2}$) при $f_0 = 300$ кГц, $F = 20$ кГц і скопіювати в протокол отримані осцилограми сигналу і його АЧС.

Для $m = \sqrt{2}$ в джерелах Г1 і Г2 встановити рівень напруги 1 В.

Сформулювати і пояснити принципову різницю отриманого спектра і спектрів з п.3,б.

1.5. Використана література

[1] т.1, с.52–61, 102–138, 334–345;

[4] с.25–53;

[5] с.8–15, 57–62;

[6] с.41–67, 103–114;

[7] с.41–66, 85–94;

[9] с.17–25.

1.6. Контрольні питання

1. Що називають спектром сигналу? Як його записують аналітично і представляють графічно для випадків періодичних і неперіодичних сигналів?

2. В чому схожість і різниця спектрів одиночного імпульсу і періодичної послідовності таких імпульсів?

3. Як змінюються основні характеристики спектра періодичної послідовності прямокутних імпульсів при зміні їх параметрів (τ , T , F , U)?

4. Як впливає вибір початку відліку часу на амплітудно-частотний і фазо-частотний спектри сигналу?

5. Що розуміють під спектром потужностей і енергетичним спектром сигналу? Для яких різновидів сигналів (періодичних, неперіодичних) може бути застосовано кожне з цих понять?

6. Як, за відомим АЧС сигналу, визначити середню потужність (енергію), яка зосереджена в заданій смузі частот.

7. Як визначити технічну ширину спектра сигналу, тобто смугу частот, в межах якої зосереджена основна частина (наприклад 90%) його потужності або енергії?
8. До яких спотворень форми імпульсів призводить «завал» (відносне ослаблення) нижніх частот їх спектра?
9. До яких спотворень форми імпульсів призводить «завал» верхніх частот їх спектра?
10. Що називають радіосигналом? В чому полягають принципові відміни радіосигналів від відеосигналів (керувальних сигналів)?
11. Яким радіотехнічним процесом утворюються радіосигнали?
12. В чому полягає суть амплітудної модуляції, як записуються при цьому радіосигнали?
13. Які різновиди амплітудної модуляції Вам відомі? В чому між ними різниця в часовій і частотній областях?
14. Що називають коефіцієнтом (глибиною) амплітудної модуляції m ? Як його виміряти за осцилограмою сигналу? Які значення він може приймати? Чи може бути $m > 1$?
15. Як пов'язані між собою спектр АМ-радіосигналу і спектр керувального сигналу? Які відмінності між ними? В чому схожість?
16. Як пов'язані між собою спектри одиночного радіоімпульсу і періодичної послідовності таких радіоімпульсів?
17. Як змінюється спектр сигналу з тональною АМ при зміні носійної частоти f_0 , модулюючої частоти F , коефіцієнту модуляції m ?
18. До чого призводить перемодуляція і як це відображається на спектрі АМ сигналу?

Завдання 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-МОДУЛЬОВАНИХ КОЛИВАНЬ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВІ КОЛА

Мета — дослідження спотворень прямокутних радіоімпульсів та зміни параметрів тонально-модульованих за амплітудою коливань при проходженні через резонансний і смуговий підсилювачі високої частоти.

2.1. Основні теоретичні відомості

2.1.1. Розглянемо застосування методу комплексної обвідної до аналізу проходження прямокутного радіоімпульсу (рис. 2.1) через резонансний підсилювач високої частоти (ПВЧ).

Миттєве значення фізичного вхідного сигналу ПВЧ (Рис.2.1) має вигляд

$$U_{\text{вх}}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (2.1)$$

Зауважимо, що послідовність таких радіоімпульсів відносять до амплітудно-модульованих (АМ) коливань, якщо імпульси «нарізані» з одного й того ж гармонічного коливання.

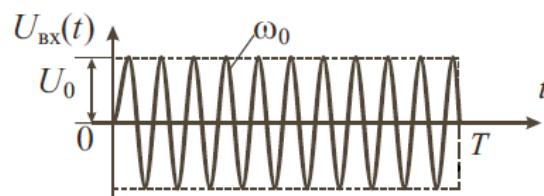


Рис.2.1. Прямокутний радіоімпульс

Для застосування спектрального методу аналізу проходження сигналів через лінійні кола потрібно зробити перехід від фізичного сигналу до аналітичного. Відомо, що між фізичним $U_{\text{вх}}(t)$ та аналітичним $\dot{Z}_{\text{вх}}(t)$ вхідними сигналами існує наступний зв'язок:

$$U_{\text{вх}}(t) = \text{Re}[U_{\text{вх}}(t) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}] = \text{Re}[U_{\text{вх}}(t) \cdot e^{j\varphi_0} \cdot e^{j\omega_0 t}] = \text{Re}[\dot{Z}_{\text{вх}}(t) \cdot e^{j\omega_0 t}],$$

У загальному випадку аналітичний вхідний сигнал можна визначити так:

$$\dot{Z}_{\text{вх}}(t) = \dot{A}_{\text{вх}}(t) \cdot e^{j\omega_0 t}, \quad (2.2)$$

де $\dot{A}_{\text{вх}}(t)$ — комплексна амплітуда вхідного радіоімпульсу, яка для фізичного сигналу (2.1) дорівнює $\dot{A}_{\text{вх}}(t) = \dot{U}_0 = U_0 e^{j\varphi_0}$

Використовуючи спектральний метод аналізу, отримуємо наступний вираз для аналітичного відгуку лінійного кола:

$$\dot{Z}_{\text{вих}}(t) = \dot{A}_{\text{вих}}(t) \cdot e^{j\omega_0 t} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \dot{Z}_a(\omega) \cdot \dot{K}(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.3)$$

де $\dot{Z}_a(\omega) = \int_0^T \dot{Z}_{\text{вх}}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$ — спектральна густина вхідного аналітичного сигналу,

який існує, як відомо, тільки на частотах $\omega > 0$, $\dot{K}(\omega)$ — коефіцієнт передачі кола.

Якщо лінійне коло вузькосмугове, тоді є можливість спростити застосування спектрального методу аналізу. Це відбувається за рахунок спрощення 1) виразу коефіцієнта передачі кола, який записують як функцію розстроювання відносно його середньої частоти ω_p ; 2) виразу спектральної густини радіосигналу, яку записують через спектральну густина обвідної цього сигналу.

Спрощення виразу коефіцієнту передачі. Введемо змінну величину — розстроювання носійної частоти:

$$\Omega = \omega - \omega_0. \quad \text{Звідки } \omega = \Omega + \omega_0. \quad (2.4)$$

Тоді коефіцієнт передачі кола:

$$\dot{K}(\omega) = \dot{K}(\Omega + \omega_0).$$

У загальному випадку коливальна система ПВЧ не налаштована в резонанс з носійною частотою радіосигналу, тобто $\omega_0 \neq \omega_p$.

Введемо величину розстроювання (відхилення) резонансної частоти:

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_p. \quad \text{Звідки } \omega_0 = \Delta\omega + \omega_p. \quad (2.5)$$

Підставляючи (2.5) в (2.4), отримаємо

$$\omega = \omega_p + \Delta\omega + \Omega. \quad (2.6)$$

Значення поточної частоти ω в (2.6) визначається трьома параметрами:

- значенням резонансної частоти коливальної системи ПВЧ, яке вважається постійним, $\omega_p = \text{const}$;
- відхиленням носійної частоти ω_0 від резонансної ω_p , значення якого теж можна вважати постійним параметром (задавати його значення для конкретних випадків аналізу);
- змінним розстроюванням $\Omega = \omega - \omega_0$, модуль значення якого змінюється у межах від нуля до ширини смуги пропускання коливальної системи ПВЧ.

Тепер коефіцієнт передачі кола можна записати так:

$$\dot{K}(\omega) = \dot{K}(\omega_p + \Delta\omega + \Omega).$$

У конкретному випадку коефіцієнт передачі інвертувального резонансного ПВЧ визначається за виразом:

$$\dot{K}(\omega) = -\frac{K_p}{1 + j\xi_e(\omega)} = -\frac{K_p}{\sqrt{1 + \xi_e^2(\omega)}} \cdot e^{-j\varphi(\omega)} = -K(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)}, \quad (2.7)$$

де K_p — коефіцієнт передачі ПВЧ на резонансній частоті його контуру, $K(\omega)$ —

АЧХ, $\varphi(\omega) = \arctg(\xi_e) = \arctg\left(2Q_e \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p}\right)$ — ФЧХ коефіцієнту передачі,

$\xi_e(\omega) = 2Q_e \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p}$ — абсолютне розстроювання коливальної системи ПВЧ.

Роблячи заміну (2.6), отримаємо:

$$\xi_e(\omega) = 2Q_e \frac{\omega_0 + \Omega - \omega_p}{\omega_p} = \frac{2Q_e}{\omega_p} (\Delta\omega + \Omega) = \tau(\Delta\omega + \Omega) = \xi_e(\Delta\omega + \Omega),$$

де $\tau = \frac{2Q_e}{\omega_p} = \frac{2L}{r_c} = \frac{1}{\alpha_c}$ — постійна часу коливальної системи.

Тепер коефіцієнт передачі (2.7), що є функцією ω , можна замінити на інший (спрощений) вираз для коефіцієнту передачі кола, який є функцією розстроювання частоти $\Delta\omega + \Omega$

$$\dot{K}_1(\Delta\omega + \Omega) = -\frac{K_p}{1 + j\tau(\Delta\omega + \Omega)}. \quad (2.8)$$

Спрощення виразу спектральної густини радіосигналу. Комплексна обвідна вхідного радіоімпульсу (рис. 2.1) змінюється за законом

$$\dot{A}_{\text{вх}}(t) = \dot{U}_0 \cdot [1(t) - 1(t - T)] = U_0 e^{j\varphi_0} \cdot [1(t) - 1(t - T)].$$

Тоді аналітичний вхідний сигнал можна визначити так:

$$\dot{Z}_{\text{вх}}(t) = \dot{A}_{\text{вх}}(t) \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot 1(t) - \dot{A}_{\text{вх}}(t - T) \cdot e^{j\omega_0(t - T)} \cdot 1(t - T) = \dot{Z}_{\text{вх}0}(t) - \dot{Z}_{\text{вх}0}(t - T).$$

Розглянемо реакцію інвертувального резонансного ПВЧ на аналітичний вхідний сигнал

$$\dot{Z}_{\text{вх}0}(t) = \dot{A}_{\text{вх}}(t) \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot 1(t) = U_0 e^{j\varphi_0} \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot 1(t).$$

Спектральна густина вхідного сигналу $\dot{Z}_{\text{вх}0}(t)$ за Фур'є та його зображення за Лапласом мають вигляд

$$Z_{\text{вх}0}(j\omega) = \frac{U_0 e^{j\varphi_0}}{j\omega - j\omega_0}, \quad Z_{\text{вх}0}(p) = \frac{U_0 e^{j\varphi_0}}{p - j\omega_0}.$$

Пригадаємо, що наш вхідний сигнал — вузькосмуговий. Використовуючи заміну (2.4), замість зображення вхідного сигналу $\dot{Z}_{\text{вх}0}(t)$ можемо перейти до зображення його комплексної амплітуди $\dot{A}_{\text{вх}}(t)$ у низькочастотній області спектра

$$\dot{A}_{\text{вх}}(p) = \frac{U_0 e^{j\varphi_0}}{p}, \quad p = j\Omega = j(\omega - \omega_0).$$

Коефіцієнт передачі інвертувального резонансного ПВЧ (2.8) в операторній формі

$$K_1(p) = -\frac{K_p}{\tau} \frac{1}{p + 1/\tau + j\Delta\omega}.$$

Знайдемо зображення комплексної амплітуди вихідного сигналу

$$A_{\text{вих}}(p) = \dot{A}_{\text{вх}} \cdot K_1(p) = \frac{U_0 e^{j\varphi_0}}{p} \cdot K_1(p) = -\frac{K_p \cdot U_0}{\tau} \cdot e^{j\varphi_0} \frac{1}{p \cdot (p + 1/\tau + j\Delta\omega)}.$$

Розкладаючи отриманий вираз на прості дроби та використовуючи таблиці зображень за Лапласом, запишемо вираз комплексної амплітуди вихідного сигналу

$$\begin{aligned} \dot{A}_{\text{вих}}(t) &= -\frac{K_p \cdot U_0}{1 + j\tau\Delta\omega} \cdot e^{j\varphi_0} (1 - e^{-t/\tau - \Delta\omega t}) \\ &= -K_p \cdot U_0 \cdot \frac{\sqrt{1 + e^{-2t/\tau} - 2e^{-t/\tau} \cos \Delta\omega t}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}} \cdot e^{j[\varphi_0 + \theta(t) - \varphi]}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $\varphi = \arctg(\tau\Delta\omega)$ — фазовий зсув, який вноситься ПВЧ у стаціонарному режимі, $\theta(t) = \arctg\left(\frac{e^{-t/\tau} \sin \Delta\omega t}{1 - e^{-t/\tau} \cos \Delta\omega t}\right)$ — фазовий зсув, який обумовлений паразитною кутовою модуляцією, що виникає при $\Delta\omega \neq 0$.

Аналітичний вихідний сигнал

$$\dot{Z}_{\text{вх}}(t) = [\dot{A}_{\text{вих}}(t) \cdot 1(t) - \dot{A}_{\text{вих}}(t-T) \cdot 1(t-T)] \cdot e^{j\omega_0 t}.$$

Відгук резонансного ПВЧ. Миттєве значення відгуку резонансного ПВЧ знайдеться як дійсна частина аналітичного вихідного сигналу:

$$U_{\text{вих0}}(t) = -K_p \cdot U_0 \cdot \frac{\sqrt{1 + e^{-2t/\tau} - 2e^{-t/\tau} \cos \Delta\omega t}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}} \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi_0 + \theta(t) - \varphi] \cdot 1(t). \quad (2.10)$$

У випадку точного налаштування контуру ПВЧ на частоту радіосигналу маємо $\Delta\omega = 0$. При цьому $\theta(t)$ і φ обертаються в нуль, а відгук ПВЧ визначається співвідношенням:

$$\begin{aligned} U_{\text{вих0}}(t) &= -K_p \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cdot 1(t) = \\ &= -K_p \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-\alpha_c t}) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cdot 1(t). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Як видно, амплітуда відгуку зростає за законом $1 - e^{-t/\tau}$ і не залежить від початкової фази φ_0 вхідного сигналу (рис. 2.2,а). Це пояснюється

підсумовуванням двох одночасно існуючих в контурі при $0 < t < T$ коливань частоти $\omega_0 = \omega_p$:

- вимушеного коливання з постійною амплітудою

$$U_0 \cdot K_p \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- вільного коливання з загасаючою амплітудою

$$U_0 \cdot K_p \cdot e^{-\alpha_c t} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

яке є протифазним до вимушеного.

Стационарне значення амплітуди відгуку дорівнює $U_{\text{стац}} = U_0 K_p$.

При існуванні розстроювання контуру $\Delta\omega \neq 0$, як видно із (2.10), наростання амплітуди має загасаючий коливальний характер з частотою $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_p$ (Рис. 2.2,б).

Останнє пояснюється биттям двох коливань різних частот: вимушеного з постійною амплітудою і частотою ω_0 і вільного із загасаючою амплітудою і частотою $\omega_v \approx \omega_p$. Значення стаціонарної амплітуди відгуку дорівнює $U_{\text{стац}} = U_0 \cdot K_p / \sqrt{1 + (\Delta\omega\tau)^2}$, тобто є меншим, ніж при точному налаштуванні контура. Із збільшенням віддаленості носійної частоти від резонансної (збільшенням $\Delta\omega$) прискорюється зменшення стаціонарної амплітуди. Окрім цього має місце паразитна кутова модуляція відгуку за законом $\theta(t)$ під час встановлення коливань у контурі. При $t \rightarrow \infty$ маємо $\theta(t) \rightarrow 0$.

Кінцем перехідних явищ домовилися вважати час досягнення амплітудою відгуку рівня $0.95 U_{\text{стац}}$. Після закінчення перехідного процесу, який триває протягом часу наростання амплітуди відгуку від 0 до $0.95 U_{\text{стац}}$ ($t_{\text{нар}} = 3\tau$), амплітуда коливань залишається практично постійною до моменту закінчення дії імпульсу ($t = T$). Зрозуміло, що при $t_{\text{нар}} > T$ стаціонарного значення амплітуди не буде досягнуто.

Починаючи з моменту $t = T$, в контурі ПВЧ існують тільки загасаючі вільні коливання, які змінюються за законом:

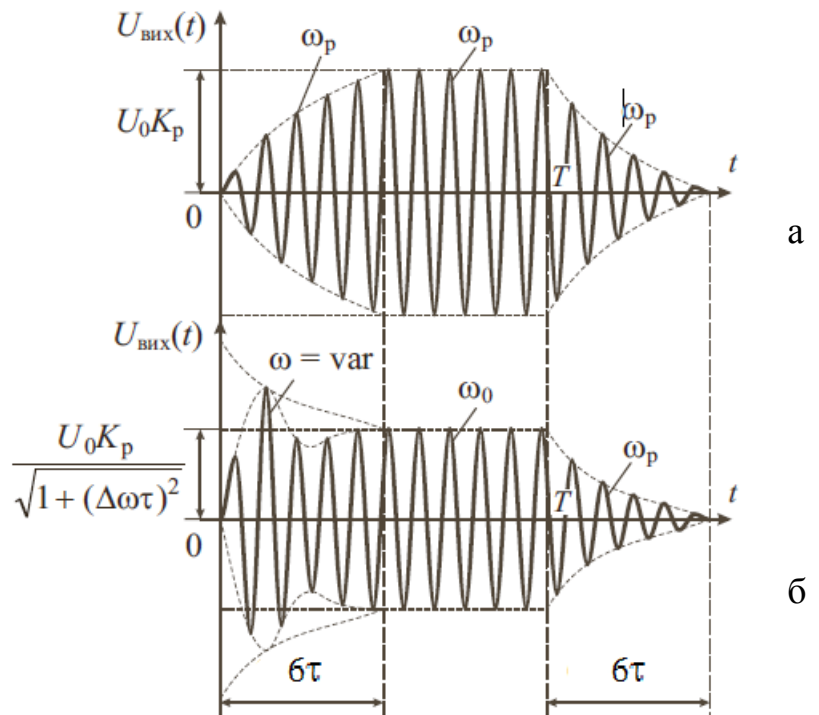


Рис.2.2. Вихідний сигнал резонансного ПВЧ для $\Delta\omega = 0$ (а) і $\Delta\omega \neq 0$ (б)

$$\begin{cases} U_0 \cdot K_p \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), & \omega_0 = \omega_p, \\ \frac{U_0 \cdot K_p}{\sqrt{1 + (\Delta\omega\tau)^2}} \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), & \omega_0 \neq \omega_p. \end{cases} \quad (2.12)$$

Час загасання коливань від $U_{\text{стац}}$ до $0.05U_{\text{стац}}$ дорівнює $t_{\text{загас}} = t_{\text{нар}}$. При зростанні добротності контуру тривалість процесів встановлення відгуку зростає, що призводить до зростання його спотворень.

Відгук смугового ПВЧ. При проходженні прямокутних радіоімпульсів через смуговий ПВЧ характер спотворень відгуку виявляється аналогічним до характеру спотворень, що розглянуті вище для резонансного ПВЧ, якщо величина зв'язку між контурами менша або дорівнює критичному. Коли зв'язок перевищує критичний, тоді процес зростання коливань ускладнюється через биття коливань, які мають частоти, що дорівнюють частотам зв'язку контурів (при $\omega_{p1} = \omega_{p2} = \omega_0$) і додаткового биття вказаних коливань з коливаннями носійної частоти радіосигналу (при $\omega_{p1} = \omega_{p2} \neq \omega_0$). Процес згасання коливань після закінчення впливу ($t > T$) при зв'язку, що більший ніж критичний, також буде коливальним через биття коливань, які мають частоти зв'язку.

2.1.2. Подаючи на вхід інвертувального **резонансного ПВЧ** з коефіцієнтом передачі (2.7) тонально-модульоване коливання

$$\begin{aligned} U_{\text{вх}}(t) &= U_0 \cdot [1 + m \cos(\Omega t + \theta)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{mU_0}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \theta] + \\ &\quad + \frac{mU_0}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \theta], \end{aligned} \quad (2.13)$$

отримуємо відгук підсилювача (на підставі спектрального методу аналізу)

$$\begin{aligned} U_{\text{вих}}(t) &= U_0 \cdot K(\omega_0) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi_0 - \varphi(\omega_0)] + \\ &\quad + \frac{mU_0}{2} \cdot K(\omega_0 + \Omega) \cdot \cos[(\omega_0 + \Omega)t + (\varphi_0 + \theta) - \varphi(\omega_0 + \Omega)] + \\ &\quad + \frac{mU_0}{2} \cdot K(\omega_0 - \Omega) \cdot \cos[(\omega_0 - \Omega)t + (\varphi_0 - \theta) - \varphi(\omega_0 - \Omega)]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Якщо резонансна частота контуру ПВЧ співпадає з частотою носійного коливання $\omega_0 = \omega_p$, тоді $\varphi(\omega_0) = 0$, $K(\omega_0) = -K_p$. Вважаючи, що поблизу резонансу частотна і фазова характеристики ПВЧ задовольняють умовам:

$$K(\omega_0 + \Omega) = K(\omega_0 - \Omega) = -\frac{K_p}{\sqrt{1 + \xi_e^2}}, \quad |\varphi(\omega_0 + \Omega)| = |\varphi(\omega_0 - \Omega)| = \varphi,$$

отримуємо

$$\begin{aligned}
U_{\text{вих}}(t) &= -U_0 \cdot K_p \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{mU_0 K_p}{2\sqrt{1 + \xi_e^2}} \cdot \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \theta - \varphi] - \\
&\quad - \frac{mU_0 K_p}{2\sqrt{1 + \xi_e^2}} \cdot \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \theta + \varphi], \\
U_{\text{вих}}(t) &= -U_0 K_p \cdot \left[1 + \frac{m}{\sqrt{1 + \xi_e^2}} \cos(\Omega t + \theta - \varphi) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.15)
\end{aligned}$$

Як бачимо, відгук резонансного ПВЧ також є коливанням з тональною АМ, однак коефіцієнт (глибина) модуляції на виході підсилювача дещо зменшується:

$$m_{\text{вих}} = \frac{m}{\sqrt{1 + \xi_e^2}} \leq m.$$

Окрім цього, обвідна відгуку підсилювача запізнюється на кут φ відносно обвідної впливу, тобто має місце затримка сигналу в часі при підсиленні.

Відносна зміна коефіцієнту амплітудної модуляції визначається коефіцієнтом демодуляції

$$D = \frac{m_{\text{вих}}}{m} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_e^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q_e \frac{\Omega}{\omega_p} \right)^2}}, \quad (2.16)$$

який дозволяє оцінити ступінь лінійних (частотних) спотворень, що виникають в ПВЧ при складній формі керувального сигналу. Якщо еквівалента добротність контуру ПВЧ дорівнює його власній добротності, графік $D(\Omega)$ представляє собою праву гілку резонансної кривої контуру.

При проходженні коливань з тональною АМ через **смуговий ПВЧ**, навантаженням якого є система двох зв'язаних контурів, у випадку зв'язку, що більше за критичний, і налаштуванні кожного контуру на носійну частоту АМ сигналу глибина амплітудної модуляції відгуку ПВЧ $m_{\text{вих}}$ може бути більше за глибину модуляції m вхідного сигналу. Особливо це помітно при співпадінні частот бокових коливань АМ сигналу з частотами зв'язку коливальної системи.

2.2. Математичне моделювання

Приклад 1. Для двох значень еквівалентної добротності контуру ПВЧ: $Q_e = 35; 15$ – розрахувати залежності коефіцієнту демодуляції від частоти керувального сигналу. Вважати $f_p = 200$ кГц. Розрахунок виконати для частоти керувального сигналу $F = 0.1; 1; 5; 10; 15; 20$ кГц.

Скористаємося формулою (2.16)

$$D(F) = \frac{m_{\text{вих}}}{m} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau \cdot F)^2}}, \quad \text{де } \tau = \frac{2Q_e}{f_p}.$$

Програмування в Mathcad

$$\begin{aligned}
 f_p &:= 200 \quad \text{кГц} & Q_1 &:= 35 & Q_2 &:= 15 & NF &:= 5 \\
 \tau(Q) &:= 2 \cdot \frac{Q}{f_p} & \tau(Q_1) &= 0.35 & & & & \\
 & & \tau(Q_2) &= 0.15 & & & & \\
 D_m(F, Q) &:= \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau(Q) \cdot F)^2}} & & & & & & \\
 & & & & & & F_k &:= \begin{pmatrix} 0.1 \\ 1 \\ 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{pmatrix} \text{кГц}
 \end{aligned}$$

Результат розрахунку

$$n := 0..NF$$

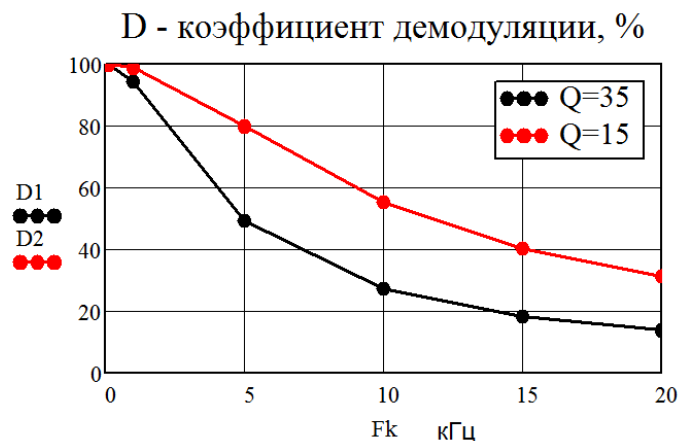
$$D1_n := 100 \cdot D_m(F_k_n, Q_1)$$

$$D2_n := 100 \cdot D_m(F_k_n, Q_2)$$

$$F_k = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 1 \\ 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{pmatrix} \text{кГц}$$

$$D1 = \begin{pmatrix} 99.939 \\ 94.386 \\ 49.614 \\ 27.472 \\ 18.711 \\ 14.142 \end{pmatrix} \%$$

$$D2 = \begin{pmatrix} 99.989 \\ 98.894 \\ 80 \\ 55.47 \\ 40.614 \\ 31.623 \end{pmatrix} \%$$



Приклад 2. Побудувати графіки АМ коливань та їх АЧС на вході і виході резонансного ПВЧ для двох випадків: $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 5 кГц.

Вважати $U_0 = 1$ В, $m = 70\%$, $F = 10$ кГц, $f_0 = 200$ кГц, $K_p = 20$. При побудові використовувати результати, що отримані у прикладі 1 для добротності $Q_e = 35$.

Різницю Δf забезпечувати за рахунок зміни f_0 .

Тональний АМ сигнал можна записати у вигляді, який враховує відхилення $\Delta f = f_0 - f_p$:

$$u_{\text{вх}}(t) = \sum_{k=1}^3 U_{\text{вх}k} \cdot \cos[2\pi(f_0 + \Delta F_k)t],$$

де

$$U_{\text{вх}} = U_0 \cdot \begin{bmatrix} m/2 \\ 1 \\ m/2 \end{bmatrix}, \quad \Delta F = \begin{bmatrix} -F + \Delta f \\ \Delta f \\ F + \Delta f \end{bmatrix}.$$

Оскільки резонансний ПВЧ є вузькосмуговим пристроєм, АЧХ його коефіцієнта передачі напруги можна визначити наступним чином

$$K_1(\Delta F) = K_p \cdot D(\Delta F),$$

де $D(\Delta F)$ – коефіцієнт демодуляції, $\Delta F = f - f_0$ – відхилення поточної частоти від носійної частоти (тут враховано, що носійна і резонансна частоти будуть задаватися однаковими).

ФЧХ коефіцієнта передачі резонансного ПВЧ $\varphi_1(\Delta F) = -\arctg(\tau \cdot \Delta F)$.

Тепер запишемо вираз для сигналу на виході резонансного ПВЧ

$$u_{\text{вих}}(t) = \sum_{k=1}^3 U_{\text{вих}k} \cdot \cos[2\pi(f_0 + \Delta F_k)t + \varphi_1(\Delta F_k)],$$

де

$$U_{\text{вих}} = U_0 \cdot K_p \cdot \begin{bmatrix} m \cdot D(-F + \Delta f)/2 \\ D(\Delta f) \\ m \cdot D(F + \Delta f)/2 \end{bmatrix}.$$

Програмування в Mathcad

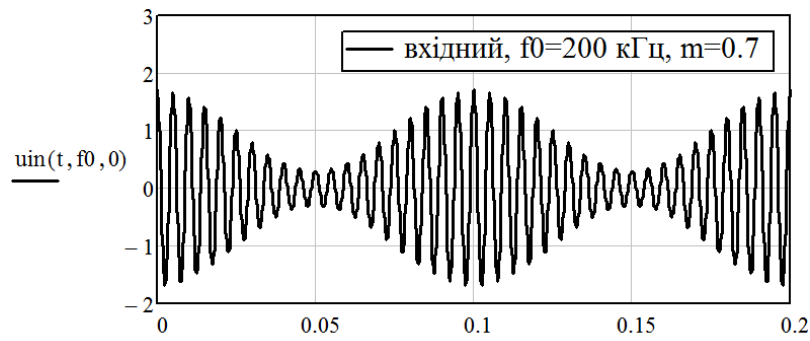
```

m := 0.7   U0 := 1 В   f0 := 200 кГц   fp := 200 кГц   F := 10 кГц   Kp := 20
           Qe := 35                                     T := 1/F = 0.1 мс

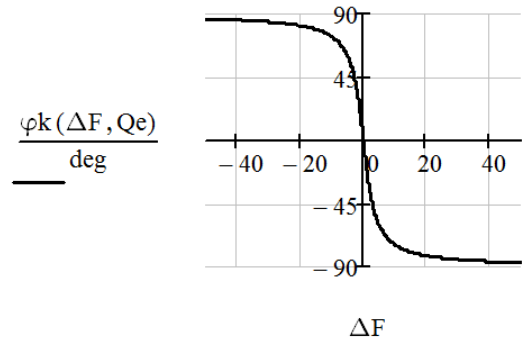
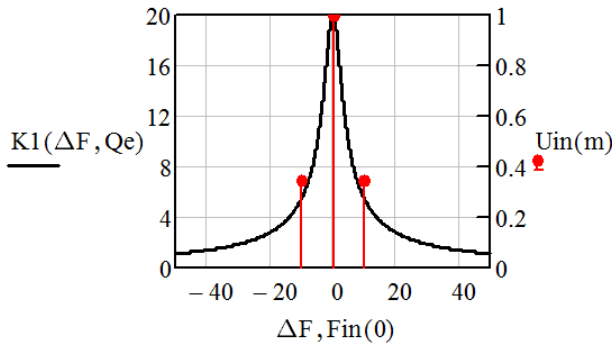
K1(ΔF, Q) := Kp · Dm(ΔF, Q)           φk(ΔF, Q) := -atan(τ(Q) · ΔF)
-----
Fin(Δf) := ⎡ -F + Δf ⎤   Uin(M) := ⎡ 0.5 · U0 · M ⎤   Fin(0) = ⎡ -10 ⎤   Uin(m) = ⎡ 0.35 ⎤
           ⎢ Δf       ⎥           ⎢ U0           ⎥           ⎢ 0       ⎥           ⎢ 1       ⎥
           ⎢ F + Δf ⎥           ⎢ 0.5 · U0 · M ⎥           ⎢ 10      ⎥           ⎢ 0.35  ⎥
-----
uin(t, ff0, Δf) := ∑k=02 [Uin(m)k · cos[2 · π · (ff0 + Fin(Δf)k) · t]

```

Вхідний сигнал



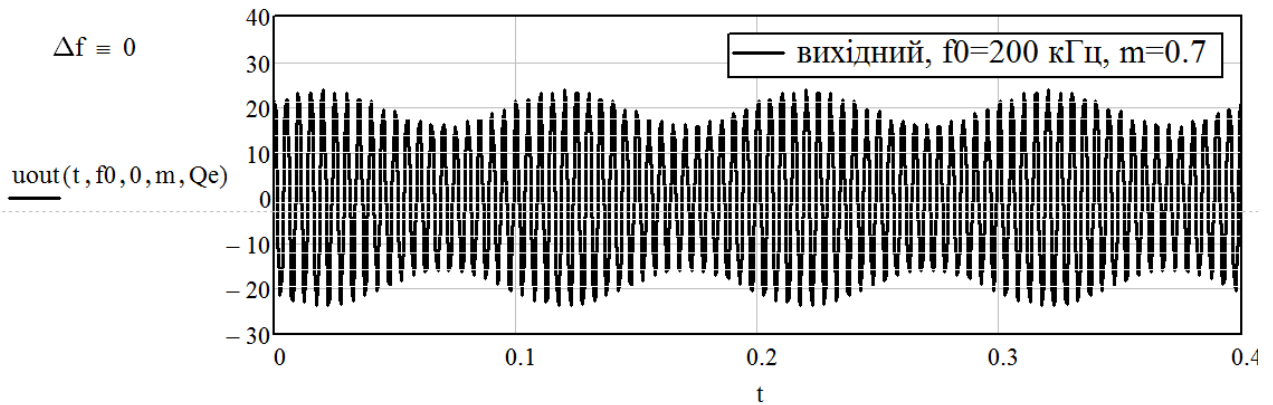
Вихідний сигнал $\Delta f = 0$



$$U_{out}(\Delta f, M, Q) := \begin{cases} \text{for } k \in 0..2 \\ G_k \leftarrow U_{in}(M)_k \cdot K_p \cdot D_m(\text{Fin}(\Delta f)_k, Q) \\ \text{return } G \end{cases}$$

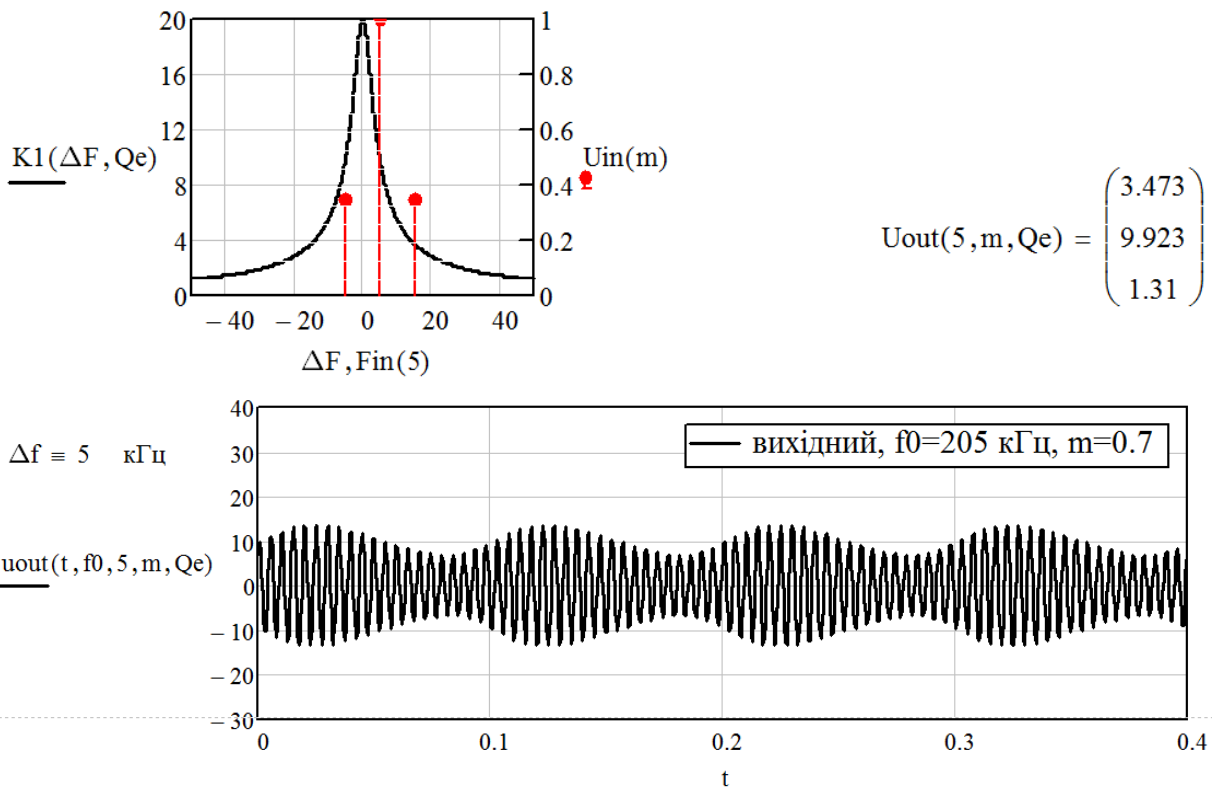
$$U_{out}(0, m, Qe) = \begin{pmatrix} 1.923 \\ 20 \\ 1.923 \end{pmatrix}$$

$$u_{out}(t, f_0, \Delta f, M, Q) := \sum_{k=0}^2 \left[U_{out}(\Delta f, M, Q)_k \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot (f_0 + \text{Fin}(\Delta f)_k) \cdot t + \varphi_k(\text{Fin}(\Delta f)_k, Q) \right] \right]$$



В цьому випадку на виході резонансного ПВЧ отримали сигнал також з тональною АМ, глибина модуляції якого в точності визначається за допомогою коефіцієнта демодуляції.

Вихідний сигнал $\Delta f = 5$ кГц



$$U_{out}(5, m, Q_e) = \begin{pmatrix} 3.473 \\ 9.923 \\ 1.31 \end{pmatrix}$$

Амплітуди складових вихідного сигналу зменшилися, а за рахунок різних початкових фаз кожної складової дещо викривилась форма обвідної.

Приклад 3. Відобразити характер залежностей коефіцієнту демодуляції D від частоти керувального сигналу F для смугового ПВЧ. Розглянути три випадки — зв'язок менший, рівний, і більший критичного. Вважати резонансні частоти та добротності контурів рівними $f_{p1} = f_{p2} = f_p = 200$ кГц, $Q_{1e} = Q_{2e} = Q_e = 35$.

Для вузькосмугової системи двох зв'язаних однакових коливальних контурів смугового ПВЧ коефіцієнт передачі напруги (коли вихідний сигнал напруги знімають з ємності другого контуру) дорівнює

$$\dot{K}(\Delta F) = \frac{Q_e k_{3B}}{k_{3B}^2 + (1 + j\tau\Delta F)^2}, \quad \text{де } \tau = \frac{2Q_e}{f_p}.$$

АЧХ коефіцієнту передачі на частоті бічних складових F дорівнює

$$K(F) = \frac{Q_e k_{3B}}{\sqrt{(k_{3B}^2 + 1 - \tau^2 F^2)^2 + (2\tau F)^2}}.$$

На носійній частоті $F = 0$,

$$K(0) = \frac{Q_e k_{3B}}{k_{3B}^2 + 1}.$$

Якщо вважати, що амплітуда носійного колювання вхідного сигналу з тональною АМ дорівнює одиниці, а амплітуди бічних колювань дорівнюють $m_{BX}/2$,

тоді амплітуда носійного колювання на виході дорівнює $K(0)$, а амплітуди бічних колювань $(m_{\text{вх}}/2) \cdot K(F)$. Звідки можна отримати вираз для залежності глибини модуляції вихідного сигналу від частоти керувального сигналу:

$$m_{\text{вих}}(F) = 2 \frac{(m_{\text{вх}}/2)K(F)}{K(0)} = m_{\text{вх}} \frac{k_{\text{ЗБ}}^2 + 1}{\sqrt{(k_{\text{ЗБ}}^2 + 1 - \tau^2 F^2)^2 + (2\tau F)^2}}$$

Нарешті, коефіцієнт демодуляції

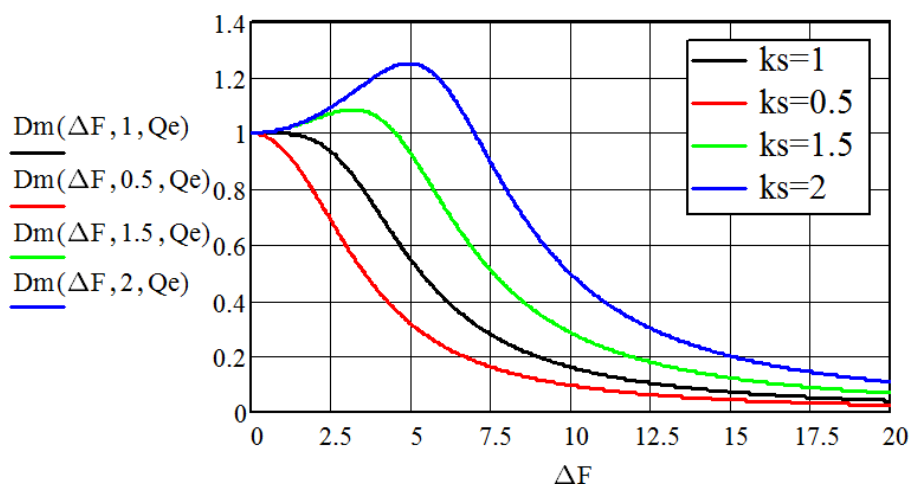
$$D(F) = \frac{m_{\text{вих}}(F)}{m_{\text{вх}}} = \frac{k_{\text{ЗБ}}^2 + 1}{\sqrt{(k_{\text{ЗБ}}^2 + 1 - \tau^2 F^2)^2 + (2\tau F)^2}}$$

Програмування в Mathcad

$f_p := 200$ кГц $Q_e := 35$

$$Dm(\Delta F, ks, Q) := \frac{1 + ks^2}{\sqrt{[1 + ks^2 - (\tau(Q) \cdot \Delta F)^2]^2 + (2 \cdot \tau(Q) \cdot \Delta F)^2}}$$

D - коефіцієнт демодуляції, %



Приклад 4. Подати на вхід резонансного ПВЧ з $f_p = 100$ кГц прямокутний радіоімпульс імпульс амплітудою $U_m = 1$ В тривалістю $T = 0.5$ мс з носійною частотою $f_0 = 100$ кГц.

Визначити відгук резонансного ПВЧ з $K_p = 20$ і еквівалентною добротністю $Q_e = 35$ для трьох випадків: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц; 3) $\Delta f = 10$ кГц. Розстроєння частоти здійснювати за рахунок зміни носійної частоти.

Для визначення комплексної амплітуди відгуку скористаємося формулою (2.9)

$$\dot{A}_{\text{вих}}(t) = \dot{A}_{\text{вих0}}(t) - \dot{A}_{\text{вих0}}(t - T),$$

де

$$\dot{A}_{\text{вих0}}(t) = K_p \cdot U_m \cdot \frac{\sqrt{1 + e^{-t/\pi\tau} - 2e^{-t/2\pi\tau} \cos 2\pi\Delta f t}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta f)^2}} \cdot e^{j[\theta(t) - \varphi]} \cdot 1(t),$$

$$\tau = \frac{2Q_e}{f_p}, \quad \varphi = \text{arctg}(\tau\Delta f),$$

$$\theta(t) = \arg\left[1 - e^{-t/2\pi\tau} \cos 2\pi\Delta f t + je^{-t/2\pi\tau} \sin 2\pi\Delta f t\right].$$

Сигнал на виході резонансного ПВЧ

$$U_{\text{вих}}(t) = \text{Re}\left\{\dot{A}_{\text{вих}}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}\right\}.$$

Програмування в Mathcad

$f_p := 100$ кГц $Q_e := 35$ $f_0 := 100$ кГц $T := 0.5$

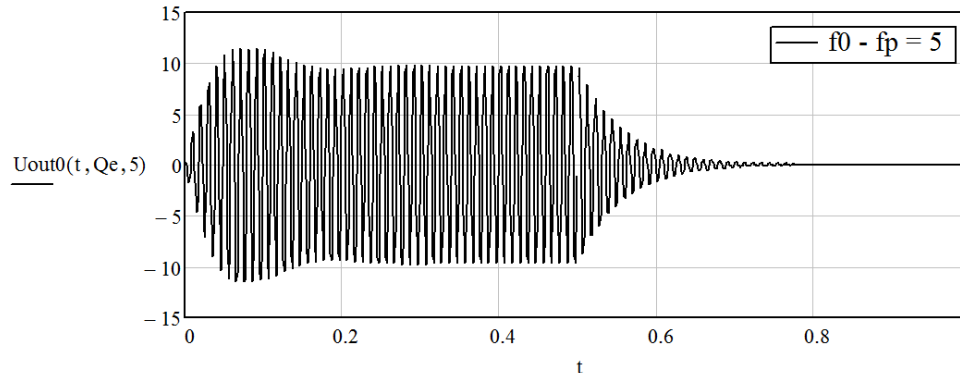
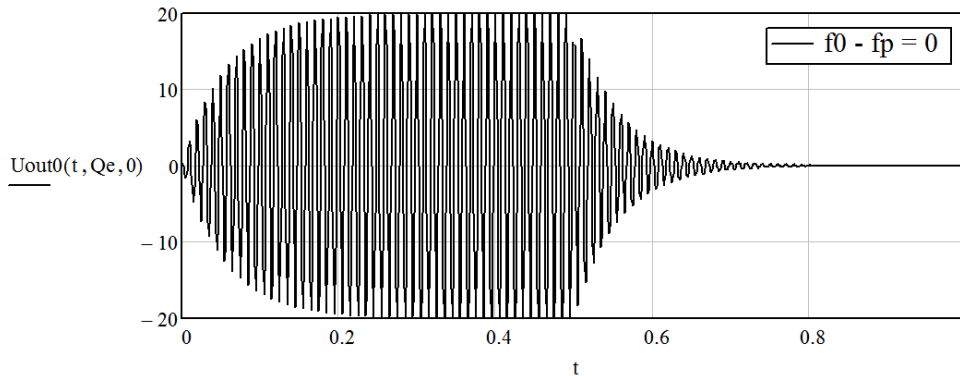
$U_m := 1$ $K_p := 20$

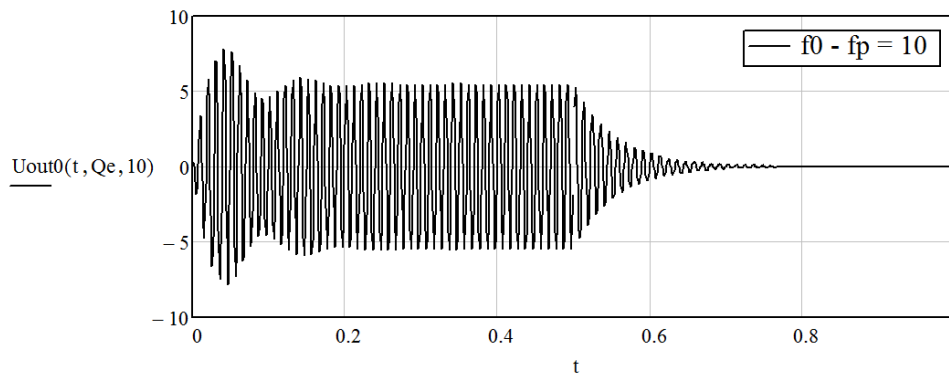
$$\theta(t, Q, \Delta f) := \arg\left[1 - e^{\frac{-t \cdot 2 \cdot \pi}{\tau(Q)}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot t) + i \cdot \left(e^{\frac{-t \cdot 2 \cdot \pi}{\tau(Q)}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot t)\right)\right]$$

$$A_0(t, Q, \Delta f) := K_p \cdot U_0 \cdot \frac{\sqrt{1 + e^{\frac{-t \cdot 4 \cdot \pi}{\tau(Q)}} - 2 \cdot e^{\frac{-t \cdot 2 \cdot \pi}{\tau(Q)}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot t)}}{\sqrt{1 + (\tau(Q) \cdot \Delta f)^2}} \cdot e^{i \cdot (\theta(t, Q, \Delta f) - \text{atan}(\tau(Q) \cdot \Delta f))}$$

$$A(t, Q, \Delta f) := A_0(t, Q, \Delta f) \cdot \Phi(t) - A_0(t - T, Q, \Delta f) \cdot \Phi(t - T)$$

$$U_{\text{out0}}(t, Q, \Delta f) := \text{Re}\left[A(t, Q, \Delta f) \cdot e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)}\right]$$





Приклад 5. Подати на вхід смугового ПВЧ прямокутний радіоімпульс амплітудою $U_m = 1$ В тривалістю $T = 0.5$ мс з носійною частотою $f_0 = 100$ кГц.

Визначити відгук смугового ПВЧ з двома однаковими зв'язаними коливальними контурами з еквівалентною добротністю $Q_e = 35$, які налаштовано на однакову резонансну частоту $f_p = 100$ кГц. Загальний коефіцієнт підсилення при критичному зв'язку $K_p = 20$. Розрахунок виконати для двох випадків розстроювання частоти: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц та трьох випадків зв'язку — меншому, рівному і більшому критичного. Розстроєння частоти здійснювати за рахунок зміни носійної частоти.

Для визначення комплексної амплітуди відгуку скористаємося формулою

$$\dot{A}_{\text{вих}}(t) = \dot{A}_{\text{вих0}}(t) - \dot{A}_{\text{вих0}}(t - T),$$

де

$$\dot{A}_{\text{вих0}}(t) = K_p \cdot U_m \cdot \frac{|\dot{f}_1(t)|}{|\dot{f}_2|} \cdot e^{j[\theta_s(t) - \varphi_s]} \cdot 1(t),$$

$$\tau = \frac{2Q_e}{f_p}, \quad \theta_s(t) = \arg[\dot{f}_1(t)], \quad \varphi_s = \arg[\dot{f}_2].$$

$$\dot{f}_1(t) = k_{\text{зв}} - e^{-2\pi(1+j\tau\Delta F)t/\tau} \cdot [(1 + j\tau\Delta F)\sin(2\pi k_{\text{зв}}t/\tau) + k_{\text{зв}} \cos(2\pi k_{\text{зв}}t/\tau)],$$

$$\dot{f}_2 = k_{\text{зв}}^2 + (1 + j\tau\Delta F)^2, .$$

Сигнал на виході резонансного ПВЧ

$$U_{\text{вих}}(t) = \text{Re}\{\dot{A}_{\text{вих}}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}\}.$$

Програмування в Mathcad

$f_p := 100$ кГц $Q_e := 35$ $f_0 := 100$ кГц $T := 0.5$

$U_m := 1$ $K_p := 20$

$$f1(t, \Delta f, k_s, Q) := k_s - e^{\frac{-2 \cdot \pi \cdot t \cdot (1 + i \cdot \Delta f \cdot \tau(Q))}{\tau(Q)}} \cdot \left[(1 + i \cdot \Delta f \cdot \tau(Q)) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k_s \cdot t}{\tau(Q)}\right) + k_s \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k_s \cdot t}{\tau(Q)}\right) \right]$$

$$f2(\Delta f, k_s, Q) := k_s^2 + [1 + i \cdot (\Delta f \cdot \tau(Q))]^2$$

$$\theta_s(t, Q, k_s, \Delta f) := \arg(f_1(t, \Delta f, k_s, Q))$$

$$\varphi_s(\Delta f, k_s, Q) := \arg(f_2(\Delta f, k_s, Q))$$

$$A_0(t, Q, k_s, \Delta f) := K_p \cdot U_0 \cdot \frac{|f_1(t, \Delta f, k_s, Q)|}{|f_2(\Delta f, k_s, Q)|} \cdot e^{i(\theta_s(t, Q, k_s, \Delta f) - \varphi_s(\Delta f, k_s, Q))}$$

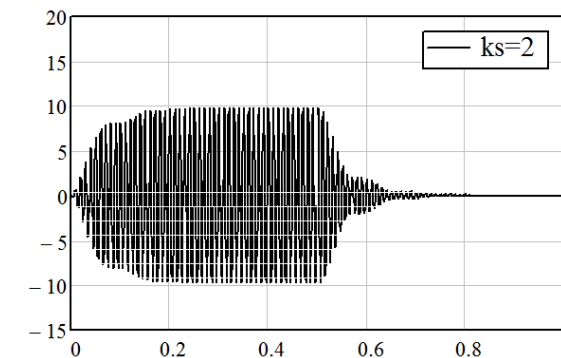
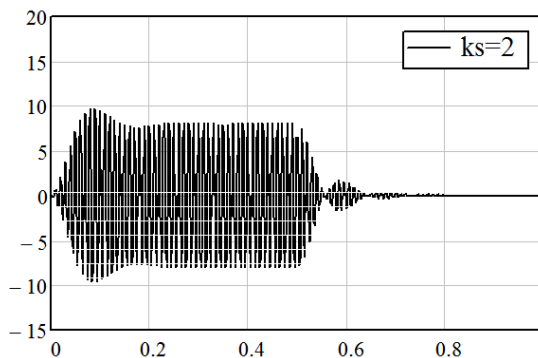
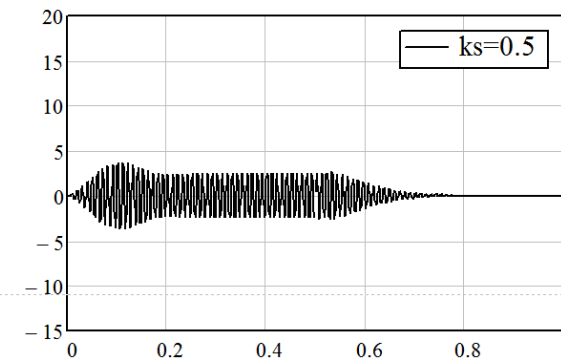
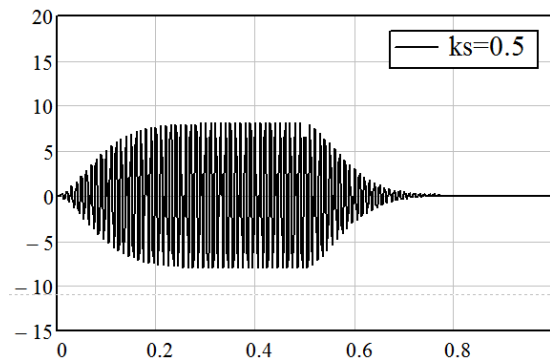
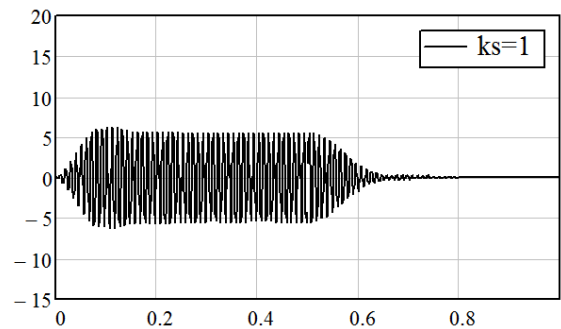
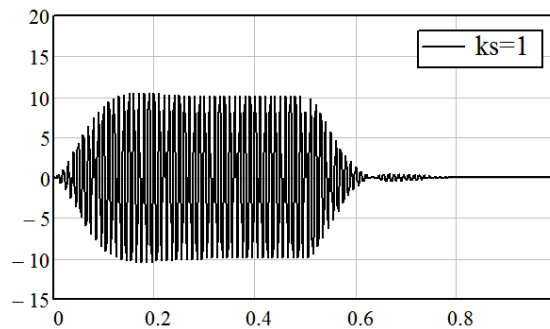
$$A(t, Q, k_s, \Delta f) := A_0(t, Q, k_s, \Delta f) \cdot \Phi(t) - A_0(t - T, Q, k_s, \Delta f) \cdot \Phi(t - T)$$

$$U_{out0}(t, Q, k_s, \Delta f) := \operatorname{Re} \left[A(t, Q, k_s, \Delta f) \cdot e^{i(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)} \right]$$

+

$\Delta f = 0$

$\Delta f = 5 \text{ кГц}$



2.3. Домашнє завдання

1. Розрахувати тривалість переднього і заднього фронтів радіоімпульсу на виході резонансного ПВЧ, який налаштовано на частоту гармонічного заповнення вхідного прямокутного радіоімпульсу $f_p = f_0 = 150 \text{ кГц}$ для двох значень добротності: 50 і 20.

2. Визначити максимально можливе значення еквівалентної добротності

контур резонансного ПВЧ, при якому спотворення форми відгуку підсилювача не перевищують допустимих, тобто $t_{\text{згас}} = t_{\text{нар}} \leq 0.1 \cdot T$, якщо тривалість імпульсу $T = 0.5$ мс і носійна частота $f_0 = 150$ кГц.

3. Для послідовного коливального контуру з резонансною частотою 150 кГц та індуктивністю 2 мГн розрахувати опір втрат за формулою

$$R = 35 + (-1)^N \cdot \text{ціла частина} \left(\frac{N}{2} \right) \text{ Ом,}$$

де N – номер студента у списку групи.

Розрахувати еквівалентну добротність і ширину смуги пропускання.

4. Для двох значень еквівалентної добротності контуру ПВЧ: 50 і 20 – розрахувати залежності коефіцієнту демодуляції від частоти керувального сигналу. Вважати $f_p = 150$ кГц. Розрахунок виконати для $F = 0,1; 1; 5; 10; 15; 20$ кГц. Побудувати на одному рисунку графіки розрахованих залежностей.

5. Побудувати у масштабі графіки амплітудного спектра АМ-коливань на вході і виході підсилювача для двох випадків: $\Delta f = f_0 - f_p = 0$ і $\Delta f = 10$ кГц. Вважати $U_0 = 1$ В, $m = 50\%$, $F = 10$ кГц, $f_0 = 150$ кГц, $K_p = 20$. При побудові використовувати результати, що отримані в п.3 домашнього завдання для добротності $Q_e = 50$.

6. Відобразити характер залежностей коефіцієнту демодуляції D від частоти керувального сигналу F для смугового ПВЧ. Розглянути три випадки — зв'язок менший, рівний, і більший за критичний. Графіки залежностей побудувати на одному рисунку. Вважати резонансні частоти контурів рівними $\omega_{p1} = \omega_{p2} = \omega_0$.

2.4. Експериментальні дослідження

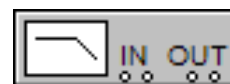
2.4.1. Використані пристрої, прилади та вбудовані функції EWB

Тут наводиться короткий опис застосованих в дослідженнях пристроїв, більш докладний їх опис наведено у додатку Б.

В схемах використані три пристрої:

- функціональний генератор (Function generator).
- осцилограф (Oscilloscope).
- вимірювач АЧХ і ФЧХ – графопобудовник (Bode Plotter) –

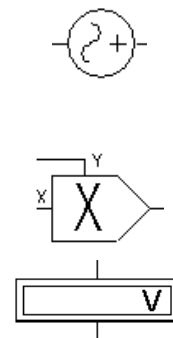
пристрій для дослідження амплітудно-частотних (АЧХ) та фазо-частотних (ФЧХ) характеристик. вимірювач АЧХ і ФЧХ має чотири гнізда: два вхідних (IN) та два вихідних (OUT). Ліві гнізда IN та OUT підключаються до досліджуваних точок, а праві гнізда – заземлюються (додаток Б.4.4).



Окрім того, застосовують ще три прилади, що можуть потребувати

попереднього налаштування:

- джерело змінної напруги синусоїдної форми (AC Voltage Source). В меню *Component Properties* джерела потрібно становити значення робочої частоти та **діючої** амплітуди коливань (додаток Б.4.5);
- аналоговий помножувач (Multiplier).
- вольтметр (Voltmeter) постійного та змінного струму. В меню *Component Properties* вольтметра потрібно обрати *Mode AC* – змінний струм. Вольтметр показує **діюче** значення напруги (додаток Б.4.4).



Для дослідження АЧС сигналів використовується вбудована графічна функція *Fourier* з меню *Analysis* програми EWB (докладний опис наведено в додатку В.1).

2.4.2. Виконання досліджень

1. Метою першого пункту завдання є дослідження проходження періодичної послідовності прямокутних радіоімпульсів резонансним ПВЧ.

1,а) Запустити програмне середовище EWB. У бібліотеці, у папці *ОТТРТ_КР_ЛІВ*, знайти і відкрити **файл** *кр_12_1.ewb*. На робочому полі з'явиться схема, яку наведено на Рис. 2.3.

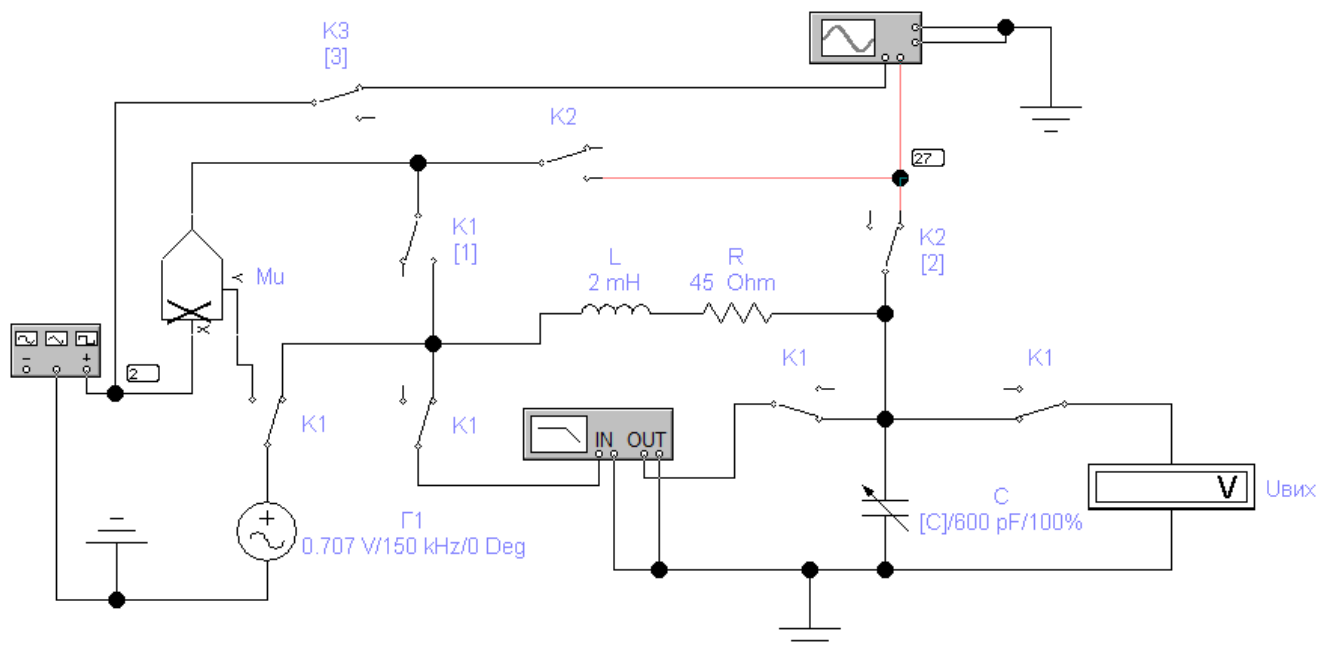


Рис.2.3. Схема для дослідження проходження АМ-сигналів резонансним ПВЧ

Схема містить два перемикача:

- K1 (перемикається клавішою «1») для роботи в двох режимах:

- 1) налаштування коливального контуру $R-L-C$ (при цьому підключаються вимірник АЧХ і ФЧХ і вольметр); 2) дослідження проходження радіосигналу налаштованим на задану резонансну частоту резонансним ПВЧ;
- К2 (перемикається клавішею «2») для візуалізації на осцилографі або вхідного радіосигналу або сигналу з виходу резонансного ПВЧ;
 - К3 (перемикається клавішею «3») для візуалізації на осцилографі вхідної періодичної послідовності прямокутних імпульсів.

Схема коливального контуру містить змінну ємність C , значення якої зменшується натисканням клавіші «С» – **латиниця**. Для збільшення значення ємності потрібно натискати комбінацію клавиш «Shift С». Максимальне значення ємності C встановлено 600 пФ.

Змінюючи значення опору R коливального контуру можна змінювати його добротність. Для цього треба підвести курсор миші до опору, натиснути **праву** кнопку миші і викликати меню параметрів опору *Component Properties*. В ньому обрати рядок *Resistance(R)* і встановити нове значення опору.

1,б) Налаштувати контур ПВЧ

Перемикач К1 встановити в таке положенні, за якого живлення на контур подається з джерела Г1.

Встановити частоту джерела гармонічної напруги 150 кГц з амплітудою 1 В. Для цього в меню параметрів джерела *Component Properties* встановити вказані на рис.2.4 значення параметрів (задається діюча амплітуда напруги).

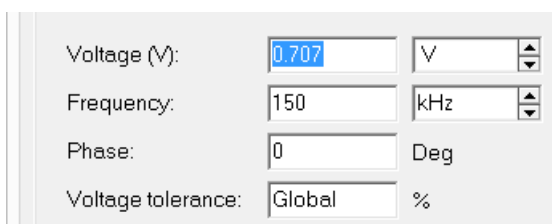


Рис.2.4. – Параметри джерела Г1

Встановити значення опору R , що дорівнює розрахованому у п.3 домашнього завдання.

Активувати схему, для цього підвести курсор миші до правого верхнього перемикача на екрані (над робочим полем) і натиснути **лівою** кнопкою миші «1».



Змінюючи значення ємності C , досягти масимальной напруги на контурі, контролюючи показник вольметра.

Відкрити вимірник АЧХ і ФЧХ, натиснувши на нього **правою** кнопкою миші і вибравши *Open* у меню, що відкрилося. Встановити вказані на рис.2.5 значення параметрів (АЧХ контуру зручніше аналізувати в логаріфмічному масштабі за вертикаллю).

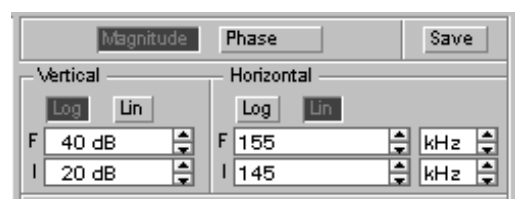
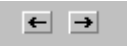
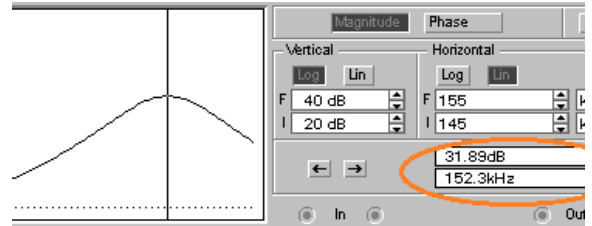


Рис.2.5. Параметри вимірника АЧХ і ФЧХ

1,в) Визначити резонансну частоту контура і значення $K_{p,дБ}$.

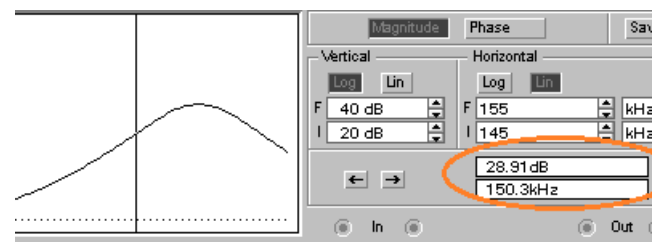
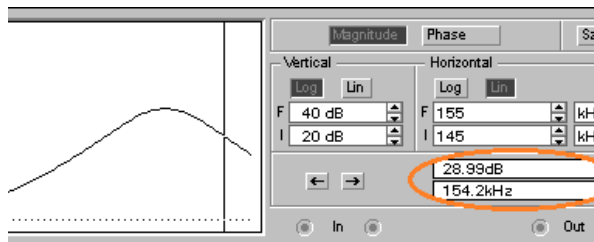
Захопивши лівою кнопкою миши вертикальний курсор, вивести його на максимум резонансної кривої. Для більш точного налаштування зручно користуватися кнопками .



Зберегти значення частоти, яка відповідає максимальному значенню $K_{p,дБ}$ та саме значення коефіцієнту передачі. $f_p = \underline{\hspace{2cm}}$ кГц, $K_{p,дБ} = \underline{\hspace{2cm}}$ дБ.

1,г) Визначити смугу пропускання і добротність коливального контуру ПВЧ.

За рівнем $(K_{p,дБ} - 3)$ дБ, користуючись вертикальним курсором, визначити смугу пропускання контуру: $f_B = \underline{\hspace{2cm}}$ кГц, $f_H = \underline{\hspace{2cm}}$ кГц



Розрахувати добротність контуру ПВЧ.

$\Pi = \underline{\hspace{2cm}}$ кГц, $Q = \underline{\hspace{2cm}}$.

Закрити вимірювач АЧХ і ФЧХ.

1,д) Отримати періодичну послідовність прямокутних радіоімпульсів з $F = 1$ кГц, шпаруватістю 50%, $f_0 = 150$ кГц.

Перевести перемикач K_1 в положення, коли сигнал на контур надходить з помножувача M_1 . Перевести перемикач K_2 , коли сигнал на вхід В осцилографа поступає з помножувача M_1 . Замкнути перемикач K_3 .

Відкрити осцилограф, натиснувши на його зображенні **правою** кнопкою миши і обравши в меню команду *Open*. Перейти в розширену версію (кнопка *Expand* на панелі осцилографа)

Відкрити функціональний генератор і становити параметри, що вказані на Рис.2.6.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вхідного сигналу ПВЧ.

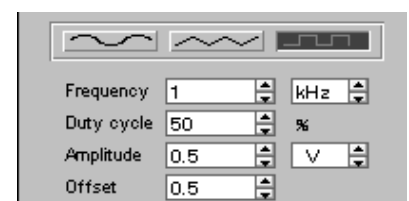


Рис.2.6. Параметри функціонального генератора

1,е) Спостерігати і зберегти осцилограми відгуку резонансного ПВЧ для трьох випадків: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц; 3) $\Delta f = 10$ кГц. Розстроєння частоти змінювати за рахунок зміни

носійної частоти.

Перевести перемикач К2 в положення, коли вигнал на вхід В осцилографа поступає з виходу ПВЧ.

1) Схема вже налаштована на випадок $\Delta f = 0$.

Активувати схему. Спостерігати на екрані осцилографа (тут синім кольором показана обвідна вхідного сигналу, червоним – вихідний сигнал ПВЧ) і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

За осцилограмою, використовуючи вертикальні курсори, визначити тривалість переднього $t_{\text{нар}} = 3t_1$ (t_1 визначається як час зростання рівня обвідної від нуля до рівня $U_{\text{max}}(1 - e^{-1}) = 0.632 \cdot U_{\text{max}}$) і заднього фронтів $t_{\text{згас}} = 3t_2$ відгуку (t_2 визначається зменшення рівня амплітуди обвідної від максимального значення до рівня $U_{\text{max}}e^{-1} = 0.368 \cdot U_{\text{max}}$). Порівняти отримані результати з розрахованими в домашньому завданні.

Як приклад, на Рис.2.7 показано процедуру визначення $t_{\text{нар}}$. Один курсор (червоний) встановлюємо на початку імпульсу. Максимальна амплітуда вхідного сигналу за осцилограмою складає приблизно 40 В. Другий курсор (синій) встановлюємо в точці, де обвідна переднього фронту приблизно дорівнює $40 \cdot 0.632 = 25.3$ В. Тоді верхнє число в третьому віконці надасть значення $t_{\text{нар}}$.

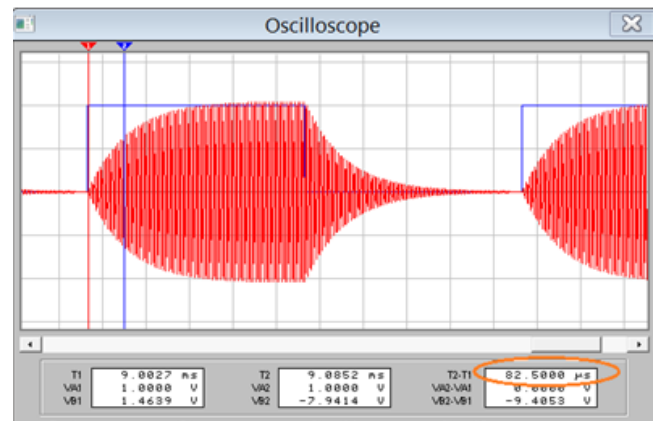


Рис.2.7. Процедура визначення $t_{\text{нар}}$

$$t_{\text{нар}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкс}, t_{\text{згас}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкс}.$$

2) $\Delta f = 5$ кГц. Встановити значення носійної частоти 145 кГц. Для цього в джерелі Г1 встановити значення частоти $Frequency = 145$ кГц.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

За осцилограмою, використовуючи вертикальні курсори, визначити період коливань амплітуди обвідної та частоту цих коливань. Порівняти отримані значення з очікуваними.

$$T_{\text{кол}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкс}, F_{\text{кол}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц}.$$

3) $\Delta f = 10$ кГц. Встановити значення носійної частоти 140 кГц. Повторити дії попереднього пункту (1,е,2).

2. Метою другого пункту є дослідження проходження тонального АМ сигналу через резонансний ПВЧ.

2,а) Для дослідження використовується схема, що наведена на рис.2.3.

В ній коливальна система вже налаштована в резонанс на частоті 150 кГц. Відомі її смуга пропускання Π та добротність Q .

В схемі потрібно розімкнути перемикач К3, перемикач К1 повинен знаходитися в положення, коли сигнал на контур надходить з помножувача M_u , а перемикач К2 – в положенні, коли вигнал на вхід В осцилографа поступає з вихода ПВЧ.

Відкрити функціональний генератор і становити параметри, що забезпечують глибину модуляції $m = 50\%$ на частоті керуючого сигналу $F = 100$ Гц, як вказано на Рис.2.8.

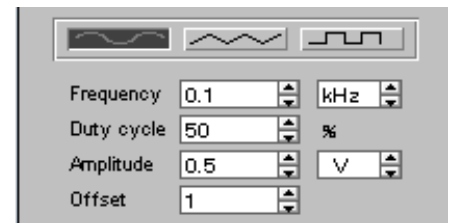


Рис.2.8. Параметри функціонального генератора

В джерелі Г1 встановити носійну частоту $f_0 = 150$ кГц.

2,б) Експериментально зняти залежність коефіцієнта демодуляції від частоти керуючого сигналу $D = m_{\text{вих}} / m = \alpha(F)$ для $m = 50\%$.

Вимірювання $m_{\text{вих}}$ провести на наступних частотах керуючого сигналу $F = 0.1; 1; 5; 10; 15; 20$ кГц, відповідно змінюючи параметр *Frequency* функціонального генератора.

Розрахунок глибини модуляції виконувати за осцилограмою АМ-коливань (Рис.2.9),

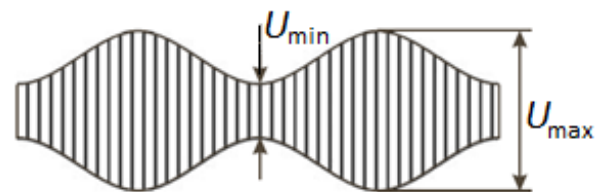


Рис.2.9. Тональний АМ сигнал

$$m\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \cdot 100\%, \quad (2.15)$$

Відкрити осцилограф. Встановити масштаб часової осі 1 мс на поділку,

Для кожного значення частоти керувального сигналу виконати наступні дії:

- активувати схему
- спостерігати вихідний сигнал, за необхідності змінюючи масштаб часової осі,

F, кГц	U_{\max} , В	U_{\min} , В	$m_{\text{вих}}$, %	D
0.1				
1				
5				
10				
15				
20				

- визначити за сигналом значення

U_{\max} та U_{\min}

- розрахувати глибину модуляції $m_{\text{вих}}$ за формулою (2.15)

- визначити значення коефіцієнта демодуляції $D = m_{\text{вих}}\% / 50\%$;
- усі дані занести до таблиці.

2, в) Дослідити часові та спектральні характеристики вхідного тонального АМ сигналу та вихідного сигналу резонансного ПВЧ для керувального сигналу з частотою $F = 10$ кГц і глибиною модуляції $m = 80\%$ для двох випадків: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц; 3) $\Delta f = 10$ кГц. Розстроювання частоти здійснювати за рахунок зміни носійної частоти.

Відкрити функціональний генератор і становити параметри, що вказані на Рис.2.10.

$$1) \Delta f = f_0 - f_p = 0$$

Встановити перемикач К2 в положення, коли на вхід В осцилографа поступає вхідний сигнал.

Активувати схему. Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вхідного сигналу ПВЧ.

Для отримання АЧС вхідного сигналу потрібно в меню *Analysis* обрати функцію *Fourier*.

Встановити значення параметрів *Fundamental frequency* – 10 кГц, *Number of harmonics* – 30. У падаючому переліку обрати *Output nodes* – 2, як показано на Рис.2.11.

Натиснути кнопку *Simulate*. Спостерігати та зберегти АЧС вхідного сигналу у протоколі.

Встановити перемикач К2 в положення, коли на вхід В осцилографа поступає сигнал з виходу ПВЧ.

Активувати схему. Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

Для отримання АЧС вихідного сигналу в функції *Fourier* обрати *Output nodes* – 27. Натиснути кнопку *Simulate*. Спостерігати та зберегти АЧС вихідного сигналу ПВЧ у протоколі.

2) $\Delta f = 5$ кГц. Встановити частоту джерела Г1 – 145 кГц. Повторити дії п.2,в,1.

3) $\Delta f = 10$ кГц. Встановити частоту джерела Г1 – 140 кГц. Повторити дії п.2,в,1.

3. Метою третього пункту є дослідження проходження періодичної

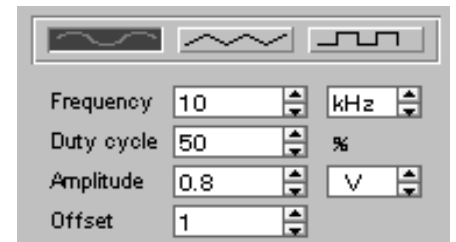


Рис.2.10. Параметри функціонального генератора

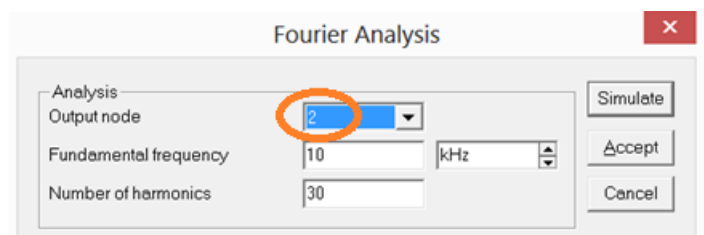


Рис.2.11. Параметри АЧС

послідовності прямокутних радіоімпульсів через смуговий ПВЧ.

3,а) У бібліотеці, у папці **ОТРТ_КР_LIB**, знайти і відкрити **файл** *кр_12_2.ewb*. На робочому полі екрану з'явиться схема, яку наведено на Рис.2.12.

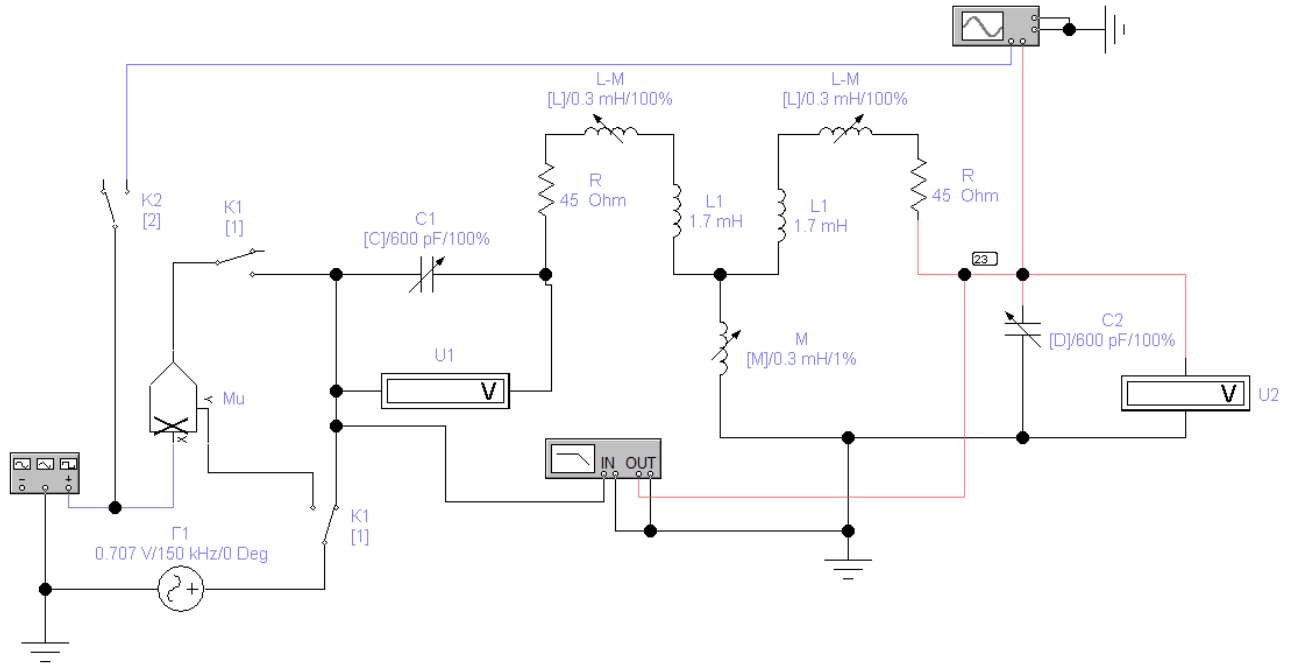


Рис.2.12. Схема для дослідження проходження АМ-сигналів смуговим ПВЧ

Тут схему системи двох індуктивно зв'язаних коливальних контурів (Рис.2.13,а) замінено еквівалентною схемою (Рис.2.13,б), в якій для зручності налаштування індуктивності L_1 і L_2 замінені кожна двома індуктивностями: невеликою змінною $L - M$ і постійною $L_1 - L$ або $L_2 - L$.

Змінюючи індуктивність зв'язку між контурами (клатвішою «М» для зменшення або «Shift M» – для збільшення), треба одночасно змінювати індуктивності $L - M$ контурів (клатвішою «L» для зменшення або «Shift L» – для збільшення). Збільшуючи значення M , необхідно одночасно зменшувати $L - M$.

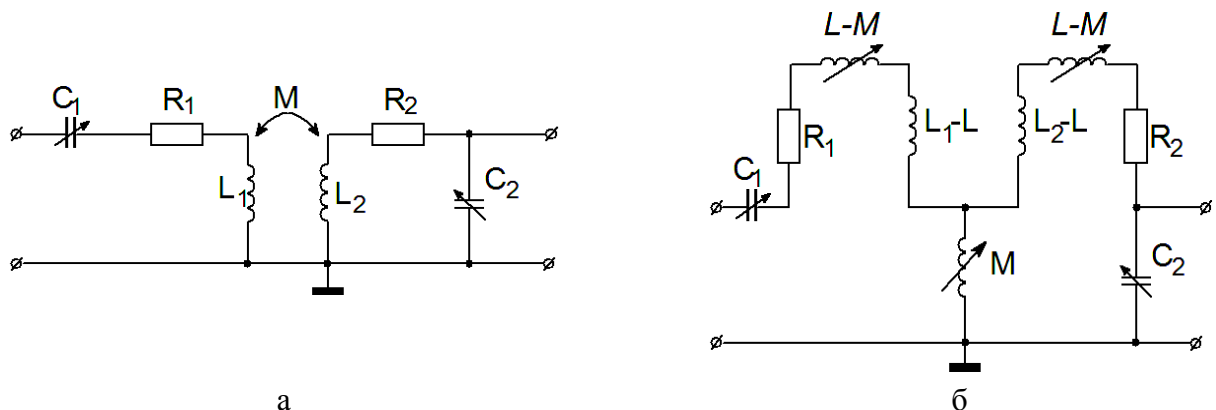


Рис.2.13. Еквівалентне перетворення схеми двох зв'язаних коливальних контурів:
а – початкова схема; б – еквівалентна схема

Перемикач К1 (перемикається клатвішою «1») призначений для роботи схеми

в двох режимах: 1) налаштування коливальної системи; 2) дослідження проходження радіосигналу налаштованим смуговим ПВЧ.

Для подачі на вхід А осцилографа сигналу вхідної обвідної застосовується перемикач К2 (перемикається клавішою «2»).

3,б) Налаштувати систему зв'язаних контурів в оптимальний режим (режим повного резонансу) на частоті 150 кГц.

Перемикач К1 встановити в таке положення, за якого живлення на контур подається з джерела Г1. Перемикач К2 розімкнено.

Встановити параметри джерела гармонічної напруги Г1 відповідності з Рис.2.4.

Встановити значення обох опорів R , що дорівнює розрахованому у п.3 домашнього завдання.

Встановити показник взаємної індуктивності M на рівень 1%, а показники індуктивності $L - M$ – на рівень 99%.

Активувати схему.

Змінюючи значення ємності C_1 , досягти максимальної напруги U_1 , контролюючи показник відповідного вольметра.

Потім, змінюючи значення ємності C_2 , досягти максимальної вихідної напруги U_2 , контролюючи показник вихідного вольметра.

Важливо! Присутній у схемі осцилограф буде заважати налаштуванню. Доведеться кілька разів активувати схему.

Розрахувати значення оптимальної індуктивності зв'язку (значення R взяти зі схеми)

$$M_{\text{опт}} = \frac{R}{2\pi \cdot 150} = \text{_____ мГн}$$

Змінюючи в схемі значення взаємної індуктивності M (натисканням клавіш «Shift M») і одночасно – значення індуктивності $L - M$ (натисканням клавіши «L»), встановити оптимальний (критичний) зв'язок.

3,в) Отримати періодичну послідовність прямокутних радіоімпульсів з $F = 1$ кГц, шпаруватістю 50%, $f_0 = 150$ кГц.

Перевести перемикач К1 в положення, коли сигнал на контур надходить з помножувача M_u . Замкнути перемикач К2.

Відкрити функціональний генератор і встановити параметри, що вказані на Рис.2.6.

3,г) Спостерігати і заберегти осцилограми відгуку смугового ПВЧ при оптимальному зв'язку для двох випадків: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц. Розстроєння частоти змінювати за рахунок зміни носійної частоти.

Відкрити осцилограф, натиснувши на його зображенні **правою** кнопкою миши і обравши в меню команду *Open*. Перейти в розширену версію (кнопка *Expand* на панелі осцилографа)

1) Схема вже налаштована на випадок $\Delta f = 0$.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа (тут синім кольором показана обвідна вхідного сигналу, червоним – вихідний сигнал ПВЧ) і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

2) $\Delta f = 5$ кГц. Встановити значення носійної частоти 145 кГц. Для цього натиснути **правою** кнопкою миши на зображення джерела Г1 і викликати меню параметрів опору *Component Properties*. В ньому обрати рядок *Frequency* і встановити нове значення частоти.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

3,д) Спостерігати і зберегти осцилограми відгуку смугового ПВЧ при зв'язку менше критичного для двох випадків: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц.

1) Повернути частоту джерела Г1 до значення 150 кГц.

Встановити значення взаємної індуктивності M в 2 рази менше за оптимальне значення, одночасно збільшуючи на відповідні відсотки значення індуктивності $L - M$.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

2) $\Delta f = 5$ кГц. Встановити значення носійної частоти 145 кГц (в джерелі Г1).

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

3,е) Спостерігати і зберегти осцилограми відгуку смугового ПВЧ при зв'язку більше критичного для двох випадків: 1) $\Delta f = f_0 - f_p = 0$; 2) $\Delta f = 5$ кГц.

1) Повернути частоту джерела Г1 до значення 150 кГц.

Встановити значення взаємної індуктивності M в 1.5 разів більше за оптимальне значення, одночасно зменшуючи на відповідні відсотки значення індуктивності $L - M$.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

2) $\Delta f = 5$ кГц. Встановити значення носійної частоти 145 кГц (в джерелі Г1).

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

4. Метою четвертого пункту є дослідження проходження тонального АМ сигналу через смуговий ПВЧ.

4,а) Для дослідження використовується схема, що наведена на Рис.2.12.

В ній коливальні контури вже налаштована в резонанс на частоті 150 кГц.

Встановити оптимальне значення взаємної індуктивності M , яке розраховане в п.3,б, одночасно відповідно змінивши індуктивності $L - M$.

В схемі потрібно розімкнути перемикач К2, перемикач К1 повинен знаходитися в положення, коли сигнал на контур надходить з помножувача M_u .

Відкрити функціональний генератор і становити параметри, що забезпечують глибину модуляції $m = 80\%$ на частоті керуючого сигналу $F = 10$ кГц, як вказано на Рис.2.10.

В джерелі Г1 встановити носійну частоту $f_0 = 150$ кГц.

4,б) Спостерігати і зберегти осцилограми та АЧС відгуку смугового ПВЧ на вхідний тональний АМ сигнал при оптимальному зв'язку.

Активувати схему.

Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

Для спостереження АЧС вихідного сигналу в функції *Fourier* обрати *Output nodes* – 23. Інші параметри зостаються таким, які вказані на рис.2.11.

Натиснути кнопку Simulate. Спостерігати та зберегти АЧС вихідного сигналу у протоколі.

4,в) Спостерігати і зберегти осцилограми та АЧС відгуку смугового ПВЧ на вхідний тональний АМ сигнал при зв'язку, що відповідає приблизному співпадінню частот зв'язку системи зв'язаних контурів з частотами бокових коливань.

Перевести перемикач К1 в положення, коли сигнал на контур надходить з джерела Г1. Відкрити вимірювач АЧХ і ФЧХ.

Збільшуючи значення індуктивності зв'язку M (комбінацією клавіш «Shift M») і одночасно зменшуючи значення індуктивності $L - M$ (клавішою «L»), контролювати АЧХ коливальної системи за допомогою вимірювача АЧХ і ФЧХ.

Після кожної зміни індуктивностей потрібно активувати схему.

Досягти випадку, коли відстань між максимумами АЧХ буде приблизно дорівнювати 20 кГц.

Перевести перемикач К1 в положення, коли сигнал на контур надходить з перемножувача Му. Закрити вимірювач АЧХ і ФЧХ.

Активувати схему. Спостерігати на екрані осцилографа і зберегти у протоколі форму вихідного сигналу ПВЧ.

За допомогою функції *Fourier* спостерігати АЧС вихідного сигналу. Зберегти його у протоколі.

2.5. Використана література

[1] т.3, с.10–63;

[4] с.228–238, 88–97, 238–244;

[5] с.58–62, 558–561, 579–584;

[9] с.26–37.

2.6. Контрольні питання

1. В чому полягає суть спектрального методу аналізу проходження сигналів через лінійні кола?

2. Що таке аналітичний сигнал і як він пов'язаний з початковим фізичним?

3. В чому полягає суть спектрального методу аналізу для комплексної обвідної?

4. Як пов'язана спектральна густина АМ-коливання зі спектральною густиною керувального сигналу?

5. Як спотворюється прямокутний радіоімпульс при проходженні резонансного ПВЧ у випадку точного налаштування контуру в резонанс з частотою радіосигналу?

6. Чим визначається час зростання і час згасання коливань на виході резонансного ПВЧ?

7. Як правильно вибрати з точки зору допустимих спотворень прямокутного радіоімпульсу добротність коливального контуру резонансного ПВЧ?

8. Як спотворюється прямокутний радіоімпульс при проходженні резонансного ПВЧ у випадку розстроювання?

9. Як спотворюється прямокутний радіоімпульс при проходженні смугового ПВЧ?

10. Як визначити, використовуючи спектральний метод аналізу, відгук резонансного ПВЧ на дію коливання з тональною АМ?

11. Як спотворюються АМ-коливання при проходженні резонансного ПВЧ

у випадку точного налаштування контуру на несучу радіосигналу?

12. Що таке коефіцієнт демодуляції?

13. Як спотворюються АМ-коливання при проходженні резонансного ПВЧ у випадку розстроювання контуру?

14. Як спотворюються АМ-коливання при проходженні смугового ПВЧ?

Завдання 3. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДУЛЬОВАНИХ ЗА КУТОМ КОЛИВАНЬ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ПРОХОДЖЕННЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНІ ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВІ КОЛА

Мета—експериментальне дослідження амплітудно-частотних спектрів радіосигналів з частотною модуляцією. Дослідження змін параметрів частотно-модульованих коливань при проходженні через резонансний підсилювач високої частоти (ПВЧ).

3.1. Основні теоретичні відомості

3.1.1. В загальному випадку модульоване за кутом коливання може бути записане у вигляді:

$$u(t) = U_0 \cos[\psi(t)], \quad (3.1)$$

де $\psi(t)$ — миттєве значення фазового кута, який змінюється в часі під впливом керуючого сигналу.

В залежності від того, що є функцією керувального сигналу – $\varphi(t)$ або $\omega(t)$ – розрізняють *фазо-модульовані (ФМ)* і *частотно-модульовані (ЧМ)* коливання.

При ФМ за законом керувального сигналу $s(t)$ змінюється приріст фази радіосигналу, тобто

$$\varphi(t) = k \cdot s(t) + \varphi_0,$$

де k — коефіцієнт пропорційності.

ФМ сигнал у загальному випадку описують виразом

$$u(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0], \quad (3.2)$$

де ω_0 — носійна частота.

При ЧМ за законом того самого керувального сигналу $s(t)$ змінюється приріст частоти радіосигналу, тобто

$$\omega(t) = \omega_0 + k_1 s(t),$$

де k_1 —коефіцієнт пропорційності.

Оскільки кутова частота – це швидкість зміни у часі фазового кута, тобто

$$\omega(t) = d\psi(t)/dt,$$

тоді

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0.$$

Підставляючи цей вираз в (3.1), отримаємо

$$u(t) = U_0 \cos \left[\int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0 \right], \quad (3.3)$$

Формула (3.3) надає загальний запис для ЧМ сигналу.

3.1.2. Розглянемо випадок **тональної кутової модуляції**.

Якщо модуляція є фазовою і

$$s(t) = U \cdot \cos(\Omega t),$$

тоді

$$\varphi(t) = k \cdot U \cdot \cos(\Omega t) = \varphi_m \cos(\Omega t),$$

і радіосигнал має вигляд:

$$u_{\text{ФМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_m \cos(\Omega t) + \varphi_0], \quad (3.4)$$

де $\varphi_m = k \cdot U$ — максимальне значення фази, яке є пропорційним амплітуді керувальної напруги. φ_m ще називають **індексом кутової модуляції**.

Частота цього сигналу знаходиться із виразу:

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_0 - \varphi_m \Omega \cdot \sin(\Omega t) = \omega_0 - \omega_m \sin(\Omega t), \quad (3.5)$$

де $\omega_m = k \cdot U \cdot \Omega$ — амплітуда зміни частоти радіосигналу (максимальне відхилення частоти від ω_0), яку називають **девіацією частоти**.

Таким чином, при ФМ індекс модуляції, який характеризує максимальну зміну фази, змінюється пропорційно амплітуді керувальної напруги U і не залежить від частоти модуляції Ω ; девіація частоти змінюється прямо пропорційно і амплітуді U і частоті Ω керувальної напруги.

Якщо модуляція є частотною і $s(t) = U \cdot \cos(\Omega t)$, тоді

$$\omega(t) = \omega_0 + k_1 U \cdot \cos(\Omega t) = \omega_0 + \omega_m \cos(\Omega t),$$

де $\omega_m = k_1 U$ — максимальне відхилення частоти від ω_0 (**девіація частоти**).

Фазовий кут радіосигналу в цьому випадку визначається виразом:

$$\psi(t) = \omega_0 t + \frac{\omega_m}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi_0 = \omega_0 t + \varphi'_m \sin \Omega t + \varphi_0, \quad (3.6)$$

де $\varphi'_m = \omega_m / \Omega$ — **індекс кутової модуляції**, який характеризує максимальну зміну фази.

Сам радіосигнал має вигляд:

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + \varphi'_m \sin \Omega t + \varphi_0], \quad (3.7)$$

Таким чином, при ЧМ девіація частоти змінюється пропорційно амплітуді керувальної напруги U і не залежить від частоти модуляції Ω ; індекс модуляції, який характеризує максимальну зміну фази, змінюється прямо пропорційно

амплітуді U і обернено пропорційно частоті Ω керувальної напруги.

Порівнюючи вирази (3.4) і (3.7), можна зробити висновок, що ФМ- і ЧМ-коливання є близькими за своїми властивостями. Обидва види модуляції завжди існують спільно, оскільки наявність ФМ викликає появу ЧМ і навпаки. Ідентичність аналітичних виразів для ФМ- і ЧМ-коливань при тональній модуляції дозволяє аналізувати обидва види коливань, розглядаючи загальний для них вираз і вважаючи їх коливаннями, **модульованими за кутом**:

$$u_{\text{КМ}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + M \cdot \sin \Omega t + \varphi_0], \quad (3.8)$$

де амплітуда зміни фази M має назву **індекс кутової модуляції**. Тільки необхідно пам'ятати, що цей індекс дорівнює

$$\begin{aligned} \text{при ФМ} \quad & M_{\text{ФМ}} = \varphi_m = k \cdot U_0, \\ \text{при ЧМ} \quad & M_{\text{ЧМ}} = \varphi'_m = k_1 U_0 / \Omega. \end{aligned}$$

Розглядаючи випадок тональної кутової модуляції (КМ) і прийнявши для спрощення початкові фази керувального і носійного коливань рівними нулю, отримуємо

$$\begin{aligned} u_{\text{КМ}}(t) &= U_0 \cos[\omega_0 t + M \cdot \sin \Omega t + \varphi_0] = \\ &= U_0 \cos(M \cdot \sin \Omega t) \cdot \cos(\omega_0 t) - U_0 \sin(M \cdot \sin \Omega t) \cdot \sin(\omega_0 t), \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.1.3. При неглибокій кутовій модуляції ($M \ll 1$) можливо вважати, що $\cos(M \cdot \sin \Omega t) \approx 1$, $\sin(M \cdot \sin \Omega t) \approx M \cdot \sin(\Omega t)$.

Тоді маємо:

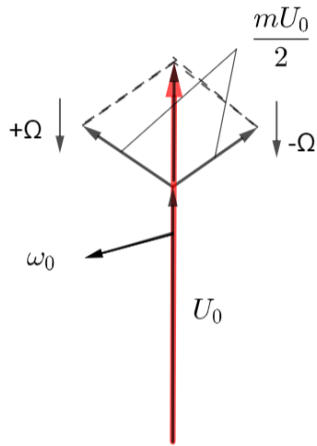
$$\begin{aligned} u_{\text{КМ}}(t) &= U_0 \cos(\omega_0 t) - U_0 M \cdot \sin \Omega t \cdot \sin(\omega_0 t) = \\ &= U_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{MU_0}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t] - \frac{MU_0}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Бачимо, що **амплітудний спектр** при тональній кутовій модуляції (3.10) практично повторює амплітудний спектр тональних АМ коливань (2.13), як показано на рис. 3.1 Ширина частотного спектру в обох випадках однакова і дорівнює $\Delta\omega = 2\Omega$. Але **фазові спектри** при кутовій і амплітудній модуляціях відмінні — фаза нижнього бічного коливання при кутовій модуляції відрізняється від фази цього ж коливання при амплітудній модуляції на 180° .

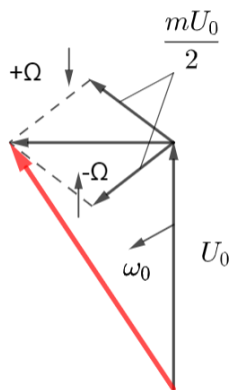
Векторна діаграма при кутовій модуляції з малим індексом відрізняється від векторної діаграми АМ-коливань протилежним напрямком вектору нижнього бічного коливання (див.рис. 3.2). В результаті, модуляційний вектор (сума векторів усіх бічних коливань) завжди є перпендикулярним до вектору носійного коливання.

При тональній кутовій модуляції (КМ) за характером коливань неможливо визначити, який вид коливань—ФМ або ЧМ—має місце. Обидва коливання

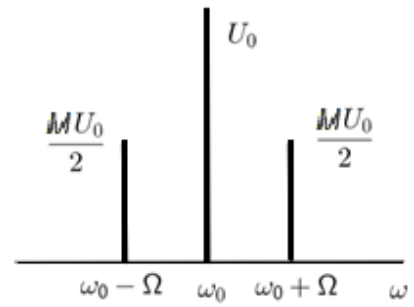
мають однакову форму і мають однаковий вигляд векторної діаграми (рис. 3.2,б)



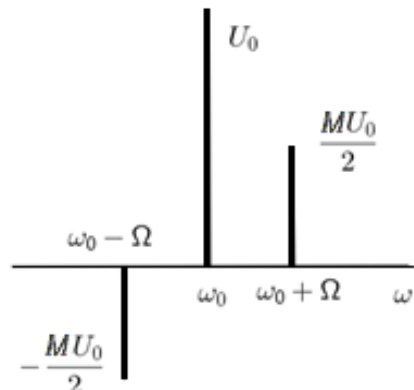
а



б



а



б

Рис.3.1. Спектри тональних АМ (а) та КМ (б) сигналів

Рис.3.2. Векторні діаграми тональних АМ (а) та КМ (б) сигналів

Тільки під час зміни частоти керувального гармонічного сигналу, або у випадку, коли керувальний сигнал має складну форму, можливо визначити різницю структури радіосигналів при ФМ і ЧМ. Низьким частотам спектра керувального сигналу при ФМ відповідають дуже малі значення девіації частоти $\omega_m = k \cdot U \cdot \Omega$, а при ЧМ — дуже великі значення індексу кутової модуляції $M = k_1 U_0 / \Omega$.

3.1.4. Для випадку глибокої кутової модуляції ($M \gg 1$) складні періодичні функції $\cos[M \cdot \sin(\Omega t)]$ і $\sin[M \cdot \sin(\Omega t)]$ у виразі (3.9) необхідно розкласти в ряди Фур'є, коефіцієнтами яких є Бесселеві функції:

$$\cos(M \cdot \sin \Omega t) = J_0(M) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(M) \cos(2n \Omega t), \quad (3.11)$$

$$\sin(M \cdot \sin \Omega t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(M) \sin[(2n-1) \Omega t],$$

де $J_n(M)$ — функція Бесселя першого роду n -го порядку від дійсного

аргументу M .

З урахуванням (3.11) вираз (3.9) приймає вигляд:

$$u_{\text{КМ}}(t) = U_0 \cdot J_0(M) \cdot \cos(\omega_0 t) + U_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_n(M) \cdot \left\{ \cos[(\omega_0 + n\Omega)t] + (-1)^n \cos[(\omega_0 - n\Omega)t] \right\} \quad (3.12)$$

Як видно з (3.12), навіть при тональній кутовій модуляції із значним індексом M амплітудний спектр радіосигналу є нескінченно широким — складається з нескінченного числа коливань бічних частот, пари яких розташовані симетрично відносно коливання носійної частоти. Верхні і нижні коливання з непарними номерами протифазні.

У зв'язку з тим, що при незмінному значенні індексу кутової модуляції M значення функцій Бесселя $J_n(M)$, які визначають амплітуди бокових коливань, при значному збільшенні порядку n швидко зменшуються, частотний спектр радіосигналу з кутовою модуляцією можливо вважати обмеженим. Ширину спектру, зазвичай, визначають виразом:

$$\Delta\omega_{\text{КМ}} = 2 \cdot (M + 1) \cdot \Omega. \quad (3.13)$$

З (3.13) випливає, що для неглибокої КМ ($M \ll 1$) ширина спектру дорівнює

$$\Delta\omega_{\text{КМ}} = 2 \cdot \Omega = \Delta\omega_{\text{АМ}},$$

а для глибокої кутової модуляції ($M \gg 1$)

$$\Delta\omega_{\text{КМ}} = 2 \cdot M \cdot \Omega.$$

3.1.5. Оскільки значення M може складати десятки і сотні радіан, частотний спектр модульованих за кутом коливань значно ширше спектра АМ-коливань. Це є недоліком кутової модуляції, що змушує використовувати її, в основному, у діапазоні УКХ, який є найбільш протяжним за частотою, і дозволяє виділити необхідну смугу частот для окремої радіостанції з кутовою модуляцією.

Широкий частотний спектр КМ радіосигналів різко ускладнює вид векторної діаграми для випадків $M \gg 1$. Діаграма може приймати вельми химерні форми і при врахуванні нескінченної кількості пар бокових коливань дозволяє отримати вектор незмінної довжини U_0 , який розхитується на площині в межах великого кута. Апаратурне обмеження ширини частотного спектру КМ коливань не дозволяє зберегти незмінність довжини сумарного вектору при його розхитуванні. В результаті, окрім корисної кутової модуляції, має місце паразитна амплітудна модуляція.

При розширенні спектра керувального сигналу структура спектра КМ радіосигналу суттєво ускладнюється за рахунок появи бічних коливань з комбінаційними частотами. Окрім цього, відбувається зміна амплітуд бічних

коливань, оскільки вони визначаються добутком функцій Бесселя від різних аргументів.

У зв'язку з тим, що функції Бесселя є знакозмінними, при зміні індексу кутової модуляції (навіть у випадку тональної модуляції) амплітуди коливань в спектрі радіосигналу будуть змінюватися. При певних значеннях індексу кутової модуляції в складі спектру радіосигналу можуть бути відсутні носійне коливання або деякі пари бічних коливань.

Оскільки ширина спектра КМ коливань є пропорційною індексу кутової модуляції M , а він, в свою чергу, є пропорційним амплітуді керувального сигналу, тому ширина спектра є пропорційною цій амплітуді. Ширина частотного спектру ФМ-коливань є пропорційною частоті керувального сигналу, а для ЧМ-коливань — від неї не залежить, оскільки визначається девіацією частоти:

$$\Delta\omega_{\text{ЧМ}} = 2 \cdot M \cdot \Omega = 2 \frac{\omega_m}{\Omega} \cdot \Omega = 2\omega_m = \text{const.} \quad (3.14)$$

КМ коливання, за певних умов, є значно завадостійкішими у порівнянні з АМ-коливаннями. Виграш в стійкості до завад зростає при зростанні девіації частоти ЧМ-коливання, тобто з розширенням частотного спектру останнього.

У випадку повільних змін в часі частоти ЧМ-коливання, тобто при виконанні умови:

$$\frac{\omega_m}{\Delta\omega} \cdot \frac{\Omega}{\Delta\omega} \ll 1, \quad (3.15)$$

де ω_m — девіація частоти ЧМ-коливання, Ω — частота керувального сигналу, $\Delta\omega$ — смуга пропускання кола, аналіз проходження ЧМ-коливань через лінійні кола, зазвичай, виконується за допомогою методу миттєвих частот. При цьому повинна бути відома передаточна функція лінійного кола

$$\dot{K}(\omega) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}. \quad (3.16)$$

Використовуючи метод миттєвих частот, обвідну відгуку лінійного кола визначають за обвідною впливу як:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_{\text{вх}}(t) \cdot K(\omega), \quad (3.17)$$

а паразитний приріст частоти ЧМ-коливань, що порушує закон корисної модуляції, як

$$\omega_1(t) = \frac{d[\varphi(\omega)]}{dt}. \quad (3.18)$$

Зведемо у порівняльну Табл. 3.1 параметри ФМ і ЧМ сигналів, що дозволить зрозуміти їх схожість і відмінності.

Таблиця 3.1. Параметри ФМ та ЧМ сигналів

Модуляція	Параметр		
	ω_m	M	$\Delta\omega$
ФМ	$kU\Omega$	$\varphi_m = kU$	$2(M+1)\Omega$
ЧМ	k_1U	$\varphi'_m = k_1U/\Omega$	$2\omega_m = \text{const}$

3.1.6. Розглянемо проходження коливання з тональною ЧМ через інвертувальний резонансний ПВЧ, коефіцієнт передачі якого визначається виразом:

$$\dot{K}(\omega) = -\frac{K_p}{1 + j\xi_e(\omega)} = -\frac{K_p}{\sqrt{1 + \xi_e^2(\omega)}} \cdot e^{-j\varphi(\omega)} = K(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)}, \quad (3.19)$$

де K_p — коефіцієнт передачі ПВЧ на резонансній частоті його контуру, $K(\omega)$ — АЧХ, $\varphi(\omega) = \text{arctg}(\xi_e) = \text{arctg}\left(2Q_e \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p}\right)$ — ФЧХ коефіцієнту передачі,

$\xi_e(\omega) = 2Q_e \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p}$ — узагальнене розстроювання коливальної системи ПВЧ.

При тональній частотній модуляції частота носійного коливання змінюється за законом $\omega(t) = \omega_0 + \omega_m \cdot \cos(\Omega t)$, а ЧМ-коливання може бути записане так:

$$U_{\text{вх}}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + M \cdot \sin(\Omega t)], \quad \text{де } M = \omega_m / \Omega. \quad (3.20)$$

Вираз для узагальненого розстроювання контуру можна переписати наступним чином

$$\xi_e = 2Q_e \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p} = \tau_e (\omega - \omega_p) = \tau_e [\omega_0 + \omega_m \cos(\Omega t) - \omega_p].$$

де $\tau_e = 2Q_e / \omega_p$ — постійна часу контуру.

У випадку точного налаштування контуру на середню частоту радіосигналу $\omega_0 = \omega_p$ маємо:

$$\xi_e = \tau_e \omega_m \cos(\Omega t).$$

При цьому вираз для коефіцієнту передачі ПВЧ приймає вигляд:

$$\dot{K}(\omega) = -\frac{K_p}{\sqrt{1 + (\tau_e \omega_m)^2 \cos^2(\Omega t)}} \cdot e^{-j \text{arctg}[\tau_e \omega_m \cos(\Omega t)]} = K(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (3.21)$$

Амплітуда відгуку інвертувального резонансного ПВЧ знаходиться наступним чином:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_0 K(\omega) = - \frac{K_p U_0}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}(\tau_e \omega_m)^2 + \frac{1}{2}(\tau_e \omega_m)^2 \cos(2\Omega t)}} \dots \quad (3.22)$$

Отже, відгук змінюється в часі з подвоєною частотою керувального сигналу. Останнє може бути легко доведено також графічно (Рис. 3.3).

Смуга пропускання частотно-вибіркового кола вибрана рівною ширині частотного спектру радіосигналу $2\omega_m$.

Паразитний приріст частоти знаходиться з виразу

$$\omega_1(t) = \frac{d[\varphi(\omega)]}{dt} = \frac{\tau_e \omega_m \Omega \cdot \sin(\Omega t)}{1 + [\tau_e \omega_m \cos(\Omega t)]^2} \dots \quad (3.23)$$

У зв'язку з тим, що, зазвичай $\tau_e \omega_m \ll 1$, можливо приблизно вважати що

$$\frac{1}{1 + [\tau_e \omega_m \cos(\Omega t)]^2} \approx 1 - [\tau_e \omega_m \cos(\Omega t)]^2 = 1 - (\tau_e \omega_m)^2 + [\tau_e \omega_m \sin(\Omega t)]^2 \dots$$

Тоді маємо:

$$\omega_1(t) \approx \tau_e \omega_m \Omega \cdot \left\{ \left[1 - \frac{1}{4}(\tau_e \omega_m)^2 \right] \sin(\Omega t) - \frac{1}{4}(\tau_e \omega_m)^2 \sin(3\Omega t) \right\}.$$

З отриманого виразу випливає, що у складі відгуку резонансного ПВЧ з'являється складова з потроєною частотою керувального сигналу, тобто з'являються нелінійні спотворення, які проявляються на виході частотного детектора радіоприймача.

Таким чином, підсилений вихідний сигнал резонансного ПВЧ при налаштуванні його контуру на середню частоту ЧМ-коливання, відрізняється від вхідної дії наявністю паразитних амплітудної і частотної модуляцій. Із зростанням добротності контуру спотворення також зростають.

3.1.7. При проходженні ЧМ-коливань через смуговий ПВЧ спотворення сигналу будуть меншими, якщо встановлено величини зв'язку, що дорівнюють критичному або більші за критичний. Останнє пояснюється більш широкою смугою пропускання системи зв'язаних контурів, у порівнянні з одиночним контуром.

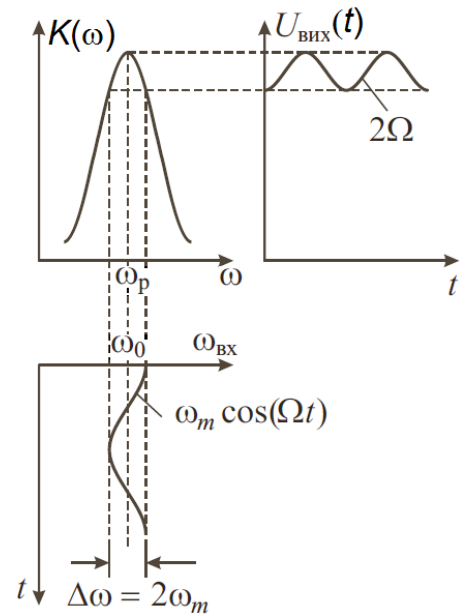


Рис.3.3. Відгук резонансного ПВЧ, $\omega_0 = \omega_p$

Якщо розстроїти коливальну систему резонансного ПВЧ, розташувавши середню частоту ЧМ-коливання на схилі його резонансної кривої, тоді при тій же ширині спектру впливу з'являється більш глибока амплітудна модуляція відгуку (рис. 3.4). Неважко зрозуміти, що в цьому випадку обвідна відгуку пульсує з частотою керувального сигналу Ω .

Ця обставина дозволяє використовувати розстроєний контур ПВЧ для перетворення виду модуляції — ЧМ перетворюється в АМ. Обвідна отриманих АМ-коливань спотворена, що пояснюється нелінійністю схилу резонансної кривої. Спотворення зменшуються при зменшенні девіації частоти.

Одночасно з появою АМ у відгуку також зберігається ЧМ (смуговий ПВЧ працює у вимушеному режимі).

3.1.8. При швидких змінах частоти радіосигналу його спотворення в частотно-вибіркових колах зростають. Через інерційність коливальних систем, параметри їх відгуку не встигають змінюватися пропорційно зі зміною параметрів входної дії. Частотна характеристика ПВЧ при цьому видозмінюється.

Зокрема, коли входною дією на резонансний ПВЧ є коливання з частотою, яка змінюється у часі за лінійним законом

$$\omega(t) = \omega_0 + 2\pi k_\omega t,$$

тоді функція $\psi(t)$ в (3.1) дорівнює

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t + \pi k_\omega t^2,$$

де коефіцієнт k_ω – швидкість наростання частоти має розмірність $[1/c^2]$.

В цьому випадку частотна характеристика ПВЧ стає асиметричною і її максимум зміщується у бік зміни частоти (тобто залежить від знаку k_ω). Смуга пропускання резонансного ПВЧ розширюється, максимальне значення коефіцієнту передачі зменшується. На схилі частотної характеристики з'являються осциляції, частоти яких, в міру віддалення від резонансної частоти, зростають. Останнє пояснюється биттям між власними коливаннями контуру резонансного ПВЧ, які мають постійну частоту, і вимушеними коливаннями,

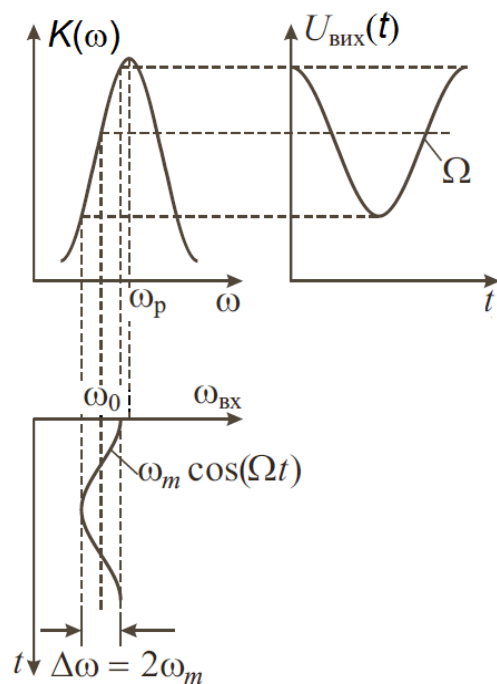


Рис.3.4. Відгук резонансного ПВЧ, $\omega_0 \neq \omega_p$

частота яких лінійно змінюється. Власні коливання з'являються у контурі, коли через нього проходить вхідна дія із змінною частотою.

Для того, щоби можна було знехтувати впливом швидкості зміни частоти k_{ω} на форму частотної характеристики, значення цієї швидкості повинне задовольняти умові

$$k_{\omega} \leq (0.7 \dots 0.8) (\Delta f)^2,$$

де Δf — ширина смуги пропускання кола, а коефіцієнти відповідають допустимому розширенню смуги пропускання контуру на (3 ... 5)%.

3.2. Математичне моделювання

Приклад 1. Побудова АЧС сигналу з тональною ЧМ.

Формуються векторні функції, що будуть далі застосовані. Вони створюють масиви даних вказаної довжини: масив частот, на яких знаходяться гармоніки ЧМ сигналу; масиви модулів амплітуд гармонік та їх початкових фаз

Програмування в Mathcad

$$FG(Fk, NG) := \left(\begin{array}{l} G_{NG} \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 1..NG \\ \quad \left| \begin{array}{l} G_{NG-n} \leftarrow -n \cdot Fk \\ G_{NG+n} \leftarrow n \cdot Fk \end{array} \right. \\ \text{return } G \end{array} \right)$$

абсолютні значення
амплітуд гармонік

$$AG(m, NG) := \left(\begin{array}{l} G_{NG} \leftarrow U0 \cdot J_n(0, m) \\ \text{for } n \in 1..NG \\ \quad \left| \begin{array}{l} G_{NG-n} \leftarrow U0 \cdot zA(n) \cdot J_n(n, m) \\ G_{NG+n} \leftarrow U0 \cdot J_n(n, m) \end{array} \right. \\ \text{return } G \end{array} \right)$$

початкові фази гармонік

$$\varphi AG(m, NG) := \left(\begin{array}{l} \text{for } n \in 0..2 \cdot NG \\ \quad G_n \leftarrow \arg(AG(m, NG)_n) \\ \text{return } G \end{array} \right)$$

$$zA(in) := \left| \begin{array}{l} 1 \text{ if } \text{mod}(in, 2) = 0 \\ -1 \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

частоти гармонік

$$fG(Fk, F0, NG) := FG(Fk, NG) + F0$$

модуль амплітуд
гармонік

$$AGS(m, NG) := \left(\begin{array}{l} \text{for } n \in 0..2 \cdot NG \\ \quad G_n \leftarrow |AG(m, NG)_n| \\ \text{return } G \end{array} \right)$$

Параметрами цих функцій є:

- Fk – частота керувального сигналу,
- m – ідекс модуляції,
- $F0$ – носійна частота,
- NG – значення, що визначає загальну кількість гармонік $2 \cdot NG + 1$.

Функція $FG(Fk,NG)$ формує масив частот від $-NG \cdot kF$ до $NG \cdot Fk$.

Функція $fG(Fk,F0,NG)$ формує масив частот АЧС тонального ЧМ сигналу від $-NG \cdot Fk + F0$ до $NG \cdot Fk + F0$.

Функція $zA(in)$ повертає одне значення $(-1)^{in}$.

Функція $AG(m,NG)$ повертає абсолютні значення (зі знаками) амплітуд АЧС.

Функція $AGS(m,NG)$ повертає модулі амплітуд гармонік АЧС.

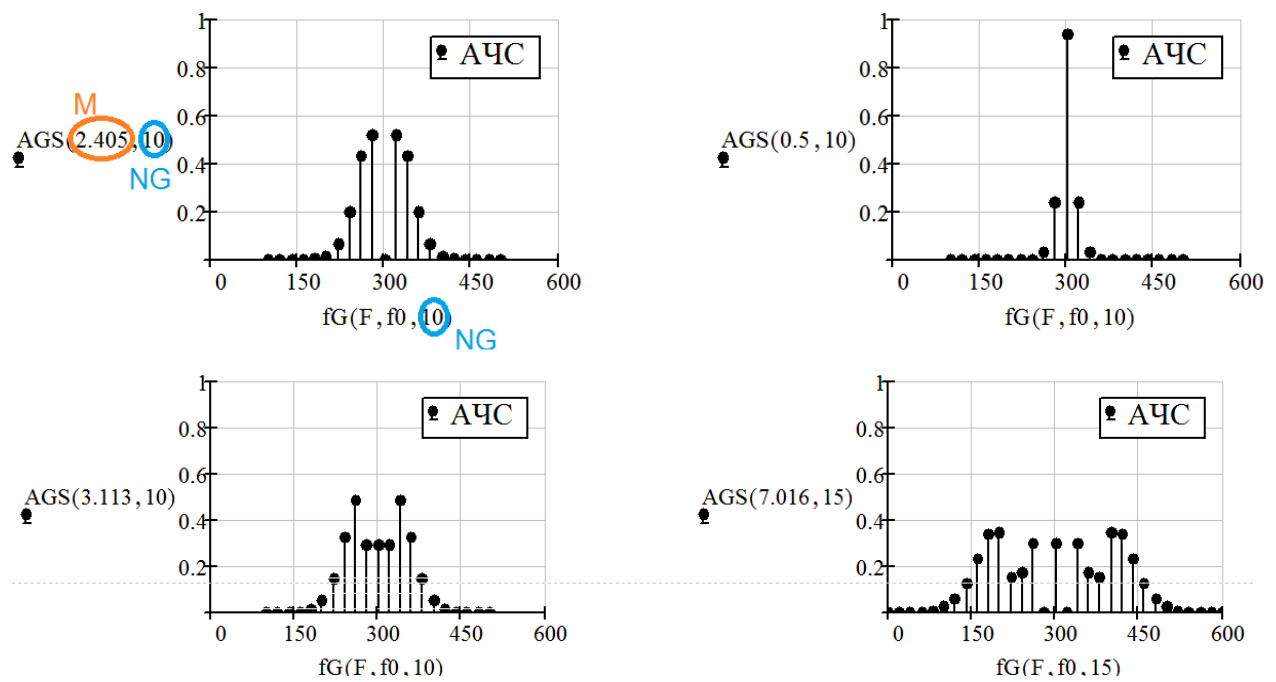
Функція $\varphi AG(m,NG)$ повертає початкові фази гармонік.

Виконаємо дослідження АЧС тонального ЧМ сигналу с параметрами: амплітуда $U_0 = 1$ В, носійна частота $f_0 = 300$ кГц, частота керувального сигналу $F = 20$ кГц.

Індекс модуляції M є змінною величиною.

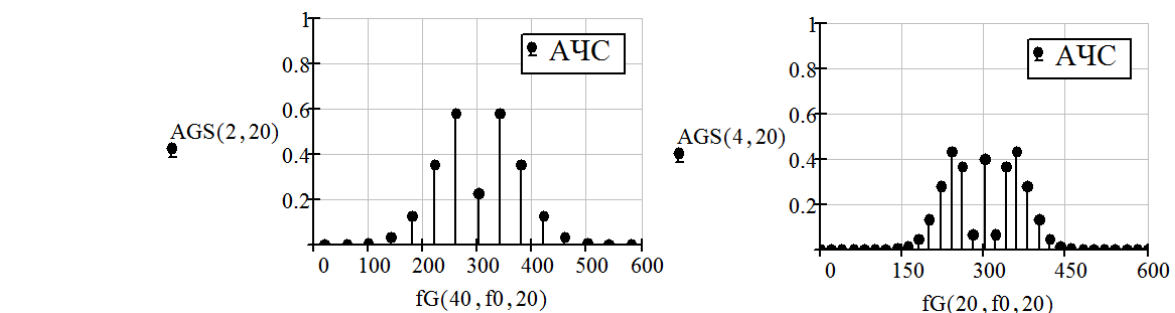
Програмування в Mathcad

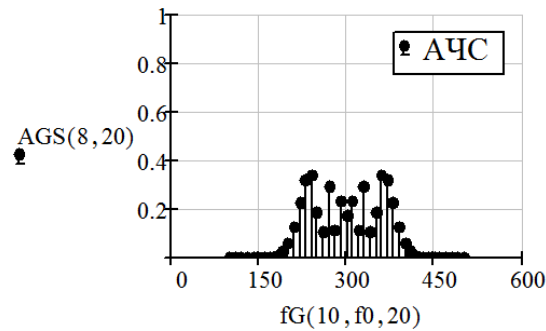
$U_0 := 1$ В $f_0 := 300$ кГц $F := 20$ кГц



Ще один експеримент. Будемо збільшувати значення індекса модуляції M за рахунок зменшення частоти керуючого сигналу F .

Програмування в Mathcad





Приклад 2. Дослідити проходження сигналу з тональною ЧМ резонансним ПВЧ з параметрами: резонансна частота $f_p = 150$ кГц, добротність $Q_e = 35$, коефіцієнт підсилення на резонансній частоті $K_p = 5$.

Задані параметри тонального ЧМ сигналу: амплітуда $U_0 = 1$ В, носійна частота $f_0 = 150$ кГц, частота керувального сигналу $F = 300$ Гц.

Значення індексу модуляції M визначається з умови, що ширина спектра сигналу на виході ПВЧ приблизно дорівнює ширині смуги пропускання Π коливального контуру ПВЧ (можна припустити, що ширина АЧС вхідного ЧМ сигналу має таке ж значення). Відповідно, девіація частоти f_m дорівнює половині смуги пропускання: $\Pi/2$.

Керувальний сигнал має вигляд

$$s(t) = 2\pi \cdot f_m \cdot \cos(2\pi Ft).$$

Сигнал на виході ПВЧ будемо визначати для трьох значень розстроювання частоти $\Delta f = f_0 - f_p = 0; 0.5\Pi; \Pi$.

Програмування в Mathcad

$$\begin{aligned}
 & f_p := 150 \text{ кГц} \quad Q := 35 \quad K_p := 5 \quad f_0 := 150 \text{ кГц} \quad F := 0.3 \text{ кГц} \quad U_0 := 1 \text{ В} \\
 & \Pi := \frac{f_p}{Q} = 4.286 \text{ кГц} \quad f_m := 0.5 \cdot \Pi = 2.143 \text{ кГц} \quad M := \frac{f_m}{F} = 7.143 \quad \tau_c := \frac{2 \cdot Q}{f_p} = 0.467 \\
 & s(t) := f_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)
 \end{aligned}$$

Розв'язок

Зміна фази керувального сигналу пов'язана із зміною частоти так

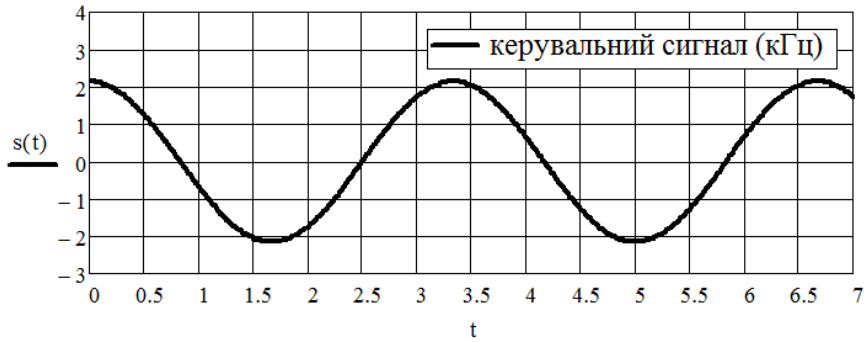
$$\varphi_1(t) = \int_0^t s(t) dt = M \sin(2\pi Ft).$$

Вхідний тональний ЧМ сигнал

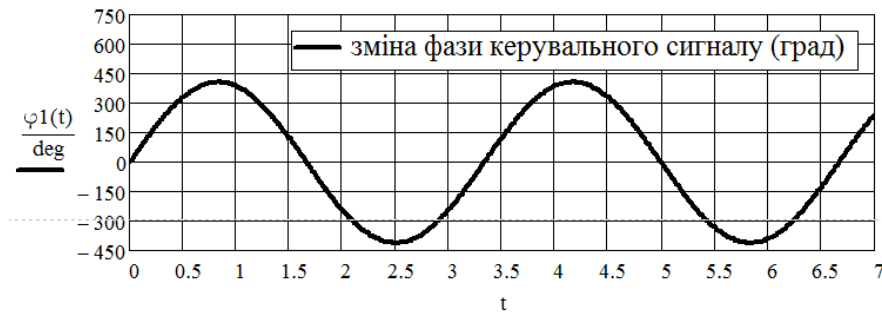
$$u_{ax}(t) = U_0 \cos[2\pi f_0 t + M \sin(2\pi Ft)].$$

Програмування в Mathcad

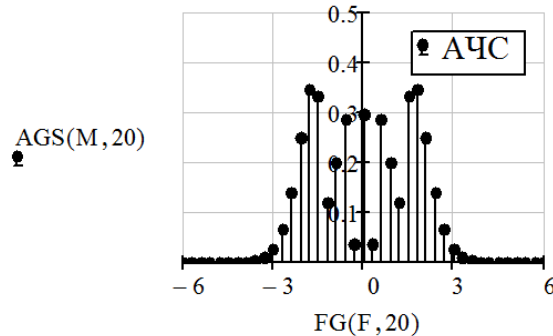
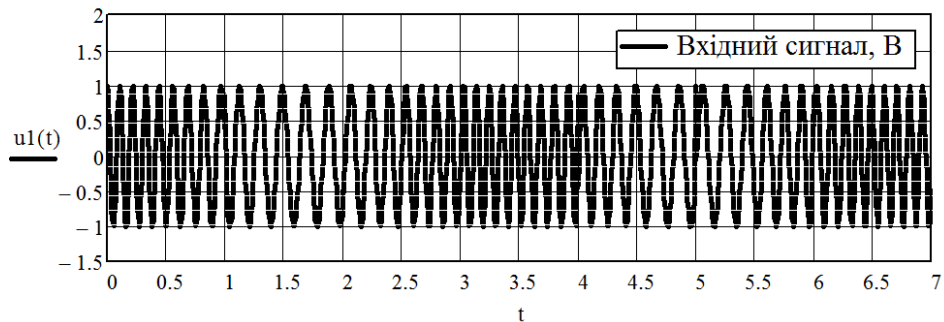
$$s(t) := f_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)$$



$$\varphi_1(t) := M \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)$$



$$u_1(t) := U_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + M \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t))$$



Враховуючи вузькосмуговість резонансного ПВЧ, можемо записати вираз коефіцієнту передачі для тональної ЧМ

$$\dot{K}(t, \Delta f) = \frac{K_p}{1 + j\tau \cdot [\Delta f + f_m \cos(2\pi Ft)]}, \text{ де } \tau = 2 \frac{Q_e}{f_p}.$$

Ця формула містить величину розстроєння $\Delta f = f_0 - f_p$, яку можна змінювати в дослідженнях відгуку резонансного ПВЧ.

АЧХ коефіцієнта передачі

$$K(t, \Delta f) = \frac{K_p}{\sqrt{1 + \tau^2 \cdot [\Delta f + f_m \cos(2\pi Ft)]^2}} =$$

$$= \frac{K_p}{\sqrt{1 + \tau^2 \cdot (\Delta f)^2 + \tau^2 \cdot \frac{f_m^2}{2} + 2\tau^2 \cdot \Delta f \cdot f_m \cos(2\pi Ft) + \tau^2 \cdot \frac{f_m^2}{2} \cos(2 \cdot 2\pi Ft)}}$$

ФЧХ коефіцієнта передачі

$$\varphi_K(t, \Delta f) = -\arctg[\tau \cdot \Delta f + \tau \cdot f_m \cos(2\pi Ft)].$$

Обвідна відгуку резонансного ПВЧ співпадає з АЧХ коефіцієнта передачі

$$U_2(t, \Delta f) = K(t, \Delta f).$$

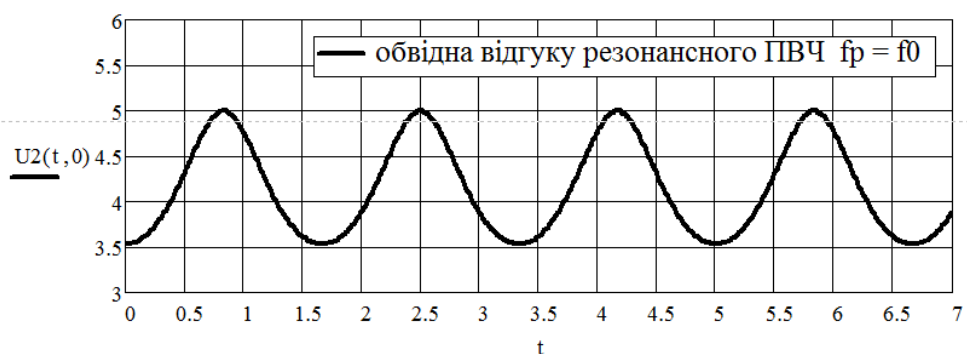
Програмування в Mathcad

$$MK(t, \Delta f) := \frac{K_p}{\sqrt{1 + \tau^2 \cdot (\Delta f^2 + 0.5 \cdot f_m^2) + \tau^2 \cdot (2 \cdot \Delta f \cdot f_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) + 0.5 \cdot f_m^2 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot F \cdot t))}}$$

$$\varphi_k(t, \Delta f) := -\text{atan}[\tau \cdot (\Delta f + f_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t))]$$



$$U_2(t, \Delta f) := MK(t, \Delta f)$$



Зміна фази у відгуку резонансного ПВЧ

$$\varphi_2(t, \Delta f) = \varphi_1(t) + \varphi_K(t, \Delta f).$$

Зміна частоти у відгуку резонансного ПВЧ

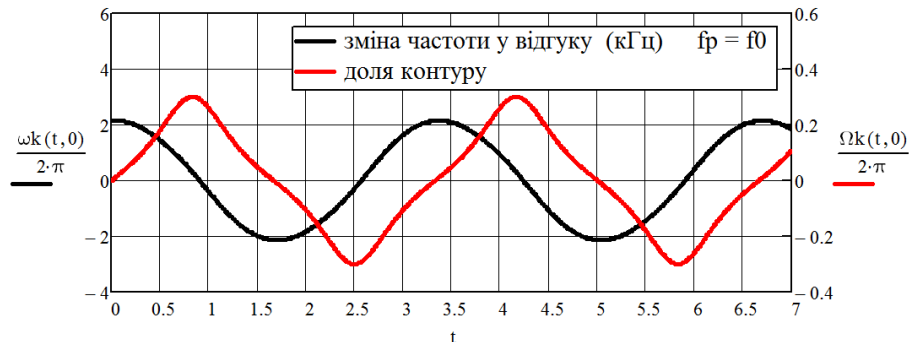
$$\omega_K(t, \Delta f) = \frac{d}{dt} [\varphi_K(t, \Delta f)] = \frac{d}{dt} [M \cdot \sin(2\pi Ft) - \arctg[\tau \cdot \Delta f + \tau \cdot f_m \cos(2\pi Ft)]],$$

$$\omega_K(t, \Delta f) = 2\pi f_m \cos(2\pi Ft) + \frac{2\pi F \tau \cdot f_m \sin(2\pi Ft)}{1 + [\tau \cdot \Delta f + \tau \cdot f_m \cos(2\pi Ft)]^2}.$$

Програмування в Mathcad

$$\Omega_k(t, \Delta f) := \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot \tau_c \cdot f_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)}{1 + [\tau_c \cdot (\Delta f + f_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t))]^2} \quad \omega_k(t, \Delta f) := 2 \cdot \pi \cdot s(t) + \Omega_k(t, \Delta f)$$

$$\omega_2(t, \Delta f) := 2 \cdot \pi \cdot f_0 + \omega_k(t, \Delta f)$$



Миттєва частота у відгуку резонансного ПВЧ змінюється так

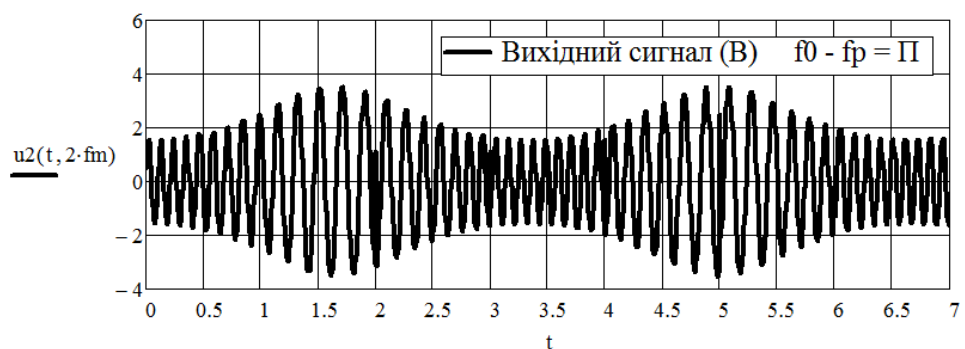
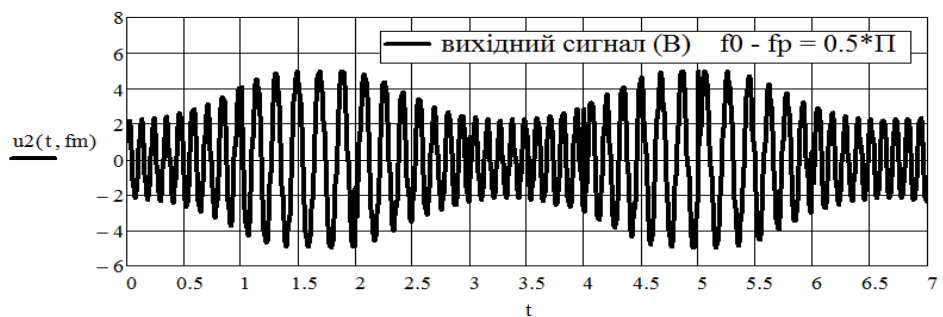
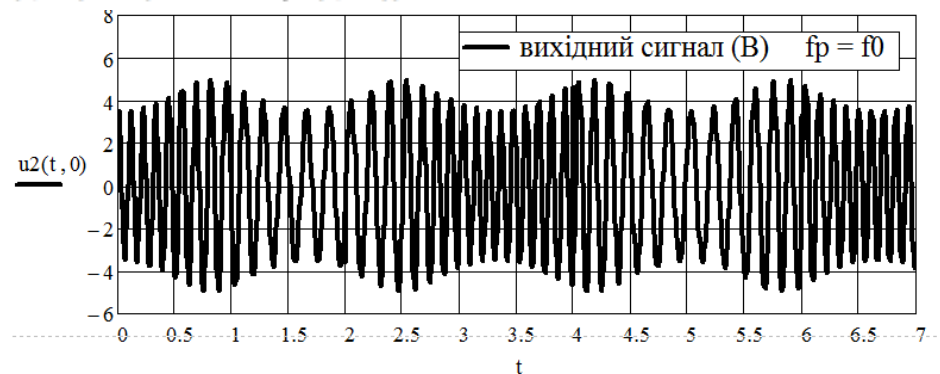
$$\omega_2(t, \Delta f) = 2\pi f_0 + \omega_k(t, \Delta f).$$

Тепер вихідний сигнал резонансного ПВЧ має вигляд

$$u_{\text{вих}}(t, \Delta f) = U_2(t, \Delta f) \cos[2\pi f_0 t + \varphi_2(t, \Delta f)].$$

Програмування в Mathcad

$$u_2(t, \Delta f) := U_2(t, \Delta f) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_2(t, \Delta f))$$

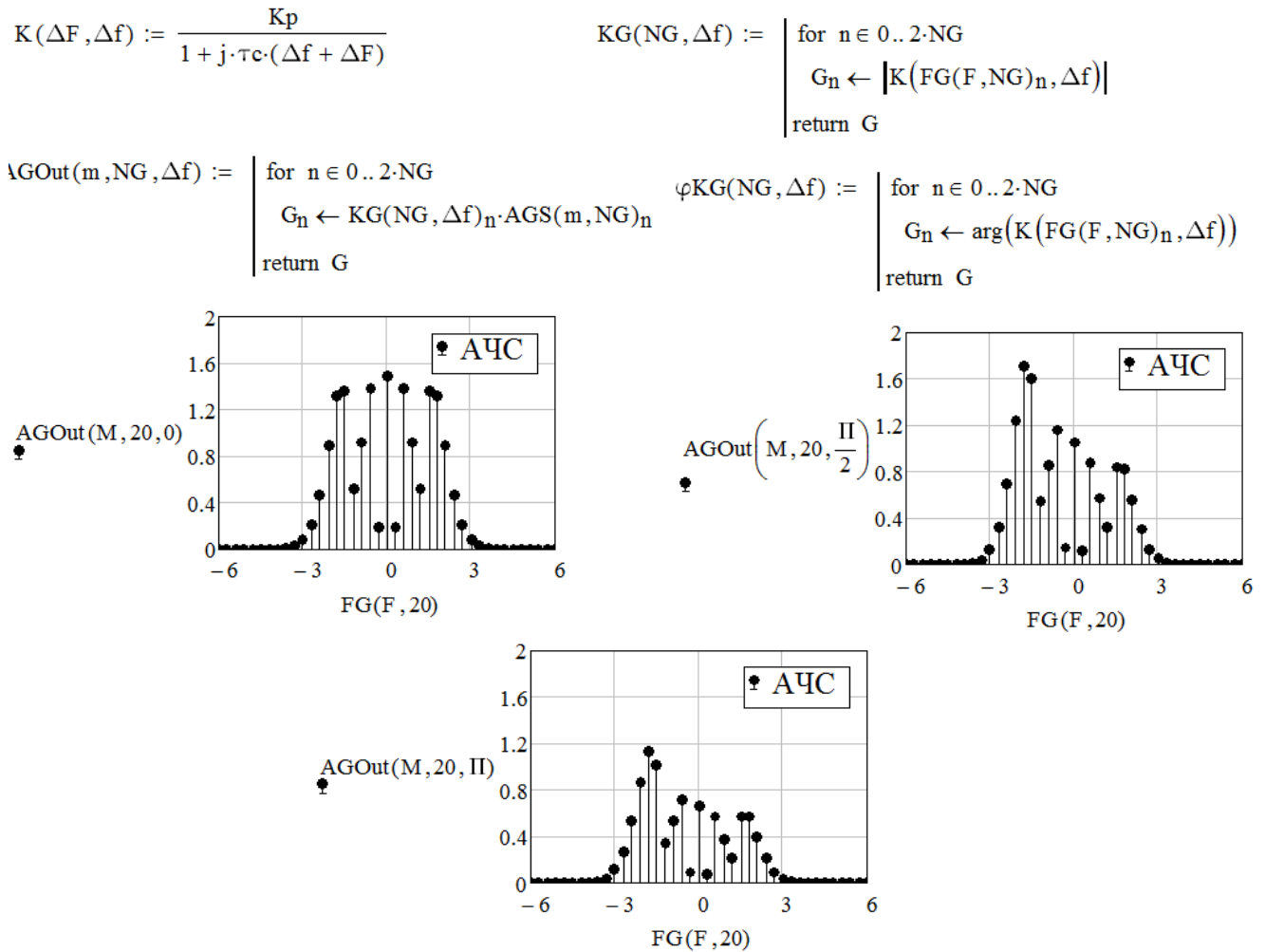


При зміщенні носійної частоти відносно резонансної ($\Delta f \neq 0$), частота зміни обвідної співпадає з частотою керувального сигналу.

Бачимо, що відгук резонансного ПВЧ, зберігаючи властивості ЧМ-сигналу, додатково набуває форму амплітудно-модульованого.

Розрахуємо АЧС сигналу на виході резонансного ПВЧ у звичайний спосіб.

Програмування в Mathcad



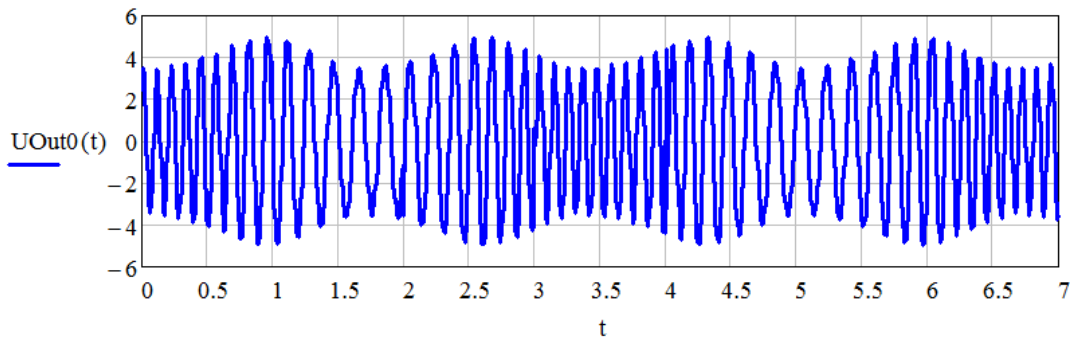
Бачимо, що для випадку, коли резонансна і носійна частоти співпадають, тоді, як і очікувалося, отриманий АЧС є симетричним відносно носійної частоти.

Перевірка. Маючи АЧС і ФЧС вхідного сигналу та АЧХ і ФЧХ резонансного ПВЧ, розрахуємо сигнал на виході резонансного ПВЧ.

Програмування в Mathcad

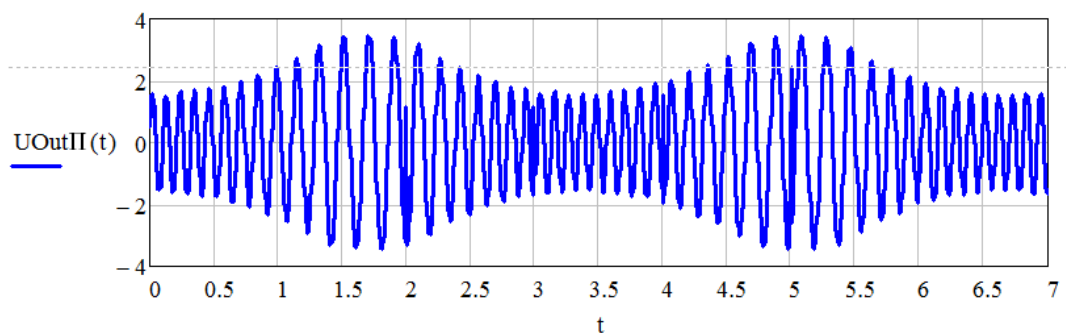
$$fG0 := fG(F, f0, 10) \quad \varphi AG0 := \varphi AG(M, 10) \quad \varphi K0 := \varphi KG(10, 0) \quad AGOut0 := AGOut(M, 10, 0)$$

$$UOut0(t) := \sum_{n=0}^{20} (AGOut0_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot fG0_n \cdot t + \varphi AG0_n + \varphi K0_n))$$



$$\varphi_{K\Pi} := \varphi_{KG}(10, \Pi) \quad AG_{Out\Pi} := AG_{Out}(M, 10, \Pi)$$

$$U_{Out\Pi}(t) := \sum_{n=0}^{20} (AG_{Out\Pi_n} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot fG_{0n} \cdot t + \varphi_{AG_{0n}} + \varphi_{K\Pi_n}))$$



Таким чином, за допомогою спектрального аналізу отримали такі самі сигнали, що і за допомогою аналізу змін частоти і фази сигналу з тональною ЧМ при проходженні через резонансний ПВЧ.

3.3. Домашнє завдання

1. Записати аналітичний вираз радіосигналу $u(t)$ з тональною ЧМ за законом $\Delta f(t) = f_m \cos(2\pi Ft)$ і відповідний йому ряд Фур'є, використовуючи наступні позначення: U_0 — амплітуда носійного коливання, f_0 (або ω_0) — носійна частота, F (або Ω) — частота керувального сигналу, φ_0 — початкова фаза носійного коливання, $M = f_m/F = \omega_m/\Omega$ — індекс кутової модуляції, f_m (або ω_m) — девіація частоти.

2. Розрахувати і побудувати в масштабі АЧС цього сигналу для випадку: $U_0 = 1$ В, $f_0 = 300$ кГц, $F = 20$ кГц, $f_m = 48.1$ кГц. Продумати відповіді на питання: до яких змін спектра сигналу призведе зміна кожного з цих параметрів при інших незмінних? Для розрахунку спектру можна користуватися значеннями функцій Бесселя, що наведені в додатку А, або розрахувати їх за допомогою готової програми.

3. Для послідовного коливального контуру з резонансною частотою 150 кГц та індуктивністю 2 мГн розрахувати опір втрат за формулою

$$R = 35 - (-1)^N \cdot \text{ціла частина} \left(\frac{N}{2} \right) \text{ Ом,}$$

де N – номер студента у списку групи.

Розрахувати еквівалентну добротність і ширину смуги пропускання.

4. Розрахувати максимальну допустиму швидкість зміни частоти радіосигналу k_ω для контуру резонансного ПВЧ при двох значеннях його добротності — 50 і 20. Вважати допустимим розширення смуги пропускання контуру не більше ніж 3%. Резонансна частота контуру дорівнює 150 кГц.

3.4. Експериментальні дослідження




3.4.1. Використані пристрої, прилади та вбудовані функції EWB

Тут наводиться тільки короткий опис застосованих в дослідженнях пристроїв, більш докладний їх опис наведено у додатку Б.

В схемі використані два пристрої:

- осцилограф (Oscilloscope).
- вимірювач АЧХ і ФЧХ – графопобудовник (Bode Plotter).

Окрім того, застосовують ще три прилади, що можуть потребувати попереднього налаштування:

- джерело тональної ЧМ змінної напруги синусоїдної форми (FM Source). В меню *Component Properties* джерела потрібно встановити амплітуду напруги, значення носійної частоти, значення індексу модуляції та значення частоти керуючого сигналу; 
- джерело змінної напруги синусоїдної форми (AC Voltage Source). В меню *Component Properties* джерела потрібно становити значення робочої частоти та **діючої** амплітуди коливань; 
- вольтметр (Voltmeter) постійного та змінного струму. В меню *Component Properties* вольтметра потрібно обрати *Mode AC* – змінний струм. Вольтметр показує **діюче** значення напруги. 

Для дослідження АЧС сигналів використовується вбудована графічна функція *Fourier* з меню *Analysis* програми EWB (докладний опис наведено в додатку В).

3.4.2. Виконання досліджень

1. Запустити програмне середовище EWB. У бібліотеці, у папці *ОТТРТ_КР_LІВ*, знайти і відкрити *файл kp_13.ewb*. На робочому полі з'явиться схема, яку наведено на Рис. 3.5.

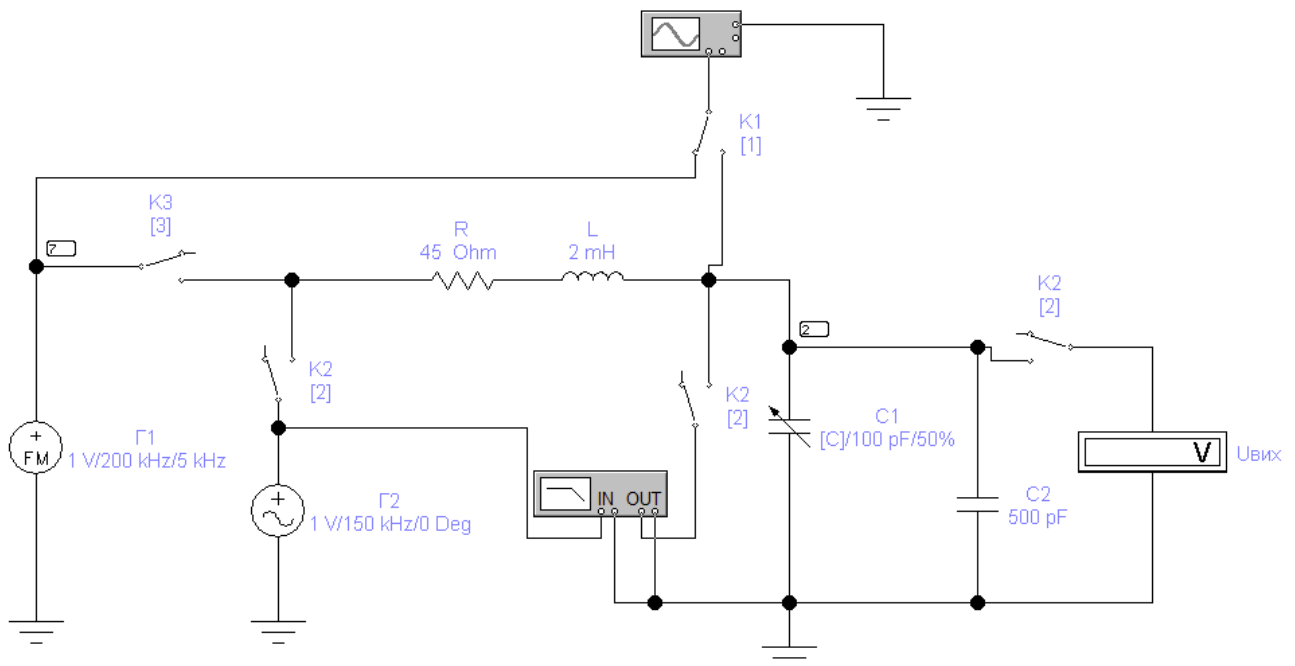


Рис.3.5. Схема для дослідження проходження ЧМ-сигналів резонансним ПВЧ

Схема містить два перемикачі:

- K1 (перемикається натисканням клавіши «1») для візуалізації на осцилографі або вхідного ЧМ сигналу або сигналу з виходу резонансного ПВЧ;
- K2 (перемикається натисканням клавіши «2») для роботи в двох режимах: 1) налаштування коливального контуру $R-L-C$ (при цьому на контур подається сигнал з джерела синусоїдних коливань Г2 і підключається вимірювач АЧХ і ФЧХ); 2) сигнал на контур подається з джерела ЧМ коливань Г1 для остаточного налаштування коливального контуру з та дослідження проходження сигналу з тональною ЧМ.

Для зручності налаштування коливального контуру його ємність C складається з двох паралельно з'єднаних ємностей: постійної $C2 = 500$ пФ та змінної $C1$, значення якої зменшується натисканням клавіши «C» – **латиниця**. Для збільшення значення ємності $C1$ потрібно натискати комбінацію клавиш «Shift C». Максимальне значення ємності $C1$ встановлено 100 пФ.

Змінюючи значення опору R коливального контуру можна змінювати його добротність. Для цього треба підвести курсор миші до опору, натиснути **праву** кнопку миші і викликати меню параметрів опору *Component Properties*. В ньому обрати рядок *Resistance(R)* і встановити нове значення опору.

1. Метою першого пункту завдання є дослідження спектральних характеристик сигналу з тональною ЧМ.

Перемикач K1 повинен бути в лівому положенні, перемикач K2 – у положенні, коли сигнал з джерела Г1 на контур **не** поступає.

1, а) Прослідкувати еволюцію амплітудно-частотного спектру ЧМ-сигналу із зміною індексу модуляції $M = f_m/F = k_1U/\Omega$ при незмінній частоті керувального сигналу $F = 20$ кГц (можна подумки вважати, що індекс модуляції M буде змінюватися за рахунок зміни амплітуди керувального сигналу U).

Носійна частота $f = 200$ кГц.

Отримати та спостерігати п'ять АЧС для значень M в діапазоні від 0.5 до 10 (для різних випадків). В тому числі *обов'язково* для $M = 2.405$. Судити про конкретні значення індексу модуляції можливо за наступними характерними ознаками АЧС:

- при $M = 0.5$ перша пара бічних коливань мають амплітуди приблизно в чотири рази менші за амплітуду носійного коливання;
- при $M = 1.435; 3.113; 4.68; 6.266; 7.836; 9.413$ — амплітуди першої пари бічних коливань стають рівними амплітуді носійного коливання;
- при $M = 2.405; 5.52; 8.654$ — амплітуда носійного коливання дорівнює нулю;
- при $M = 3.832; 7.016$ —дорівнюють нулю амплітуди першої пари бічних коливань.

Навести мишу на джерело тонального ЧМ сигналу Г1 і натиснути *праву* кнопку. У відкритимому меню обрати *Component properties*. В ньому встановити наступні значення (див. Рис. 3.6):

Рис.3.6. Параметри джерела тонального ЧМ сигналу

- амплітуду напруги (*Peak amplitude*) $VA = 1$ В; значення носійної частоти (*Carrier frequency*) $FC = 200$ кГц;
- значення індексу модуляції (*Modulation index*) $M = 0.5$ (наприклад);
- значення частоти керуючого сигналу (*Modulation frequency*) $FM = 20$ кГц.

Для кожного значення індексу модуляції M виконати наступні дії:

1) Активувати схему.



2) Потім, для спостереження АЧС тонального ЧМ сигналу, в меню *Analysis* обрати графічну функцію *Fourier*. Встановити значення параметрів *Fundamental frequency* – 20 кГц, *Number of harmonics* – 20. У спадаючому переліку обрати *Output nodes* – 7, як показано на рис.3.7.

Натиснути кнопку *Simulate*.

3) Спостерігати в графічному вікні *Analysis Graphs* та зберегти АЧС сигналу у протоколі.

Рис.3.7. Параметри АЧС (Fourier)

4) Після збереження АЧС *графічне вікно закрити*.

1, б) Прослідкувати еволюцію амплітудно-частотного спектру ЧМ-сигналу із зміною індексу модуляції $M = f_m/F$ за рахунок зміни частоти керуючого сигналу F . Носійна частота $f = 200$ кГц, початковий індекс модуляції $M = 2$, початкова частота керувального сигналу $F = 20$ кГц.

В табл. 3.2 наведені параметри досліджуваних тональних ЧМ сигналів: значення індексу модуляції, частоти керувального сигналу та кількість гармонік, що будуть розраховані в АЧС.

Таблиця 3.2. Параметри досліджуваних сигналів та їх АЧС

F, кГц	20	16	10	8	5
M	2	2.5	4	5	8
Number of harmonics, N	20	25	40	50	80

Для кожного значення індексу модуляції M виконати наступні дії:

1) Навести мишу на джерело тонального ЧМ сигналу Г1 і натиснути *праву* кнопку. В меню обрати *Component properties*. У відповідності з Табл. 3.2 встановити значення індексу модуляції M та частоти керувального сигналу F.

2) Активувати схему.

3) Для спостереження АЧС тонального ЧМ сигналу в меню графічної функції *Fourier* у відповідності до Табл. 3.2, встановити значення *Fundamental frequency = F*, *Number of harmonics = N*.

Натиснути кнопку *Simulate*.

4) Спостерігати в графічному окні *Analysis Graphs* та зберегти АЧС сигналу у протоколі.

5) Після збереження АЧС *графічне вікно закрити*.

1, в) За отриманими результатами зробити висновки про вплив девіації частоти і частоти модуляції на основні характеристики спектра (число спектральних компонент, ширина спектра, відстань між сусідніми гармоніками тощо). Співставити ці висновки з теоретичними відомостями.

2. Метою другого пункту завдання є дослідження часових і спектральних характеристик відгуку резонансного ПВЧ на вхідний тональний ЧМ сигнал для випадку $f_0 = f_p$.

Перемикач K1 перевести в праве положення.

Встановити значення опору R у відповідності з п.3 домашнього завдання.

2, а) Налаштувати коливальний контур ПВЧ в резонанс.

Перемикач K2 перевести у ввікнене положення.

Встановити частоту джерела гармонічної напруги Г2 150 кГц з амплітудою 1 В. Для цього в меню параметрів джерела *Component Properties* встановити вказані на Рис.3.8 значення параметрів (задається *дієва* амплітуда напруги).

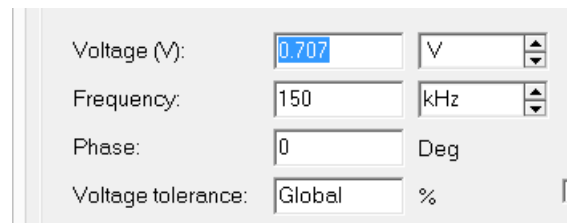


Рис.3.8. – Параметри джерела Г2

Активувати схему.

Змінюючи значення ємності C2, досягти масимальної напруги на контурі, контролюючи показник вольтметра.

Відкрити вимірювач АЧХ і ФЧХ.

Встановити вказані на Рис.3.9 значення параметрів (АЧХ контуру зручніше аналізувати в логарифмічному масштабі за вертикаллю).

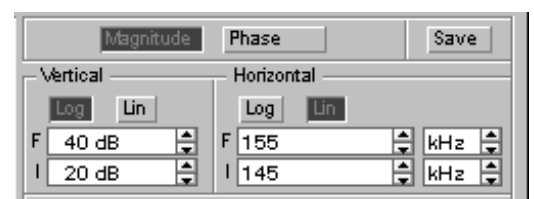



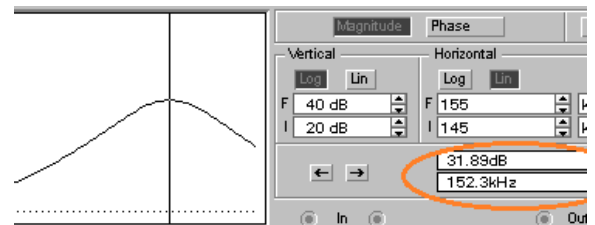
Рис.3.9. Параметри вимірювача АЧХ і ФЧХ

Активувати схему.

2,б) Визначити резонансну частоту контура і значення $K_{p,дБ}$.

Захопивши лівою кнопкою миши вертикальний курсор, вивести його на максимум резонансної кривої.

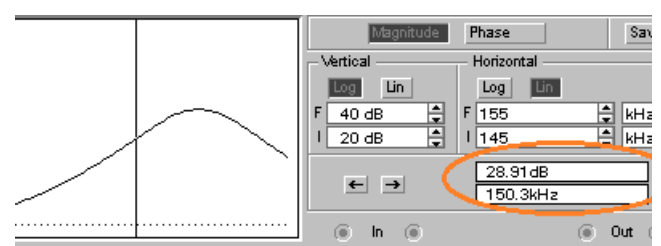
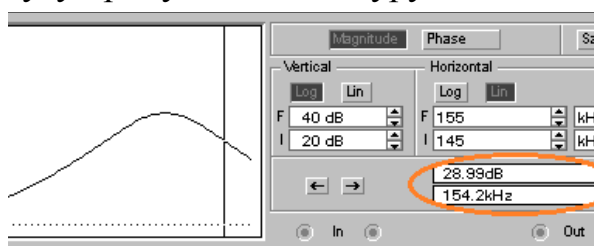
Для більш точного налаштування зручно користуватися кнопками . Зберегти значення частоти, яка відповідає максимальному значенню $K_{p,дБ}$ та саме значення коефіцієнту передачі.



$$f_p = \text{_____ кГц}, K_{p,дБ} = \text{_____}.$$

2,в) Визначити смугу пропускання і добротність коливального контуру ПВЧ.

За рівнем ($K_{p,дБ} - 3$) дБ, користуючись вертикальним курсором, визначити смугу пропускання контуру:



Розрахувати добротність контуру ПВЧ.

$$П = \text{_____ кГц}, Q = \text{_____}.$$

Закрити вимірювач АЧХ і ФЧХ.

2,г) Остаточо налаштувати коливальний контур ПВЧ, використовуючи джерело ЧМ коливань.

Перевести перемикач К2 в положення, за якого живлення на контур подається з джерела ЧМ коливань Г1.

В джерелі Г1 потрібно нівелювати присутність керуючого коливання. Але нульовий індекс модуляції задати в EWB не можна. Тому встановити в ньому наступні значення параметрів:

- амплітуда напруги (*Peak amplitude*) $V_A = 1$ В;
- значення носійної частоти (*Carrier frequency*) $F_C = 150$ кГц;
- значення індексу модуляції (*Modulation index*) $M = 0.000001$;
- значення частоти керувального сигналу (*Modulation frequency*) $F_M = 5$ Гц.

Активувати схему.

Змінюючи значення ємності C_2 , досягти масимальної напруги на контурі, контролювати покази вольтметра.

Таким чином, маємо резонансний ПВЧ, коливальна система якого налаштована на частоту носійного коливання $f_0 = f_p$.

2, д) На частоті керувального сигналу $F = 300$ Гц отримати такий індекс модуляції M тонального ЧМ сигналу, при якому ширина частотного спектру відгуку резонансного ПВЧ приблизно дорівнює ширині смуги пропускання контуру ПВЧ. При цьому мінімуми обвідної відгуку ПВЧ складають 0,707 від рівня максимуму.

Приблизне початкове значення M розрахувати, використовуючи формулу (3.13),

$$M \approx \frac{B}{2F}, \quad (3.24)$$

де B – ширина смуги пропускання, що отримана в п. 2,в.

Потім зменшуючи або збільшуючи M , досягти потрібного результату. Ширину спектра оцінювати за АЧС відгуку резонансного ПВЧ.

В джерелі Г1 встановити наступні значення параметрів:

- значення носійної частоти (*Carrier frequency*) $F_C = 150$ кГц;
- значення індексу модуляції (*Modulation index*) $M =$ значенню, яке отримане за формулою (3.24);
- значення частоти керувального сигналу (*Modulation frequency*) $F_M = 300$ Гц.

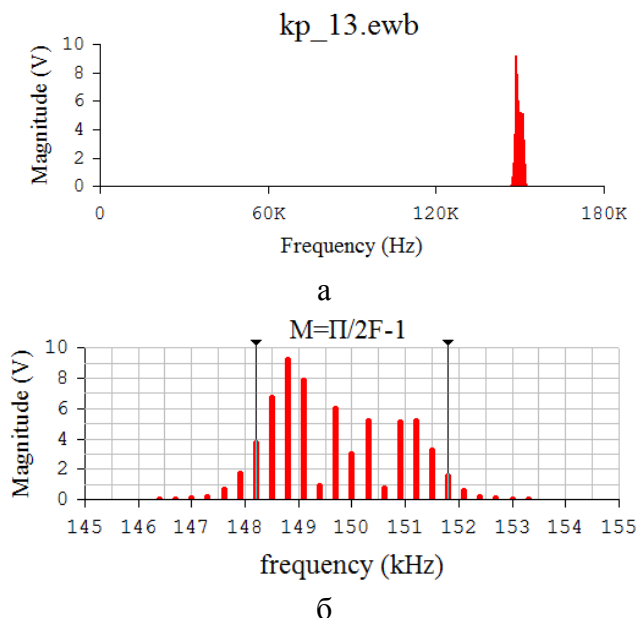
Для кожного досліджуваного значення M виконати наступні дії:

1) Активувати схему.

2) Для спостереження АЧС відгуку ПВЧ в меню *Analysis* обрати графічну функцію *Fourier*. Встановити значення параметрів:

- *Fundamental frequency* – **300 Гц = F** ,
- *Number of harmonics* – **550 = N** .
- У спадаючому переліку обрати *Output nodes* – **2**.

3) Натиснути кнопку *Simulate*. В графічному екрані буде зображення АЧС, яке можна скопіювати (див. рис. 3.10,а). Оскільки функція *Fourier* завжди будує АЧС в діапазоні частот від 0 до $F \cdot N$, спектрограму на рис. 3.10,а потрібно редагувати (див. додаток В). Після редагування отримуємо АЧС, що наведений на рис. 3.10,б. Тут вертикальні курсори показують границі смуги пропускання Π коливальної системи ПВЧ



4) Після збереження АЧС **графічне вікно закрити.** Рис.3.10. АЧС відгуку ПВЧ до редагування (а) і після редагування (б)

Якщо з АЧС на рис. 3.10,б виявляється, що ширина спектра є більшою за смугу пропускання коливального контуру Π , потрібно, у відповідності до формули (3.13), зменшувати значення індексу модуляції M . Якщо ж ширина АЧС є меншою за Π , значення M потрібно збільшувати.

Для нового значення M повторювати дії 1) – 4) допоки ширина АЧС відгуку резонансного ПВЧ на стане приблизно дорівнювати ширині смуги пропускання контуру ПВЧ.

$$M = \underline{\hspace{2cm}}$$

Останній АЧС зберегти в протоколі.

Відкрити осцилограф в розширеній версії. Активувати схему. Спостерігати та зберегти в протоколі осцилограму відгуку ПВЧ.

За осцилограмою визначити:

- відношення мінімального рівня напруги до максимального $U_{\min}/U_{\max} = \underline{\hspace{2cm}}$;
- період коливань огибаючої $T_{\text{огин}} = \underline{\hspace{2cm}}$ мс;
- частоту коливань огибаючої $F_{\text{огин}} = 1/T_{\text{огин}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Гц.

3. Метою третього пункту завдання є дослідження часових і спектральних характеристик відгуку резонансного ПВЧ на вхідний тональний ЧМ сигнал з

частотою керувального сигналу $F = 300$ Гц та індексом модуляції M , який визначено в п. 2,д, для випадку $f_0 \neq f_p$.

3,а) Дослідити часові і спектральні характеристики відгуку резонансного ПВЧ на тональний ЧМ сигнал для трьох значень частотного розстроювання: $\Delta f = f_0 - f_p = \Pi/2$, $\Delta f = f_0 - f_p = \Pi$, $\Delta f = f_0 - f_p = 3\Pi/2$ (Π – смуга пропускання коливального контура, яку визначено в п. 2,в).

Використовувати кінцеві налаштування п. 2.

Частотне розстроювання виконувати за рахунок зміни носійної частоти.

Розрахувати значення частотного розстроювання та носійної частоти для усіх випадків і занести їх у табл. 3.3.

Відкрити осцилограф в розширеному режимі.

Таблиця 3.3. Значення носійної частоти f_0

Δf , кГц	$f_0 = 150 - \Delta f$, кГц
$\Pi/2 =$ _____	
$\Pi =$ _____	
$3\Pi/2 =$ _____	

Для кожного значення носійної частоти виконати наступні дії:

1) В джерелі Г1 встановити чергове значення носійної частоти (*Carrier frequency*).

2) Активувати схему.

3) Спостерігати та зберегти в протоколі осцилограму відгуку ПВЧ.

За осцилограмою визначити:

- відношення мінімального рівня напруги до максимального U_{\min}/U_{\max} ;
- глибину АМ m ;
- період коливань обвідної $T_{\text{огин}}$;
- частоту коливань обвідної $F_{\text{огин}} = 1/T_{\text{огин}}$.

4) Для спостереження АЧС відгуку ПВЧ в меню *Analysis* обрати графічну функцію *Fourier*. Значення параметрів повинні бути як в п.2,д-3).

5) Спостерігати, редагувати та зберегти у протоколі АЧС відгуку резонансного ПВЧ.

3, б) За отриманими результатами зробити висновки про вплив величини розстроювання частоти $\Delta f = f_0 - f_p \neq 0$ на часові та частотні параметри відгуку резонансного ПВЧ – глибину амплітудної модуляції, амплітуду вихідного сигналу, ширину та положення спектру, вигляд бічних складових. Співставити ці висновки з теоретичними відомостями.

3.5. Використана література

- [1] т.1, с.400–423, т.3, с.102–113; [4] с.98–107, 251–256;
[5] с.62–68; [6] с.561–566, 585–587;
[7] с.115–125, 292–296; [8] с.94–101, 214–217;
[9] с.37–49.

3.6. Контрольні питання

1. Який зв'язок існує між частотою і фазою коливань?
2. В чому полягають схожість і відмінність ФМ- і ЧМ-коливань?
3. Що таке індекс кутової модуляції і девіація частоти? Який фізичний зміст і розмірність цих величин?
4. Який вигляд мають спектри коливань з тональною КМ у випадках неглибокої і глибокої модуляції?
5. Який вигляд мають векторні діаграми коливань з тональною КМ для випадків $M \ll 1$ та $M \gg 1$?
6. Чим визначається ширина АЧС коливань з тональною КМ?
7. Як позначається на спектрі КМ коливань розширення спектру керувального сигналу?
8. Як залежить ширина спектру КМ коливань від амплітуди і частоти керувального сигналу у випадку тональної модуляції?
9. Як видозміниться АЧС коливань з тональною КМ при збільшенні від нуля амплітуди керувального сигналу (індекс кутової модуляції)?
10. В чому полягають умови застосування методу миттєвих частот?
11. Поясніть суть методу миттєвих частот?
12. Чим обумовлені спотворення обвідної і закону зміни частоти ЧМ-коливання, що з'являються при проходженні радіосигналу через вузькосмугове коло?
13. Як спотворюється тональне ЧМ-коливання при проходженні через резонансний (смуговий) ПВЧ при налаштуванні коливальної системи на середню частоту ЧМ-коливання. При розстроюванні коливальної системи?
14. Поясніть процес перетворення виду модуляції розстроєним коливальним контуром.
15. Як змінюється частотна характеристика резонансного ПВЧ при збільшенні швидкості зміни частоти вхідної дії?
16. Чим визначається максимально допустима швидкість зміни частоти вхідної дії, при якій форма частотної характеристики ПВЧ ще лишається практично незмінною?

Перелік посилань

1. Волощук, Ю. І. *Сигнали та процеси в радіотехніці*, в 4-ч томах. — Харків : СМІТ, 2003-2005.
2. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник. Навчальний посібник / За ред. Ю.А.Мазора, Є.Д.Мачуського, В.І.Правди. - К.: Вища шк., 1999. - 838 с.
3. Основи теорії телекомунікацій і радіотехніки. Частина I, II. *Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів радіотехнічного факультету всіх форм навчання за спеціальністю 172 «Телекомунікації і радіотехніка»* / В. П. Гололобов, С. М. Літвінцев. — К. : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. —72 с.—Видання 3-є, виправлене та доповнене.
4. Гоноровский, И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. — М. : Сов. Радио, 1977. —М. : Радио и связь, 1986 (4е изд.).— 512 с.
5. Баскаков, С. И. *Радиотехнические цепи и сигналы*.—М. : Высшая школа, 1983, 2000, 2002.
6. Зернов, Н.В.; Карпов, В. Г. *Теория радиотехнических цепей*. — Л. : Энергия, 1972. —816 с.
7. Самойло, К. А. (ред.). *Радиотехнические цепи и сигналы*.—М. : Радио и связь, 1982.—527 с.
8. Зиновьев, А.Л.; Филиппов, Л. И. *Введение в теорию сигналов и цепей*. — М. : Высшая школа, 1975.
9. Кольченко, О. Ф.; Безверхий, Б. В.; Новоборский, Ю. Л. *Методические указания к лабораторному практикуму по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы, ч.1» для студентов специальности «Радиотехника» всех форм обучения*.—К. : КПИ, 1984. — 68 с.
- 10.Mathcad [Online] // <https://uk.wikipedia.org/wiki/Mathcad>
- 11.Справочное руководство по Electronics Workbanch [Online] // <https://baumanka.pashinin.com>

Додатки

А. Таблица значений функций Бесселя I рода аргументу М

M	$J_0(M)$	$J_1(M)$	$J_2(M)$	$J_3(M)$	$J_4(M)$	$J_5(M)$	$J_6(M)$	$J_7(M)$	$J_8(M)$	$J_9(M)$
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.938	0.242	0.031	0.003	0	0	0	0	0	0
1	0.765	0.44	0.115	0.02	0.002	0	0	0	0	0
1.5	0.512	0.558	0.232	0.061	0.012	0.002	0	0	0	0
2	0.224	0.577	0.353	0.129	0.034	0.007	0.001	0	0	0
2.5	-0.048	0.497	0.446	0.217	0.074	0.02	0.004	0.001	0	0
3	-0.26	0.339	0.486	0.309	0.132	0.043	0.011	0.003	0	0
3.5	-0.38	0.137	0.459	0.387	0.204	0.08	0.025	0.007	0.002	0
4	-0.397	-0.066	0.364	0.43	0.281	0.132	0.049	0.015	0.004	0.001
4.5	-0.321	-0.231	0.218	0.425	0.348	0.195	0.084	0.03	0.009	0.002
5	-0.178	-0.328	0.047	0.365	0.391	0.261	0.131	0.053	0.018	0.006
6.5	-0.007	-0.341	-0.117	0.256	0.397	0.321	0.187	0.087	0.034	0.011
7	0.151	-0.277	-0.243	0.115	0.358	0.362	0.246	0.13	0.057	0.021
7.5	0.26	-0.154	-0.307	-0.035	0.275	0.374	0.3	0.18	0.088	0.037
8	0.3	-0.005	-0.307	-0.168	0.158	0.348	0.339	0.234	0.128	0.059
8.5	0.266	0.135	-0.23	-0.258	0.024	0.283	0.354	0.283	0.174	0.089
9	0.172	0.235	-0.113	-0.291	-0.105	0.186	0.338	0.321	0.223	0.126
9.5	0.042	0.273	0.022	-0.263	-0.208	0.067	0.287	0.338	0.269	0.169
10	-0.09	0.245	0.145	-0.181	-0.265	-0.055	0.204	0.327	0.305	0.215
10.5	-0.194	0.161	0.228	-0.065	-0.269	-0.161	0.099	0.287	0.323	0.258
11	-0.246	0.043	0.255	0.058	-0.22	-0.234	-0.014	0.217	0.318	0.292
11.5	-0.237	-0.079	0.222	0.163	-0.128	-0.261	-0.12	-0.124	0.285	0.311
12	-0.171	-0.177	0.139	0.227	-0.015	-0.238	-0.202	0.018	0.225	0.309
12.5	-0.068	-0.228	0.028	0.238	0.096	-0.171	-0.245	-0.085	0.142	0.282
13	0.048	-0.223	-0.085	0.195	0.182	-0.073	-0.244	-0.17	0.045	0.23
13.5	0.147	-0.165	-0.173	0.11	0.226	0.035	-0.198	-0.225	-0.054	0.156
14	0.207	-0.07	-0.218	0.003	0.219	0.132	-0.118	-0.241	-0.141	0.067
14.5	0.215	0.038	-0.209	-0.1	0.165	0.198	-0.018	-0.214	-0.204	-0.027
15	0.171	0.133	-0.152	-0.177	0.076	0.22	0.081	-0.151	-0.232	-0.114
15.5	0.088	0.193	-0.061	-0.21	-0.026	0.196	0.161	-0.062	-0.221	-0.182
16	-0.014	0.205	0.042	-0.194	-0.119	0.13	0.206	0.034	-0.174	-0.22
16.5	-0.109	0.167	0.131	-0.133	-0.182	0.039	0.208	0.122	-0.098	-0.223
17	-0.175	0.09	0.186	-0.044	-0.203	-0.057	0.167	0.183	-0.007	-0.19
17.5	-0.196	-0.006	0.196	0.053	-0.176	-0.139	0.092	0.206	0.082	-0.126
18	-0.17	-0.098	0.158	0.135	-0.111	-0.187	0.001	0.188	0.154	-0.043
18.5	-0.103	-0.163	0.084	0.183	-0.022	-0.193	-0.088	0.132	0.194	0.045
19	-0.013	-0.188	-0.008	0.186	0.07	-0.155	-0.156	0.051	0.196	0.123
19.5	0.077	-0.167	-0.095	0.146	0.143	-0.084	-0.188	-0.038	0.16	0.176
20	0.147	-0.106	-0.158	0.072	0.181	0.004	-0.179	-0.116	0.093	0.195

Б. Опис програми комп'ютерного моделювання радіотехнічних та радіоелектронних кіл ELECTRONICS WORKBENCH

Б.1. Загальна характеристика

Програма Electronics Workbench дозволяє моделювати аналогові, цифрові та цифро-аналогові схеми великої складності. В програмі є бібліотеки, які містять великий набір електричних та радіоелектронних компонентів. Параметри компонентів можна змінювати в широких межах. Програма містить значний набір вимірювальних приладів, лицеві панелі яких мають наближений до реальних приладів вигляд.

Перевагами програми є: суттєва економія часу при підготовці експерименту в порівнянні з реальною лабораторією; зручність виконання вимірювань з використанням широкого набору вимірювальних віртуальних приладів з ідеалізованими параметрами, що значно спрощує розуміння одержаних результатів; гарантія від пошкодження приладів при їх неправильному ввімкненні; широкі графічні можливості; використання стандартного інтерфейсу Windows, інтуїтивність і простота якого робить програму доступною будь-кому, хто знайомий з основами застосування Windows.



Electronics Workbench дозволяє будувати схеми за допомогою таких операцій:

- вибір елементів і приладів з бібліотек.
- переміщення елементів та схем в будь-яке місце робочого столу.
- обертання елементів і груп елементів на кути, що кратні 90 градусів.
- копіювання, вставка, видалення елементів і груп елементів, фрагментів схем і цілих схем.
- зміна кольору провідників.
- виділення кольором контурів схем для більш зручного сприймання.
- одночасне підключення кількох вимірювальних приладів і спостереження їх показань на моніторі.
- присвоєння елементам умовних позначень.
- зміна параметрів елементів у широких межах.
- зміна шкал приладів у залежності від діапазону вимірювань.
- вибір режимів роботи приладів.
- задавання виду вхідних сигналів.

Усі ці операції виконуються за допомогою миші та клавіатури.

Графічні можливості програми дозволяють одночасно спостерігати кілька графіків, відображати криві на графіках різними кольорами, вимірювати координати точок на графіках.

Б.2. Короткий опис програми ELECTRONICS WORKBENCH

Вигляд головного вікна програми показано на рис. Б.1. Воно містить рядок заголовку, рядок меню, панель інструментів, панель елементів і приладів. На панелі інструментів присутні значки, що відповідають певним командам меню. У правій верхній частині панелі розташовано вмикач  (*Activate simulation*), при натисканні якого починається аналіз схеми (для завершення аналізу слід вимкнути вмикач) та кнопка паузи  (*Pause simulation*) – кнопка тимчасової призупинки симуляції (повторне натискання цієї кнопки відновлює симуляцію з місця призупинки). Під панелями розташовано робоче поле, на якому формується досліджувана схема разом з вимірювальними приладами. Справа і знизу робочого поля розміщено смуги прокрутки.

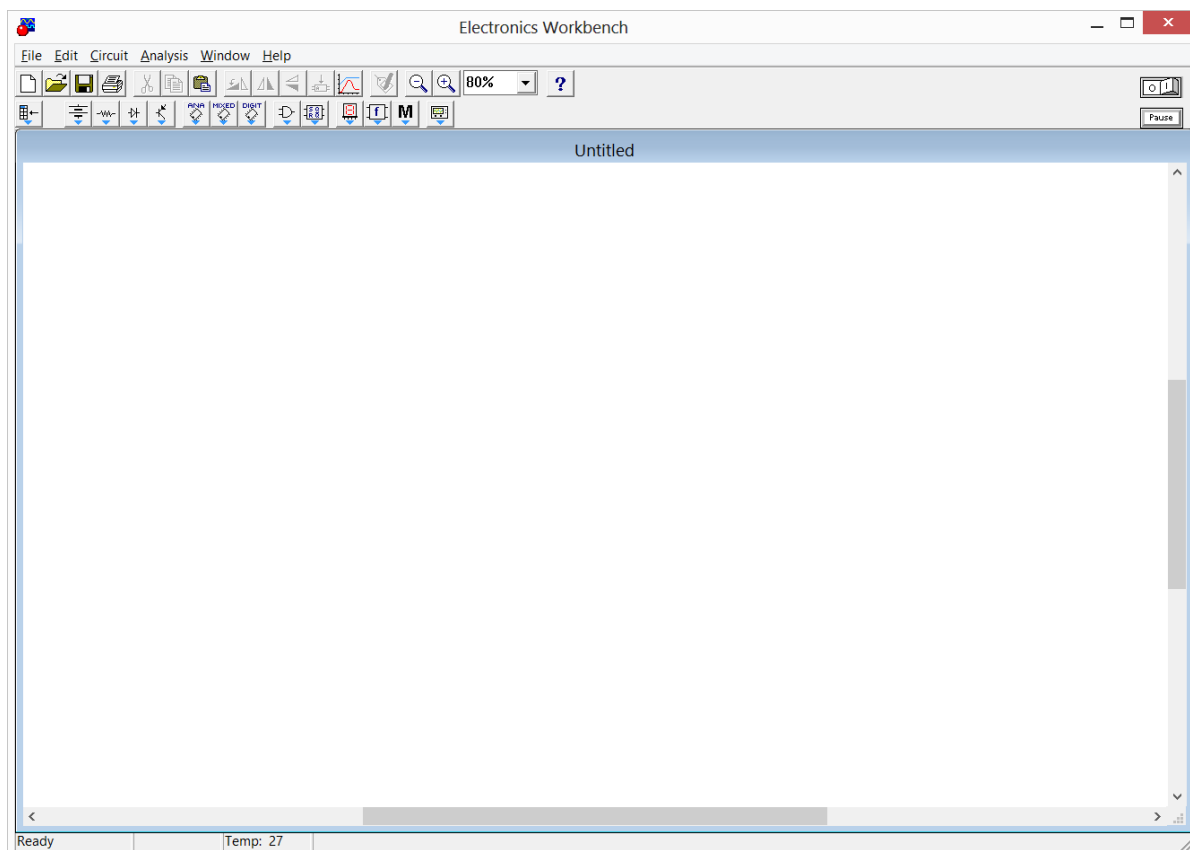








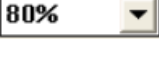





Рис. Б.1.








Б.2.1. Призначення кнопок панелі інструментів

Завжди активні кнопки:

 (*New*) створити новий файл

-  (*Open*) відкрити новий файл
-  (*Save*) зберегти файл
-  (*Print*) друк файла
-  (*Paste*) вставити з буфера обміну
-  (*Display graphs*) виводить на екран вікно відображення результатів моделювання. Тут можна переглянути покази усіх приладів, що підключено до схеми, і графіки, що отримані в результаті аналізу схеми (такі, як аналіз Фур'є, графік перехідного процесу, осцилограми тощо), напруги у вузлах схеми тощо.
-  (*Zoom out*) та  (*Zoom in*), дозволяють вибирати масштаб схеми, яка а також  (*Scale factor*) створюється або проглядається
-  (*Help*) перегляд справки
-  (*Activate simulation*) кнопка запуску симуляції схеми
-  (*Pause simulation*) кнопка тимчасового зупинення симуляції, повторне натискання цієї кнопки поновлює симуляцію з місця призупинення

Кнопки, які активуються тільки за умови виділення будь-якого елемента (або групи компонентів) схеми:

-  (*Cut*) вирізати у буфер обміну
-  (*Copy*) копіювати у буфер обміну
-  (*Rotate*) повертати виділений елемент вліво на 90^0
-  (*Flip horizontal*) відобразити виділений компонент за горизонталлю
-  (*Flip vertical*) відобразити виділений компонент за вертикаллю
-  (*Create subcircuit*) створити підсхему (ця кнопка дозволяє об'єднати виділені компоненти в одному блоці (іноді це буває дуже зручно)
-  (*Component properties*) перегляд та редагування параметрів компонента

Б.2.2. Система меню. Основні команди

Меню File. Використовується для роботи з файлами. Його структура досить стандартна. Тут можна:

- створити новий файл – команда *New*,
- відкрити вже існуючий файл – команда *Open*,
- записати файл на диск – команда *Save*,

- записати файл, вказавши його ім'я – команда *Save as*,
- повернутися до збереженого файлу (при цьому відмінити усі зміни, що зроблені у схемі до останнього збереження) – команда *Revert*,
- вийти з програми – команда *Exit*.

Це основні команди цього меню, які знадобляться для роботи.

- **Меню Edit.** Використовується для редагування схеми. Перед тим як використовувати команди цього меню необхідно виділити елемент, що редагується, натиснувши його один раз лівою кнопкою миші. Тоді можна:
 - вирізати елемент (або групу елементів) схеми – команда *Cut*,
 - скопіювати елемент (або групу елементів) в буфер обміну – команда *Copy*,
 - вставити елемент (або групу елементів) схеми – команда *Paste*,
 - видалити виділений елемент (або групу елементів схеми) – команда *Delete*,
 - виділити всі елементи схеми – команда *Select All*.

Це основні команди цього меню, які знадобляться для роботи.

Меню Circuit. Використовується для складання схеми з електричних компонентів та налаштування відображення схеми. За його допомогою можна:

- повернути елемент (або групу елементів) на 90° вліво – команда *Rotate*,
- зробити горизонтально віддзеркалену копію – команда *Flip Horizontal*,
- зробити вертикально віддзеркалену копію – команда *Flip Vertical*.
- встановити параметри електричного компонента можна командою *Component Properties*,
- створити підсхему з виділених елементів схеми – команда *Create Subcircuit*,
- збільшити або зменшити зображення схеми – команди *Zoom in* та *Zoom out*,
- задати опції відображення сітки, трасування провідників тощо – команда *Schematic options*.

Меню Analysis. Використовується для проведення різних видів аналізу складеної схеми та для зміни налаштувань симуляції (встановити час моделювання тощо).

Перші три команди керують процесом моделювання роботи схеми:

- запуск моделювання – команда *Activate*,
- зробити паузу – команда *Pause*,
- припинити моделювання – команда *Stop*.

Команда *Analysis Options* дозволяє встановити деякі параметри моделювання схеми.

Далі йде група функцій (команд) аналізу:

- *DC Operating Point* – аналіз схеми за сталим струмом (визначає напруги у

- вузлах схеми),
- *AC Frequency* – аналіз схеми в частотній області (АЧХ та ФЧХ коефіцієнту передачі між заданими вузлами схеми),
 - *Transient* – аналіз перехідних процесів між заданими вузлами (перехідна характеристика),
 - *Fourier* – аналіз Фур'є (АЧС сигналу в заданому вузлі, додаткові можливості – відображення огинаючої АЧС та відображення ФЧС),
 - *Monte Carlo* – аналіз Монте Карло.

Команда *Display graphs* дозволяє виводити на екран вікно відображення результатів аналізу.

Б.2.3. Короткий опис елементної бази EWB 5.12

На початку слід зазначити, що для одержання звичних умовних графічних позначень елементів і компонентів електричних схем в системі EWB 5.12, необхідно під час встановлення програми на комп'ютер обрати європейську систему (DIN) позначень елементів.

Будь-які елементи електричних схем можна вставляти в схему використовуючи панель елементів головного вікна програми, рис. Б.2.



Рис. Б.2

Зліва направо кнопки панелі мають таке призначення:

1. (*Sources*) Різноманітні джерела напруги, струму чи живлення.
2. (*Basic*) Базові компоненти електричних схем.
3. (*Diodes*) Діоди, діодні мости, світлодіоди, діністори тощо.
4. (*Transistors*) Транзистори.
5. (*Analog ICs*) Аналогові інтегральні мікросхеми.
6. (*Mixed ICs*) Гібридні інтегральні мікросхеми.
7. (*Digital ICs*) Цифрові інтегральні мікросхеми.
8. (*Logic gates*) Логічні елементи та мікросхеми.
9. (*Digital*) Спеціалізовані цифрові мікросхеми.
10. (*Indicators*) Індикаторні пристрої.
11. (*Control*) Функціональні блоки та базові елементи радіоавтоматики.
12. (*Miscellaneous*) Інші елементи.
13. (*Instruments*) Прилади, інструменти аналізу.

Панель Sources – Джерела Панель подано на рис. Б.3. Кнопки панелі мають

таке призначення:

1. *Ground* – заземлення.
2. *Battery* – джерело живлення 12 В. (Можна довільно змінити напругу до потрібного значення).
3. *DC Current Source* – джерело постійного струму.
4. *AC Voltage Source* – джерело змінної напруги.
5. *AC Current Source* – джерело змінного струму.
6. *Voltage-Controlled Voltage Source* – джерело напруги, кероване напругою.
7. *Voltage-Controlled Current Source* – джерело струму, кероване напругою.
8. *Current Controlled Voltage Source* – джерело напруги, кероване струмом.
9. *Current Controlled Current Source* – джерело струму, кероване струмом.
10. *Vcc Source* – джерело живлення +5 В.
11. *Vdd Source* – джерело живлення +15 В.
12. *Clock* – джерело імпульсної напруги 1000 Гц.
13. *AM Source*- джерело амплітудно-модульованого сигналу.
14. *FM Source* – джерело частотно- модульованого сигналу.
15. *Voltage-Controlled Sine Wave Oscillator* – генератор гармонічного сигналу, керований напругою.
16. *Voltage-Controlled Triangle Wave Oscillator* – генератор трикутних імпульсів, керований напругою.
17. *Voltage-Controlled Square Wave Oscillator* – генератор прямокутних імпульсів, керований напругою.
18. *Controlled One-Shot* – генератор імпульсного струму довільної форми.
19. *Piecewise Linear Source* – джерело кусково-лінійно апроксимованої напруги (інформація записана у файлі).
20. *Voltage-Controlled Piecewise Linear Source* – джерело кусково-лінійно апроксимованої напруги, кероване напругою.
21. *Frequency-Shift-Keying Source (FSK Source)* – частотно-керований генератор.
22. *Polynomial Source* – поліноміальне кероване джерело напруги.
23. *Nonlinear Dependent Source* – нелінійно-кероване джерело.

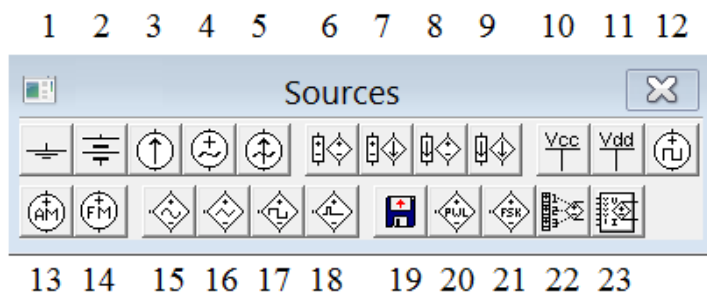


Рис. Б.3. Панель Sources

Панель Basic – Базові компоненти

Панель подано на рис. Б.4. Кнопки панелі мають таке призначення:

1. *Connector* – з'єднання.
2. *Resistor* – резистор (опір).

3. *Capacitor* – конденсатор (ємність).
4. *Inductor* – індуктивність.
5. *Transformer* – трансформатор.
6. *Relay* – електромагнітне реле.
7. *Switch* – перемикач.
8. *Time-Delay Switch* – перемикач з затримкою.

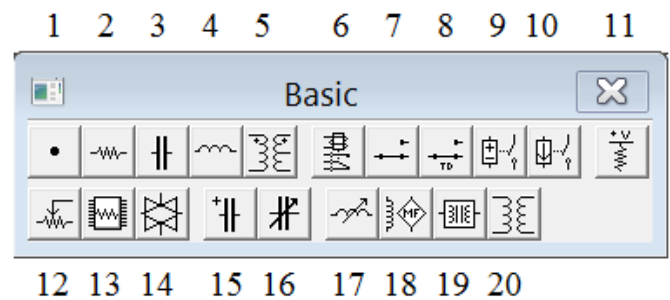


Рис. Б.4. Панель *Basic*

9. *Voltage-Controlled Switch* – перемикач, керований напругою.
10. *Current-Controlled Switch* – перемикач, керований струмом.
11. *Pull-up Resistor* – опір, підключений до плюса джерела живлення.
12. *Potentiometer* – потенціометр (змінний опір).
13. *Resistor Pack* - набір опорів.
14. *Voltage-Controlled Analog Switch* – аналоговий перемикач, керований напругою.
15. *Polarized Capacitor* – електролітичний конденсатор.
16. *Variable Capacitor* – змінний конденсатор.
17. *Variable Inductor* – змінна індуктивність.
18. *Coreless coil* – котушка без осердя.
19. *Magnetic core* – магнітне осердя
20. *Nonlinear Transformer* – імпульсний трансформатор.

Панель *Diodes* – Діоди

Панель подано на рис. Б.5. Кнопки панелі мають таке призначення:

1. *Diode* – діод.
2. *Zener Diode* – тунельний діод.
3. *LED* – світлодіод.
4. *Full Wave Bridge Rectifier* – діодний міст.
5. *Shockley Diode* – діод Шоклі.
6. *Silicon Controlled Rectifier*– триністор.
7. *Diac* – симетричний диністор (діак).
8. *Triac* – симетричний триністор (триак).

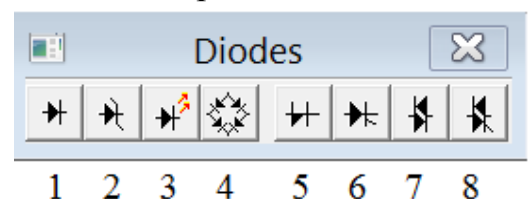


Рис. Б.5. Панель *Diodes*

Панель *Transistors* – Транзистори

Панель подано на рис. Б.6. Кнопки панелі мають таке призначення:

1. *NPN Transistor* – біполярні *n-p-n* транзистори.
2. *PNP Transistor* – біполярні *p-n-p* транзистори.
3. *N-Channel JFET* – польовий транзистор з *n*-каналом, що керований *p-n*

Панель Controls – Функціональні елементи

Панель подано на рис. Б.9. Кнопки панелі мають таке призначення:

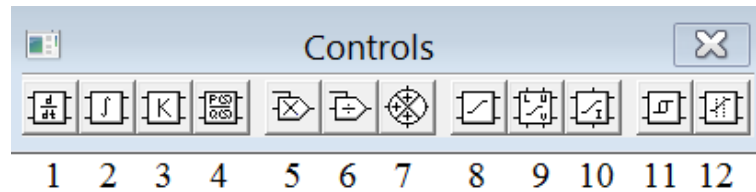


Рис. Б.9. Панель Controls

1. *Voltage Differentiator* – диференціатор напруги.
2. *Voltage Integrator* – інтегратор напруги.
3. *Voltage Gain Block* – підсилювальний 4-полюсник.
4. *Transfer Function Block* – передаточний функціональний блок.
5. *Multiplier* – помножувач.
6. *Divider* – подільувач.
7. *Three-Way Voltage Summer* – 3-и-вхідний суматор напруги.
8. *Voltage Limiter* – обмежувач напруги.
9. *Voltage-Controlled Limiter* – обмежувач напруги, керований напругою.
10. *Current Limiter Block* – обмежувач струму.
11. *Voltage Hysteresis* – 4-и-полюсник з петлею гістерезису.
12. *Voltage Slew Rate* – коло затримки.

Панель Miscellaneous – Інші елементи

Панель подано на рис. Б.10. Кнопки панелі мають таке призначення:

1. *Fuse* – вставка плавка.
2. *Write Data* – запис даних до файлу ASCII.
3. *Lossy Transmission* – лінія передачі з втратами.
4. *Lossless Transmission* – лінія передачі без втрат.
5. *Crystal* – кварцовий резонатор.
6. *DC Motor* – двигун постійного струму.
7. *Triode Vacuum* – вакуумний триод.
8. *Boost Converter* – перетворювач постійної напруги (підвищуючий).
9. *Buck Converter* – перетворювач постійної напруги (понижуючий).
10. *Buck-Boost Converter* – перетворювач постійної напруги.
11. *Textbox* – текстовий блок.
12. *Title Block* – титульна рамка креслення.

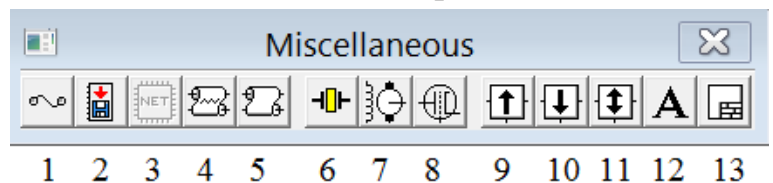
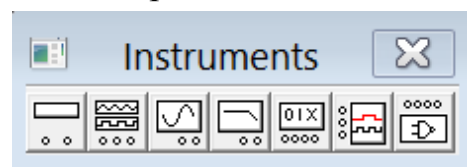


Рис. Б.10. Панель Miscellaneous

Панель Instruments – Вимірювальні пристрої

Панель подано на рис. Б.11. Кнопки панелі мають таке призначення:

1. *Multimeter* – мультиметр.
2. *Function Generator* – генератор стандартних сигналів.
3. *Oscilloscope* – осцилограф.
4. *Bode Plotter* – вимірювач АЧХ і ФЧХ (характериограф).
5. *Word Generator* – генератор двійкових цифрових послідовностей.
6. *Logic Analyzer* – логічний аналізатор цифрових послідовностей.
7. *Logic Converter* – перетворювач цифрових послідовностей.



1 2 3 4 5 6 7

Рис. Б.11. Панель *Instruments*

Б.3. Моделювання схем

Б.3.1. Вибір компонентів з бібліотеки компонентів і їх переміщення




Потрібний компонент обирається з бібліотеки компонентів. Для цього треба відкрити відповідне поле групи компонентів шляхом натискання *лівої* кнопки миші на піктограмі поля.

Обраний компонент переміщується на робоче поле за допомогою миші.

При обиранні елемента в схемі треба встановити покажчик миші на елементі (при цьому він змінює своє зображення на вигляд руки) і натиснути *ліву* кнопку. Обраний елемент змінює колір з чорного на червоний.

Для вибору групи елементів треба, натиснувши на *ліву* кнопку миші, розтягнути рамку навколо частини схеми, що виділяється. Виділення знімається натисканням *лівої* кнопки миші у будь-якому місці робочого поля. Виділені елементи переміщуються на робочому полі мишею або стрілками на клавіатурі.

Виділений об'єкт (або об'єкти) можна обертати та відображати в горизонтальному або вертикальному напрямках. Наприклад, для обертання треба вибрати команду мишею *Rotate* з меню *Circuit* або натиснути на клавіатурі

«*Ctrl + &*» або натиснути кнопку  на панелі інструментів. При цьому кожний з виділених елементів повернеться на кут 90 градусів вліво (проти годинникової стрілки). Для відображення вибраного об'єкту за вертикаллю або горизонталлю треба натиснути кнопку  або  на панелі інструментів.

Нарешті, виділені об'єкти можна копіювати командою «*Ctrl + C*» і вставляти командою «*Ctrl + V*».

Б.3.2. З'єднання елементів у схемі

Для з'єднання елементів треба підвести покажчик миші до виводу одного з

елементів. При цьому на виводі з'явиться чорна точка. Натиснувши *ліву* кнопку миші треба протягнути лінію до виводу іншого елемента, тоді елементи з'єднаються провідником.

Провідники, що з'єднують елементи, можна переміщувати мишею з метою їх кращого розташування на схемі. Щоб змінити колір провідника, треба встановити курсор миші на провіднику і двічі натиснути *ліву* кнопку миші. У діалоговому вікні, що відкриється, треба вибрати бажаний колір.

Коли схема зібрана, в неї можна вставити додаткові елементи. Для цього треба мишею помістити елемент на провідник у потрібному місці і він автоматично вставиться у схему.


Прилади підключаються до схеми у вигляді їх піктограм. Для цього треба перетягнути прилад з панелі приладів і підключити його виводи до відповідних точок схеми в такий же спосіб, як і для з'єднання елементів схеми. Деякі прилади треба обов'язково заземлювати, а саме, осцилограф, генератор, вимірювач АЧХ і ФЧХ.

Б.3.3. Установка значень параметрів елементів

Параметри елементів встановлюються у діалоговому вікні, яке відкривається подвійним натисканням *лівої* кнопки миші на зображенні елемента. В діалоговому вікні за допомогою клавіатури та миші вводяться потрібні величини параметрів і підтверджуються командою ОК. В діалоговому вікні також можна вибрати тип елемента та надати йому назву (присвоїти умовне позначення).

Б.3.4. Активація роботи схеми

Цю операцію потрібно виконувати після кожної зміни хоча б одного параметра елементів схеми або конфігурації схеми.

Підвести курсор миші до правого верхнього перемикача на екрані . Натиснувши *лівою* кнопкою миші «1» на ньому або натиснувши на клавіатурі «Ctrl+G», активувати схему. Після встановлення показів вимірювальних приладів натиснути *лівою* кнопкою миші «0» на перемикачі або на клавіатурі використати клавіші «Ctrl+T».

Б.4. Прилади, що застосовуються в комп'ютерних практикумах

Під час виконання комп'ютерних практикумів можуть використовуватися осцилограф, генератор стандартних сигналів, вимірювач АЧХ і ФЧХ, різноманітні джерела сигналів, вольтметри тощо.

Наприклад, в схемі на рис. Б.12 застосовано три прилади: функціональний генератор як джерело синусоїдних коливань, осцилограф для спостереження сигналів та вимірювач АЧХ і ФЧХ для спостереження АЧХ кола.

Нижче наведено опис застосування таких вбудованих в середовищі EWB приладів та пристроїв.

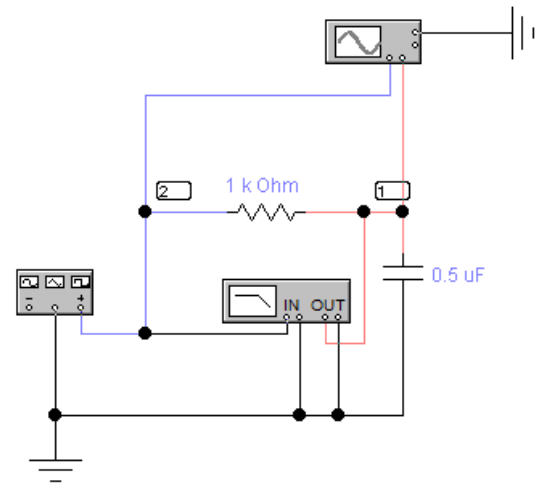


Рис. Б.12. Схема для дослідження роботи ФНЧ

Б.4.1. Осцилограф

Осцилограф (*Oscilloscope*). На зображенні осцилографа є чотири вхідних вивода: верхній правий вивід – загальний, нижній правий – вхід синхронізації, лівий та правий нижні виводи – входи Канал А та Канал В, відповідно.

Підвівши курсор миші до зображення осцилографа, натиснути праву кнопку і відкрити зображення простої моделі осцилографа (встановлена за замовчуванням для першого відкриття осцилографа), обравши з меню *Open* (див. рис. Б.13).

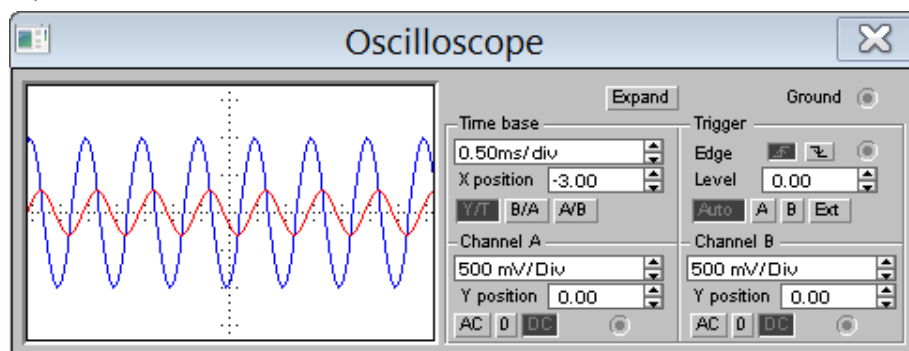
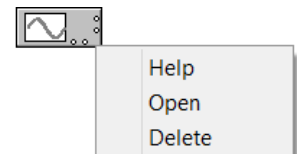



Рис. Б.13. Лицева панель простої моделі осцилографа

Осцилограф має два канали (*Channel*) А і В з роздільною регулювкою чутливості в діапазоні від 10 мкВ/дел ($\mu\text{V}/\text{div}$) до 5 кВ/дел (kV/div) та регулювкою зміщення за вертикаллю (*Y position*).

Вибір вхідного режиму відбувається натисканням кнопок .

- Режим АС призначений для спостереження тільки сигналів змінного струму (його ще називають режимом «закритого входу», оскільки в цьому режимі на вході підсилювача включається роздільний конденсатор, який не пропускає постійну складову).
- В режимі 0 вхідний вивід замикається на землю.
- В режимі DC (включений за замовченням) можна виконувати осцилографічні вимірювання як постійного, так і змінного струму. Цей режим ще називають режимом «відкритого входу», оскільки вхідний сигнал поступає на вхід вертикального підсилювача безпосередньо.


З правого боку від кнопки DC розташований вхідний вивід.


Режим розгортки вибирається кнопками .

- В режимі Y/T (звичайний режим, що включений за замовченням) реалізуються наступні режими розгортки: за вертикаллю – напруга сигналу, за горизонталлю – час.
- В режимі B/A: за вертикаллю – сигнал каналу В, за горизонталлю – сигнал каналу А.
- В режимі A/B: за вертикаллю – сигнал каналу А, за горизонталлю – сигнал каналу В.

В режимі розгортки Y/T тривалість розгортки (*Time base*) може бути заданою в діапазоні від 0,1 нс/дел (ns/div) до 1 с/дел (s/div) з можливістю встановлення зміщення в тих самих одиницях за горизонталлю, тобто, за віссю X (*X position*).

В режимі Y/T також передбачено режим очікування (*Trigger*) з запуском розгортки (*Edge*)

- за переднім або заднім фронтом запускаючого сигналу (вибирається натисканням кнопок ), при регульованому рівні (*Level*) запуску,
- в режимі *Auto* (від каналу А або В),
- від каналу А,
- від каналу В,
- від зовнішнього джерела (*Ext*) синхронізації, який підключається до виводу в блоці керування *Trigger*.

Зазначені режими запуску розгортки вибираються кнопками .

Заземлення осцилографа здійснюється за допомогою вивода Ground в правому верхньому куті прилада.

Натискання кнопки *Expand* на простій моделі осцилографа відкриває розширену модель осцилографа (див. рис. Б.14).

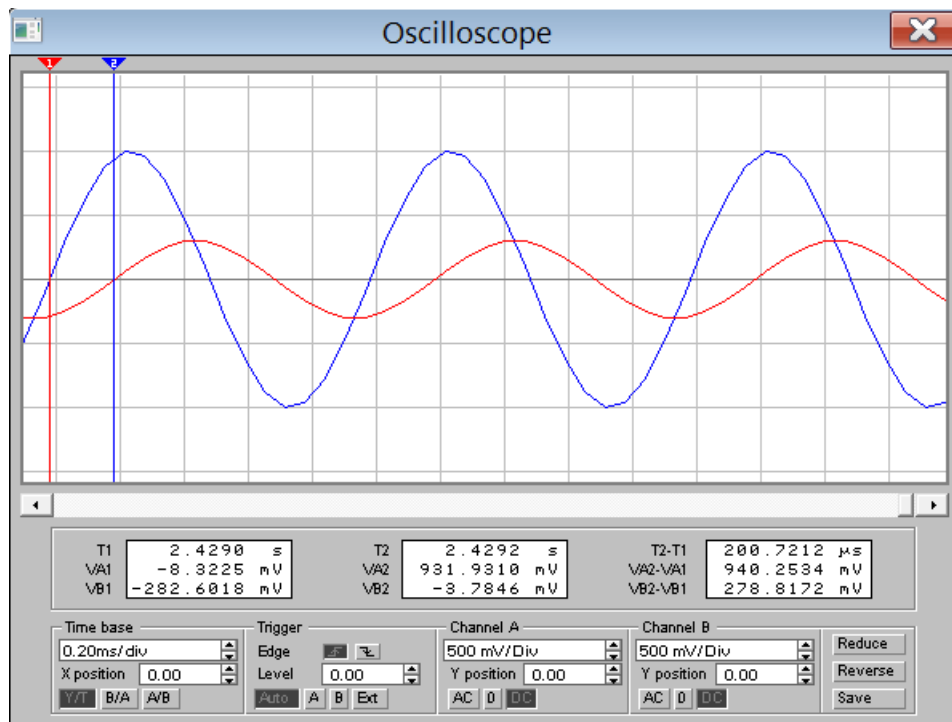


Рис. Б.14. Лицева панель осцилографа в режимі Expand

На відміну від простої моделі тут збільшений екран і є три інформаційні таблиці, на яких виводяться результати вимірювань. Окрім того, безпосередньо під екраном знаходиться лінійка прокрутки, яка дозволяє спостерігати будь-який часовий відрізок від моменту активізації до моменту виключення схеми.

На екрані осцилографа розташовані два курсори (червоний і синій), які позначені «1» і «2» і за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруг у будь-якій точці осцилограми. Для цього курсори перетягуються мишкою в потрібне положення (мишкою захоплюють трикутники у верхній частині курсору).

На правому відображено момент часу $T1$, що відповідає положенню першого курсору на осі часу, а також величини миттєвих напруг сигналів у каналах $VA1$, $VB1$ на момент $T1$. На середньому таблиці показано такі ж дані для другого курсору, а саме – $T2$, $VA2$, $VB2$. На правому таблиці відображено різницю моментів часу $T2 - T1$, а також миттєвих напруг $VA2 - VA1$, $VB2 - VB1$.

Інформація на цих таблицях дає змогу вимірювати параметри досліджуваних сигналів: період та тривалість сигналу, фазові зсуви між сигналами, тривалість фронту та спаду імпульсних сигналів, амплітуди сигналу та інші параметри.

Зображення можна інвертувати натисканням кнопки *Reverse* (див рис. Б.15).

В режимі *Expand* зручно спостерігати фігури Ліссажу, обравши режим розгортки В/А (див.рис. Б.16) або А/В.

Також, в режимі *Expand* з'являється кнопка *Save*, натискання на яку надає можливість зберегти дані сигналу/сигналів у файлі в текстовому форматі.

Натискання на кнопку *Reduce* забезпечує перехід назад до простої моделі осцилографа.

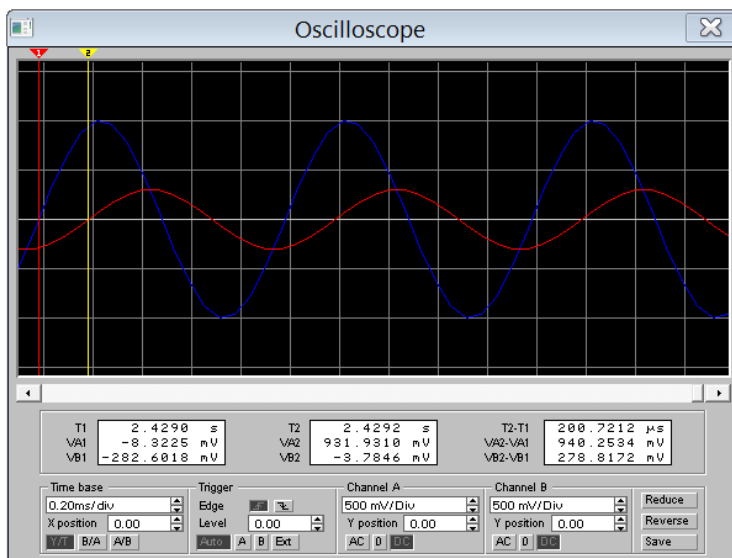


Рис. Б.15. Лицева панель осцилографа в реверсному режимі

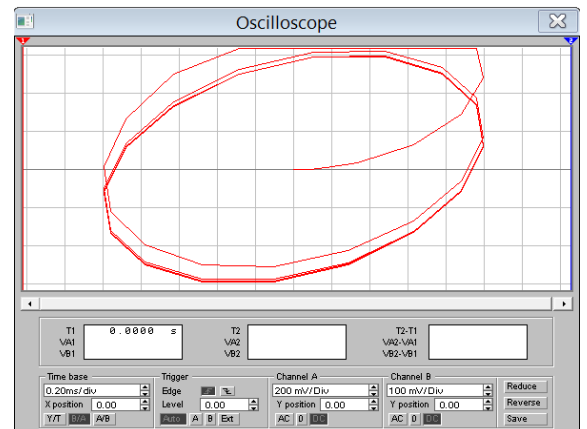


Рис. Б.16. Фігура Ліссажу

Б.4.2. Функціональний генератор

Генератор є ідеальним джерелом напруги, яке виробляє сигнали синусоїдної, або трикутної, або прямокутної форми.



Середній вивід генератора при підключенні до схеми забезпечує спільну точку для відрахунку амплітуди змінної напруги. Для відрахунку напруги відносно нуля цей вивід заземлюють. Крайні лівий та правий виводи слугують для подавання сигналу до схеми.

Напруга на правому виводі змінюється у додатному напрямку відносно спільного виводу, на лівому виводі – у від'ємному.

Для налаштування функціонального генератора потрібно підвести мишку на його зображення та натиснути **праву** кнопку. Вибравши команду *Open*, відкрити збільшене зображення генератора (рис. Б.17), на якому можна задати:

- форму вихідного сигналу,
- частоту вихідної напруги (Frequency), від 0.1 Гц до 999 МГц
- шпаруватість (Duty cycle), від 0.1% до 99%
- амплітуду вихідної напруги (Amplitude) від 1 мкВ до 999 кВ,
- постійну складову вихідної напруги (Offset).

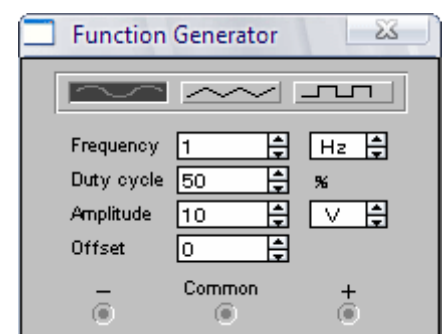


Рис. Б.17. Панель функціонального генератора

Використовуючі комбінацію форми сигналу, параметрів та обираючи той чи інший вихід функціонального генератора можна отримати різні форми сигналів,

які частково наведені на Рис. Б.18.

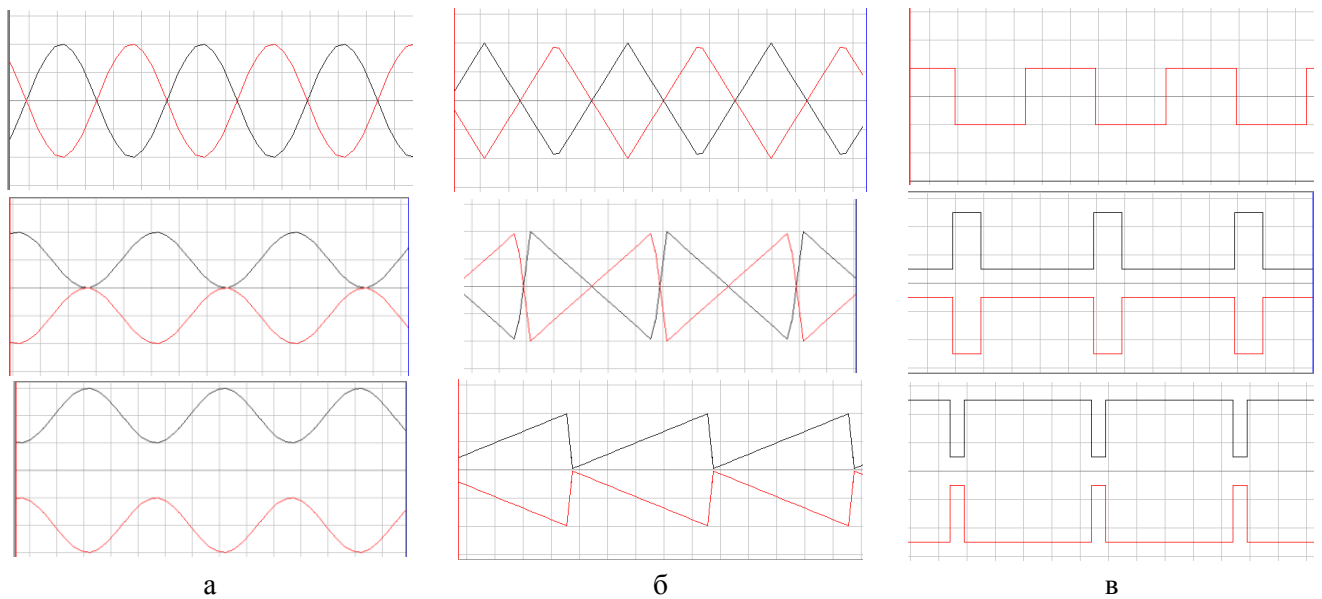
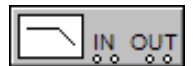


Рис. Б.18. Сигнали з виходів функціонального генератора:
а – синусоїдної форми, б – трикутної форми, в – прямокутної форми;
чорні криві – з додатного виходу, червоні криві – з від'ємного виходу

Б.4.3. Вимірювач АЧХ і ФЧХ

Для дослідження частотних характеристик коливальних кіл, що зостосовані в комп'ютерних практикумах, використовується вимірювач АЧХ і ФЧХ – вимірювач амплітудно-частотних (АЧХ) та фазо-частотних (ФЧХ) характеристик (у англomовній літературі *Bode Plotter*).



Вимірювач АЧХ і ФЧХ зображає відношення амплітуд сигналів у двох точках схеми та фазовий зсув між ними. Для вимірювань вимірювач АЧХ і ФЧХ генерує власний спектр частот, діапазон якого може задаватися при налаштуванні приладу. Частота коливань будь-якого джерела в досліджуваній схемі ігнорується, однак схема повинна включати джерело змінної напруги.

Вимірювач АЧХ і ФЧХ має чотири виводи: два вхідних (IN) та два вихідних (OUT). Ліві виводи входів IN та OUT підключаються до досліджуваних точок, а праві виводи – заземлюються.

Для налаштування вимірювача АЧХ і ФЧХ потрібно підвести мишку на його зображення та натиснути **праву** кнопку. Вибравши команду *Open*, відкрити збільшене зображення вимірювача АЧХ і ФЧХ (рис. Б.19).

Досліджуваний параметр (АЧХ або ФЧХ) обирається кнопками *Magnitude* (натиснута за замовчуванням) та *Phase*.

Панель *Vertical* задає:

- початкове (I) значення параметру вертикальної осі,
- кінцеве (F) значення параметру вертикальної осі,

- вид шкали вертикальної осі – логарифмічна (*Log*) або лінійна (*Lin*).

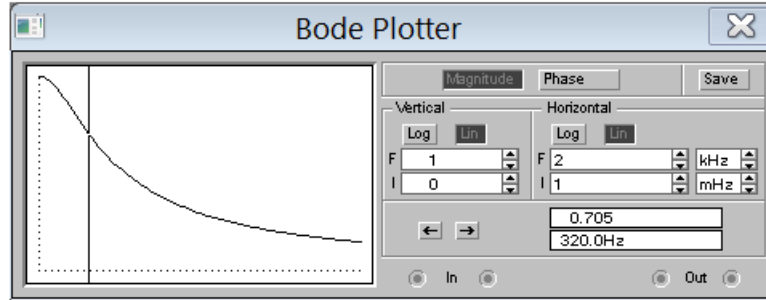


Рис. Б.19. Зображення вимірювача АЧХ і ФЧХ

При отриманні АЧХ по вертикальній осі відкладається відношення напруги:

- в лінійному масштабі від 0 до $10E9$;
- в логарифмічному масштабі від -200 dB до 200 dB.

При отриманні ФЧХ по вертикальній осі відкладаються градуси від -720 до $+720$ градусів.

Мінімальні та максимальні значення діапазону досліджуваних частот встановлюються за допомогою кнопок \uparrow, \downarrow та цифрових табло, що розміщені у полі *Horizontal* на лицевій панелі вимірювача.

Панель *Horizontal* задає:

- початкове (I) значення частоти,
- кінцеве (F) значення частоти,
- вид частотної шкали – логарифмічна (*Log*) або лінійна (*Lin*).

По горизонтальній осі завжди відкладається частота в Гц або у похідних одиницях.

Окрім частотної залежності параметру на екрані вимірювача є вертикальна риска-курсор, яка у вихідному положенні знаходиться на початковому значенні частоти. Риска-курсор можна пересувати за допомогою керувальних кнопок \rightarrow і \leftarrow (більш точно) або лівою кнопкою миші, встановивши її покажчик на вертикальну риску (менш точно). Праворуч від керувальних кнопок розміщені два табло. Нижнє табло відображає частотне положення курсора, верхнє – значення параметру на даній частоті.

За допомогою цих табло можна визначати граничні частоти та складати таблиці частотних залежностей амплітуди та фази.

Б.4.4. Вольтметр

Вольтметр (Voltmeter) використовується для вимірювання напруги постійного та змінного струму.



Для налаштування вольтметра потрібно навести курсор миші на його

зображення, натиснути **праву** кнопку і відкрити меню *Component Properties*. Там в меню *Mode* обрати *DC* – постійний струм (встановлено за замовчуванням) або *AC* – змінний струм.

Б.4.5. Джерело гармонічних коливань напруги

Ідеальне джерело змінної напруги синусоїдальної форми (AC Voltage Source) з нульової постійною складовою може включатися в схему «напрохід» (тоді генерованим ним сигнал сумується з вже існуючим сигналом) або виконувати роль вхідного джерела (тоді один з його виводів заземлюється).



Для налаштування генератора потрібно навести курсор миші на його зображення, натиснути **праву** кнопку і відкрити меню *Component Properties* (рис. Б. 20).

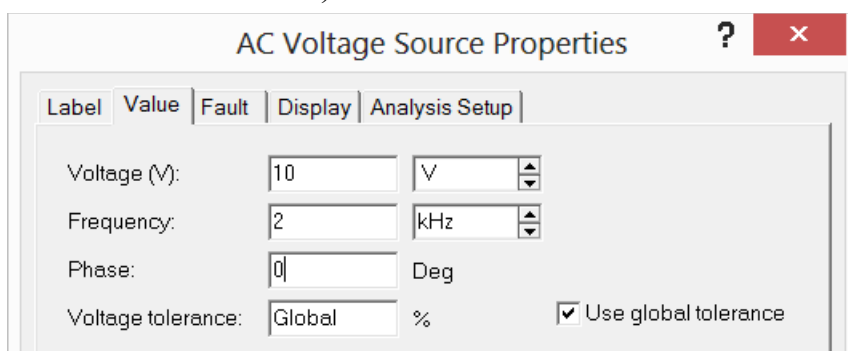


Рис. Б.20. Панель джерела гармонічної напруги

Тут можна встановити: **дієву** амплітуду – *Voltage (V)*, частоту – *Frequency* та початкову фазу – *Phase* вхідної напруги.

Б.4.6. Джерело сигналів з тональною АМ

Джерело сигналу змінної напруги з тональною АМ (*AM Source*) також може включатися в схему «напрохід» або один з його виводів заземлюється.



Для формування потрібного сигналу з тональною АМ треба навести на зображення джерела мишу і подвійно клацнути **лівою** кнопкою. Відкриється вікно, що показано на рис. Б.21.

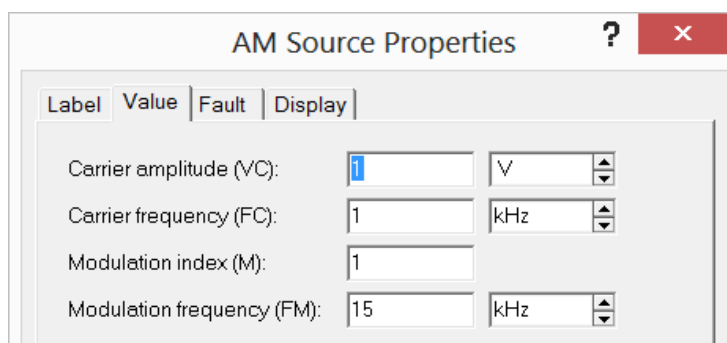


Рис. Б.21. Параметри джерела тонального АМ сигналу

В ньому можна встановити / змінити такі параметри:

- амплітуду носійного коливання U_0 (*Carrier amplitude*);
- носійну частоту f_0 (*Carrier frequency*);
- глибину (індекс) модуляції m (*Modulation index*);

– частоту керуючого коливання F (*Modulation frequency*).

Три з цих параметрів (окрім глибини модуляції) на схемі позначаються поряд із зображенням джерела (справа).

Б.4.7. Джерело тональних ЧМ сигналів

Джерело сигналу змінної напруги з тональною ЧМ (*FM Source*) також може включатися в схему «напрохід» або один з його виводів заземлюється.



Для налаштування джерела сигналу з тональною ЧМ треба навести мишу на його зображення і подвійно клацнути на ньому. Відкриється вікно *Component properties*. В ньому встановити наступні значення (див.рис. Б.22):

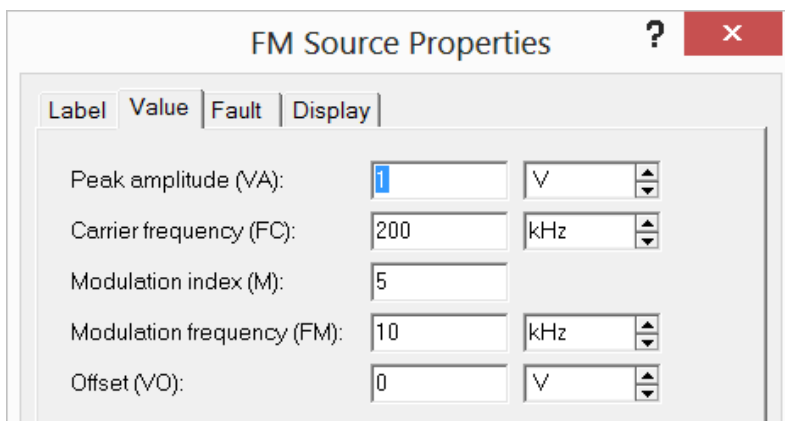
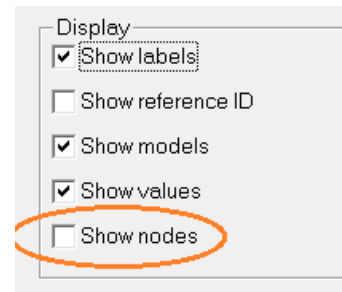


Рис.Б.22. Параметри джерела тонального ЧМ сигналу

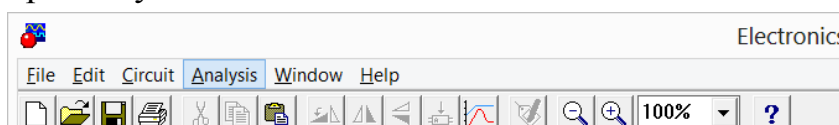
- амплітуду напруги (*Peak amplitude*) $VA = 1$ В;
- значення носійної частоти (*Carrier frequency*) $FC = 200$ кГц;
- значення індексу модуляції (*Modulation index*) $M = 5$ (наприклад);
- значення частоти керуючого сигналу (*Modulation frequency*) $FM = 10$ кГц.

В. Математичні засоби EWB для дослідження характеристик сигналів та кіл

Перед будь-яким аналізом слід встановити номери вузлів, що робиться у вікні *Schematic Options* меню *Circuit*.



В меню EWB *Analysis* є три команди, які можуть бути застосовані в комп'ютерних практикумах:



- команда *Fourier* для отримання АЧС та ФЧС сигналу у вказаному вузлі;
- команда *Transient* для отримання сигналу як функцію часу у вказаному вузлі;
- команда *AC Frequency* для отримання АЧХ та ФЧХ коефіцієнта передачі між вказаними вузлами.

Важливо.

1. Вказані характеристики моделюються в EWB математично і можуть дещо відрізнятися від вимірних в схемі вбудованими приладами EWB.
2. Перед запуском команди необов'язково активувати схему.
3. Після будь-яких змін у схемі відкрите вікно команди потрібно закрити і виконати команду знову

Розглянемо застосування усіх команд для схеми ФНЧ на рис. В.1.

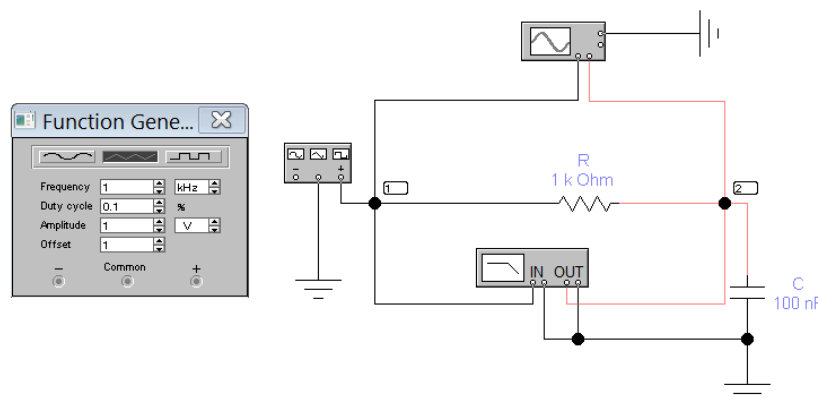


Рис. В.1. ФНЧ

На вхід подається періодична послідовність трикутних імпульсів, з частотою 1 кГц.

В.1. Частотні характеристики сигналів

За допомогою команди *Fourier* можна отримати амплітудно-частотний спектр (АЧС) періодичного сигналу у вказаному вузлі. За бажанням можна також отримати фазо-частотний спектр (ФЧС) сигналу та обвідну АЧС.

Для цього треба відкрити меню *Fourier* та встановити такі параметри (рис. В.2):

- в спадаючому переліку обрати номер вузла (*Output node*), сигнал в якому підлягає аналізу;
- частоту сигнала (*Fundamental frequency*) в бажаних одиницях;
- кількість гармонік (*Number of harmonics*), амплітуди яких бажано розрахувати.

Для сигналу, що заданий в схемі на Рис.В.1, для отримання АЧС вхідного сигналу треба встановити: номер вузла – 1, частоту – 1 кГц, кількість гармонік – наприклад, 20.

За замовчуванням буде створено тільки АЧС сигналу.

Натиснути мишкою на кнопку *Simulate*. Відкриється графічне вікно. В його верхній частині – графік АЧС, в нижній – коефіцієнт гармонік. Якщо натиснути мишкою на графік, навпроти нього зліва з'явиться маленький червоний трикутник. Тепер графік можна відредагувати (див.В.4), скопіювати і перенести до протоколу.

Вигляд АЧС після редагування наведено на рис. В.3.

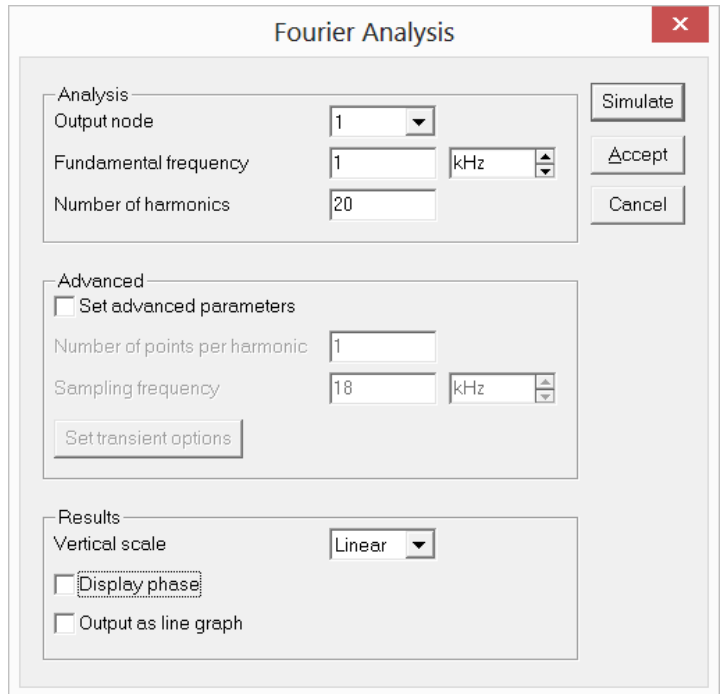


Рис. В.2. Меню параметрів АЧС та ФЧС

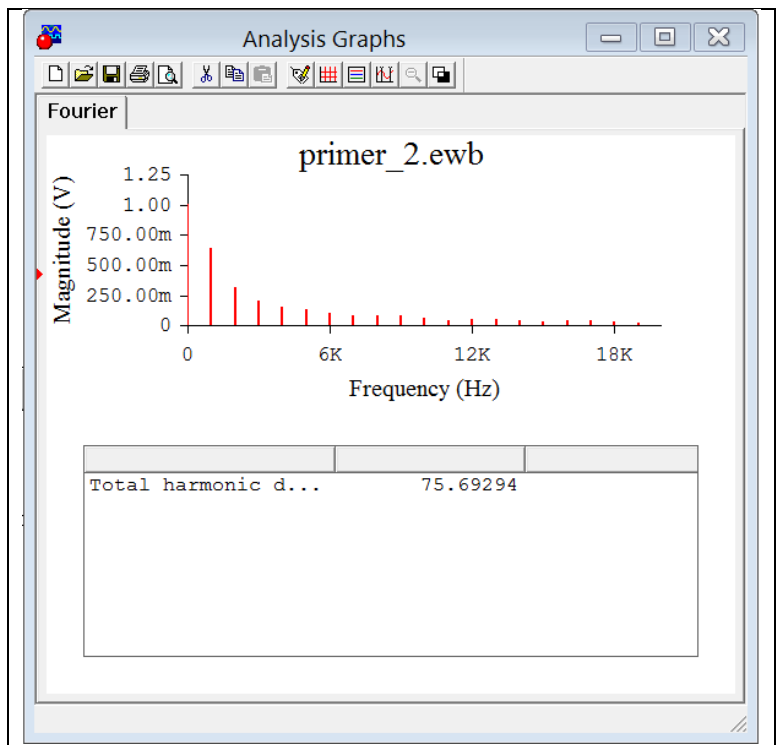




Рис. В.3. Приклад редагованого АЧС

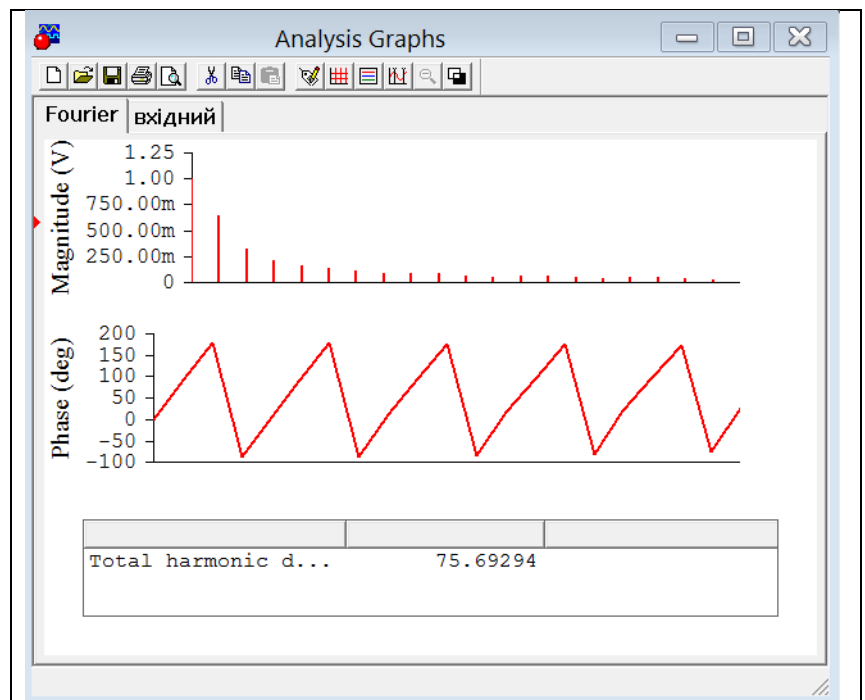
За допомогою вертикальних курсорів (див.п.В.4) можна визначити амплитуди гармонік цього АЧС.

Якщо треба отримати ще і ФЧС, тоді в полі *Display phase* (рис. В.2) потрібно поставити відмітку.

ФЧС зображається як обвідна фазового спектру.

За допомогою вертикальних курсорів (див.п.В.4) можна визначити початкові фази гармонік.

За бажанням можна замість АЧС побудувати тільки його обвідну. Для цього потрібно поставити відмітку в полі *Output as line graph* (рис.2).



В.2. Часові характеристики сигналів

Часові характеристики сигналів досліджують, застосовуючи команди *Transient*. Для цього треба:

Відкрити меню команди *Transient*.

Встановити значення *Start time* (за замовчуванням – 0) та *End time* у форматі з пливковою точкою в секундах, як показано на рис. В.4.

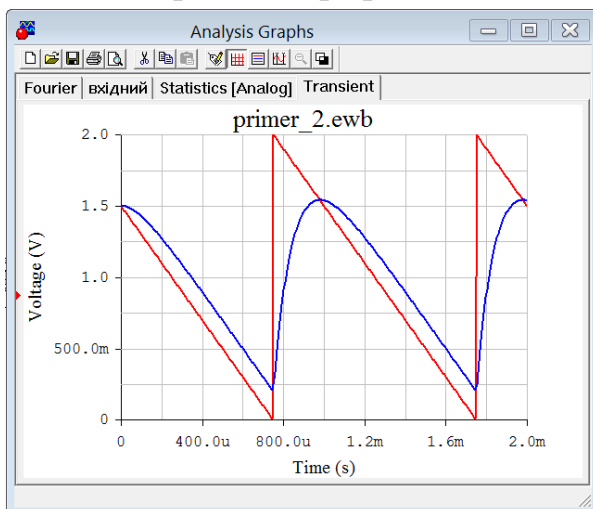
За бажанням встановити кількість розрахункових точок в заданому часовому інтервалі *Minimum number of time points* (за замовчуванням – 100).

Перенести у список *Nodes for analysis* зі списку *Nodes in circuit* номери тільки тих вузлів, сигнали в яких будуть спостерігатися одночасно.

Для сигналу (рис. В.1) на рис. В.4 наведено приклад заповнення меню параметрів сигналів. Тут встановлений час *End time* 0.002 с для спостереження двох періодів сигналу з частотою повторення 1 кГц.

Натиснути мишкою на полі *Simulate*.

Відкриється графічне вікно *Analysis Graphs*.



протоколу.

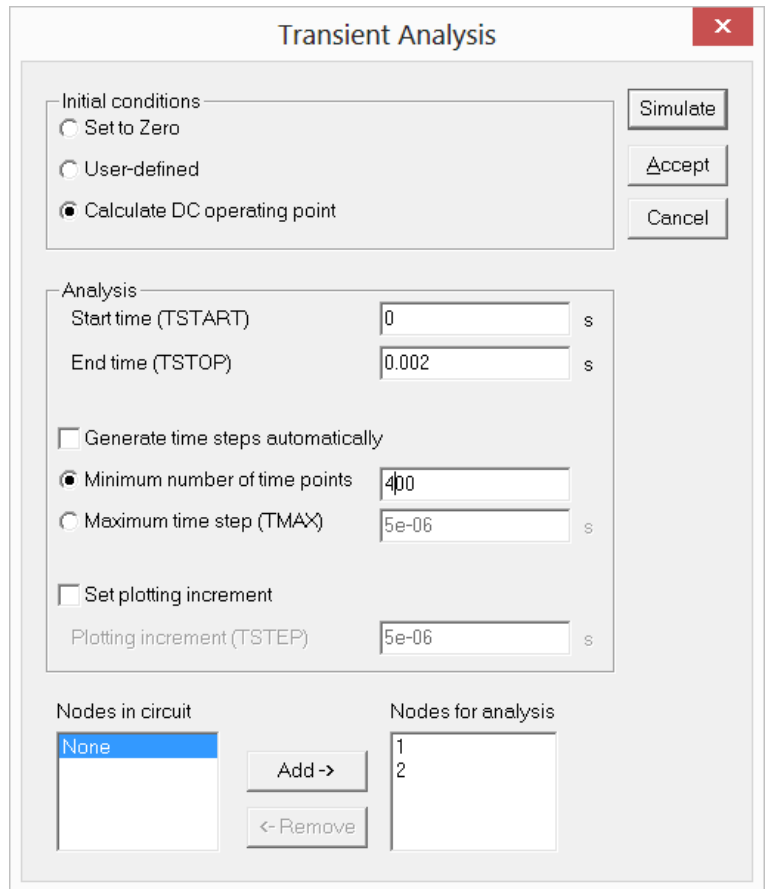


Рис. В.4. Меню параметрів сигналів

Оскільки у списку *Nodes for analysis* вказані два вузли, тому ми побачимо відразу два сигнали різного кольору: вхідний з вузла з номером 1 та вихідний з вузла з номером 2.

Оскільки встановлено значення *Start time* – 0, тоді тут показано самий початок перехідного процесу.

Графік можна відредагувати (див. п.В.4), скопіювати і перенести до

В.3. Частотні характеристики кіл

АЧХ та ФЧХ кіл досліджують за допомогою команди *AC Frequency* з меню *EWB Analysis*. Для цього треба:

Відкрити меню *AC Frequency*.

Встановити значення *Start frequency* (по замовчуванню 1 Гц – мінімальне допустиме значення) та *End frequency*.

Встановити кількість розрахункових точок в заданому частотному діапазоні *Number of points* (за замовчуванням – 100).

У списку *Node for analysis* треба залишити тільки вузол з номером, що відповідає вихідному вузлу кола.

На рис. В.5 наведені параметри АЧХ та ФЧХ для схеми на рис. В.1.

Натиснути ліву кнопку мишки на полі *Simulate*.

Відкриється графічне вікно *Analysis Graphs*.

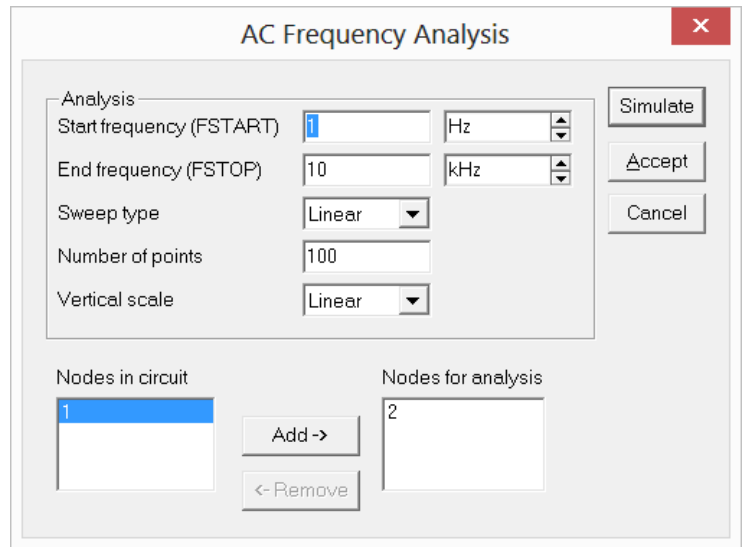
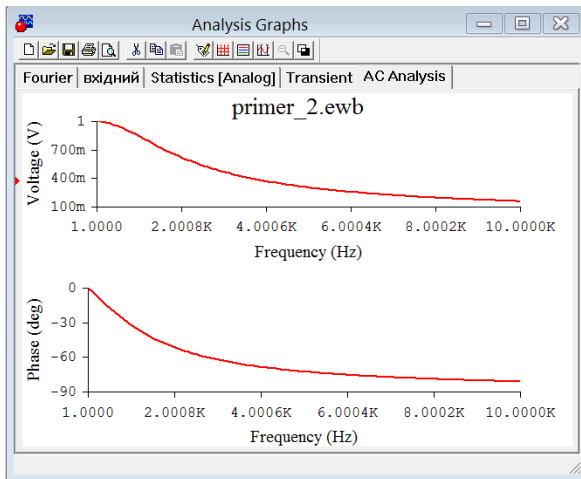


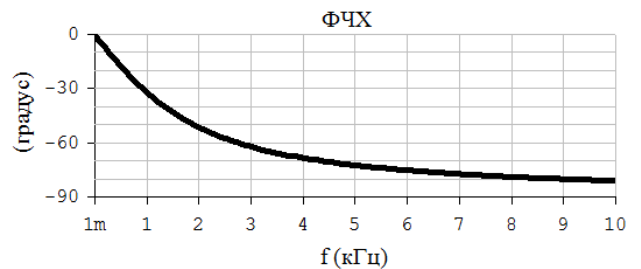
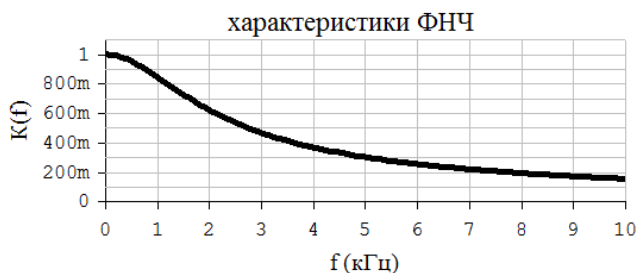
Рис. В.5. Меню параметрів АЧХ та ФЧХ



На верхньому графіку тут показано АЧХ, а на нижньому ФЧХ кола.









Можна відредагувати кожний графік (див. п.В.4), скопіювати і перенести до протоколу.

За допомогою вертикальних курсорів (див.п.В.4) можна визначити граничну частоту.









В.4. Команди графічного вікна

Панель інструментів


	<i>New</i> – створити нову сторінку (закладку) або закрити усі (отримати чисте поле);
	<i>Open</i> відкрити збережене раніше на диску графічне вікно *.gra;
	<i>Save as</i> – зберегти на диску графічне вікно *.gra;
	<i>Print</i> – виводити на принтер в режимі діалогу;
	<i>Print Preview</i> – встановити принтер;
	<i>Cut</i> – видалити з графічного поля відмічений графік (або таблицю) з копіюванням його у буфер;
	<i>Copy</i> – копіювати відмічений графік у буфер. Скопійований у буфер графік можна вставити у протокол або у іншу закладку (так можна зібрати в одній закладці сигнал та його спектр);
	<i>Paste</i> – вставити на графічне поле з буфера



Наступні команди працюють лише для відіченого графіка

	<i>Properties</i> – редагувати відміченого графіка;
	<i>Toggle Grid</i> – включити/відключити сітку;
	<i>Toggle Legend</i> – включити/відключити легенду;
	<i>Toggle Cursors</i> - включити/відключити вертикальні курсори;
	<i>Restore Graph</i> – відновити графік;
	<i>Reverse Colors</i> – обернути кольори.

Додаткові функції

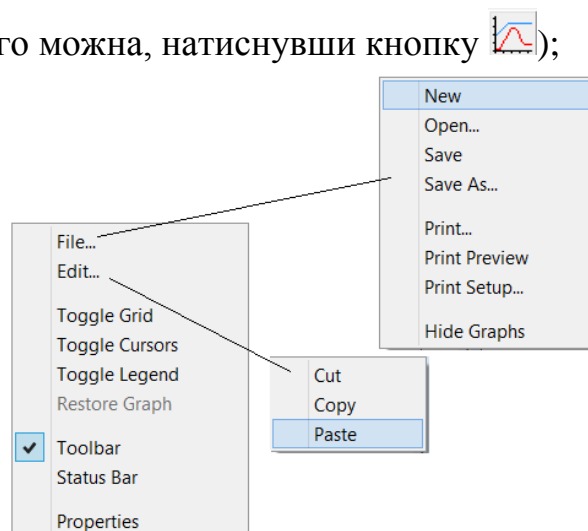
 згорнути графічне вікно (розгорнути його можна, натиснувши кнопку );

 розгорнути (збільшити до розмірів робочого поля EWB (потім можна зменшити у звичайний спосіб);

 закрити графічне вікно (відкрити його можна, натиснувши кнопку .

Графічне вікно можна розтягнути (збільшити у розмірах) звичайним чином.

Команди з панелі інструментів можна також отримати, натиснувши на відмічений графік правою кнопкою миши і потім обравши потрібну дію.



В.5. Редагування графіків

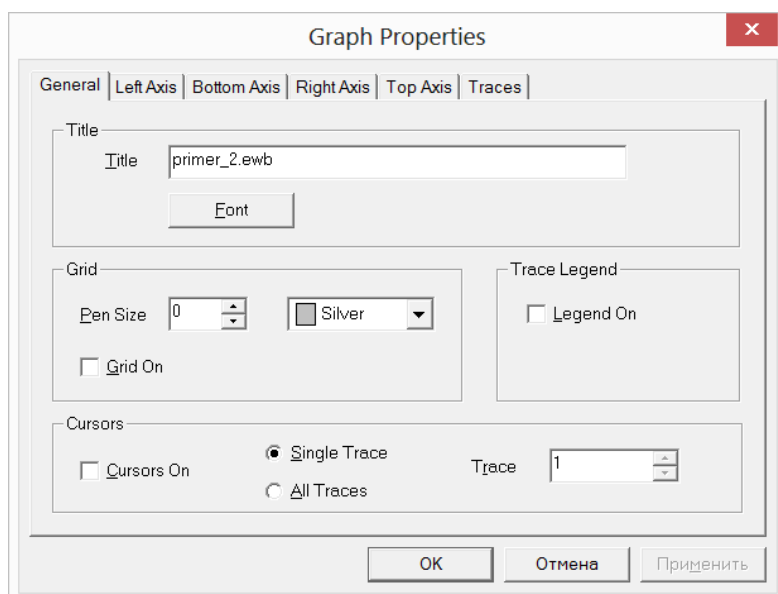
Визвавши команду Properties, відкриємо вікно редагування, яке містить шість вікон:

- *General* – загальні установки
- *Left Axis* – редагування лівої шкали
- *Bottom Axis* – редагування нижньої шкали
- *Right Axis* – редагування правої шкали, якщо вона потрібна
- *Top Axis* – редагування верхньої шкали, якщо вона потрібна
- *Traces* – редагування кривих

Усі шкали редагуються однаково.

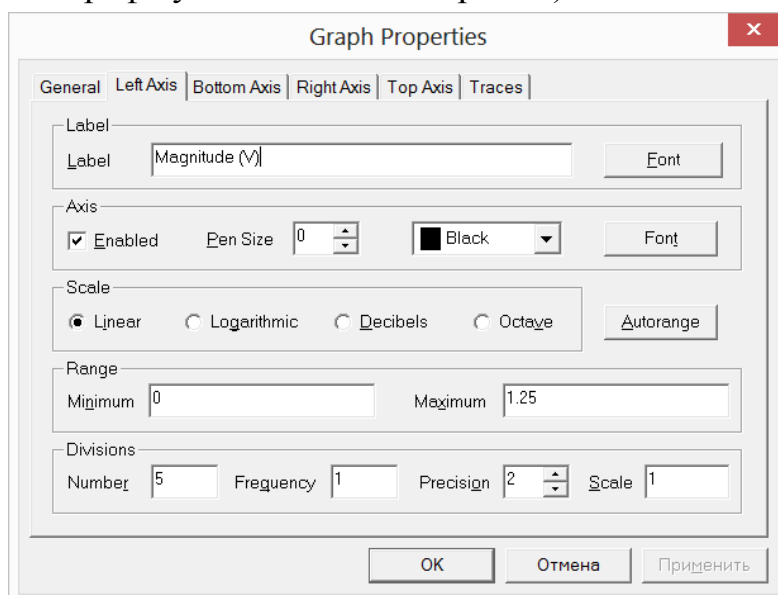
Загальні установки

- (**Title**) встановити назву графіка (*Title*) та налаштувати шрифт;
- (**Grid**) включити / відключити сітку (*Grid On*), встановити її колір та товщину ліній;
- (**Trace Legend**) включити/відключити легенду (*Legend On*);
- (**Cursors**) включити/відключити вертикальні курсори (*Cursors On*), встановити номер кривої (*Trace*), яку супроводжують курсори (якщо на графіку дві або більше кривих).



Редагування шкали

- (**Label**) встановити підпис шкали, та налаштувати шрифт;
- (**Axis**) включити/відключити шкалу (*Enabled*), встановити товщину та колір шкали, налаштувати штрифт для оцифрування шкали;
- (**Scale**) обрати масштаб: лінійний (*Linear*), логариф-

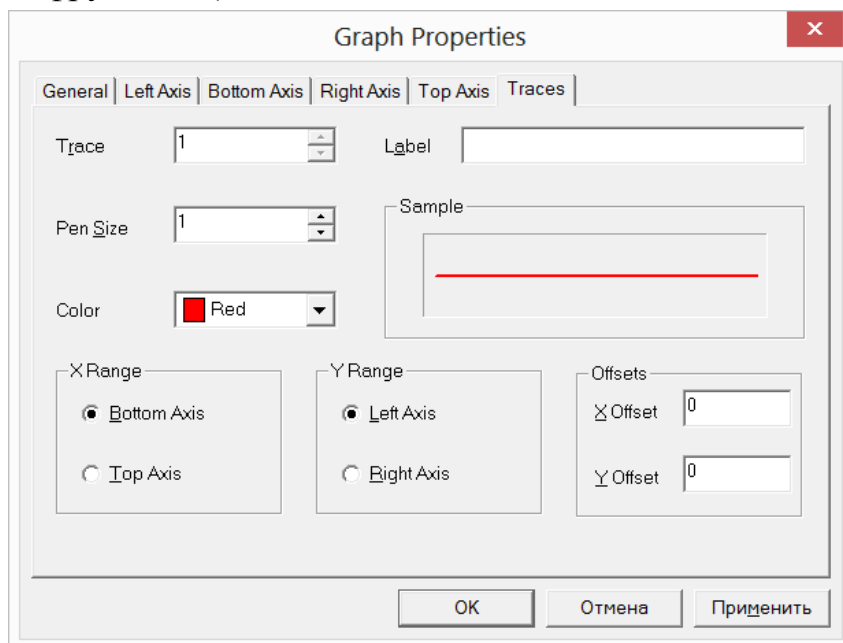


мічний (*Logarithmic*), в децибелах (*Decibels*), октавний (*Octave*) (для звукових сигналів);

- (*Autorange*) обрати автомасштабування;
- (*Range*) встановити діапазон шкали: мінімальне значення (*Minimum*), максимальне значення (*Maximum*);
- (*Divisions*) встановити загальну кількість поділок шкали (*Number*), як часто оцифровувати шкалу (*Frequency*), кількість знаків після коми про оцифруванні (*Precision*), множник для оцифрування (*Scale*).

Редагування кривих

- (*Trace*) обрати номер кривої
- (*Label*) надати кривій помітку (тоді при вивозі дегенди, крива буде мати назву)
- (*Pen Size*) обрати товщину кривої
- (*Color*) обрати колір кривої
- (*XRange*) обрати нижню (*Bottom Axis*) (за замовчуванням) або верхню (*Top Axis*) шкалу для кривої
- (*YRange*) обрати ліву (*Left Axis*) (за замовчуванням) або праву (*Right Axis*) шкалу для кривої
- (*Offsets*) змістити криву відносно шкали на задану величину: по осі X (*XOffset*), по осі Y (*YOffset*)



В.6. Робота з вертикальними курсорами

При виклику команди (*Cursors*) – курсори на графіку з'являються дві вертикальні лінії і відкривається додаткове інформаційне віконце:

- x_1 – координата x першого курсора;
- y_1 – координата y першого курсора;
- x_2 – координата x другого курсора;
- y_2 – координата y другого курсора;
- $dx = x_1 - x_2$;

Magnitude (V)	
x_1	3.0000K
y_1	202.2316m
x_2	4.0000K
y_2	159.1848m
dx	1.0000K
dy	-43.0468m
$1/dx$	1.0000m
$1/dy$	-23.2305
min x	0.0000
max x	20.0000K
min y	0.0000
max y	1.0053

- $dy = y_1 - y_2$;
- $1/dx$;
- $1/dy$;
- $\min x$ – мінімальне значення осі X;
- $\max x$ – максимальне значення осі X;
- $\min y$ – мінімальне значення осі Y;
- $\max y$ – мінімальне значення осі Y.

Для пересування курсору його треба захопити мишею у будь-якій точці по висоті і встановити в місце кривої, значення координат якої нас цікавить. За даними в інформаційному віконці контролюємо точність встановлення курсора в потрібне місце.

Г. Деякі корисні схеми

Важливо. При проектуванні схем слід враховувати, що прилади (осцилограф, функціональний генератор, вимірювач АЧХ і ФЧХ, мультиметр) можуть бути присутні в схемі тільки в одному екземплярі, тоді як різноманітних одноіменних джерел може бути багато.

Г.1. Схеми тонального амплитудного модулятора

Г.1.1. Глибина модуляції $m \leq 1$

Папка *ОТТРТ_КР_LIB*, схема *am_01.ewb*.

Якщо глибина модуляції $m \leq 1$, тоді можна користуватися вбудованим в EWB джерелом сигналу з тональною АМ

$$u(t) = U_0 \cdot [1 + m \cdot \cos(2\pi Ft)] \cdot \cos(2\pi f_0 t), \quad (\text{Г.1})$$

де U_0 , f_0 – амплітуда та частота носійного коливання, m – глибина модуляції, F – частота керувального сигналу.

Для формування потрібного АМ сигналу за допомогою цього джерела треба навести на його зображення мишу і подвійно клацнути *лівою* кнопкою. Відкриється вікно, що показано на рис. Г.1. В ньому можна встановити / змінити такі параметри:

- амплітуду носійного коливання U_0 (*Carrier amplitude*);
- носійну частоту f_0 (*Carrier frequency*);
- глибину (індекс) модуляції m (*Modulation index*);
- частоту керуючого коливання F (*Modulation frequency*).

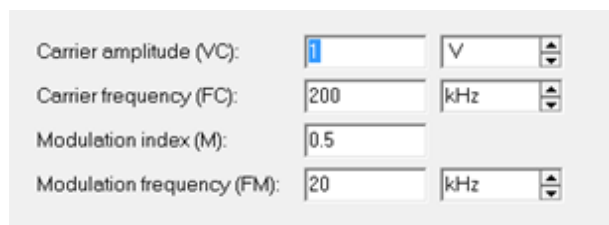


Рис. Г.1. Параметри джерела тонального АМ сигналу

Три з цих параметрів (окрім глибини модуляції) на схемі позначаються поряд із зображенням джерела (справа), як показано на рис. Г.2 для сигналу з параметрами, що вказані на рис Г.1.

Для прикладу на рис. Г.3 наведено осцилограму та АЧС тонального АМ сигналу з $m = 0.5$.

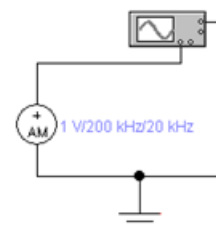


Рис. Г.2. Схема *am_01.ewb*

Чому в такий спосіб неможливо досліджувати АМ сигнали з $m > 1$ за допомогою EWB ? Тому що в такому випадку АЧС сигналу не відповідає

дійсності. Наприклад, встановимо $m = 2$. На рис. Г.4 наведено осцилограму та АЧС цього сигналу. Бачимо, що, хоча, осцилограма правильно відображає сигнал, АЧС його, який розраховується за допомогою вбудованої математичної функції *Fourier*, неправильний.

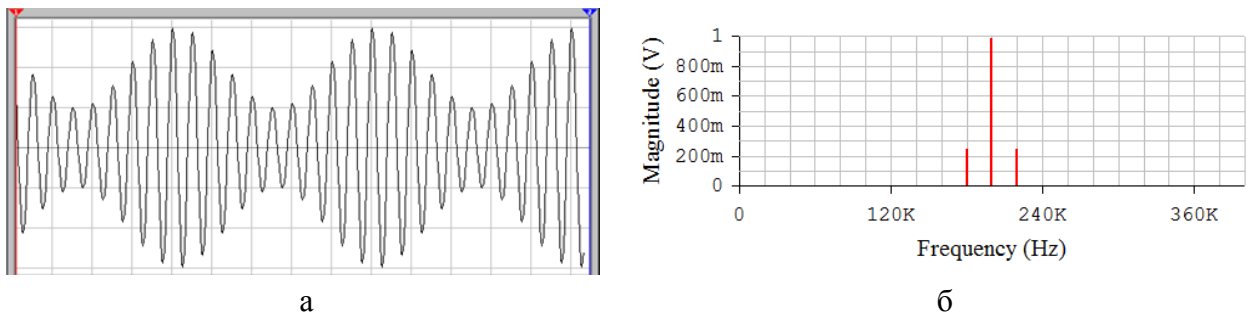


Рис. Г.3. Осцилограма (а) та АЧС (б) тонального АМ сигналу з $m = 0.5$, що отримані на схемі на рис. Г.2

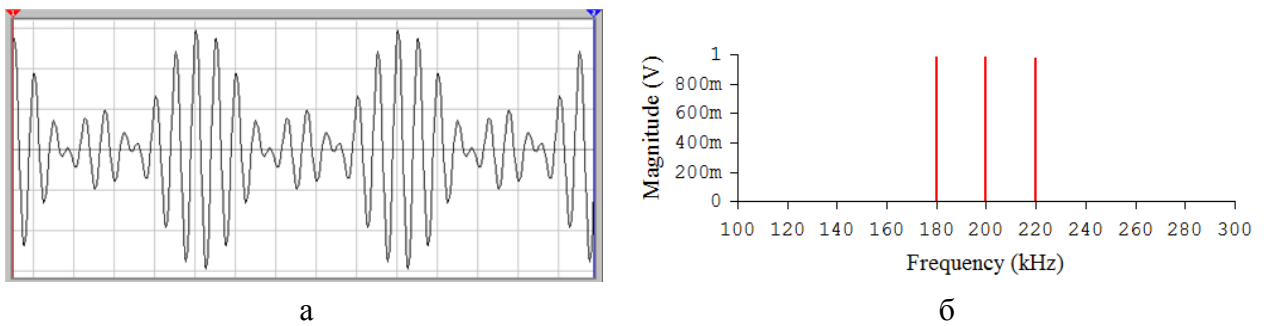


Рис. Г.4. Осцилограма (а) та АЧС (б) тонального АМ сигналу з $m = 2$, що отримані на схемі на рис. Г.2

Додаткова можливість. Якщо поміняти місцями значення носійної частоти і частоти керувального сигналу (тобто F буде мати значення носійної частоти, а f_0 – частоти керувального сигналу), тоді в джерелі АМ сигналу будуть сформовані сигнали іншого вигляду.

Приклади таких сигналів наведені на рис. Г.5.

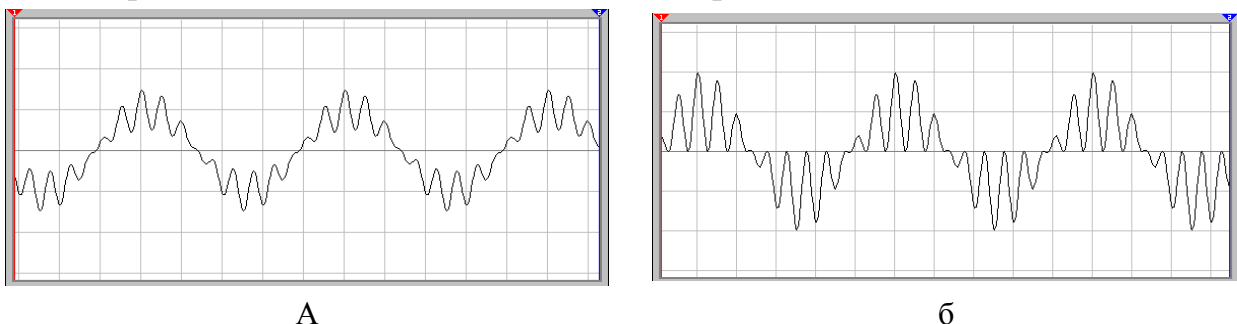


Рис. Г.5. Осцилограми сигналів з низькою носійною частотою та високою частотою керуючого коливання з $m = 0.5$ (а) та $m = 1$ (б)

Г.1.2. Глибина модуляції $m > 1$

Г.1.2.1. Схема з функціональним генератором

Папка *ОТТРТ_КР_ЛІВ*, схема *am_b1_1.ewb*.

Схема тонального амплітудного модулятора, в якому глибина модуляції m може перевищувати одиницю ($m > 1$), на базі функціонального генератора наведена на рис. Г.6.

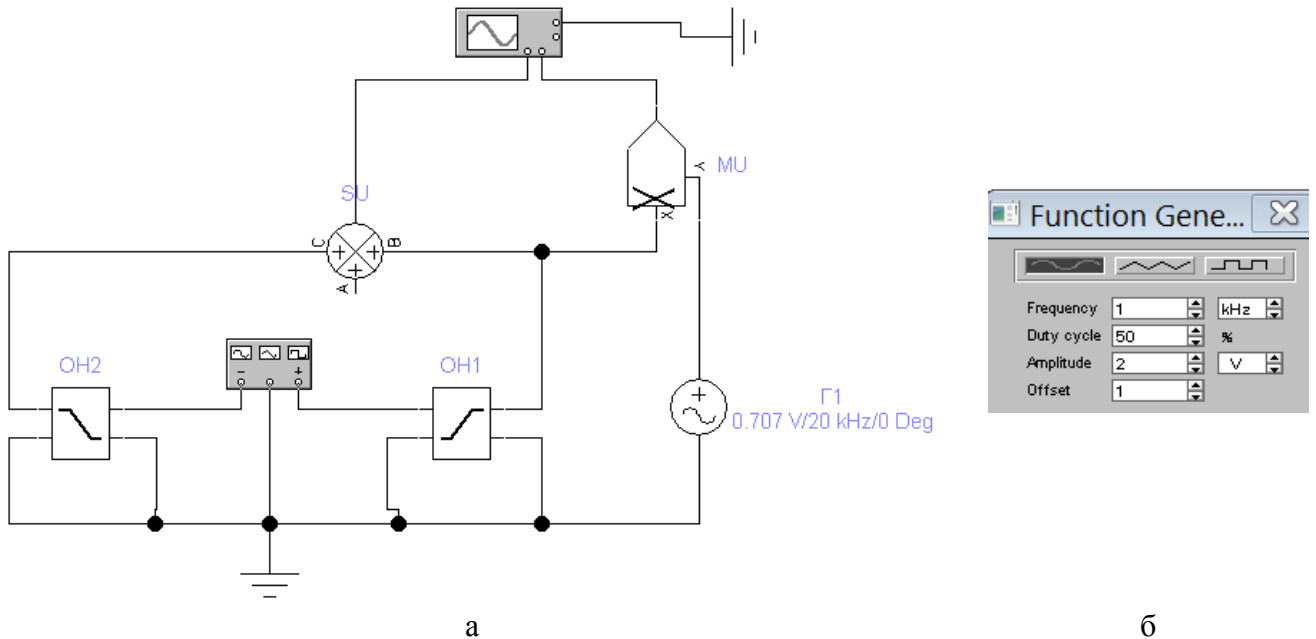


Рис. Г.6. Схема *am_b1_1.ewb* (а) та приклад показників функціонального генератора (б)

В схемі є можливість одночасно використовувати сигнали з додатного та від'ємного відносно «землі» виходів функціонального генератора. Кожен сигнал проходить через однакові обмежувачі напруги ОН1 та ОН2 [0,10] В. На рис. Г.7 для прикладу на рис. Г.6,б наведені осцилограми та АЧС сигналів після обмежувачів напруги.

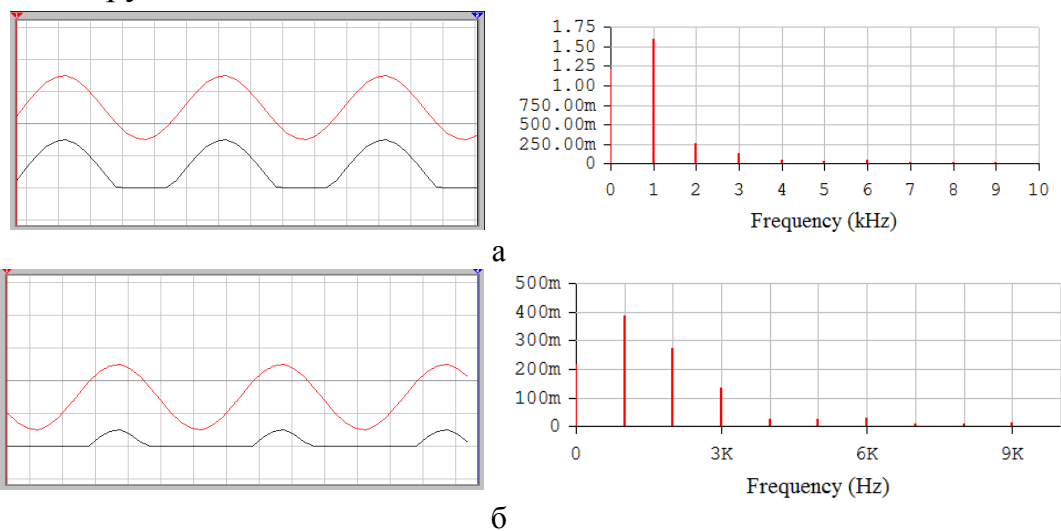


Рис. Г.7. Додатний (а) та від'ємний (б) сигнали та їх АЧС після обмежувачів напруги

Далі обмежені за напругою сигнали підсумовуються в суматорі SU. Вихідний сигнал суматора та його АЧС представлені на рис. Г.8.

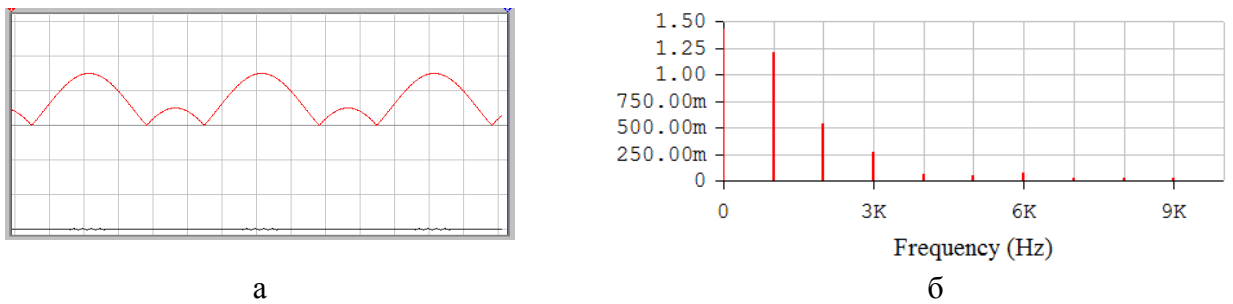


Рис. Г.8. Сигнал з вихода суматора (а) та його АЧС (б)

Нарешті, підсумковий сигнал перемножується з синусоїдальним сигналом джерела Г1 у перемножувачі МУ. Параметри джерела гармонічної напруги для прикладу, що розглядається, наведені на рис. Г.9. Нагадаємо, значення амплітуди напруги повинно бути *дієвим*.

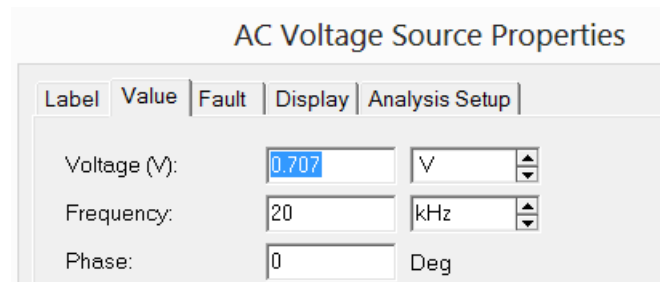


Рис. Г.9. Параметри джерела Г1

На рис. Г.10 показана осцілограма та АЧС отриманого тонального АМ сигналу з глибиною модуляції $m = 2$.

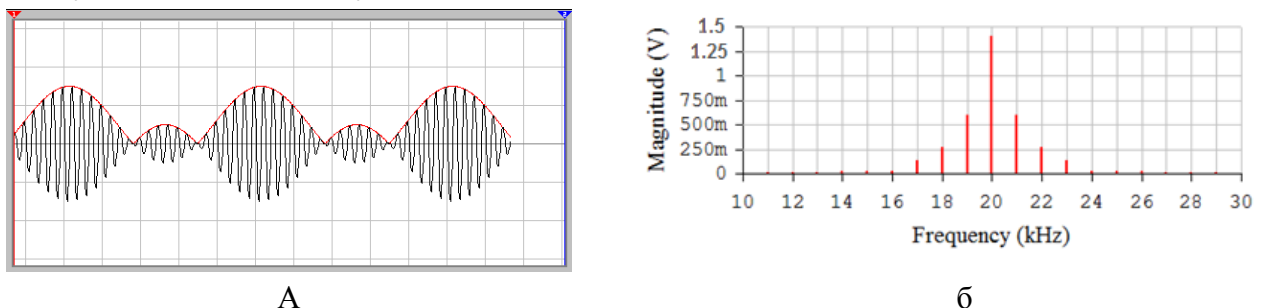


Рис. Г.10. Вихідний тональний АМ сигнал (а) та його АЧС (б)

Г.1.2.1. Схема з джерелами гармонічних коливань

Папка *ОТТРТ_КР_L1B*, схема *am_b1_2.ewb*.

На рис. Г.11 наведена схема тонального амплітудного модулятора з глибиною модуляції $m > 1$, в якій, на відміну від схеми на рис. Г.6, застосовані лише джерела синусоїдних коливань. Два з них, Г1 і Г2, використані для формування обвідної, третій Г3 – надає коливання носійної частоти. Постійна складова 1 В або -1 В забезпечується двома джерелами постійної напруги E1 і E2, які відносно «землі» підключаються зустрічно.

Схема на рис. Г.11 забезпечує такі ж часові та частотні характеристики, що і схема на рис. Г.6.

Перевага схеми: вона вивільнює функціональний генератор, який може бути застосованим для інших цілей.

Недолік схеми: для зміни параметрів керувального колювання потрібно одночасно змінювати параметри джерел Г1 і Г2.

Окрім того, треба пам'ятати, що в джерелах гармонічних колювань Г1, Г2 та Г3 задається *дієве* значення амплітуди напруги.

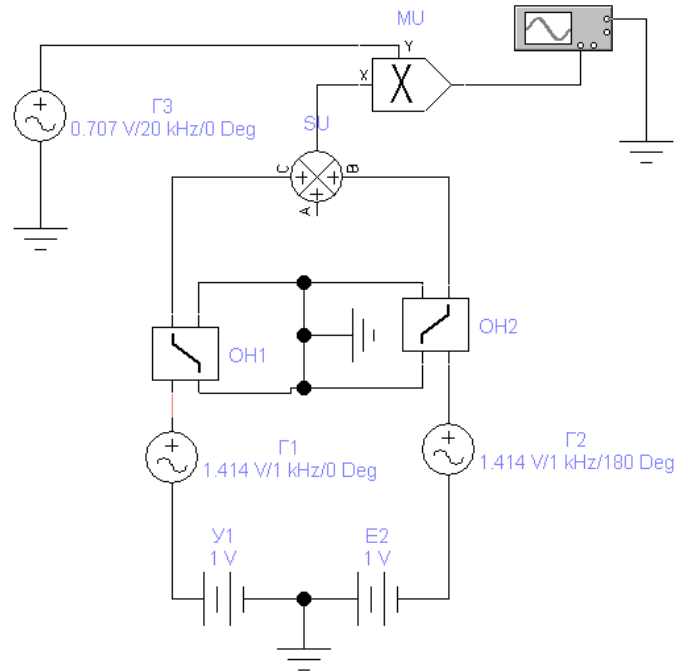


Рис. Г.11.

Г.2. Зв'язані колювальні контури

Папка *ОТРТ_КР_ЛІВ*, схема *kk_s2.ewb*.

Система двох зв'язаних колювальних контурів використовується в смугових ПВЧ, які застосовано в двох комп'ютерних практикумах.

Для схемної реалізації зв'язаних колювальних контурів в EWB їх реальну схему замінено еквівалентною, як це показано на рис. Г.12.

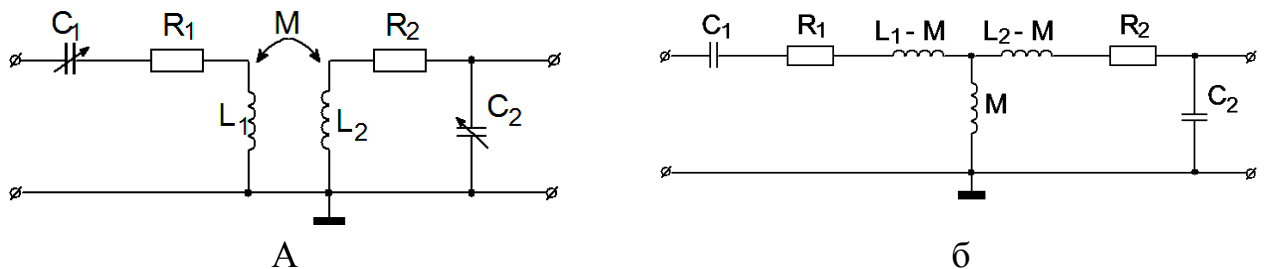


Рис. Г.12. Еквівалентне перетворення схеми двох зв'язаних колювальних контурів:
а – реальна схема; б – еквівалентна схема

Як бачимо, значення усіх трьох індуктивностей в схемі на рис. Г.12,б залежать від значення взаємної індуктивності M (з різними знаками).

Окрім того, в комп'ютерних практикумах для отримання досліджуваних ефектів необхідно системи зв'язаних контурів налаштовувати якомога точніше. Тому зроблено ще дві еквівалентні заміни, які наведено на рис. Г.13:

1) Послідовні індуктивності $L_n - M$ замінено на послідовне з'єднання постійної індуктивності L_{n1} , що складає $\approx 90\%$ від L_n , та змінної індуктивності $L_{n2} -$

M , максимальне значення якої дорівнює $L_n - L_{n1} \approx 10\%$ від L_n (рис. Г.13,а).

Максимальне значення взаємної індуктивності також дорівнює $L_n - L_{n1}$.

2) Ємності C_n замінені паралельним з'єднанням постійної ємності C_{n1} , що складає $\approx (80...85)\%$ від C_n , та змінної ємності C_{n2} , максимальне значення якої дорівнює $C_n - C_{n1} \approx (15...20)\%$ від C_n (рис. Г.13,б).

На рис. Г.14 наведено схему, яку отримано в результаті усіх еквівалентних заміни, з пристроями, що потрібні для збудження та налаштування схеми (джерело гармонічних коливань, два вольтметри $U1$ і $U2$, вимірювач АЧХ і ФЧХ).

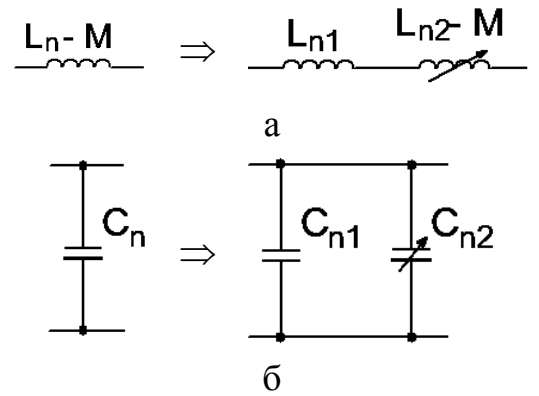


Рис. Г.13

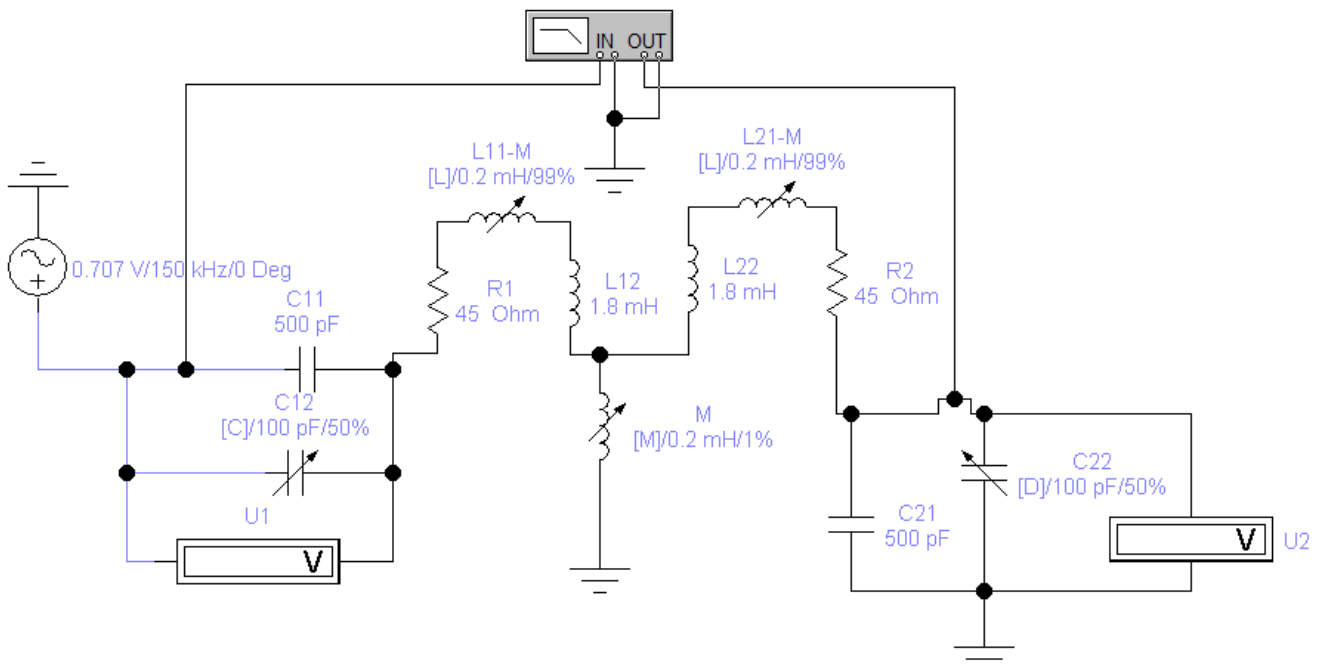


Рис. Г.14. Схема налаштування системи двох зв'язаних коливальних контурів

Початкове значення взаємної індуктивності $M = 1\%$ від 0.2 мГн – **мінімальний зв'язок**. Змінюється значення взаємної індуктивності натисканням клавіші «М» для зменшення або комбінації клавіш «Shift М» для збільшення.

Початкові значення індуктивностей $L11 - M = L21 - M = 99\%$ від 0.2 мГн. Змінюються значення обох цих індуктивностей одночасно (паралельно) натисканням клавіші «L» для зменшення або комбінації клавіш «Shift L» для збільшення.

Початкові значення ємностей $C12 = C22 = 50\%$ від 100 пФ. $C12$ змінюється натисканням клавіші «С» для зменшення або комбінації клавіш «Shift С» для

збільшення. С22 змінюється натисканням клавіши «D» для зменшення або комбінації клавіш «Shift D» для збільшення.

Параметри елементів на рис. Г.14 відповідають системі *однакових* зв'язаних контурів.

Налаштування.

Для мінімального зв'язку потрібно виконати наступні дії:

- 1) Активувати схему.
- 2) Змінюючи значення ємності С12, досягти максимальної напруги U_1 – налаштуємо вхідний контур в резонанс.
- 3) Змінюючи значення ємності С22, досягти максимальної напруги U_2 – налаштуємо вихідний контур в резонанс.
- 4) Після цього налаштуємо коливальну систему в режим повного резонансу. Для цього змінюємо взаємну індуктивність з метою досягнення максимальної напруги U_2 .

Важливо. Для того, щоби не «збилися» налаштування п.2) і 3) – тоді доведеться починати усе спочатку – необхідно, збільшуючи значення взаємної індуктивності M , одночасно зменшувати значення індуктивностей $L_{11} - M$ та $L_{21} - M$ (або при зменшенні M одночасно збільшувати інші змінні індуктивності).

5) Зберегти отримані при налаштуванні значення ємностей С12 та С22, а також значення взаємної індуктивності, що відповідає оптимальному зв'язку.

6) Відкрити та налаштувати вимірювач АЧХ і ФЧХ на діапазон частот, який відповідає початковим значенням L і C (наприклад, L_1 і C_1 в схемі на рис. Г.12,а).

7) Активувати схему. Спостерігати АЧХ коливальної системи ПВЧ. За нею, у разі необхідності, визначити значення резонансної частоти та ширину смуги пропускання.