

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КІЛ РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інформаційно-обчислювальні засоби радіоелектронних систем»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

Укладачі: В. М. Бондаренко, Н. О. Бондаренко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент

*Орлов А.Т., канд.техн.наук, доц.,
проф. кафедри мікроелектроніки, КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний
редактор

*Кучернюк П.В., канд.техн.наук, доц.,
доц. кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури,
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол № 5/22 від 31.05.2022 р.)*

Навчальний посібник містить варіанти індивідуальних завдань, методику і приклади розв'язання типових завдань та посилання на літературу щодо виконання студентами розрахункової роботи з дисципліни «Моделювання радіоелектронних кіл». Основну увагу приділено практичному засвоєнню студентами базових режимів моделювання радіоелектронних кіл, підтримуваних програмою PSpice, визнаною у світі промисловим стандартом. Програма PSpice є складовою системи проектування інтегральних схем OrCAD американської компанії Cadence. Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка, також буде корисним для самостійного вивчення і практичного застосування інструментів моделювання радіоелектронних кіл.

Реєстр. № НП 21/22-849. Обсяг 1,0 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

Зміст

Вступ.....	4
1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ	5
2. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ.....	6
2.1. Аналіз робочої точки (Bias Point).....	6
2.2. Аналіз частотних характеристик (AC Sweep).....	6
2.3. Аналіз у часі/перехідних процесів (Time Domain/Transient).....	7
3. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РОБОТИ.....	9
4. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	10
4.1. Аналіз робочої точки (Bias Point).....	10
4.2. Аналіз частотних характеристик (AC Sweep)	16
4.3.Аналіз у часі/перехідних процесів (Time Domain/Transient).....	20
5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ РОБОТИ....	29
Список рекомендованої літератури.....	30
Перелік посилань.....	31
Додаток. Варіанти індивідуальних завдань.....	32

Вступ

У навчальному посібнику наведені варіанти індивідуальних завдань, вимоги, методика і приклади розв'язання типових завдань та посилання на літературу щодо виконання студентами спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» розрахункової роботи (РР) з дисципліни «Моделювання радіоелектронних кіл». В рамках дисципліни «Моделювання радіоелектронних кіл», яка продовжує схемотехнічний цикл підготовки бакалаврів, застосовуються базові методи теорії кіл та обробки даних, а практичне моделювання здійснюється за допомогою визнаної в світі промисловим стандартом програми OrCAD PSpice [1] американської компанії Кейденс (Cadence) шляхом вибору і налаштування необхідного типу аналізу. Програма моделювання PSpice, звичайно, не замінює лабораторний експеримент, який дозволяє вирішити, чи задовольняє схема необхідним вимогам. Проте, за допомогою моделювання можна скоротити витрати на лабораторні експерименти.

Досвідчені проектувальники радіоелектронних пристроїв відмовляються від лабораторної збірки і проводять збірку першого прототипу відразу на друкованій платі. Саме такий шлях розвитку інтерактивного моделювання запропоновано розробниками пакета програм OrCAD, який об'єднав всі інструменти, необхідні для проектування електронних пристроїв, під однією призначеною для користувача оболонкою. В результаті стало можливим здійснювати весь процес проектування пристрою за комп'ютером, включаючи проектування друкованих плат [2], яке студенти також вивчають у конструкторсько-технологічному циклі дисциплін підготовки бакалаврів.

Дисципліна “Моделювання радіоелектронних кіл” базується на знаннях з дисциплін «Основи теорії кіл», «Методи обробки даних в інформатиці», отриманих студентами впродовж першого та другого років навчання.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Головна мета виконання індивідуальних завдань (тобто РР) полягає у засвоєнні студентами знань про основні методи та типи аналізу радіоелектронних кіл з застосуванням методів обробки даних та оволодінні практичними вміннями та навичками самостійного отримання характеристик радіоелектронних кіл у програмному середовищі OrCAD.

Формально у межах виконання розрахункової роботи студент має:

- провести комп'ютерне моделювання заданого кола на постійному струмі з перевіркою результатів шляхом розрахунку схеми заміщення на постійному струмі вручну за допомогою метода вузлових напруг;
- отримати частотні характеристики шляхом комп'ютерного моделювання заданого кола на змінному струмі;
- отримати перехідну характеристику шляхом комп'ютерного моделювання заданого кола у часі (режим перехідних процесів);
- провести комп'ютерне моделювання заданого кола у часі на заданій частоті до досягнення сталого синусоїдального режиму;
- проаналізувати отримані характеристики заданого кола та підтвердити проведені обчислення шляхом порівняння результатів моделювання у різних режимах для окремих частот та моментів часу;
- зробити висновки по роботі.

2. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Завдання: для кола (Рис. 1 - 5, табл. 1, 2 у Додатку) з параметрами з табл. 3 у Додатку (номер рис., варіанту і параметри отримуються індивідуально у викладача) за допомогою програми PSpice виконати моделювання у наведених нижче режимах.

2.1. Аналіз робочої точки (Bias Point)

Аналіз робочої точки проводиться шляхом моделювання кола в режимі постійного струму за методом вузлових напруг [3]. Режим постійного струму забезпечується за умов постійних напруг і струмів незалежних джерел, а також завершення перехідних процесів у колі. Математична модель кола в загальному випадку представлена системою нелінійних алгебраїчних рівнянь, у випадку лінійного кола – системою лінійних алгебраїчних рівнянь. Результатом розв’язання системи рівнянь є значення вузлових напруг, на базі яких розраховуються необхідні струми в елементах кола і функція передачі кола.

2.1.1. Сигнал на вході кола (надати скріншот кола): джерело струму з силою струму 1 А у режимі постійного струму (DC). У випадку наявності у колі котушки індуктивності, що закорочує вхід або вихід, виключити котушку з кола.

Необхідно в рамках аналізу робочої точки:

- визначити за допомогою програми моделювання і надати скріншоти:
 - а) вузлових напруг у колі, вихідної напруги;
 - б) функції передачі у режимі малого сигналу;
- порівняти з результатами розрахунку кола вручну за допомогою метода вузлових напруг.

2.2. Аналіз частотних характеристик (AC Sweep)

Аналіз частотних характеристик проводиться шляхом моделювання кола в режимі змінного струму з застосуванням методу комплексних амплітуд та

методу вузлових напруг [3]. Режим змінного струму забезпечується за умов зміни напруг і струмів незалежних джерел за гармонічним законом, а також завершення перехідних процесів у колі. Також, за наявності у колі нелінійних елементів, застосовується лінійна апроксимація їх вольт-амперних характеристик, яка приводить до лінійної схеми заміщення нелінійного кола. Математична модель кола в цьому режимі представлена системою лінійних алгебраїчних рівнянь. Результатом розв'язання такої системи рівнянь є значення амплітуд і початкових фаз вузлових напруг, на базі яких розраховуються амплітуди і початкові фази необхідних струмів в елементах кола. За умови зміни частоти гармонічного сигналу в заданому діапазоні, на базі розрахованих для окремих частот амплітуд і початкових фаз вихідного сигналу будуються амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристики.

2.2.1. Сигнал на вході кола (надати скріншот кола): джерело гармонічного струму з амплітудою коливання 1 А. Коло повне.

Необхідно в рамках аналізу частотних характеристик:

- отримати частотні характеристики кола і надати скріншот отриманих діаграм;
- визначити амплітуду і початкову фазу вихідної напруги на частоті 0,16 Гц.

2.3. Аналіз у часі/перехідних процесів (Time Domain/Transient)

Аналіз у часі проводиться шляхом моделювання кола в режимі перехідних процесів з застосуванням дискретних схем заміщення реактивних та нелінійних елементів, побудованих на базі чисельних методів розв'язку диференціальних і нелінійних алгебраїчних рівнянь [3], та методу вузлових напруг. В результаті застосування дискретних схем заміщення математична модель кола на кожному кроці обчислень у часі і на кожній ітерації представлена системою лінійних алгебраїчних рівнянь. Результатом розв'язання такої системи рівнянь є значення вузлових напруг в моменти часу, що визначаються вибраним кроком обчислень, величина якого залежить від

швидкості зміни вузлових напруг у часі. На базі часових залежностей вузлових напруг розраховуються часові залежності необхідних струмів в елементах кола. Завершення перехідних процесів у колі супроводжується настанням сталого режиму: у випадку постійного вхідного сигналу – режиму постійного струму, у випадку гармонічного вхідного сигналу – сталого синусоїдального режиму.

2.3.1. Сигнал на вході кола (надати скріншот кола): джерело струму з амплітудою стрибка струму 1 А (початковий рівень струму – нульовий). У випадку наявності у колі котушки індуктивності, що закорочує вхід або вихід, виключити котушку з кола.

Необхідно в рамках аналізу перехідних процесів:

- отримати перехідну характеристику кола, що відображає зміну вихідної напруги і надати скріншот отриманої діаграми;
- порівняти результати з результатами моделювання кола у режимі аналізу робочої точки.

2.3.2. Сигнал на вході кола (надати скріншот кола): джерело гармонічного струму з амплітудою коливання 1 А і кутовою частотою 1 рад/с (частота: 0,16 Гц). Коло повне.

Необхідно в рамках аналізу сталого синусоїдального режиму:

- отримати діаграму вихідної напруги після закінчення перехідного процесу і надати скріншот отриманої діаграми та діаграми вхідного струму;
- порівняти отримані результати з результатами моделювання частотних характеристик кола (використовуючи курсор у точці 0,16 Гц);
- зробити висновки стосовно результатів моделювання і порівняння роботи кола в різних режимах.

3. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РОБОТИ

Розрахункова робота має складатися з трьох розділів, кожен з яких відповідає типу проведеного аналізу схеми в рамках індивідуальних завдань:

1. Аналіз робочої точки.
2. Аналіз частотних характеристик.
3. Аналіз у часі/перехідних процесів.

Також мають бути зроблені Висновки за результатами аналізу отриманих характеристик заданого кола та порівняння результатів моделювання у різних режимах для окремих частот та моментів часу.

В кожному розділі роботи наводяться скріпшоти створеної в редакторі OrCAD принципової схеми, отриманих характеристик схеми, а також розрахунки або дані, необхідні для підтвердження і перевірки результатів моделювання. Загальний обсяг розрахункової роботи не має перевищувати 8 сторінок формату A4.

4. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1. Аналіз робочої точки (Bias Point)

У випадку постійного струму всі конденсатори розглядаються як розриви в електричному колі, всі котушки індуктивності – як короткі замикання. Нелінійні компоненти, наприклад діоди або транзистори, замінюються на їх опір постійному струму в робочій точці. Створена таким чином схема заміщення містить тільки активні опори. В результаті аналізу цієї схеми у режимі робочої точки отримуємо вузлові потенціали.

Всі напруги, які обчислює PSpice, є вузловими, тобто відраховуються від точки, відміченої на схемі як «земля». На окремо взятому компоненті напруга дорівнює різниці вузлових потенціалів на виводах компоненту. Для виконання моделювання необхідно

- завантажити заздалегідь підготовлену схему через меню **File -> Open -> Project**;
- відредагувати профіль моделювання (**PSpice -> Edit Simulation Profile**);
- відкрити меню **PSpice** і запустити моделювання командою **Run**.

Редагуючи профіль моделювання (**Edit Simulation Profile**) у вікні **Simulation Settings**, необхідно вибрати тип аналізу (**Analysis type**): **Bias Point** (робоча точка). Щоб виконати аналіз функції передачі у режимі малого сигналу, в настройках профілю моделювання (**Bias Point**) потрібно встановити прапорець поряд з опцією **Calculate small-signal DC gain (.TF)**. У полі, що відкрилося: **From Input source name** потрібно вказати джерело вхідної напруги (наприклад, **V1**), а в полі: **To Output variable** (до вихідної змінної) – вихідну напругу (наприклад, **V(out)**).

Після запуску моделювання командою **Run** відкриється екран PSpice Probe, причому його основне вікно буде порожнім. **Output Window** відобразить інформацію про хід моделювання. Вибравши **View -> Output File**, відкриємо

вміст вихідного файлу. При кожному аналізі програма PSpice обчислює дані про робочу точку. Ці дані містяться у вихідному файлі під заголовком: **SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION** і включають інформацію про вузлові потенціали і струми, що проходять через використовувані джерела напруги. Під заголовком **NODE VOLTAGE** знаходиться інформація про потенціал відповідного вузла. Далі наводиться інформація про струми джерел (**VOLTAGE SOURCE CURRENTS**) і споживану колом потужність (**TOTAL POWER DISSIPATION**). Результати розрахунків функції передачі знаходяться у вихідному файлі під заголовком: **SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS**.

Перевірити результати моделювання у режимі робочої точки можна шляхом створення схеми заміщення заданого кола на постійному струмі з подальшим записом і розв'язанням системи вузлових рівнянь. Відомо, що джерела напруг та струмів можуть бути взаємно перетворені. Припустимо, що таке перетворення проведене і коло містить тільки резистори, конденсатори, котушки індуктивності і джерела струмів. Покажемо, як формуються вектор струмів J і матриця Y системи рівнянь, яку називають системою вузлових рівнянь. Сформулюємо основні правила складання вузлових рівнянь:

1. Діагональні елементи матриці Y позитивні і $y_{jj} = \Sigma$ провідностей, підключених до j -го вузла.

2. Позадіагональні елементи матриці Y від'ємні і $y_{jk} = -\Sigma$ провідностей, включених між j -м та k -м вузлами.

3. Елемент вектора струмів J з номером j : $J_j = \Sigma$ струмів незалежних джерел, впадаючих в j -й вузол, $-\Sigma$ струмів джерел, витікаючих з вузла j .

Сформульовані правила корисні при складанні рівнянь вручну. Вони дозволяють записати рівняння при послідовному переборі всіх вузлів. Під час складання рівнянь за допомогою програми переважним є підхід, заснований на послідовному переборі елементів схеми.

Розглянемо елемент з провідністю y , включений між j -м та k -м вузлами

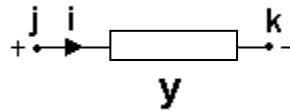


Рис. 4.1. Пасивний елемент з провідністю y

Припустимо, що струм i тече від вузла j до вузла k . Цей струм з'явиться в рівняннях балансу струмів, записаних тільки для j -го і k -го вузлів, причому один раз зі знаком "+", а інший раз зі знаком "-":

для j -го вузла $\dots + i \dots = \dots$;

для k -го вузла $\dots - i \dots = \dots$,

де точками замінені струми через інші елементи і джерела. Представимо струм i у вигляді добутку різниці потенціалів $V_j - V_k$ та провідності y :

для j -го вузла $\dots + y(V_j - V_k) \dots = \dots$;

для k -го вузла $\dots - y(V_j - V_k) \dots = \dots$.

Розділивши члени з різними вузловими потенціалами, отримаємо:

для j -го вузла $\dots + yV_j \dots - yV_k \dots = \dots$;

для k -го вузла $\dots - yV_j \dots + yV_k \dots = \dots$.

Звідси випливає, що провідність двополюсника, включеного між j -м та k -м вузлами, з'являється в матриці Y тільки в стовпцях і рядках з номерами j та k , причому зі знаком "+" в елементах з номерами (j,j) і (k,k) , зі знаком "-" в елементах з номерами (j,k) та (k,j) . Це можна записати символічно

$$\begin{matrix} & j & k \\ \begin{matrix} j \\ k \end{matrix} & \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Припустимо, що незалежне джерело струму J включене між j -м та k -м вузлами і струм направлений у бік вузла k . Тоді j -й і k -й компоненти вектора струмів J :

$$\begin{matrix} j \\ k \end{matrix} \begin{bmatrix} -J \\ J \end{bmatrix}$$

Зазначимо, що записані представлення для провідності і незалежного джерела струму будуть містити тільки один член, якщо даний елемент з'єднаний з нульовим вузлом.

Кероване напругою джерело струму можна легко включити в рівняння, записані по методу вузлових потенціалів. Позначимо його вхідні затиски літерами j, j' , а вихідні — літерами k та k' , тоді:

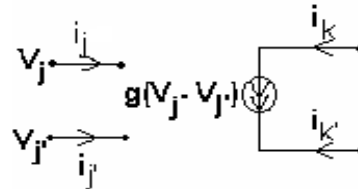


Рис. 4.2. Джерело струму, кероване напругою

Струми і напруги елемента пов'язані наступними співвідношеннями:

$$i_j = 0;$$

$$i_{j'} = 0;$$

$$i_k = g(V_j - V_{j'});$$

$$i_{k'} = -g(V_j - V_{j'}).$$

Провівши, як і раніше, перетворення можна показати, що Y -матриця керованого напругою джерела струму:

$$\begin{matrix} & j & j' & k & k' \\ \begin{matrix} j \\ j' \\ k \\ k' \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & -g & 0 & 0 \\ -g & g & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Приклад аналізу робочої точки

Результат аналізу робочої точки за допомогою програми PSpice (вузлові напруги) відображений у вихідному файлі (**Output File**) Рис. 4.3, а також на схемі (Рис. 4.4).

```

**** INCLUDING SCHEMATIC1.net ****
* source RGR
G_G1      0 OUT N00275 N00296 -1
R_R1      0 N00275 1 TC=0,0
R_R2      OUT N00275 1 TC=0,0
R_R3      OUT 0 1 TC=0,0
C_C1      N00275 N00296 1 TC=0,0
L_L1      0 N00296 4
I_I1      0 N00275 DC 1A

NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE
( OUT)  0.0000 (N00275)  .5000 (N00296)  0.0000

```

Рис. 4.3. Фрагменти вихідного файлу

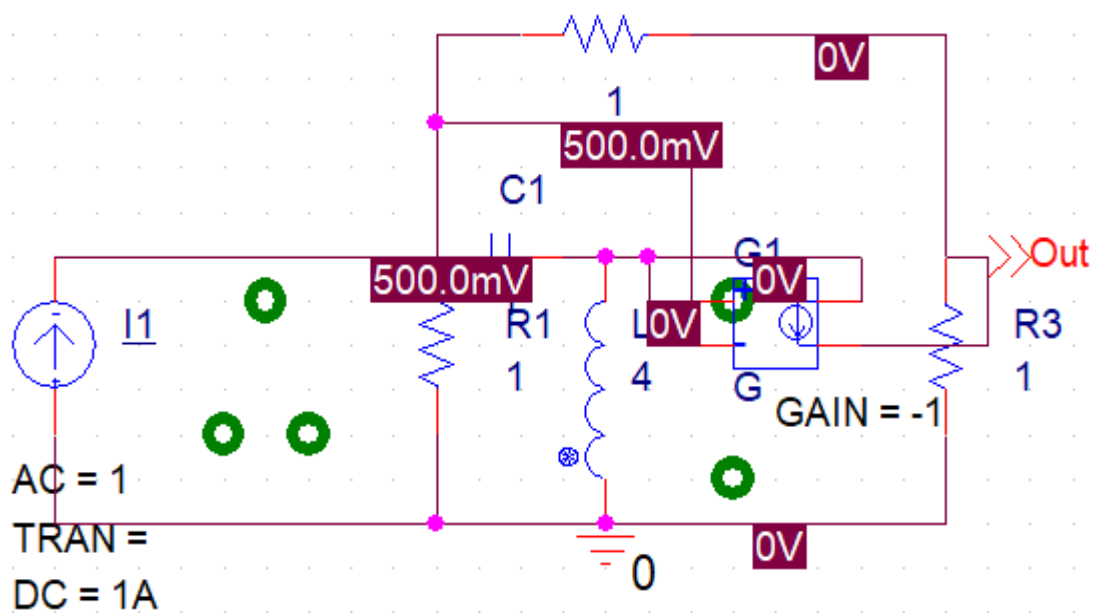


Рис. 4.4. Схема, створена в редакторі програмного середовища OrCAD

Функцію передачі у режимі малого сигналу (опір передачі) також можна знайти у вихідному файлі:

```

**** SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

V(OUT)/I_I1 = 0.000E+00
INPUT RESISTANCE AT I_I1 = 5.000E-01
OUTPUT RESISTANCE AT V(OUT) = 5.000E-01

```

Рис. 4.5. Опір передачі, вхідний і вихідний опори

Для заданого в Додатку варіанту (№ 6) і кола (схема 5) перехід до схеми заміщення на постійному струмі (DC) виглядає наступним чином (Рис. 4.6):

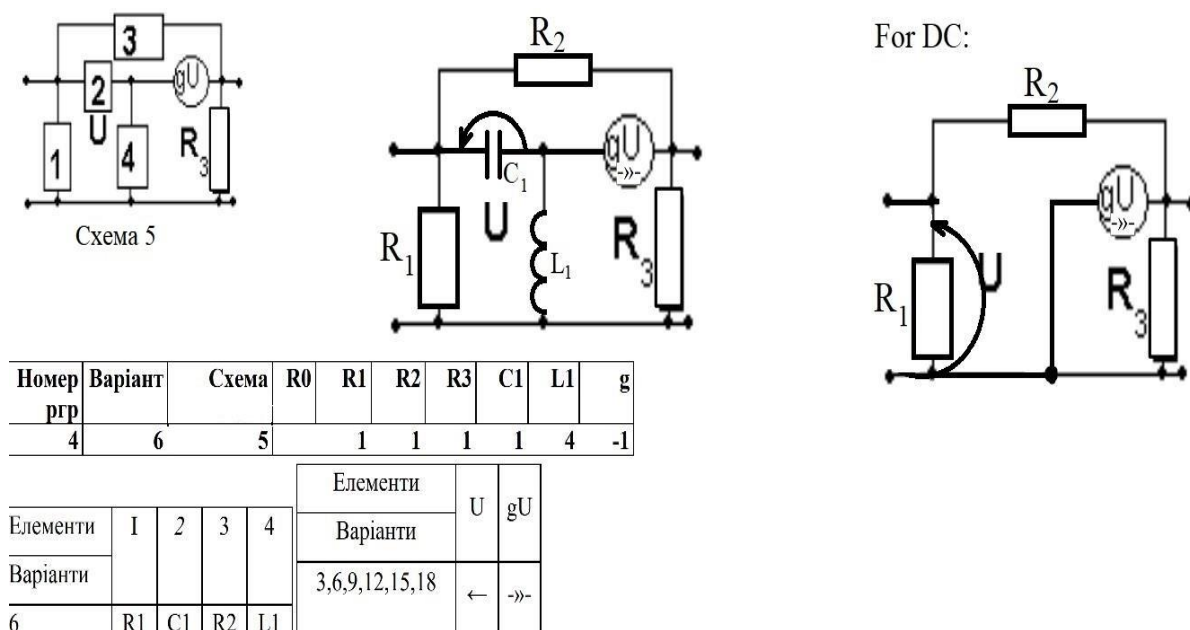


Рис. 4.6. Варіант схеми і схема заміщення для режиму постійного струму

Система вузлових рівнянь, створена для схеми заміщення:

$$\begin{bmatrix} G1+G2 & -G2 \\ -G2-g & G2+G3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

З врахуванням параметрів елементів, система має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Результат розв'язання системи рівнянь: $U1 = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}B$, $U2 = \frac{0}{4} = 0B$

співпадає з результатом моделювання.

4.2. Аналіз частотних характеристик (AC Sweep)

Під **AC Sweep** мається на увазі аналіз кола змінного струму в заданому частотному діапазоні. З допомогою редактора створюється схема, у якій в якості джерела напруги (струму) використовується, наприклад, джерело гармонічних коливань **VSIN (ISIN)** з бібліотеки **source.olb**. Атрибути джерела можна задати і після завершення побудови схеми. Для цього достатньо відкрити вікно атрибутів, двічі клацнувши по позначенню джерела, і встановити всі атрибути на 0 за винятком амплітуди коливань **AC** і **Reference**. Атрибутом **Reference** задається однозначне ім'я для компоненту. Програма PSpice автоматично привласнює імена всім схемним позначенням, даючи, наприклад, джерелам напруги ім'я **V**, за яким слідує порядковий номер. Ці імена можна змінювати. Але привласнення однакових імен двом компонентам приведе до помилки.

Джерело **VSIN (ISIN)** підходить як для аналізу на змінному струмі, так і для аналізу у часі/перехідних процесів. Значення напруги, що задається для амплітуди **AC**, потрібне тільки при проведенні аналізу на змінному струмі. Значення напруги, що задаються для амплітуди **VAMPL (IAMPL)** і середнього значення **VOFF (IOFF)**, діють тільки при аналізі у часі/перехідних процесів і ігноруються під час аналізу на змінному струмі. Також в останньому випадку ігноруються: частота **FREQ**, час затримки розповсюдження сигналу **TD** і коефіцієнт затухання **DF**. Не дивлячись на це, у будь-якому випадку необхідно задавати які-небудь значення для **VAMPL (IAMPL)**, **VOFF (IOFF)**, **FREQ**, **TD** і **DF** (наприклад, 0), навіть якщо аналіз у часі/перехідних процесів не проводитиметься. Інакше з'явиться повідомлення про помилку. Основні задані атрибути відображаються на схемі.

Перед початком моделювання виконується налаштування режиму. Для цього використовується профіль моделювання. У вікні **Simulation Settings** вибираємо **AC Sweep/Noise** (аналіз кола змінного струму/шумів). За допомогою аналізу **AC Sweep** можна досліджувати цілу серію частот. Для аналізу **AC Sweep/Noise** доступні 3 групи опцій:

а) група **AC Sweep Type** (базові налаштування режиму):

- **Linear** встановлює лінійний крок по частоті, при цьому поле **Total Points** задає загальну кількість частотних точок.
- **Logarithmic (Decade/Octave)** встановлює логарифмічний характер зміни частоти декадами або октавами відповідно. Поле **Points/Decade** при цьому визначає кількість частотних точок на одній декаді або октаві.
- **Start Frequency** та **End Frequency** задають відповідно початкову і кінцеву частоту в Гц.

б) група **Noise Analysis** (розрахунок шумових характеристик). Джерелами шуму можуть служити резистори, ключі і напівпровідникові прилади (у PSpice усі ці компоненти мають шумові схеми заміщення). При моделюванні на кожній частоті f розраховується спектральна щільність вихідної напруги $S_{u_{вих}}(f)$ [В²/Гц], обумовлена наявністю статично незалежних джерел внутрішнього шуму. Місця для зняття вихідної напруги вказуються в полі **Output Voltage** у форматі **V(<вузол>[,<вузол>])**, наприклад, у нашому випадку **V(Out)**.

До вхідних клем кола підключається незалежне джерело напруги або струму, ім'я якого вказується в полі **I/V Source**, наприклад, у нашому випадку **Vin**. Це джерело не є джерелом реального сигналу, воно служить лише для позначення вхідних клем кола, до яких перераховується вихідний шум. Якщо до входу підключене джерело напруги, то на вході розраховується еквівалентна спектральна щільність напруги $S_{u_{вх}}(f)$ [В²/Гц]; якщо до входу підключене джерело струму, то розраховується еквівалентна спектральна щільність струму $S_{i_{вх}}(f)$ [А²/Гц]. Рівень шуму перераховується з виходу на вхід як відношення

спектральної щільності вихідної напруги або струму на квадрат модуля відповідної функції передачі. При роботі з реальним генератором сигналу, його внутрішній опір R_T повинен бути включений в опис схеми як окремий резистор.

В полі **Interval** задається у вигляді цілого числа параметр **n**, який визначає, що на кожній **n**-й частоті в діапазоні аналізу розраховується не тільки спектральна щільність сумарного шуму, але й внесок кожного шумового джерела. Якщо в полі **Interval** немає заданих значень, то цей розрахунок не проводиться.

в) група **Output File Options** (опції вихідного файлу). Опція **Include detailed bias point information for nonlinear controlled sources and semiconductors (.OP)** дозволяє виводити у вихідний файл деталізовану інформацію про ключові параметри нелінійних керованих джерел і напівпровідників. Розрахунок характеристик у частотній області проводиться після визначення робочої точки і лінеаризації нелінійних компонентів (це робиться автоматично, ніяких додаткових директив не потрібно).

Усі незалежні джерела напруги **V** і струму **I**, для яких задані параметри змінних сигналів (амплітуди – обов’язково), є вхідними впливами. При проведенні аналізу на змінному струмі інші специфікації цих джерел, у тому числі параметри джерела синусоїдального сигналу, не приймаються до уваги (враховуються при аналізі у часі/перехідних процесів).

Проводимо аналіз схеми і переходимо назад у редактор Capture для виконання команди **PSpice⇒Markers⇒Voltage Level**. Розташовуємо маркер амплітуди напруги **V** на виході. Маркер **VDB** (**PSpice⇒Markers⇒Advanced⇒db Magnitude of Voltage**) дозволяє задавати значення величини в децибелах, яке вираховується як $20lg(\text{величина})$. Переходимо назад у редактор Capture і виконуємо команду **PSpice⇒Markers⇒Advanced⇒Phase of Voltage**. Розміщуємо маркер **VP** на виході (наприклад, в точці **OUT**). У вікні побудованих діаграм виберемо ім'я

VP(OUT) і виконаємо команду **Edit⇒Cut**. Потім виконаємо команду **Plot⇒Add Y Axis** (додати ще одну вісь **Y**) і, нарешті, команду **Edit⇒Paste**.

Приклад аналізу частотних характеристик (AC Sweep)

В схемі, наведеній на рис 4.7, встановлюємо для незалежного джерела струму **I1 (ISIN)** амплітуду коливань **AC=1**. Решта заданих параметрів ігноруються і знадобляться для аналізу у часі сталого синусоїдального режиму.

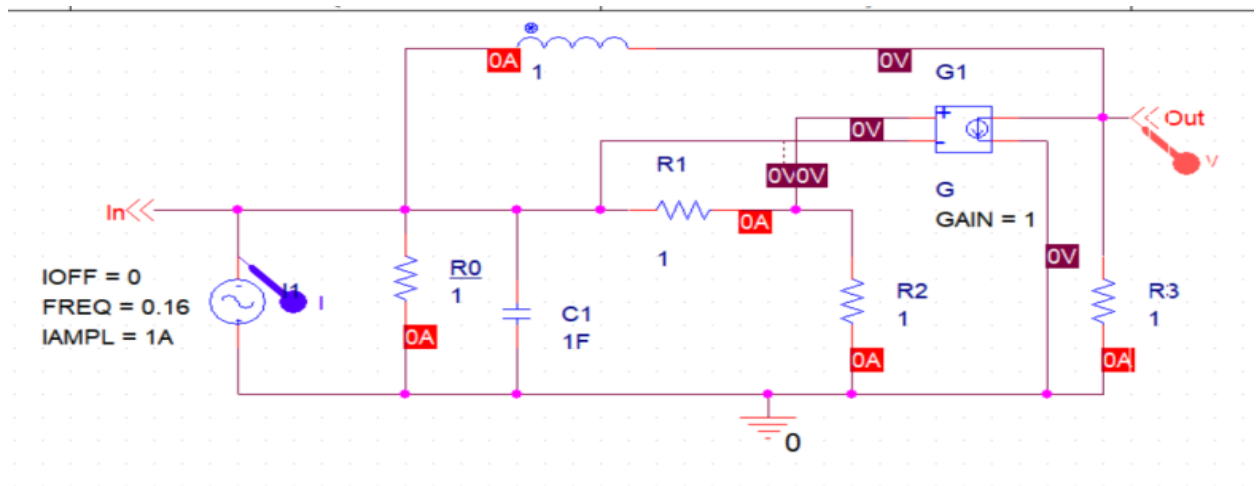


Рис. 4.7. Схема, створена в редакторі програмного середовища OrCAD

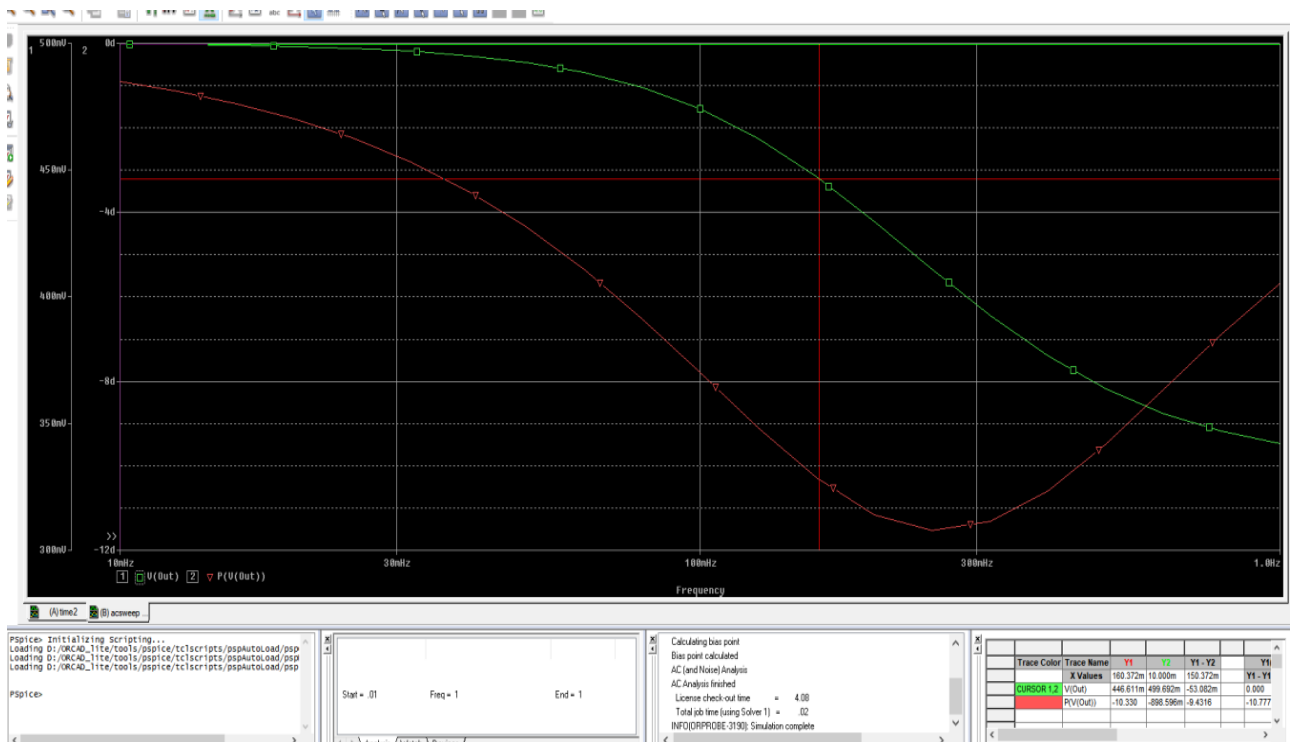


Рис. 4.8. Амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристики

Використовуючи курсор у точці 0,16 Гц на вісі частот, отримаємо амплітуду вихідної напруги **V(OUT)**: 446.6 мВ. Початкова фаза вихідної напруги в градусах **P(V(OUT))** дорівнює: -10.33.

4.3. Аналіз у часі/перехідних процесів (Time Domain/Transient)

Для дослідження часових залежностей електричних процесів в колах в програмі PSpice реалізований аналіз у часовій області перехідних процесів. Графічне відображення результатів аналізу перехідних процесів здійснюється за допомогою програми-осцилографа PSpice Probe.

Встановлення параметрів моделювання здійснюється через вікно **Simulation Settings**, яке відкривається з меню **PSpice**. Вибираємо **Time Domain (Transient)** у вікні **Analysis type** закладки **Analysis**. До базових налаштувань відносяться наступні:

- Поле **Run to time** задає час спостереження перехідного процесу. У разі гармонійного сигналу на вході цей час можна встановити кратним періоду вхідного сигналу (8 – 10 періодів).
- **Start saving data after** дозволяє визначити момент, з якого слід почати запис даних у вихідний файл. У цьому полі залишаємо **0**.
- У полі **Maximum step size** можна змінювати максимальну величину кроку обчислень, якщо не влаштовують значення, які програма вибирає автоматично. Якщо залишити поле порожнім, значення встановлюється рівним 2% від значення в полі **Run to time**, тобто прораховуються, як мінімум, 50 контрольних точок. В цьому випадку графічне зображення не завжди якісне. Для отримання кращих результатів потрібно 1000 – 2000 точок. Вибір кроку обчислень програмою залежить від поведінки струмів і напруг: якщо вони змінюються швидко, то PSpice вибирає менший крок, при незначних змінах, навпаки – більший. Це скорочує загальний час розрахунків без погіршення якості аналізу. Але вибрати крок більший заданого в полі **Maximum step size** програма не зможе.

- За допомогою кнопки **Output File Options** відкривається вікно, в якому можна визначити, з якими інтервалами слід записувати у вихідний файл результати аналізу. Значення в цьому полі не може дорівнювати 0 і повинне бути меншим, ніж значення в полі **Run to time**. Задану за умовчанням величину залишаємо незмінною.

Для отримання перехідних характеристик використовується генератор імпульсного струму (напруги) типу **IPULSE (VPULSE)** з бібліотеки **source.olb**. Розглянемо параметри імпульсного джерела, двічі клацнувши по його схемному позначенню і відкривши, тим самим, вікно атрибутів. Для прикладу привласнимо атрибутам наступні значення:

- **DC=0** (постійний струм (напруга), що використовується в аналізі на постійному струмі);
- **AC=0** (змінний струм (напруга), що використовується в аналізі на змінному струмі);
- **I1=0** (початковий струм (напруга **V1**) імпульсу);
- **I2=1** (амплітуда імпульсу (**V2**));
- **TD=0** (time delay – час затримки імпульсу);
- **TR=1ns** (rise time – час наростання імпульсу, який не повинен приймати нульове значення);
- **TF=1ns** (fall time – час загасання імпульсу, який не повинен приймати нульове значення);
- **PW=1.5ms** (тривалість імпульсу);
- **PER=5ms** (період повторення імпульсу). Після завершення періоду джерело посилає наступний імпульс. Для отримання одиночного імпульсу необхідно задати для **PER** значення, що перевищує тривалість процесу моделювання в полі **Run to time**;
- поле **Reference** (позначення на схемі) можна залишити таким як є.

Після створення схеми в редакторі і налаштування профілю моделювання запускаємо моделювання. З'явиться екран PSpice Probe з індикаторами процесу моделювання у вікні **Simulation Status**:

- **Time step** – величина кроку обчислень, яка вибирається програмою і може змінюватися під час моделювання;
- **Time** – час, до якого розрахований перехідний процес в даний момент;
- **End** – кінцевий час, заданий в полі **Run to time**.

Програма PSpice Probe використовується для графічного відображення результатів моделювання, наприклад, для відображення часової діаграми напруги. Крім того, можна не тільки графічно відображати результати моделювання, але і математично зв'язувати їх один з одним. Наприклад, якщо необхідно створити часову діаграму потужності, PSpice Probe обчислить точка за точкою добуток $u(t)*i(t)$ і відобразить результат у вигляді діаграми.

Розглянемо опції попереднього налаштування програми PSpice Probe. Відкриємо вікно **Simulation Settings**, а в ньому – вкладку **Probe Window**. За умовчанням встановлена опція **Display Probe window ... after simulation has completed** (для того, щоб екран PSpice Probe автоматично відкривався після завершення моделювання). Також встановлена опція **Show ... All markers on open schematics** (показати всі маркери на відкритій схемі).

Якщо потрібні дані не для всіх вузлів схеми, на вкладці **Data Collection** (збір даних) потрібно відмітити, наприклад, опцію **At Markers only** (за умовчанням встановлене **All but Internal Subcircuits**). Якщо тепер запустити моделювання без встановлених маркерів на схемі, то після його завершення автоматично з'явиться екран PSpice Probe, але без діаграм. Необхідно визначити, яка саме діаграма повинна бути показана.

Відкриваємо в програмі PSpice Probe меню **Trace** (діаграма). Вибираємо підменю **Add Trace...** (додати діаграму), після чого відкривається вікно **Add Traces** (додати діаграми). Для відкриття цього вікна є також кнопка із

зображенням діаграми. У лівій частині вікна перераховані всі струми і потенціали вузлів схеми. У правій частині є список математичних функцій і макросів, які можна застосувати до окремих діаграм. У центральній частині вікна можна вказати, які дані повинні бути в списку діаграм. Тут доступні аналогові (**Analog**), цифрові (**Digital**) дані, напруги (**Voltages**), струми (**Currents**), потужність (**Power**) та шум (**Noise**). Опція **Alias Names** (альтернативні імена) дозволяє виводити в списку діаграм всі альтернативні позначення для обчислених струмів і напруг. Відмітимо, що одні і ті ж величини можуть мати декілька позначень, одні з яких надаються користувачем, а інші – програмою. Як вже вказувалося вище, імена, привласнені програмою PSpice струмам і напругам, зберігаються у вихідному файлі і ці ж імена використовуються в списку діаграм. Клацання по іменах в лівій частині вікна **Add Traces** відправить їх до нижнього рядка **Trace Expression**. Для відображення нульового потенціалу до цих імен додають потенціал «землі» **V(0)**. Дані в рядку **Trace Expression** можна змінювати як в звичайному текстовому редакторі: курсор переміщається в будь-яке місце. Вибір підтверджується кнопкою **OK**.

Опція **Subcircuit Nodes** (вузли підсхем) позначає вузли в підсхемах. Наприклад, характеристики операційних підсилювачів в програмі описуються за допомогою підсхем, що складаються з транзисторів, діодів, резисторів та ін. Внутрішня структура підсхеми, як правило, не потрібна і значення внутрішніх струмів і напруг тільки заохаращуватимуть список діаграм. Опція **Subcircuit Nodes** дозволяє їх відключити.

Якщо покластися на автоматичний вибір кроку обчислень програмою PSpice, то отримаємо діаграми не досить хорошої якості. Крок можна зменшити, тим самим збільшивши число значень в інтервалі. Для цього необхідно відкрити вікно **Simulation Settings** і в налаштуваннях профілю моделювання перехідних процесів **Time Domain (Transient)** ввести в поле **Maximum step size** значення кроку (якщо величина задається в мкс, то

вводиться: *us*). Потім процес моделювання необхідно запустити наново і вивести на екран відповідну діаграму. Вивчаючи діаграми, можна переконатися в тому, що аналіз перехідних процесів дозволяє одночасно отримати характеристики сталого (стаціонарного) режиму.

Якщо на діаграмі одночасно з напругою потрібно показати струм, необхідно додати другу вісь координат **Y**. Річ у тому, що в PSpice Probe не передбачено використання одиниць вимірювання. Тому відображення напруги і струму на діаграмі із загальним масштабуванням осі **Y** приведе до того, що струм не буде помітний. Для додавання другої координатної осі **Y**, після закінчення моделювання у вікні **Add Traces**, як і раніше, вибираємо діаграму напруги і нульовий потенціал. Далі, відкриваємо меню **Plot** і вибираємо команду **Add Y Axis**, щоб створити нову координатну вісь **Y**. Потім відкриваємо вікно **Add Traces** і відправляємо дані струму в рядок **Trace Expression**. У цьому ж рядку перед струмом встановлюємо негативний знак, щоб врахувати протилежність напруги і струму в окремому елементі.

Програма PSpice дозволяє проводити аналіз Фур'є (спектральний аналіз) і визначати за його допомогою частотні спектри заданих сигналів. Отримання частотного спектру здійснюється за допомогою попереднього моделювання у часовій області: **Time Domain (Transient)**. Наприклад, для розрахунку спектру імпульсного сигналу, до джерела напруги типу **VPULSE** підключають навантаження у вигляді резистора (можна взяти $R1 = 1 \text{ кОм}$), а потім запускають процес моделювання перехідних процесів. Якщо в якості сигналу використовувати прямокутне коливання (меандр), то параметри джерела **VPULSE** можуть виглядати наступним чином:

AC=0; DC=0; V1= -1 (початкова напруга); **V2=1** (амплітуда); **TD=0;**
TR=1n (наростання); **TF=1n** (загасання); **PW=0.5m** (тривалість); **PER=1m**
(період).

В налаштуваннях профілю моделювання задається кінцевий час (**Run to time**): наприклад **15m**, що відповідає 15 періодам коливання, максимальний крок (**Maximum step size**): **1u**. При виконанні аналізу Фур'є передбачається, що заданий сигнал періодично повторюється незалежно від того, яка його частина в даний момент відображена на екрані PSpice Probe. Тобто необхідно стежити за тим, щоб для досліджуваної функції був змодельований або тільки один період, або ціла кратна кількість періодів. Якщо, з якихось причин, потрібно відмовитися від цілої кратної кількості періодів, то перед проведенням аналізу Фур'є обмежують область даних, які будуть використані для спектрального аналізу. Для цього необхідно відкрити з меню **Plot** програми PSpice Probe вікно **Axis Settings -> X Axis** і, активізувавши опцію **Restricted** (обмежений), вказати діапазон даних, скорочений до цілого числа періодів.

Запуск аналізу Фур'є здійснюється за допомогою кнопки **FFT**. Після проведення аналізу, у вікні **Axis Settings -> X Axis** за допомогою опції **User Defined** можна звузити частотний діапазон для відображення найбільш важливої частини спектру. Кнопка **FFT** дозволяє не тільки проводити запуск аналізу Фур'є, але і перемикатися після його завершення від зображення частотного діапазону до часової області.

Теоретично для виконання аналізу Фур'є може вистачити і одного періоду коливань. Якщо в наведеному прикладі використовувати часовий інтервал від 0 до 1 мс (**Run to time: 1m**), то розраховані контрольні точки будуть розподілені по частоті з кроком в $1/1 \text{ мс} = 1 \text{ кГц}$. У разі 15 періодів коливання відстань між контрольними точками в спектрі складає приблизно $1/(15 \cdot 1 \text{ мс}) = 66.6 \text{ Гц}$. Оскільки точки на діаграмі з'єднуються прямими лініями, спектр, отриманий для одного періоду коливань, матиме вид послідовності трикутників, вершини яких відповідають ненульовим амплітудам гармонік.

Дані аналізу Фур'є можна представити в табличній формі, записавши їх у вихідний файл. У налаштуваннях профілю моделювання (**Time Domain (Transient)**) є кнопка **Output File Options**, що відкриває вікно **Transient Output**

File Options, в якому потрібно виставити прапорець поряд з опцією **Perform Fourier Analysis** (виконати аналіз Фур'є). Крім того, у вікні задають: **Center Frequency** (частоту основної гармоніки або приріст частоти в спектрі, наприклад: 1 кГц), **Number of Harmonics** (кількість гармонік, наприклад: 20), **Output Variables** (вихідні змінні, наприклад: напруга на навантаженні **V(OUT)**).

У вихідному файлі (**View -> Output File**) в табличній формі наводяться амплітуди і фази гармонік, а також їх нормовані значення. Якщо таким чином активізувати аналіз Фур'є, то програма автоматично бере за основу для проведення спектрального аналізу останній із змодельованих періодів, тобто немає необхідності самим вибирати для аналізу ціле число періодів. В кінці таблиці з результатами аналізу Фур'є наведено значення загального гармонійного спотворення, близького до коефіцієнта гармонік, який є мірою спотворення сигналу. Коефіцієнт гармонік визначається як співвідношення діючого значення вищих гармонік до діючого значення сигналу. У гармонійному спотворенні, замість діючого значення сигналу, використовується діюче значення основної гармоніки. При спотвореннях в межах 10% ці величини чисельно майже рівні.

Приклад аналізу у часі/перехідних процесів (Time Domain/Transient)

Для схеми, наведеної на рис. 4.7 з під'єднаним джерелом імпульсного струму **IPULSE** замість джерела **ISIN** (приклад встановлення параметрів – на с. 21), отримана перехідна характеристика (**V(OUT)**), зображена на рис. 4.9. Як видно з рис. 4.9, амплітуда імпульсу струму **I(I1)** складає 1 А, вихідна напруга **V(OUT)** досягає рівня 0.5 В у режимі постійного струму (робочої точки). Отриманий результат збігається з результатом аналізу частотних характеристик схеми, зображеної на рис. 4.7, а саме: значенням її амплітудно-частотної характеристики на частоті 10 мГц, близької до частоти постійного струму 0 Гц (рис. 4.8).

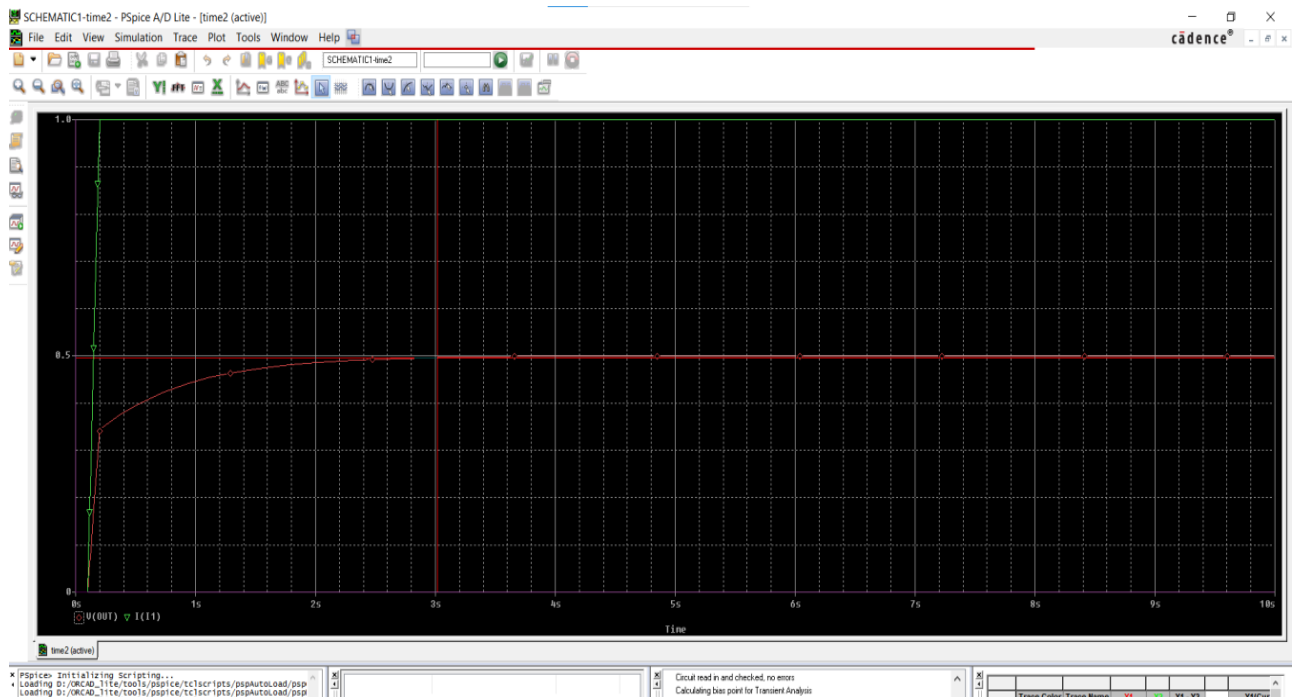


Рис. 4.9. Перехідна характеристика

Аналіз сталого синусоїдального режиму на частоті 0.16 Гц, що настає в схемі на рис.4.7 після завершення перехідних процесів, дає результат, наведений на рис. 4.10.

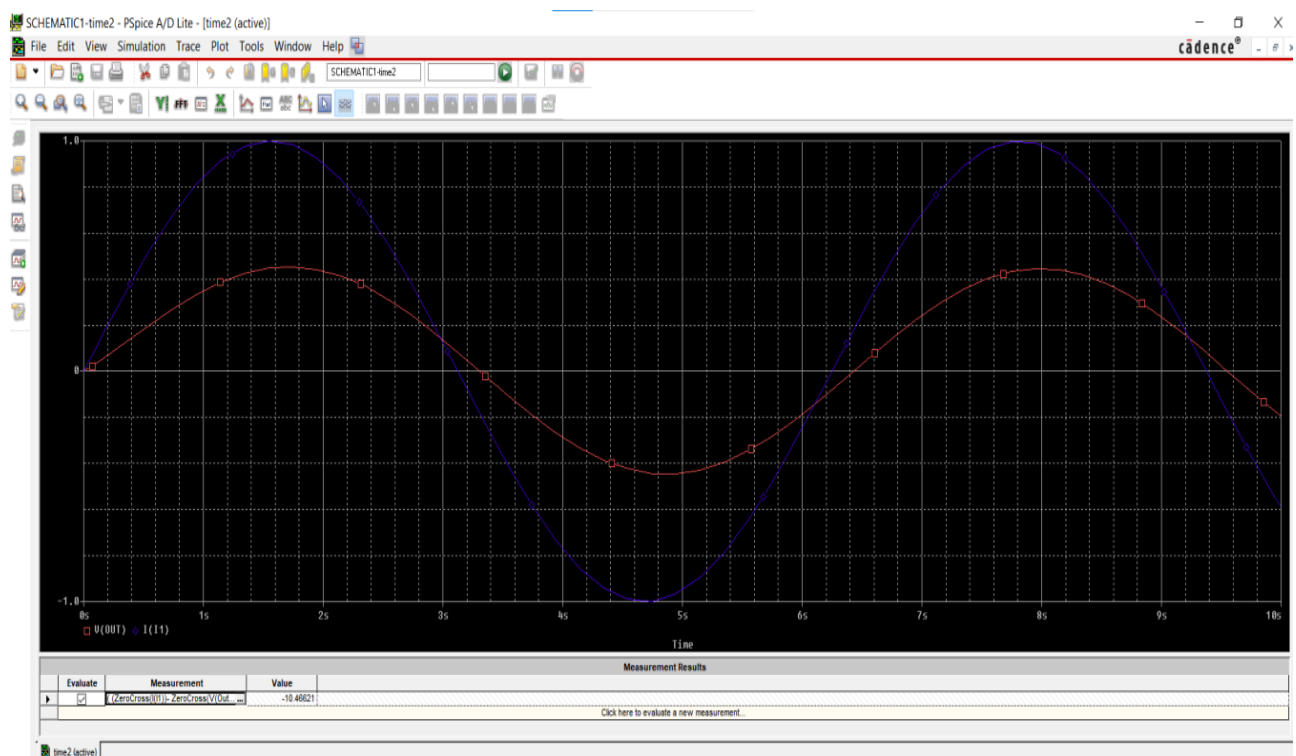


Рис. 4.10. Результат аналізу в часі сталого синусоїдального режиму

Амплітуда вихідної напруги **V(OUT)** дорівнює 446.053 мВ (рис.4.11), що майже не відрізняється від значення амплітуди (446.6 мВ), отриманої на частоті 0.16 Гц в результаті аналізу частотних характеристик (рис.4.8).

	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2		Y1(Cursor1) - Y2(Cursor1)
	X Values	7.9494	0.000	7.9494		Y1 - Y1(Cursor1) Y2 - Y2(Cursor1)
	V(OUT)	446.053m	0.000	446.053m		0.000
	I(I1)	990.256m	2.0106m	988.245m		544.202m

Рис. 4.11. Амплітуда вихідної напруги **V(OUT)**

Початкова фаза напруги **V(OUT)** на частоті 0,16 Гц становить в градусах -10.466 (рис. 4.12), що також майже не відрізняється від початкової фази, отриманої на частоті 0.16 Гц в результаті аналізу частотних характеристик $P(V(OUT)) = -10.33$ (рис. 4.8).

	Evaluate	Measurement	Value
	☒	((ZeroCross(I(I1))- ZeroCross(V(Out... ...	-10.46621

Рис. 4.12. Початкова фаза напруги **V(OUT)** відносно вхідного струму

Таким чином, на фіксованій частоті результати аналізу частотних характеристик і аналізу сталого синусоїдального режиму у часі майже співпадають. Незначна похибка пов'язана з похибкою обчислень, що виконуються різними методами у різних типах аналізу схеми.

5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ РОБОТИ

Результати виконання завдань РР мають бути оформлені у електронному вигляді із титульним листом (зазначено ПІБ студента, номер групи та номер варіанту індивідуального завдання) з поясненнями виконаних налаштувань типів аналізу, проведених розрахунків і наданням всіх необхідних скріншотів.

Критерії оцінки роботи:

- виконання всіх завдань трьох розділів без помилок і з поясненнями – 36 балів;
- виконання всіх завдань не менше як з двох розділів без істотних помилок – 24 бали;
- виконання всіх завдань одного розділу без помилок, які спотворюють результат – 12 балів;
- виконання всіх завдань трьох розділів з помилками – 6 балів.

Список рекомендованої літератури

1. Бондаренко В.М., Губар В.Г. Основи електродинаміки. Розділ «Основи теорії сигналів» : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 90 с.
2. Бондаренко В.М., Бондаренко Н.О. Основи радіоелектроніки та моделювання радіоелектронних кіл. Розділ «Моделювання радіоелектронних кіл в OrCAD» : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 91 с.
3. Бондаренко В.М., Бондаренко Н.О. Основи теорії кіл : Розділи «Аналіз кіл у сталому синусоїдальному режимі», «Аналіз кіл у часі» : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 70 с.
4. Бондаренко В.М., Бондаренко Н.О. Моделювання радіоелектронних кіл в OrCAD : Дистанційний курс в системі дистанційного навчання КПІ ім. Ігоря Сікорського [Електронний ресурс] / В.М. Бондаренко. 2020. Режим доступу до ресурсу: <https://do.ipi.kpi.ua/enrol/index.php?id=4700>

Перелік посилань

1. Кеон Дж. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей. / Дж.Кеон. Москва : ДМК Пресс, 2008. 640 с.
2. Кузнецова С.А., Нестеренко А.В., Афанасьев А.О. OrCAD 10. Проектирование печатных плат / А.О. Афанасьев. Москва : Горячая линия – Телеком, 2005. 454 с.
3. Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., Стахів П.Г., Писаренко Л.Д., Якименко Ю.І. Основи теорії електронних кіл: підручник / П.Г. Стахів. Львів : Магнолія 2006, 2017. 296 с.

Варіанти індивідуальних завдань

Варіанти принципових схем для аналізу

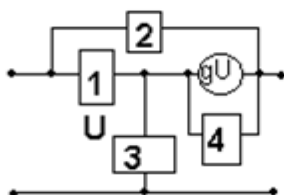


Рис. 1

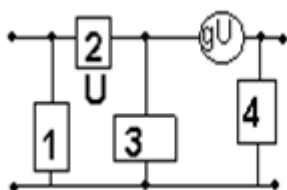


Рис. 2

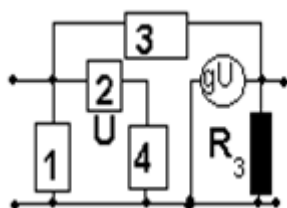


Рис. 3

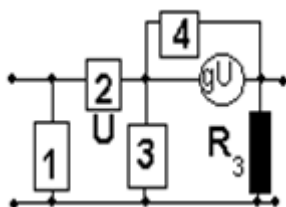


Рис. 4

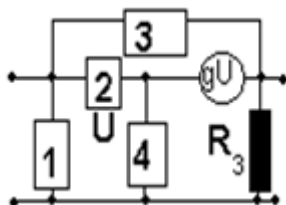


Рис. 5

Принципова схема, відповідна варіанту №_{вар}, визначається із схеми, зображеної на рисунку №, заміщенням елементів останньої елементами з таблиці 1, а також позначенням напрямів керуючої напруги U на елементі 2 (на

елементі 1 для рис. 1) та струму залежного джерела gU відповідно до таблиці 2. Виділений на рис. 3 – 5 резистор R_3 не підлягає заміні в залежності від варіанту.

На вхід кола подається сигнал у вигляді незалежного джерела струму. У випадку, якщо на вході кола немає резистора, включеного паралельно до незалежного джерела струму, необхідно під'єднати паралельно до джерела струму резистор R_0 .

Таблиця 1

Елементи Варіанти № _{вар}	1	2	3	4
1	R1	R2	C1	C2
2	R1	R2	L1	C1
3	R1	R2	C1	L1
4	R1	C1	R2	C2
5	R1	L1	R2	C1
6	R1	C1	R2	L1
7	R1	C1	C2	R2
8	R1	C1	L1	R2
9	R1	L1	C1	R2
10	C1	R1	R2	C2
11	L1	R1	R2	C1
12	C1	R1	R2	L1
13	C1	R1	C2	R2
14	C1	R1	L1	R2
15	L1	R1	C1	R2
16	C1	C2	R1	R2
17	L1	C1	R1	R2
18	C1	L1	R1	R2

Таблиця 2

Елементи Варіанти № _{вар}	U	gU
1,4,7,10,13,16	←	-«-
2,5,8,11,14,17	→	-«-
3,6,9,12,15,18	←	-»-

Таблиця 3

Номер РР	Варіант № _{вар}	Схема (Рис.)	R0	R1	R2	R3	C1	L1	g
1	2	1	1	1	1		1	1	-0,5
2	2	3		1	1	1	1	1	-1
3	2	4		1	1	1	1	1	-1
4	2	5		1	1	1	1	1	-1
5	3	1	1	1	1		1	0,5	-1
6	3	3		1	1	1	1	1	1
7	3	4		1	1	1	1	1	1
8	3	5		0,333	0,5	0,5	1	1	1
9	5	1	1	1	1		1	1	-1
10	5	3		1	1	1	1	1	1
11	5	4		1	1	1	1	1	1
12	5	5		1	1	1	1	1	-1
13	6	1	1	1	1		1	1	1
14	6	3		1	1	1	1	0,5	1
15	6	4		0,5	1	1	1	1	1
16	6	5		1	1	1	1	4	-1
17	8	1	1	1	1		1	1	1
18	8	3		1	1	1	1	1	1
19	8	4		1	1	1	1	4	-1
20	8	5		1	1	1	1	1	-1
21	9	1	1	1	1		1	1	1
22	9	3		0,5	1	1	1	1	1
23	9	4		1	1	1	1	1	1
24	11	1	1	1	1		1	1	-1
25	11	3	1	1	1	1	1	1	1