

1. ПРОГРАМА МОДЕЛЮВАННЯ NI MULTISIM

1.1. Призначення програми NI Multisim

Розробка будь-якого радіоелектронного пристрою супроводжується фізичним або математичним моделюванням. Фізичне моделювання пов'язане зі значними матеріальними витратами, оскільки потрібно виготовляти макет і проводити досить трудомісткі дослідження. Найчастіше фізичне моделювання неможливе, наприклад, при розробці великих інтегральних схем (ВІС). Тому при проектуванні доцільно застосовувати програми математичного моделювання, які не тільки дозволяють знизити строки й вартість розробки, але й надають розроблювачу цілий ряд інструментів аналізу, які або недоступні при фізичному моделюванні, або їх вартість надзвичайно висока.

На сьогоднішній день розроблювачі використовують кілька програм схемотехнічного моделювання: Micro-Cap, Alpak, Orcad, Altium Designer (раніше Protel), Proteus, Multisim (раніше Electronics Workbench), Labview та інші [1].

Найбільш зручними для моделювання є два пакети програм – Orcad та NI Multisim (це не відноситься до НВЧ-пристроїв). Безкоштовна версія програми моделювання NI Multisim Analog Devices Edition версії 10.0.1 призначена для моделювання схем з використанням аналогових компонентів, що випускаються компанією Analog Devices. Слід відмітити, що ліцензійна версія програми NI Multisim без пакетів розширення коштує більше 4000\$, а повна версія близько 6000\$. На сьогоднішній день вже випущена версія програми 3.01.

З програмою NI Multisim™ Analog Devices® Edition, яка поширюється вільно, компанія Analog Devices і підрозділ Electronics Workbench Group компанії National Instruments надають інженеру можливість розробки й моделювання різних радіоелектронних пристроїв: аналогових, цифрових і комбінованих аналого-цифрових.

До повної версії пакету NI Multisim входять програми NI

Ultiboard (для розробки друкованих плат, виконує розміщення й трасування з'єднань на платах, що мають до 32 шарів) і NI Multisim MCU Module (для налагодження та моделювання мікропроцесорних систем). Крім того, знімається багато обмежень, які введені в безкоштовній версії (наприклад, на число елементів схеми, яке в безкоштовній версії не має перевищувати 25).

Програма NI Multisim™ Analog Devices® Edition є Spice симулятором і дозволяє:

- моделювати аналогові схеми, використовуючи більше 800 бібліотечних елементів – операційних підсилювачів, ключів, комутаторів та ін.;
- досліджувати схеми з числом елементів не більше 25;
- використовувати для аналізу вбудовані інструменти та алгоритми, включаючи аналіз найгіршого випадку (що передбачає аналіз самого несприятливого варіанту умов);
- проводити заміну компонентів і зміну їх параметрів для детального вивчення властивостей схеми;
- здійснювати online зв'язок з Analog Devices Design Center для отримання додаткових інструментів аналізу;
- негайно отримувати доступ до довідкових даних будь-яких компонентів Analog Devices.

Програму Multisim (раніше Electronics Workbench) розробила канадська компанія Electronics Workbench (колишня Interactive Image Technologies). Головний продукт компанії Electronics Workbench, Multisim – це один з кращих інструментів для розрахунку лінійних і нелінійних електричних кіл і розробки друкованих плат. Серед користувачів програми такі відомі корпорації як Sony, Boeing, а також передові академічні установи на зразок Масачусетського технологічного інституту. В 2005 р. компанія Electronics Workbench була придбана американською корпорацією National Instruments з метою розвитку більш тісного зв'язку між вимірювальним устаткуванням, що використовується при створенні електронних пристроїв, і програмами, призначеними для розрахунку електричних кіл. Угода відбулася після того, як кілька років National Instruments співробітничала з Electronics Workbench для інтеграції програми Multisim у графічне середовище «віртуальних приладів» NI Labview. Незважаю-

чи на укладений контракт, компанія Electronics Workbench залишається незалежним підрозділом у складі National Instruments і в найближчі кілька років буде незалежно поширювати програми через власну дистрибуторську мережу.

Основні переваги програми Multisim:

1. Простий графічний редактор, що дозволяє досить просто малювати на екрані електронні схеми у звичному зображенні.

2. Велика бібліотека сучасних електронних компонентів (дискретних, інтегральних аналогових, цифрових і змішаних аналого-цифрових). Бібліотека відкрита, легко може поповнюватися новими елементами, у тому числі й вітчизняними.

3. Велика бібліотека моделей електронних схем, що дозволяє використовувати готові практичні розробки й легко модернізувати їх під конкретне завдання. Приклади схем, пропонувані компаніями National Instruments і Analog Devices, можна знайти в [2].

4. Широкий вибір віртуальних вимірювальних приладів, що дозволяє виконати будь-яке вимірювання (при цьому не тільки електричне вимірювання). Робота з цими віртуальними вимірювальними приладами максимально наближена до роботи з реальними приладами. Підключивши віртуальний прилад до будь-якої точки схеми, можна отримати вичерпну інформацію про процеси в даному вузлі.

5. Простий по інтерфейсу набір моделюючих засобів, що дозволяє крім традиційного моделювання електронної схеми на постійному та змінному струму провести моделювання спектральних, нелінійних, амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик, оцінити вплив температури на окремі компоненти й на схему в цілому, можливість зміни будь-яких параметрів компонентів, а також параметрів джерел сигналів і живлення. Досить просто можна виконати імовірнісний аналіз роботи схеми з різними законами розподілу параметрів.

6. Можливість підключення віртуальних приладів програми Labview.

7. Широкі можливості документування дослідження, отримання твердої копії як електричної схеми, так і параметрів

моделювання, а також інформації з екрану вимірювальної апаратури (якісно оформлених графічних результатів дослідження).

8. Низькі вимоги до швидкодії комп'ютера (можлива робота починаючи з 386 моделі процесора).

9. Не вимагає знань програмування. Потрібно лише знайомство із середовищем Windows. Інтуїтивний інтерфейс дозволяє швидко навіть непідготовленому користувачеві (буквально за півгодини) ознайомиться з основами та приступити безпосередньо до досліджень (електронного моделювання).

10. Ретельно підготовлений довідковий матеріал (Help) забезпечує контекстну допомогу як по меню, компонентам і опціям моделювання, так і по загальних питаннях моделювання.

Multisim забезпечує введення електричних схем для їхнього подальшого моделювання та дозволяє створювати текстовий опис цифрових пристроїв на мовах VHDL і Verilog для синтезу ПЛІС.

1.2. Початок роботи з програмою NI Multisim

Роботу з програмою слід почати з установки основних параметрів. Для цього необхідно в меню Options вибрати пункт Global Preferences (рис. 1.1).

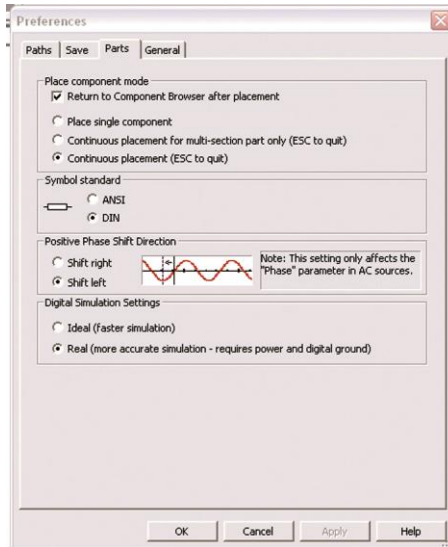


Рис. 1.1. Вікно установки основних параметрів програми

Відкривається вікно, у якому є чотири вкладки. У вкладці Parts вибираються:

- спосіб відображення елементів схеми – у стандарті DIN або ANSI;
- спосіб вводу елементів схеми;
- одиночний елемент;
- ввід всіх частин елемента (наприклад, ІС, до складу якої входять чотири операційні підсилювачі (ОП));
- ввід елементів необмежену кількість разів при натисканні лівої кнопки «миші»;
- аналіз схеми з використанням ідеальних або реальних моделей елементів.

У вкладці Paths задаються шляхи до файлів і робочої папки програми, а у вкладці Save задається автозбереження (auto-backup), створення прихованої копії (для відновлення останньої працездатної версії досліджуваної схеми у випадку пошкодження файлу схеми) і режим збереження даних симулювання (моделювання) разом з параметрами вимірювальних приладів.

Додатково встановлюються параметри для робочого ли-

ста програми через меню Options/Sheet Properties (рис. 1.2). Тут можна задати колір фону та колір елементів. Доступними є 5 варіантів установки параметрів: білий або чорний фон та колір елементів і ліній за замовчуванням, чорний фон та білі елементи й лінії, білий фон та чорні елементи і лінії.

В режимі Custom користувач може задати колір усіх елементів та фону самостійно (рис. 1.3). У вкладці Sheet Properties задаються товщина ліній, режим відображення сітки, вибирається розмір і тип шрифту, розмір і орієнтація робочого листа й ще цілий ряд параметрів. Докладно з пунктами меню та їх призначенням можна ознайомитися за допомогою підказки програми (англ. Мовою).

Настроїти вигляд робочого вікна та панелі інструментів легко. Для цього досить помістити курсор «миші» в область листа з панелями інструментів і натиснути праву клавішу «миші». У контекстному меню, що відкриється, необхідно поставити галочки біля тих панелей інструментів, які бажано відобразити.

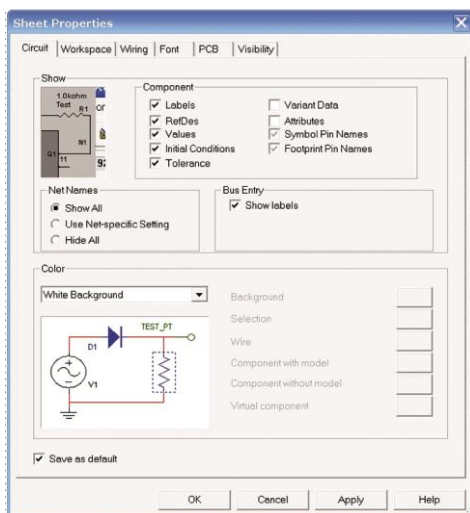


Рис. 1.2. Вікно установки параметрів робочого листа

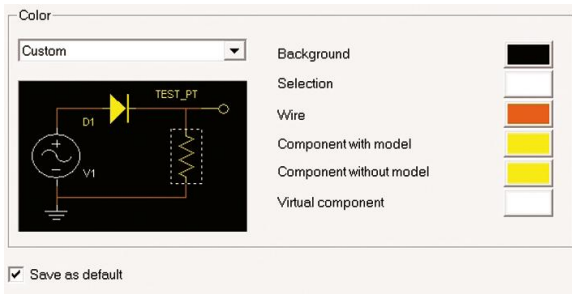


Рис. 1.3. Установка кольору елементів робочого листа

1.3. Компоненти та прилади NI Multisim

Після установки параметрів програми та робочого листа можна приступати до складання принципової схеми.

Для цього спочатку розміщують елементи схеми на робочому листі. Для розміщення елемента досить клацнути лівою кнопкою «миші» на піктограмі потрібної бібліотеки (рис. 1.4) або через меню Place/Component вибрати необхідний елемент. За замовчуванням панель компонентів відображається у вікні програми (рис. 1.5). Користувачу доступні бібліотеки джерел живлення, генераторів сигналів, пасивних компонентів, транзисторів і діодів, логічних і аналогових мікросхем, змішаних аналого-цифрових і цифро-аналогових компонентів, індикаторів, запобіжників, джерел опорної напруги, електромеханічних компонентів (двигунів, механічних контактів, котушок, трансформаторів та ін.).

Деякі елементи бібліотек джерел потужності та генераторів сигналів наведені в табл. 1.1.

На рис. 1.6 наведений приклад вікна програми при виборі резистора. У вікні Component вибирається номінальне значення опору резистора, у вікні Component type – тип виконання резистора: плівковий, провідний, композитний, для поверхневого монтажу (різного типу) та ін. Точність резистора (відхилення від номінального значення) вибирається у вікні Tolerance (%) з ряду 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1 та 2.

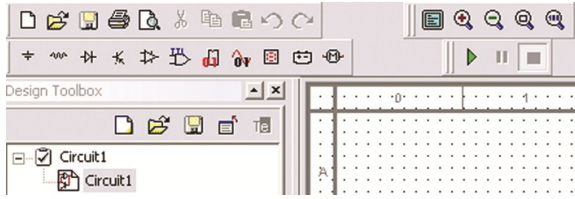


Рис. 1.4. Фрагмент робочого вікна програми з бібліотеками елементів

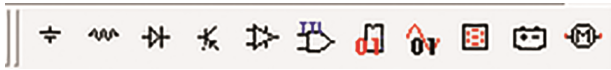











Рис. 1.5. Панель компонентів

При виборі інших компонентів (наприклад, змінного резистора або конденсатора) будуть з'являтися видозмінені вікна вибору параметрів компонентів.

Розглянемо на прикладі фільтра нижніх частот (ФНЧ) порядок роботи з програмою, вибір віртуальних приладів і аналіз отриманих результатів. Для аналізу виберемо схему, синтезовану за методикою, викладеною в [3], і розраховану за допомогою програми Filter Wiz Pro. Вихідні дані для проектування фільтра: нерівномірність АЧХ у смузі пропускання $a_c \leq 1$ дБ, гарантоване затухання в смузі затримування $a_s \geq 30$ дБ, частота зрізу фільтра $f_c = 3400$ Гц, частота гарантованого затухання 9000 Гц. При розрахунках отримано порядок фільтра $n = 3$ для апроксимації за Чебишевим та $n = 5$ для апроксимації за Батервортом. Вибираємо апроксимацію за Чебишевим.

Схема реалізується послідовним з'єднанням кола першого порядку з добротністю 0.5, під'єданого через повторювач напруги, і другого порядку, реалізованого за схемою Саллен-Кі, що реалізує добротність полюсу, яка дорівнює 2,02. Розрахована програмою Filter Wiz Pro АЧХ фільтра наведена на рис. 1.7, а значення опорів резисторів і ємностей конденсаторів наведені на електричній схемі (рис. 1.8). Колір провідників і компонентів на схемі залишені встановленими в програмі за замовчуванням. Слід зауважити, що набір резисторів, пропонує в меню програми, відповідає ряду E96, і на схемі розміщені компоненти відповідно до цього ряду, хоча розрахункові значення резисторів становлять: $R_1 = 94,72$ кОм, $R_2 = R_3 = 99,89$ кОм.

Табл. 1.1. Елементи бібліотек джерел живлення та генераторів сигналів

POWER_SOURCES							SIGNAL_SOURCES	
DC_ Power	DGND	Ground	VCC	VDD	VEE	VSS	Clock_ Voltage	AC_ Voltage
								
Джерело постійної напруги	Цифровий спільний	Спільний	Джерело +Uж для ІМС TTL	Джерело +Uж для ІМС КМОП	Джерело -U-	Джерело живлення КМОП	Генератор імпульсів позитивної полярності	Генератор змінної напруги

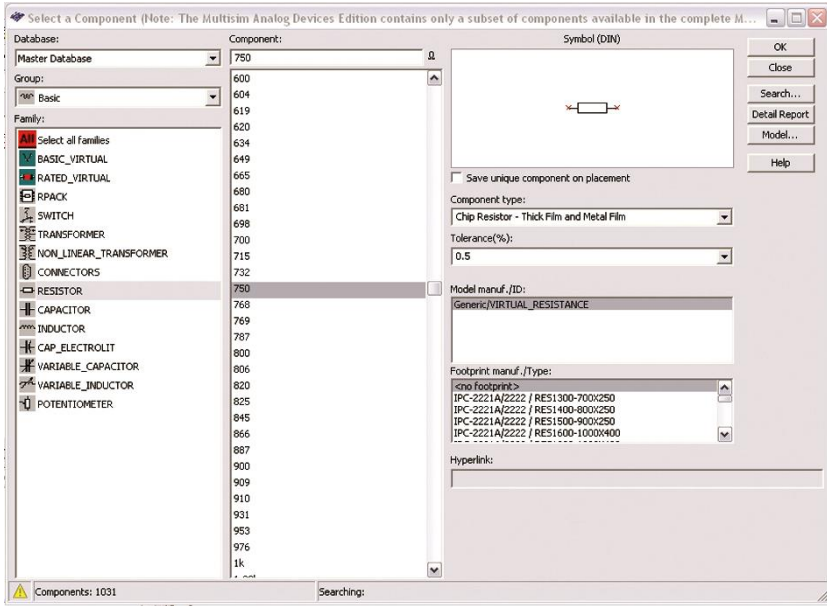


Рис. 1.6. Вікно вибору пасивних компонентів

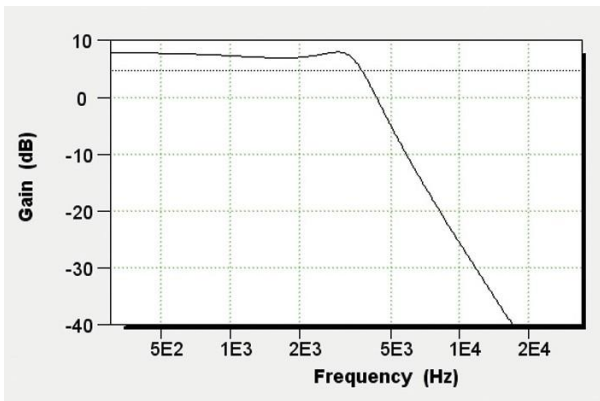


Рис. 1.7. Розрахована АЧХ фільтра нижніх частот

За необхідністю можна ввести резистори необхідного номіналу вручну. Для реалізації фільтра буде потрібно використати два операційні підсилювачі зі смугою одиничного підсилення (GBW – Guaranteed Bandwidth) не менш 1 МГц. Вибирає-

мо операційний підсилювач (ОП) типу AD713 (чотири ОП в одному корпусі), частота одиничного підсилення якого 3 МГц.

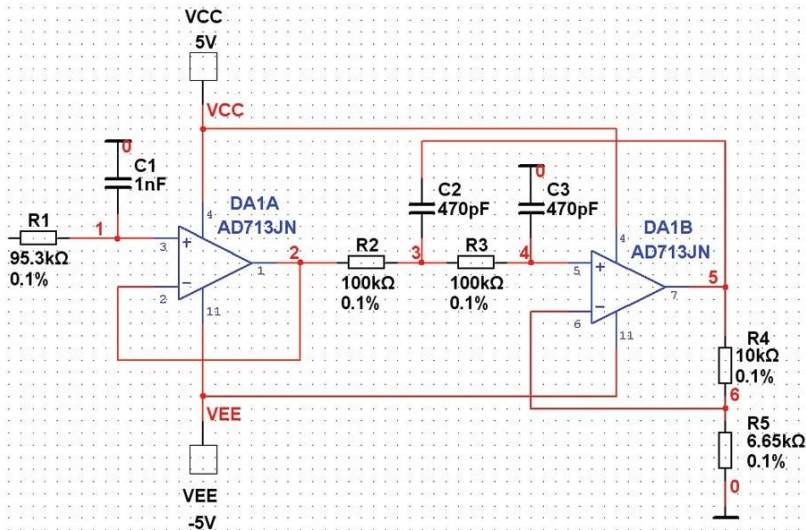


Рис. 1.8. Електрична схема ФНЧ

При розміщенні елементів на схемі зручно користуватися контекстним меню, яке викликається натисканням правої кнопки "м<ши".» Воно дозволяє повертати елементи за і проти годинникової стрілки на 90 градусів, здійснювати дзеркальні перетворення по вертикалі та горизонталі й містить ще багато різних пунктів. При підключенні джерел живлення (меню Place Source, яке позначено піктограмою спільного проводу (табл. 1.1) слід врахувати, що джерело позитивної напруги позначається як VCC, а негативної – як VEE.

Тепер можна приступати до розміщення джерела сигналу та вимірювальних приладів на робочому листі схеми. Програма дозволяє використовувати прилади, показані на рис. 1.9.

Кожний з віртуальних приладів має багато параметрів, з якими знайомляться за необхідністю. Для аналізу схеми обмежимося поки трьома приладами:

- функціональним генератором в якості джерела вхідного сигналу;

- двоканальним осцилографом для аналізу форми сигналу на вході та виході фільтра;
- графопобудовником АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter).

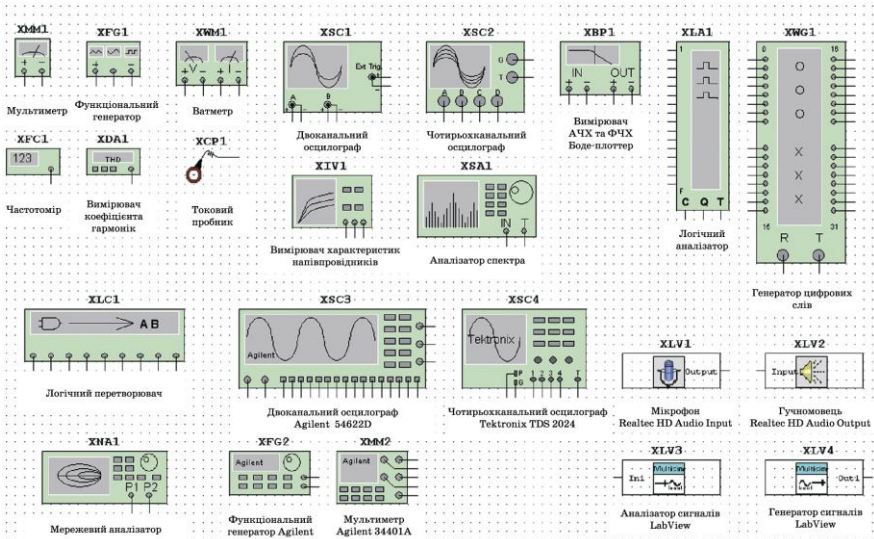


Рис. 1.9. Віртуальні вимірвальні прилади програми Multisim

Для розміщення приладу досить клацнути лівою кнопкою "м«ші" на піктограмі приладу, розміщеної з правого боку робочого вікна програми, і перетягнути зображення в потрібне місце робочого листа.

Для того, щоб на екрані осцилографа вхідний і вихідний сигнали відображалися різним кольором, необхідно поміняти колір лінії, яка підключена до другого входу осцилографа. Для цього виділяють лінію клацанням лівої кнопки "м«ші" потім натискають праву кнопку. У контекстному меню, що з'явився, потрібно вибрати пункт Change Color. Схема з підключеними приладами показана на рис. 1.10.

Після цього можна задати параметри тестового сигналу. Для цього необхідно клацнути на зображенні приладу лівою кнопкою "м«ші" у вікні, що відкрилося, встановлюємо параметри сигналу на виході функціонального генератора (рис. 1.11). Можна вибрати одну з таких форм сигналу: синусоїдальна (гар-

монічна) напруга, послідовність трикутних імпульсів, послідовність прямокутних імпульсів. Частота сигналу задається в рядку Frequency в діапазоні від 1 фГц до 103 ТГц, а амплітуда – в діапазоні від 1 фВ до 103 ТВ. Напруга зсуву задається у тому ж діапазоні. За замовчуванням на виході генератора формується двополярна напруга. Наприклад, якщо задана амплітуда 10 В для гармонічного сигналу, то на виході генератора буде сформовано сигнал з позитивною і негативною амплітудами 10 В. Якщо потрібно сформувати однополярний сигнал (наприклад, прямокутні імпульси амплітудою 5 В), то потрібно задати амплітуду сигналу на рівні половини від необхідної (для нашого прикладу 2,5 В) і задати позитивний зсув напруги +2,5 В.

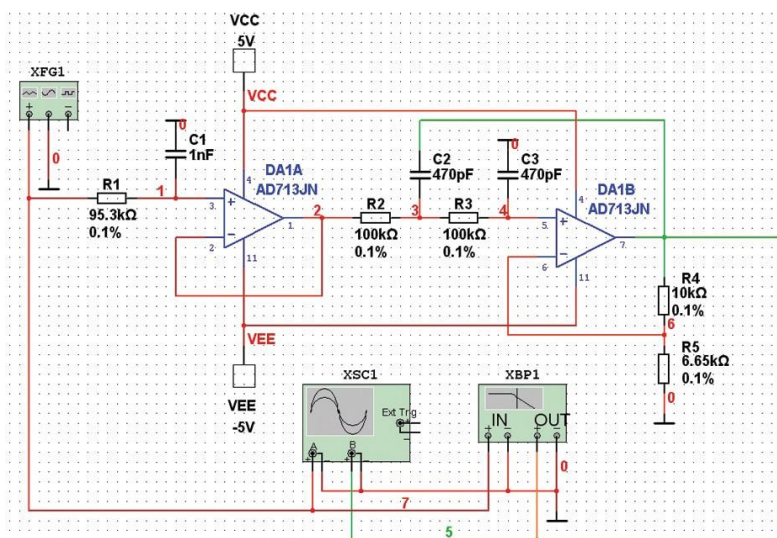


Рис. 1.10. Схема ФНЧ з підключеними вимірвальними приладами

Далі приступаємо до аналізу роботи схеми. Для цього достатньо або натиснути на зелений трикутник (рис. 1.4), або натиснути вимикач, розташований у правій верхній частині робочого вікна програми, або через меню Simulate викликати команду Run.

Проконтролюємо форму сигналу на вході і виході фільтра за допомогою осцилографа. Тому що коефіцієнт підсилення

фільтра (з розрахунку) дорівнює 2.5, а розмах вхідної напруги – 1 В, встановимо чутливість каналу А осцилографа 1 В/поділку, а каналу В – 2 В/поділку. Форма сигналу на вході та виході ФНЧ показана на рис. 1.12. Для рознесення сигналів на екрані осцилографа по вертикалі вводимо зсув Y position в каналі А на рівні +1.6 В, а в каналі В – -1.4 В.

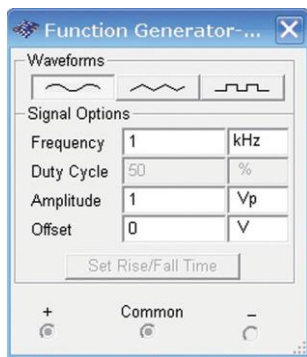


Рис. 1.11. Установка параметров входного сигнала

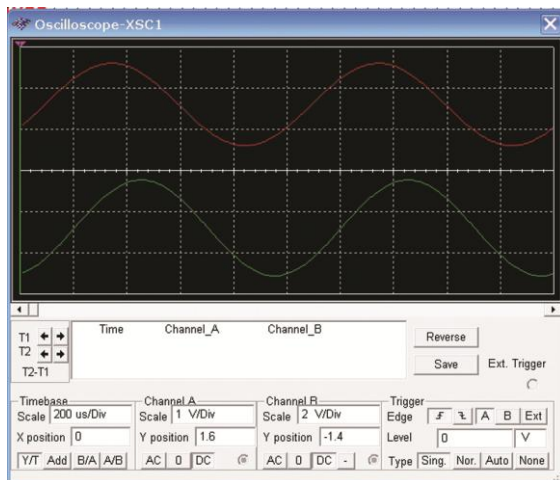


Рис. 1.12. Форма сигнала на входе (червоний) і виході (зелений) ФНЧ

Після цього можна здійснити перевірку АЧХ і ФЧХ спроектованого фільтра за допомогою Vode Plotter. Отримана в результаті моделювання АЧХ наведена на рис. 1.13, а ФЧХ – на

рис. 1.14. Крім того, можна зберегти файл з результатами визначення АЧХ і ФЧХ. Файл з розширенням .bod є текстовим файлом, фрагмент якого показаний на рис. 1.15. Аналіз результатів показав, що максимальна нерівномірність АЧХ в смузі пропускання небагато менше 1 дБ, що цілком задовольняє поставлені умови.

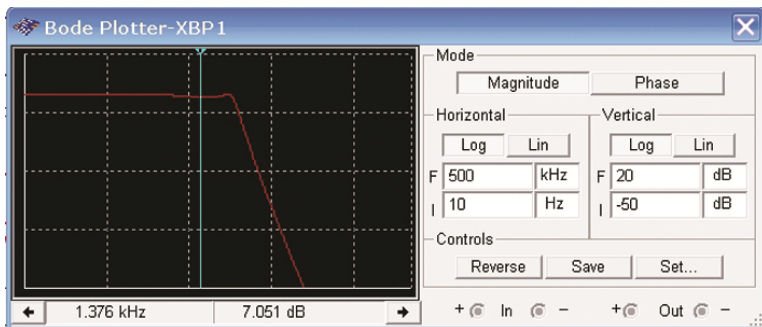


Рис. 1.13. Форма АЧХ змодельованого ФНЧ

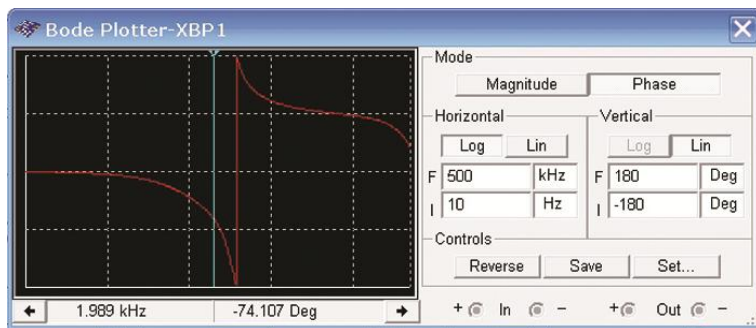


Рис. 1.14. Форма ФЧХ змодельованого ФНЧ

З безкоштовною версією програми поставляється один приклад (Getting Started), що складається з трьох різних файлів: лист з розміщеними компонентами (Getting Started 1), компоненти, з'єнані в схему (Getting Started 2), і схема з підключеними вимірювальними приладами (Getting Started 3). Використовуючи ці файли, легко провести експерименти із запропонованою в прикладі схемою, що дозволить швидше засвоїти роботу з програмою.

```

Bode data: BOD

column 1 Frequency (Hz)
column 2 Gain (dB)
column 3 Gain (Linear)
column 4 Phase (Deg)
trace name: Bode Result

Color: 255
Gain_Range_Start: 3.162278e-003
Gain_Range_End: 1.000000e+001
Phase_Range_Start: -1.800000e+002
Phase_Range_End: 1.800000e+002
Frequency Gain (dB) Gain Phase
-----
1.000000e+001 7.97149e+000 2.50365e+000 -4.27497e-001
1.02329e+001 7.97148e+000 2.50365e+000 -4.37454e-001
1.04713e+001 7.97148e+000 2.50365e+000 -4.47644e-001
1.07152e+001 7.97148e+000 2.50365e+000 -4.58071e-001
1.09648e+001 7.97147e+000 2.50365e+000 -4.68740e-001
1.12202e+001 7.97147e+000 2.50365e+000 -4.79658e-001
1.14815e+001 7.97146e+000 2.50365e+000 -4.90831e-001
1.17490e+001 7.97146e+000 2.50365e+000 -5.02263e-001
1.20226e+001 7.97145e+000 2.50364e+000 -5.13962e-001
1.23027e+001 7.97144e+000 2.50364e+000 -5.25934e-001
1.25893e+001 7.97144e+000 2.50364e+000 -5.38184e-001
-----

```

Рис.1.15. Фрагмент текстового файлу з результатами моделювання

Контрольні питання

1. Як настроїти інтерфейс програми NI Multisim?
2. Як в програми NI Multisim встановити розмір робочого листа та одиниць виміру?
3. Як в програми NI Multisim настроїти автоматичне збереження схем і результатів моделювання?
4. Як в програми NI Multisim настроїти колір фону, елементів, проводів та інших позначень схеми?
5. Як в програми NI Multisim настроїти відображення панелей інструментів?

2. СИГНАЛИ ТА МЕТОДИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Загальні характеристики сигналів

Форма та способи перетворення електричних сигналів нерозривно пов'язані з принципами побудови електронних пристроїв автоматики та управління і суттєво впливають на їх характеристики та особливості.

Електричні сигнали в електронних пристроях по своїй фізичній суті можна розділити на аналогові та дискретні. Аналогові сигнали є безперервними в часі функціями напруги або струму та, у свою чергу, діляться на постійні і змінні.

Постійні аналогові сигнали є однополярними сигналами напруги або струму, що повільно змінюються з часом.

Змінними аналоговими сигналами називають функції напруги або струму, що змінюються в часі як за амплітудою, так і за знаком. Прикладом змінного сигналу є гармонічний або синусоїдальний сигнал.

Дискретними називаються такі електричні сигнали, які є розривними в часі функціями напруги або струму і можуть мати обмежену кількість рівнів. Найбільш часто в електроніці використовуються дискретні сигнали, які мають тільки два рівні – високої напруги (струму) і низької напруги (струму). Такі сигнали називають імпульсними або двійковими. Представлення інформації за допомогою таких сигналів має ряд переваг, обумовлених високою надійністю та простотою пристроїв, якими вони генеруються і перетворюються. Два дискретні значення, які приймають двійкові сигнали, зазвичай позначають двома цифровими символами – "1« » "0«.»Тому двійкові дискретні сигнали також називають цифровими, а розділ електроніки, що вивчає формування, перетворення та передачу двійкових сигналів – цифровою технікою.

Аналогова або дискретна форми представлення електричних сигналів суттєво впливають на принципи побудови й особливості роботи електронних пристроїв, які формують, підсилю-

ють і перетворюють ці сигнали.

Електронні пристрої, що оперують аналоговими сигналами, як правило, працюють у лінійному режимі та формують клас аналогових пристроїв. Особливість їх полягає в тому, що вхідні й вихідні сигнали зв'язані лінійними або близькими до лінійних залежностями. Прикладами аналогових пристроїв є підсилювачі постійних, змінних та імпульсних сигналів, що працюють без насичення, активні фільтри, генератори гармонічних сигналів, лінійні електричні кола із зосередженими або розподіленими параметрами типу R , L , C , імпульсні трансформатори, що працюють в лінійному режимі без насичення, лінії затримки та ін.

Лінійні елементи використовуються для підсилення, фільтрації, диференціювання, інтегрування, вкорочення, розширення та інших перетворень аналогових і дискретних сигналів.

Електронні пристрої, що оперують дискретними сигналами, працюють у суттєво нелінійному режимі. Основою їх структури є нелінійні (ключові) елементи, які здійснюють під впливом керуючих сигналів різні комутації, підключення та відключення пасивних і активних елементів, джерел живлення та ін. В статичному режимі ключова схема перебуває в одному з двох станів – замкненому (включеному) або розімкненому (виключеному). Комутації ключа створюють на його виході перепади напруги з амплітудою, близькою до амплітуди джерела живлення. Тому на виході ключа формується послідовність імпульсних сигналів, форма яких залежить як від швидкості перемикання ключа, так і від параметрів лінійних елементів, що входять до складу схеми.

Цифрові пристрої здійснюють логічне перетворення сигналів, їх запам'ятовування, підсумовування; шифрування та дешифрування цифрових кодів; ділення частоти імпульсів, а також ряд інших операцій. Цифрові пристрої відіграють провідну роль у багатьох галузях науки й техніки, і, насамперед в автоматичній, телемеханічній, обчислювальній техніці, супутниковому зв'язку, радіолокації, робототехніці, телебаченні, системах радіо та проводового зв'язку. Це пояснюється тим, що елементи і вузли цифрової техніки завдяки широкому застосуванню в них ключових режимів при існуючому рівні розвитку електроніки є найбільш

надійними, завадостійкими і тому дозволяють забезпечити високу надійність роботи складних апаратних комплексів, наприклад, АСУ, робототехнічних систем, гнучких автоматизованих виробництв, обчислювальних машин та ін.

Важливим фактором, що визначає широке впровадження цифрової техніки, є також її економічна ефективність, яка, з одного боку, визначається технологічністю при виготовленні та простотою при настроюванні й експлуатації, а з іншого – можливістю розв'язання завдань, нездійснених раніше на базі вузлів аналогової техніки.

Елементи та вузли цифрової техніки при правильному проектуванні не вимагають індивідуального регулювання й настроювання, дозволяють організувати масове виробництво із застосуванням сучасних засобів автоматизації, скоротити витрати праці й отримати великий економічний ефект. Цифрові пристрої досить просто зазнають автоматизації проектування, для них легко будуються математичні моделі, які з високим ступенем точності відповідають характеристикам реальних пристроїв, вони досить просто перебудовуються (перепрограмовуються) на реалізацію інших функцій. Цифрова техніка дозволяє також широко використовувати мікромініатюризацію, зменшувати масу й габаритні розміри апаратури, що в ряді випадків є одним з вирішальних факторів при проектуванні.

Імпульсна й цифрова техніка, будучи тісно зв'язані одна з одною, відповідають за різні характеристики пристроїв. Імпульсні сигнали є носіями цифрової інформації, при цьому імпульсна техніка займається формуванням, підсиленням і перетворенням імпульсних сигналів за їх фізичними параметрами (тривалістю, частотою, амплітудою, потужністю), а цифрова техніка, абстрагуючись від цих фізичних параметрів, займається перетворенням інформації, яку несуть в собі послідовності імпульсних сигналів, чергування високих і низьких рівнів напруги або сукупності різних рівнів напруги, виражених умовними параметрами 0 або 1, В або А і т. ін. Таким чином, імпульсні сигнали є носіями цифрової інформації, а імпульсні пристрої лежать в основі реалізації будь-яких цифрових схем.

Різна фізична суть імпульсних і цифрових сигналів ви-

значає й різні методи їх дослідження й опису.

В основі аналізу й синтезу імпульсних пристроїв, які є електричними та електронними колами, лежать відомі закони електричних і магнітних кіл, доповнені електричними моделями окремих електронних елементів, що є сукупністю пасивних елементів і джерел напруги. В основі аналізу й синтезу цифрових пристроїв, стан яких описується абстрагованими від конкретних фізичних параметрів змінними й функціями, лежать методи дискретної математики, алгебри логіки й теорії цифрових автоматів.

Інформація, передана за допомогою електричних сигналів, закладена в зміну їх електричних параметрів і форми або в умовному взаємному розташуванні елементів цих сигналів.

При передачі інформації шляхом зміни фізичних параметрів електричних сигналів в якості інформативного параметра можуть використовуватися амплітуда, частота або фаза гармонічного сигналу, а також амплітуда, полярність чи тривалість імпульсу або паузи.

2.2. Аналогові сигнали

Серед аналогових сигналів найбільш поширеними є синусоїдальні сигнали. Математичний вираз, що описує синусоїдальну напругу, має вигляд

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де U_m – амплітуда сигналу, ω – кутова частота в радіанах за секунду, причому $\omega = 2\pi f$, φ – початкова фаза сигналу.

Оскільки дослідження характеристик сигналів здійснюється у часовій та частотній областях, то для ілюстрації наведемо представлення сигналів у кожній з цих областей. За допомогою віртуальних інструментів та деяких видів аналізу Multisim можна дослідити характеристики сигналів у часовій області за допомогою осцилографу, а у частотній – за допомогою аналізатора спектру або швидкого перетворення Фур'є.

Змінний електричний сигнал у більшості випадків є функцією часу $x(t)$ з періодом $T = 1/f$, яку можна записати у вигляді ряду Фур'є'

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \sin(\omega_n t + \varphi_n),$$

де X_n , ω_n , φ_n – відповідно амплітуда, частота та початкова фаза n -ої гармоніки; N – кількість гармонік.

Окремі складові називають гармоніками, причому коливання основної частоти називають першою гармонікою і т. ін. Сукупність величин X_n називають спектром амплітуд, а сукупність величин φ_n – спектром фаз. Найчастіше цікавляться тільки спектром амплітуд і називають його просто спектром.

На рис. 2.1 наведена схема (2_garm_1.ms10) для дослідження форми і спектру гармонічного сигналу, а на рис. 2.2 – результати аналізу у часовій та частотній областях.

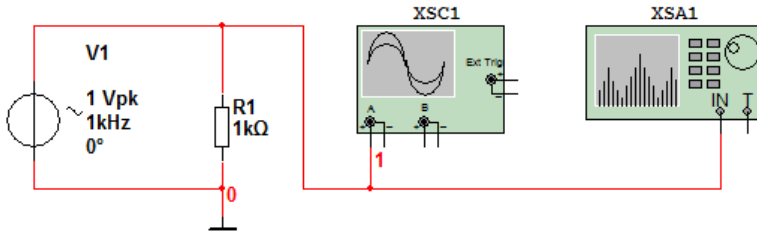
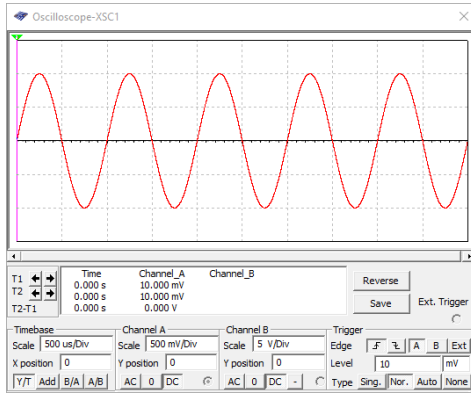


Рис. 2.1. Модель для дослідження форми та спектру гармонічного сигналу

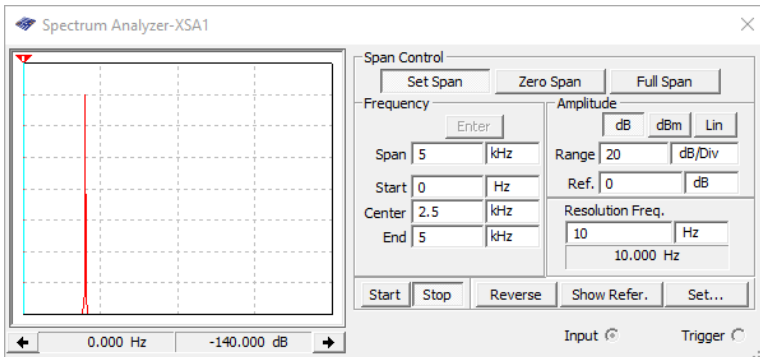
В якості генератора використано генератор гармонічного сигналу V1 (AC voltage). Залишаємо частоту генератора за замовчуванням рівною 1 кГц.

Для формування більш точного значення спектру необхідно встановити обмежений діапазон частот аналізу, достатній для відображення всіх складових спектру. Оскільки гармонічний сигнал у своєму спектрі має містити одну складову з частотою 1 кГц, то достатньо було б встановити верхню частоту діапазону аналізу на рівні 2 кГц. Але оскільки нижче будуть показані спектри більш складних сигналів, то для коректного порівняння результатів доцільно зберегти параметри аналізу однаковими. Тому задаємо верхню частоту смуги аналізу рівною 5 кГц. Форма спектру у значній мірі залежить від розділової здатності аналізу (Resolution Freq. на рис. 2.2, б). Чим меншим є значення розділової здатності, тим точнішим є значення спектру. Тому

задаємо значення розділової здатності 10 Гц. Якщо це значення занадто мале для заданого діапазону частот, то аналізатор спектру автоматично збільшить його до потрібного. Розділова здатність аналізу також залежить від кількості усереднених реалізацій сигналу, яка задається після натискання кнопки Set (рис. 2.2, б) у вікні, що показано на рис. 2.3.



a)



б)

Рис. 2.2. Форма гармонічного сигналу (а) та його спектр (б)

Чим більшою є кількість усереднень, тим більша точність аналізу, але і більший час для його проведення. Значення кількості усереднень може вибиратись у діапазоні від 1024 (2^{10}) до 32768 (2^{15}). Після вибору потрібного числа (у розглянутому прикладі це значення дорівнює 8192 або 2^{13}) треба натиснути кнопку Асерт. Далі можна проводити аналіз, натиснувши кноп-

ку початку моделювання у Multisim.

З рис. 2.2, б слідує, що у спектрі досліджуваного сигналу є тільки одна складова в діапазоні аналізу 140 дБ.

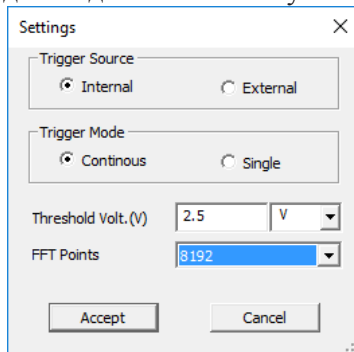


Рис. 2.3. Вікно для вибору кількості усереднених реалізацій сигналу

Інший спосіб дослідження спектру полягає у реалізації швидкого перетворення Фур'є. Для цього потрібно у меню Simulate вибрати пункт Analyses/Fourier Analysis (рис. 2.4) і у вікні, що відкриється (рис. 2.5), задати основну частоту аналізу 1 кГц, кількість гармонік аналізу 5 і масштаб по вертикалі у дБ. Далі необхідно натиснути на вкладку Output і у вікні (рис. 2.6), що відкривається, вибрати точку схеми, у якій проводиться аналіз (на схемі це напруга у точці 1), та натиснути кнопку Simulate. Результати спектрального аналізу наведені на рис. 2.7.

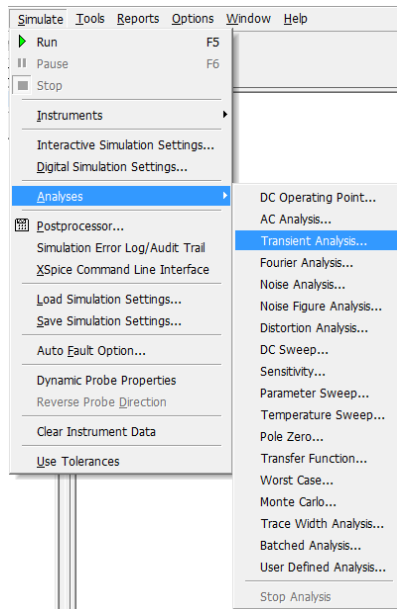


Рис. 2.4. Меню вибору виду аналізу

Окрім значень рівня гармонік у вікні Grapher View (рис. 2.7) виводиться інформація про коефіцієнт гармонік сигналу. Це

параметр THD (Total Harmonic Distortion), який дорівнює 0,0003569% або 3.569 ppm.

Розглянемо, чому найчастіше використовується синусоїдальна функція. Основна її перевага (а також основна причина настільки широкого поширення синусоїдальних сигналів) полягає в тому, що ця функція є розв'язком цілого ряду лінійних диференціальних рівнянь, що описують як фізичні явища, так і властивості лінійних кіл.

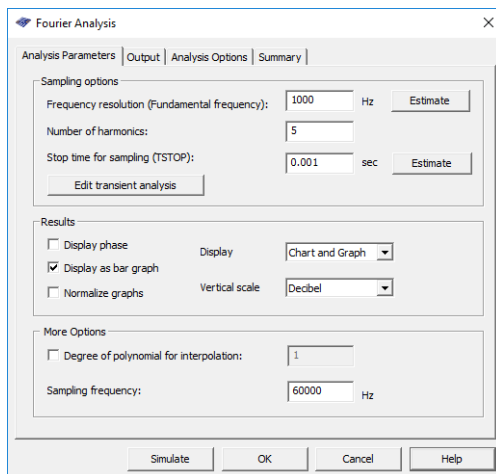


Рис. 2.5. Вікно задавання параметрів Fourier Analysis

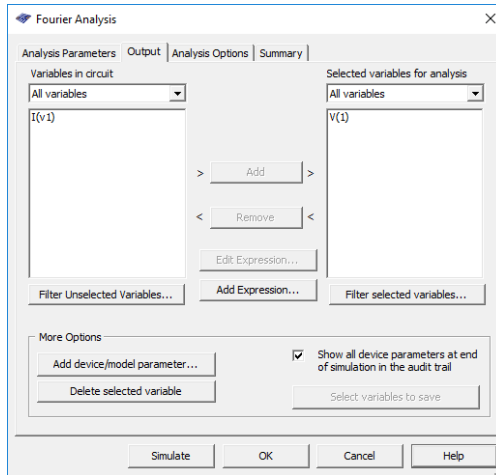


Рис. 2.6. Вікно вибору точки схеми для аналізу

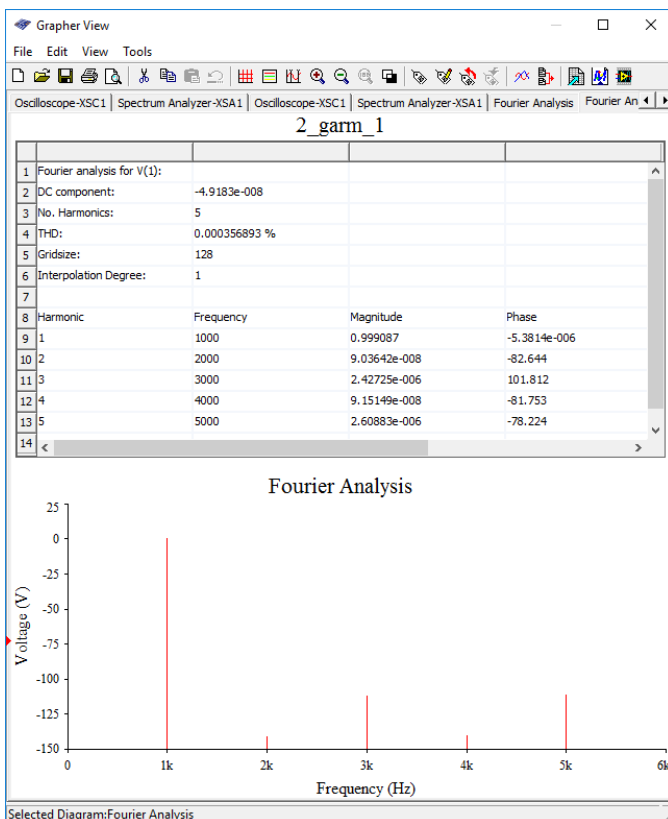


Рис. 2.7. Результати спектрального аналізу гармонічного сигналу, що формується генератором AC Voltage

Лінійне коло має таку властивість: вихідний сигнал, породжений сумою двох вхідних сигналів, дорівнює сумі двох вхідних сигналів, кожний з яких породжений вхідними сигналами, що діють не в сукупності, а окремо: інакше кажучи, якщо $U_{\text{вих}}(A)$ – вихідний сигнал, породжений сигналом A , то для лінійного кола справедливою є така рівність:

$$U_{\text{вих}}(A + B) = U_{\text{вих}}(A) + U_{\text{вих}}(B).$$

Якщо на вході лінійного кола діє синусоїдальний сигнал, то на виході також отримуємо синусоїдальний сигнал, але в загальному випадку його амплітуда і фаза будуть іншими. Це тве-

рдження слухне тільки для синусоїдального сигналу. На практиці прийнято оцінювати реакцію схеми за її амплітудно-частотною характеристикою, яка показує, як змінюється амплітуда синусоїдального сигналу залежно від частоти.

Аналогові сигнали описуються неперервними функціями напруги, струму та ін. Джерелами аналогових сигналів є давачі різних фізичних величин, наприклад, давач тиску, акселерометр та ін.

Процес цілеспрямованої зміни параметрів базового сигналу за законом зміни інформації, що передається, називається модуляцією. Базовий сигнал при цьому називається носійним.

Розрізняють амплітудну (АМ), частотну (ЧМ) та фазову (ФМ) модуляції. Останні дві завдяки взаємозв'язку між частотою та фазою часто об'єднуються під назвою кутової модуляції. Окрім перелічених існує ще багато більш складних видів модуляції. Пристрої, в яких забезпечується процес модуляції параметрів базової функції, називаються модуляторами. Розглянемо коротко основні характеристики двох видів модуляції – амплітудної (АМ) та частотної (ЧМ).

Дослідити форму та спектри АМ- та ЧМ-сигналів можна за допомогою моделі 2_mod.ms10, що наведена на рис. 2.8.

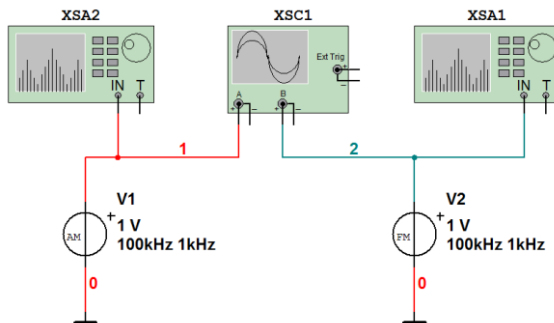


Рис. 2.8. Модель для дослідження форми та спектрів АМ- та ЧМ-сигналів

Для дослідження сигналів вибрана частота носійного коливання 100 кГц, частота модулюючого коливання 1 кГц, коефіцієнт модуляції при АМ дорівнює 0,7, а індекс модуляції при ЧМ – 5.

На рис. 2.9, а наведена форма амплітудно-модульованого (АМ), а на рис. 2.9, б – частотно-модульованого сигналів.

Якщо модулюючий сигнал гармонічний (рис. 2.9), то модуляція називається гармонічною.

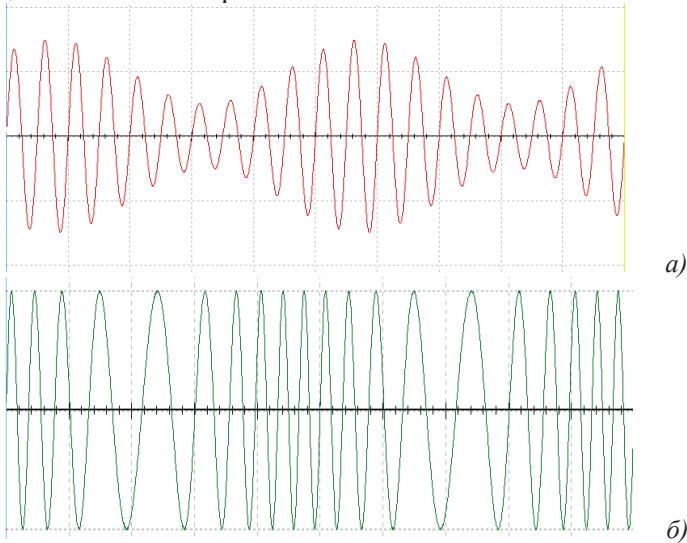


Рис. 2.9. Приклад амплітудно-модульованого (а) та частотно-модульованого (б) сигналів

Спектри АМ- та ЧМ-сигналів наведені на рис. 2.10 і 2.11 відповідно. З аналізу отриманих результатів слідує, що у спектрі АМ-сигналу присутні тільки дві бічні смуги частот, а у спектрі ЧМ-сигналу їх значно більше. Теоретично спектр ЧМ-сигналу має нескінченну кількість складових.

Описані види модуляції використовуються для передачі мовних, музичних, телевізійних сигналів, сигналів з різних джерел даних (наприклад, давачів рівня рідини у цистернах, температури в приміщеннях і т. ін.).

Не вдаючись у деталі теорії модуляції, необхідно відзначити, що амплітудна модуляція більш проста в технічній реалізації порівняно з кутовою. Але, у той самий час, цей вид модуляції має низьку стійкість як відносно зовнішніх завад, так і відносно нестабільності параметрів апаратури, в якій вона використовується. Кутова модуляція, навпаки, має більш складну тех-

нічну реалізацію і займає більш широку смугу частот, але при цьому вона більш стійка до зовнішніх завад.

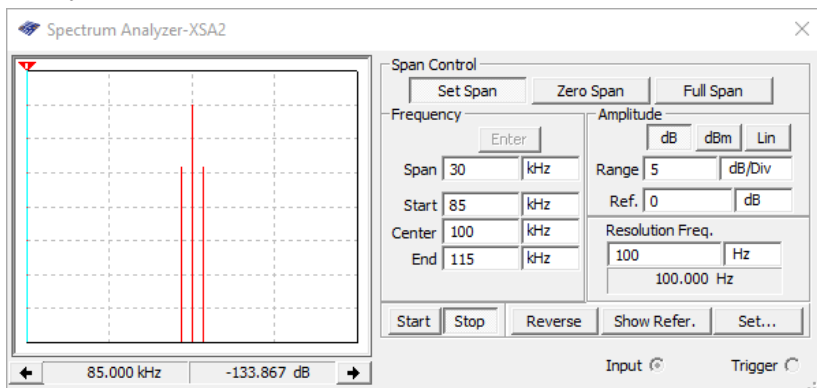


Рис. 2.10. Спектр АМ-сигналу

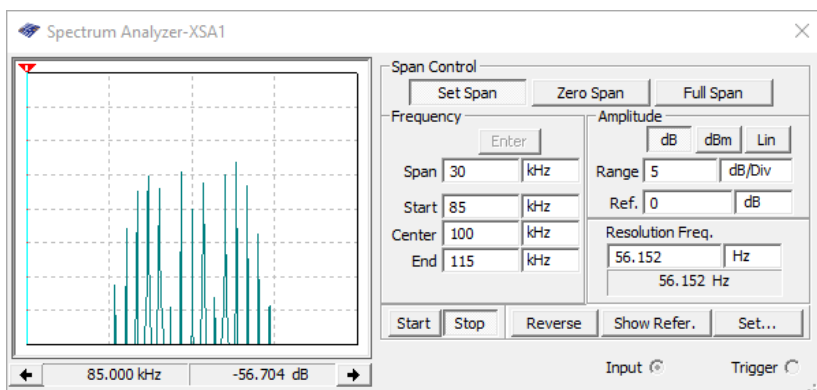


Рис. 2.11. Спектр ЧМ-сигналу

2.3. Імпульсні сигнали

Підтримувати стабільність і точність параметрів аналогових пристроїв досить важко. На їх роботу впливають технологічні допуски, які закладаються при виробництві електронних компонентів, коливання температури, напруги живлення, космічне випромінювання, шуми і наводки, що створюються електронними приладами, а також іншими колами і пристроями.

До того ж, реалізація математичних і логічних операцій у більшості випадків або дуже складна, або навіть неможлива при роботі з аналоговими сигналами. Для того, щоб впевнитись у цьому, достатньо спробувати реалізувати на аналогових компонентах будь-яку з відомих констант. Рекомендується провести такий дослід: використовуючи операційний підсилювач і решту реальних компонентів, реалізувати схему підсилювача так, щоб на виході підтримувалась напруга, яка за рівнем дорівнює числу $\pi = 3,141592653\dots$ На практиці забезпечити точність відтворення такого аналогового сигналу навіть з похибкою в 1% досить складно.

Окрім синусоїдальних в якості базових сигналів часто використовують різні за формою імпульсні сигнали та їх послідовності. На рис. 2.12 зображений типовий поодинокий імпульс та наведені його амплітудні та часові параметри.

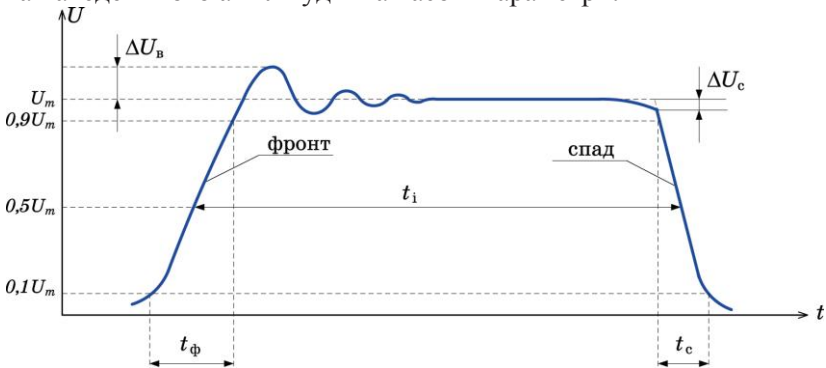


Рис. 2.12. Типовий поодинокий імпульс

До амплітудних параметрів відносяться такі: U_m — амплітуда імпульсу; ΔU_v — викид на фронті імпульсу; ΔU_c — спад вершини. До часових параметрів відносяться тривалість фронту t_ϕ та спаду t_c , а також тривалість імпульсу t_i .

Параметри імпульсу з часом можуть змінюватись у широких межах і, відповідно, поодинокі імпульси можуть мати різну форму. На рис. 2.3, а, б, в зображені імпульси експоненціальної, пилкоподібної та трикутної форм.

Імпульси можуть бути однополярними та різнополярними. Однополярні імпульси можуть бути позитивними та негативними.

вними. Для отримання імпульсних послідовностей різної форми, частоти та амплітуди застосовують спеціальні генератори.

Імпульси, наведені на рис. 2.12 та 2.13, називають відеоімпульсами. Однак окрім відеоімпульсів часто використовуються більш складні імпульси – з заповненням простими або модульованими сигналами. На рис. 2.14 наведені приклади радіоімпульсів з заповненням гармонічним сигналом (рис. 2.14, а) та прямокутним сигналом (рис. 2.14, б).

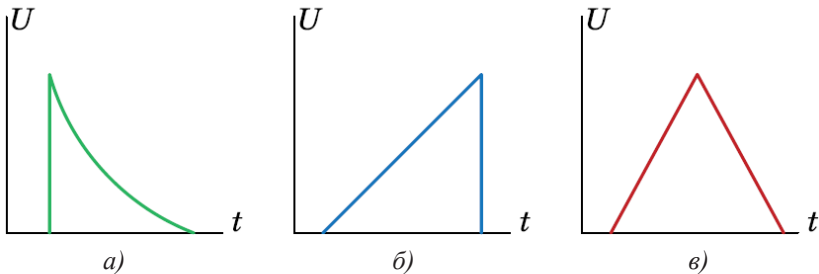


Рис. 2.13. Однополярні імпульси експоненціальної (а), пилкоподібної (б) та трикутної (в) форм

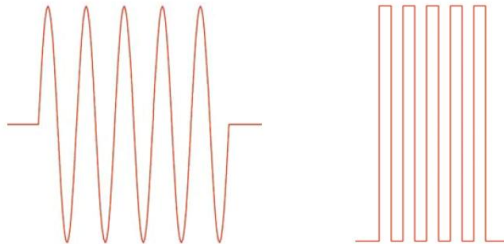


Рис. 2.14. Радіоімпульси з заповненням гармонічним (а) та прямокутним (б) сигналами

Імпульсна послідовність характеризується наявністю пауз між поодинокими імпульсами. Як пауза тривалістю t_n приймається нульовий рівень напруги чи струму або такий рівень, який прирівнюється до нульового (рис. 2.15).

Якщо тривалість імпульсів і пауз між ними в послідовності не змінюється, то говорять про періодичну послідовність, яка характеризується періодом

$$T = t_i + t_n,$$

коефіцієнтом заповнення

$$S = t_i / T$$

та шпаруватістю

$$Q = T / t_i.$$

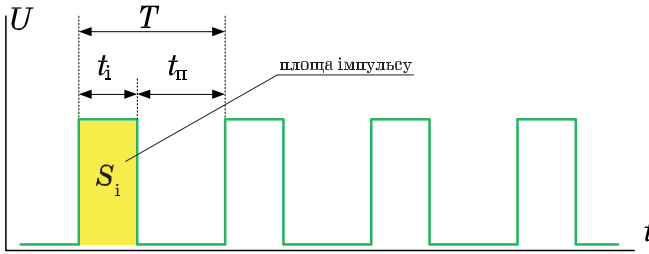


Рис. 2.15. Послідовність прямокутних імпульсів

Одним з найбільш важливих параметрів імпульсної послідовності є середнє значення напруги, яке можна визначити за формулою

$$U_{\text{сеп}} = \int_0^{t_i} U(t) dt = \frac{S_i}{T} = \frac{U_m}{Q}, \quad (2.1)$$

де S_i — площа підінтегральної функції; U_m — амплітуда імпульсу.

Графічні зображення спектрів послідовностей деяких імпульсних сигналів наведені на рис. 2.16.

Довжини вертикальних відрізків дорівнюють амплітудам відповідних гармонік. Ці відрізки називають спектральними лініями, а сам спектр — лінійчатим.

В загальному випадку спектр сигналу нескінченний. Тому що амплітуди гармонік при збільшенні їх номера (кутової частоти) зменшуються, починаючи з деякої гармоніки високочастотними коливаннями нехтують, обмежуючи спектр сигналу.

Величина інтервалу частот, в якому розміщується обмежений спектр, називається шириною спектру. Обмеження спектру проводять виходячи з припустимого спотворення сигналу так, щоб не втратити інформацію, яка міститься в ньому.

На рис. 2.17 показано, як формуються прямокутні імпульси (рис. 2.16, а) з окремих гармонік. Графіки першої і третьої гармонік та їх суми зображені на рис. 2.17, а. На рис. 2.17, б ця сума доповнена п'ятою гармонікою. Характерно, що прямокутні

імпульси з шпаруватістю $Q = 2$ є парними відносно осі і містять тільки непарні гармоніки.

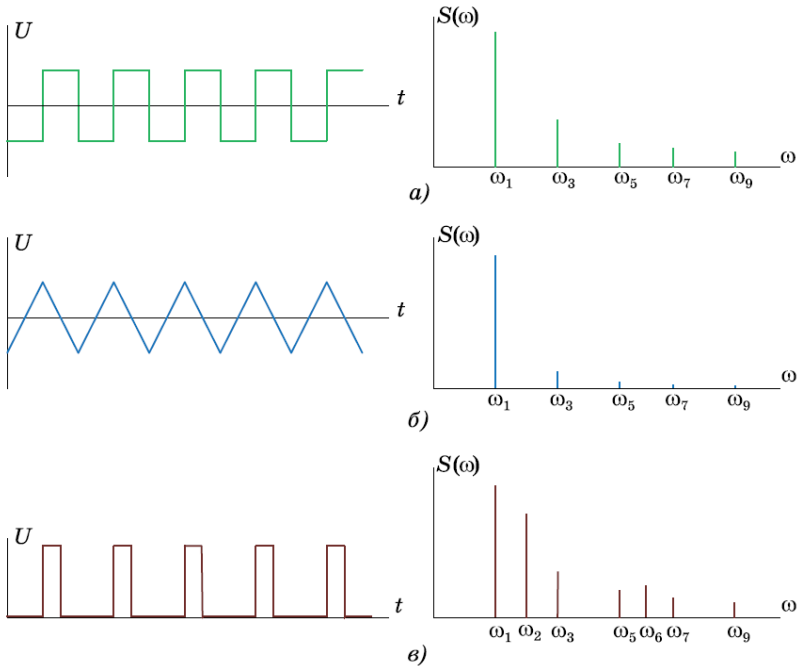


Рис. 2.16. Форма сигналів та графічне зображення спектрів прямокутних симетричних імпульсів з $Q = 2$ (а), трикутних імпульсів (б) та однополярних прямокутних імпульсів з $Q = 4$ (в)

Використання для гармонічного аналізу складних періодичних коливань ряду Фур'є в комбінації з принципом накладання є ефективним засобом для вивчення впливу лінійних кіл на проходження сигналів. Однак необхідно зазначити, що визначення сигналу на виході кола за сумою гармонік із заданими амплітудами та фазами є непростою задачею, особливо якщо не забезпечується швидка збіжність ряду Фур'є який представляє вхідний сигнал. Найбільш поширені в радіотехніці сигнали не відповідають цій умові, тому для задовільного відтворення форми сигналів зазвичай необхідно підсумувати велику кількість гармонік (для прямокутної імпульсної послідовності достатньою є кількість гармонік, що дорівнює потроєному значенню шпару-

ватості).

На рис. 2.18 наведено схему моделі 2_form_imp_z_garm.ms10, що дозволяє формувати сигнали, які складаються з 9 гармонік, а на рис. 2.19 осцилограми послідовності прямокутних імпульсів, сформованих генератором V1 (червона) та послідовності імпульсів з такою ж частотою, сформованої з 9-ти гармонік (зелена). У генератора гармонік моделі (рис. 2.18) встановлені параметри, які відповідають параметрам послідовності прямокутних імпульсів амплітудою 5 В, частотою слідування 1 кГц та коефіцієнтом заповнення 30%.

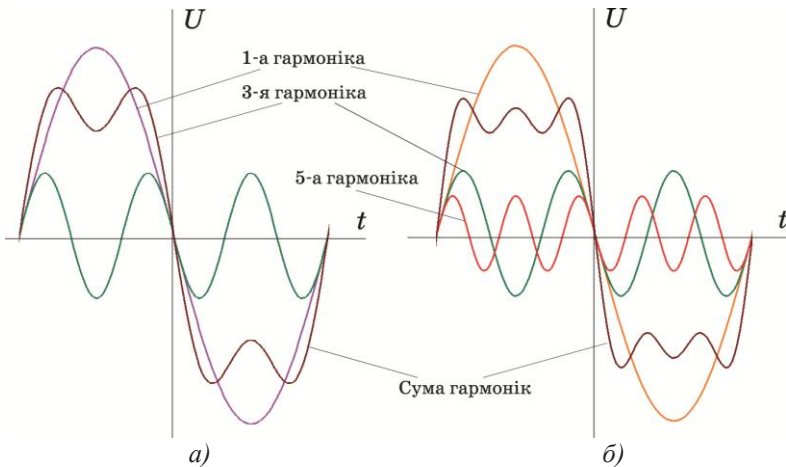


Рис. 2.17. Формування прямокутних імпульсів з першої (фіолетова) та третьої (зелена) гармонік (а), а також з додаванням n 'я'ої гармоніки (б)

Як слідує з рис. 2.19, навіть 9-ти гармонік недостатньо для точного відтворення форми сигналу, але отриманий сигнал вже досить близький за формою до сформованого генератором прямокутних імпульсів.

Оскільки при дослідженні різних кіл параметри сигналів можуть змінюватися в широких межах, доцільно мати такий інструмент, який дозволить визначити параметри сигналів з найменшими втратами часу. Найкраще для таких цілей підходить програма NI Multisim.

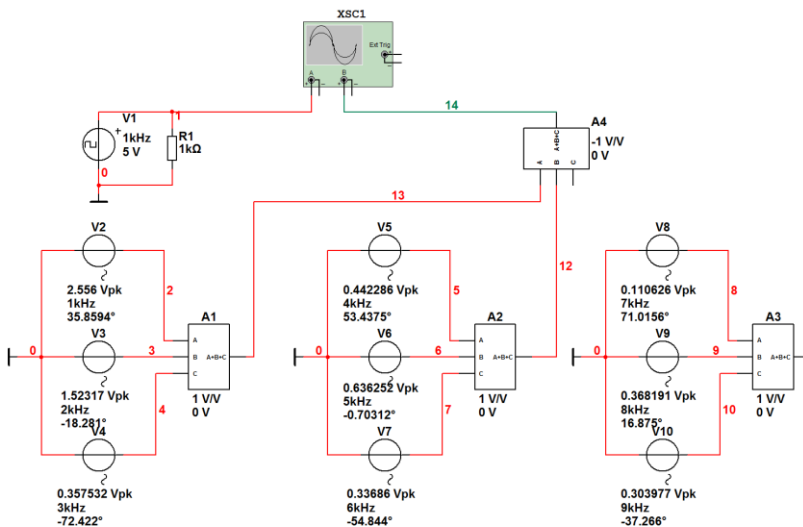


Рис. 2.18. Модель для дослідження форми сигналу, що складається з 9-ти гармонік

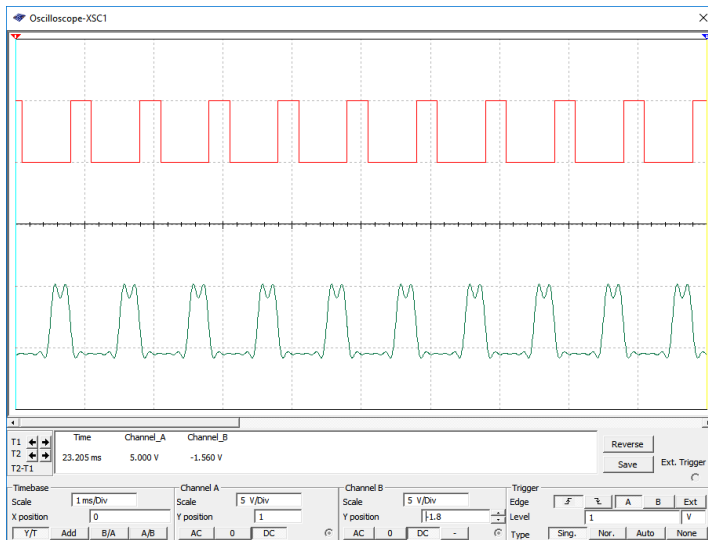


Рис. 2.19. Осцилограми послідовності прямокутних імпульсів, сформованих генератором V1 (червона) та послідовності імпульсів з такою ж частотою, сформованої з 9-ти гармонік (зелена)

2.4. Вимірювання параметрів сигналів за допомогою програми NI Multisim

2.4.1. Джерела сигналів у Multisim

Програма NI Multisim надає широкі можливості як для синтезу сигналів, так і для дослідження їх параметрів. До складу стандартної бібліотеки джерел сигналів входять:

- джерела напруги:

- AC VOLTAGE – джерело змінної напруги;
- AM VOLTAGE – джерело амплітудно-модульованого сигналу;

- BIPOLAR VOLTAGE – генератор біполярних прямокутних імпульсів з інтервалами між позитивним та негативним імпульсами;

- CLOCK VOLTAGE – генератор прямокутних однополярних імпульсів;

- EXPONENTIAL VOLTAGE – генератор експоненціального імпульсу;

- FM VOLTAGE – джерело частотно-модульованого сигналу;

- LVM VOLTAGE – генератор LabVIEW, що використовує дані з файлу *.lvm;

- PIECEWISE LINEAR VOLTAGE – генератор кусково-лінійного сигналу;

- PULSE VOLTAGE – генератор біполярних прямокутних імпульсів;

- TDM VOLTAGE – генератор LabVIEW, що використовує дані з файлу *.tdm;

- THERMAL NOISE – генератор теплового шуму;

- TRIANGULAR VOLTAGE – генератор трикутного сигналу;

- джерела струму:

- AC CURRENT – джерело змінного струму;

- BIPOLAR CURRENT – генератор струму біполярних

прямокутних імпульсів з інтервалами між позитивним та негативним імпульсами;

- **CLOCK CURRENT** – генератор прямокутних однополярних імпульсів струму;

- **DC CURRENT** – джерело постійного струму;

- **EXPONENTIAL CURRENT** – генератор експоненціального імпульсу струму;

- **FM CURRENT** – джерело частотно-модульованого струму;

- **LVM CURRENT** – генератор LabVIEW, що використовує дані з файлу *.lvm;

- **PIECEWISE LINEAR CURRENT** – генератор кусково-лінійного струму;

- **PULSE CURRENT** – генератор біполярних прямокутних імпульсів струму;

- **TDM CURRENT** – генератор LabVIEW, що використовує дані з файлу *.tdm;

- джерела сигналів, керованих напругою:

- **ABM VOLTAGE** – генератор, параметри якого задаються математичним виразом;

- **CONTROLLED ONE SHOT** – генератор з одним стійким станом (аналог одновібратора), параметри якого задаються користувачем;

- **CURRENT CONTROLLED VOLTAGE SOURCE** – джерело напруги, кероване струмом;

- **FSK VOLTAGE** – джерело частотно-маніпульованого (Frequency Shift Keying) сигналу;

- **VOLTAGE CONTROLLED PIECEWISE LINEAR SOURCE** – джерело напруги, апроксимованої відрізками, кероване напругою;

- **VOLTAGE CONTROLLED SINE WAVE** – джерело синусоїдальної напруги, кероване напругою;

- **VOLTAGE CONTROLLED SQUARE WAVE** – джерело прямокутної напруги, кероване напругою;

- **VOLTAGE CONTROLLED TRIANGLE WAVE** – джерело трикутної напруги, кероване напругою;

- **VOLTAGE CONTROLLED VOLTAGE SOURCE** – джерело напруги, кероване напругою;
 - джерела сигналів, керовані струмом;
- **ABM CURRENT** – джерело струму;
- **CURRENT CONTROLLED CURRENT SOURCE** – джерело струму, кероване струмом;
- **VOLTAGE CONTROLLED CURRENT SOURCE** – джерело струму, кероване напругою.

2.4.2. Інструменти аналізу сигналів у Multisim

У Multisim передбачена велика кількість функцій аналізу даних емуляції – від простих до самих складних, у тому числі й вкладених.

Список усіх можливих видів аналізу Multisim наведений на рис. 2.20. Розглянемо основні види аналізу.

1. DC Operating Point – аналіз кола на постійному струмі. Аналіз кіл на постійному струмі здійснюється для резистивних схем. Це правило впливає прямо з теорії електричних кіл. При аналізі на постійному струмі конденсатори замінюють розривом, котушки індуктивності – коротким замиканням, а нелінійні компоненти, такі як діоди і транзистори, замінюють їх опором постійному струму в робочій точці. Аналіз кіл на постійному струмі виявляє вузлові потенціали досліджуваної схеми.

2. AC Analysis – аналіз кола на змінному струмі. Такий аналіз полягає в побудові частотних характеристик.

3. Transient Analysis – аналіз перехідних процесів. Дозволяє визначити форму вихідного сигналу протягом тривалості перехідного процесу, тобто побудувати графік сигналу в функції часу. Для того, щоб почати аналіз, потрібно вибрати пункт меню Simulate/Analyses та необхідний режим.

4. Fourier Analysis – Фур'є-аналіз, тобто аналіз спектру сигналу. Дозволяє здійснювати аналіз спектру сигналів у заданому діапазоні частот і вибраній кількості гармонік. Результати аналізу виводяться як у вигляді графіків, так і в табличній формі.

З іншими методами аналізу за необхідністю будемо зна-

Йомитись в процесі досліджень.

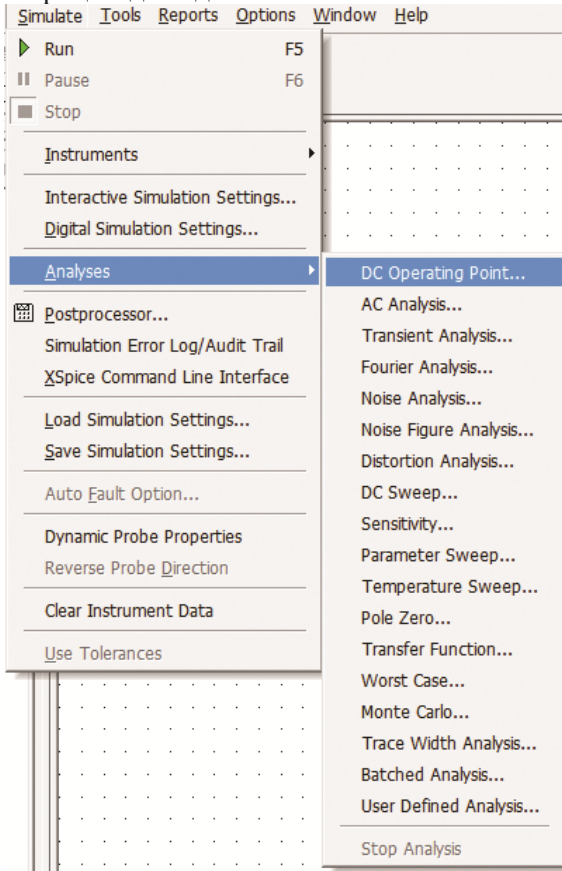


Рис. 2.20. Меню аналізу програми NI Multisim

Крім вбудованих функцій аналізу є можливість визначити власну необхідну функцію за допомогою команд SPICE.

При підготовці до аналізу необхідно налаштувати його параметри, наприклад, діапазон частот для аналізу на змінному струмі (AC analysis) або основну частоту та кількість гармонік для Фур'є-аналізу. Необхідно також вибрати вихідні канали (traces), що позначені на схемі як ноди, тобто точки (вузли) схеми, для яких необхідно провести аналіз.

Для перегляду результатів емуляції призначено вікно

Grapher. Воно відкривається з меню View/Grapher або іконкою, що розташована у верхньому рядку графічного меню програми. Після завершення вибраного типу аналізу вікно Grapher відкривається автоматично.

Більшість параметрів Grapher настроюється у вікні властивостей. Наприклад, можна змінювати масштаби, діапазони, заголовки, стилі ліній осей та ін. (рис. 2.21).

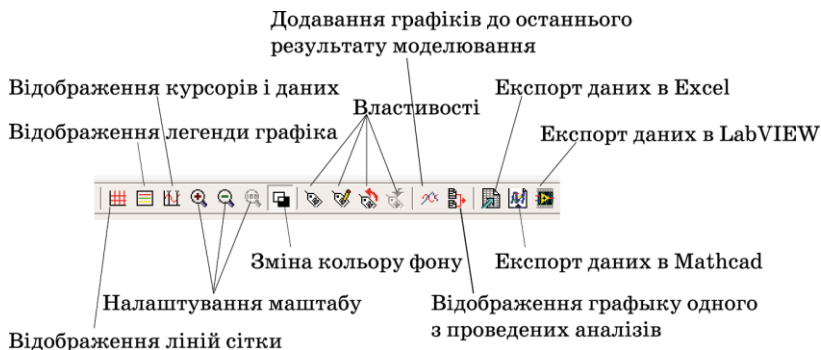


Рис. 2.21. Меню настроювання параметрів Grapher

Кнопками управління (рис. 2.21), піктограми яких відображаються у верхній частині вікна, можна виконувати такі дії.

1. Включити або виключити сітку.
2. Включити або виключити легенду (позначення кольором сигналу у вибраному каналі вимірювання).
3. Включити або виключити курсори. При цьому користувачу надається можливість переміщення курсорів по горизонтальній осі. У вікні, яке відкривається знизу під вікном графіків, відображаються:

- x_1 – відстань першого курсору (блакитного кольору) від початку координат в одиницях часу;
- y_1 – значення напруги в точці перетину сигналу з курсором. Аналогічно для другого (жовтого) курсору. Крім того, вказуються мінімальні та максимальні значення сигналів і зсув по осях x та y .

4. Змінити колір фону (з чорного на білий і навпаки) кнопкою реверс (Reverse).

5. Змінити оформлення вікна перегляду. При натисканні

кнопки Graph Properties відкривається вікно настроювання (рис. 2.22), у якому в кожній вкладці можна внести зміни в оформлення.

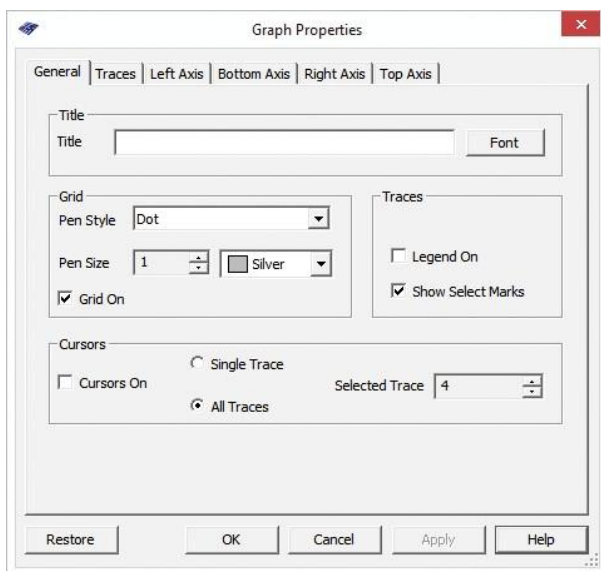


Рис. 2.22. Вікно настроювання інтерфейсу Graph Properties

На вкладці General задається колір і товщина ліній сітки, число виведених кривих. На ній також можна включити і виключити курсори, сітку та легенду.

На вкладці Traces вибирається колір і товщина ліній виведених кривих, зсув графіка по осях (вручну або автоматично), на осі Left Axis – мінімальне та максимальне значення напруги (діапазон вимірювання напруги), напис на осі (Label), колір і товщина осі, кількість поділок, кількість знаків після коми в числах, нанесених на осі, а також тип шрифту.

Кнопки масштабування, збереження та завантаження настроювань, додавання наступних результатів вимірювання в особливих поясненнях не мають потреби.

Натиснувши кнопку Overlay traces, можна додати вікно з результатами вимірювань з двох різних вікон на одному графіку. В таблицю, що відображає значення напруги у різних точках осцилограм та інші параметри (наприклад, виміряні при інших

параметрах і виведені в інше вікно), виводяться дані двох графіків. Біля назви додаткових стовпців виведеної таблиці (рис. 2.23) з'являється напис (merged). На рис. 2.23 до результатів вимірювання спектру у вузлі V(2) додано результати вимірювання у вузлі V(1).

Fourier Analysis		
	V (2)	V (1) [Merged]
x1	2.0000k	2.0000k
y1	1.1794e-016	636.6822m
x2	1000.0000	1000.0000
y2	1.2733	900.3369m
dx	-1000.0000	-1000.0000
dy	1.2733	263.6546m
1/dx	-1.0000m	-1.0000m
1/dy	785.3802m	3.7928
min x	0.0000	0.0000
max x	10.0000k	10.0000k
min y	0.0000	0.0000
max y	1.2733	900.3389m
offset x	0.0000	0.0000
offset y	0.0000	0.0000

Рис. 2.23. Вікно результатів вимірювання після натискання кнопки *Overlay traces*

Для трансформації часового масштабу відображуваної осцилограми або АЧХ необхідно, натиснувши ліву кнопку "м«-ші",» виділити ділянку сигналу (така операція можлива тільки у вікні, в якому відображаються сигнали, обмежені осями) і відпустити кнопку. У виділеній ділянці масштаб зображення по вертикалі залишиться незмінним, а по горизонталі він розтягнеться на все вікно. Чим менше ширина захопленої ділянки, тим більшим є коефіцієнт збільшення масштабу зображення по горизонталі.

Останні три кнопки призначені для експорту результатів вимірювань в Excel, MathCad і збереження файлу вимірювань (Save to Measurement file) для системи Lab View.

Програма пакету Multisim Postprocessor за допомогою Grapher дозволяє відобразити результати моделювання в графічному вигляді.

Для роботи з функцією Postprocessor необхідно знати назви вузлів. Тільки ті параметри (вхідні та вихідні змінні), які

вказуються при виконанні будь-якого виду аналізу (AC Sweep, DC Sweep, Transient Analysis та ін.) відображаються на графіках Postprocessor і Grapher.

За допомогою даної функції можна створити декілька графіків, змінювати параметри графіка, видаляти об'єкти, проводити логічні та алгебраїчні операції над графіками (додавання, множення, піднесення до квадрату та ін.).

2.4.3. Налаштування параметрів аналізу

Перш ніж проводити будь-який аналіз, необхідно встановити його вихідні параметри, задавши їх у пунктах меню Interactive Simulation Settings та Digital Simulation Settings. Якщо ці установки не провести, моделювання буде виконуватися з параметрами, заданими в програмі Multisim за замовчуванням.

При зверненні до пункту меню Interactive Simulation Settings відкриється вкладка Defaults for Transient Analysis Instruments, у якій задаються початковий і кінцевий час аналізу. За замовчуванням – від 0 до 1030 с, при цьому за замовчуванням часовий крок аналізу задається автоматично. Однак досить поставити "гачок" »іля пункту Set Initial Time Step, щоб встановлювати крок аналізу вручну.

В закладці **Analysis Options** встановлені за замовчуванням такі параметри:

- Use Multisim Defaults (параметри за замовчуванням);
- Perform Consistency check before starting analysis (перевірка правильності зв'язків до початку аналізу);
- Discard plots to save memory (не проводити запис графіків).

Для того, щоб змінити параметри, задані за замовчуванням, необхідно вибрати режим Use Custom Settings і натиснути кнопку Customize, при цьому відкриється вікно Custom Analysis Options (рис. 2.24) – набір команд для встановлення параметрів моделювання.

Налаштування загального характеру (**Global**) задаються в діалоговому вікні (рис. 2.24), у якому можна змінити параметри аналізу, якщо поставити "гачок" »іля відповідного пункту.

Параметри мають такі значення:

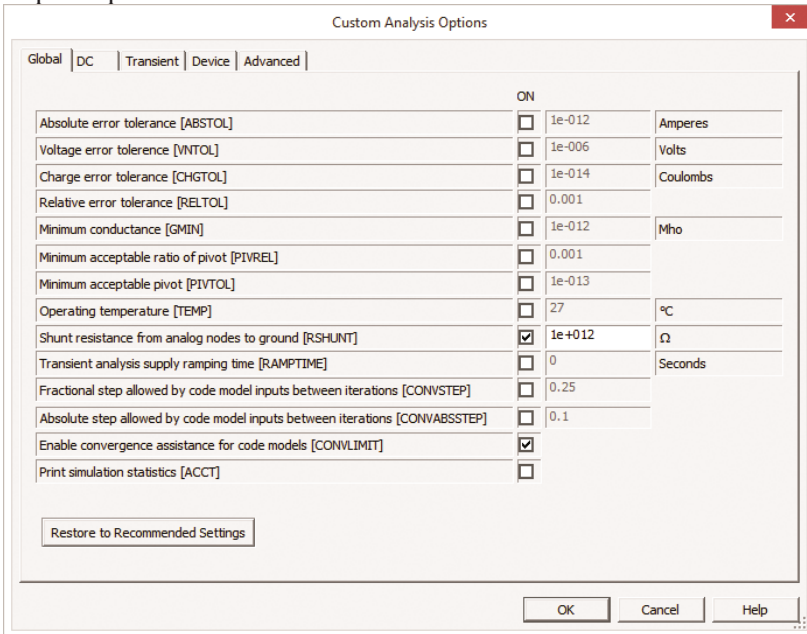


Рис. 2.24. Вікно установки глобальних параметрів аналізу

- ABSTOL – абсолютна похибка розрахунку струмів; якщо струми у схемі моделі значно більші зазначеного на рис. 2.24 значення, то для прискорення процесу аналізу значення ABSTOL доцільно збільшити, виходячи з припустимої похибки розрахунків (наприклад, з врахуванням розрядності мультиметра);

- VNTOL – абсолютна похибка розрахунку напруги;

- CHGTOL – абсолютна похибка розрахунку зарядів; встановлені за замовчуванням значення (рис. 2.24) змінювати не рекомендується;

- GMIN – мінімальна провідність вітки або ділянки кола (зазначене на рис. 2.24 значення змінювати не рекомендується); збільшення GMIN позитивно позначається на сходженні розв'язку при одночасному зниженні точності моделювання; використовується при підключенні додаткового алгоритму Gmin stepping;

- PIVREL, PIVTOL – відносна та абсолютна величини елемента рядка матриці вузлових провідностей, прийнятого за основний; введення такого елемента у випадку застосування методу Гауса дозволяє підвищити точність проміжних обчислень і, отже, зменшити загальну кількість ітерацій; встановлені за замовчуванням значення параметрів (рис. 2.24) змінювати не рекомендується;

- RELTOL – відносна помилка моделювання; впливає на збіжність розв'язку та швидкість моделювання; рекомендовані значення – $10^{-2} \dots 10^{-6}$;

- TEMP – температура, для якої проводиться моделювання;

- RSHUNT – опір витоку для всіх нод (точок) схеми відносно спільного проводу (шини заземлення); при повідомленнях про помилки "N« DC path to ground" »погане заземлення кола) і "M« trix is nearly singular" »матриці дуже близькі) мова йде про матриці Li U-рівнів) значення параметра варіюється в межах $10^6 \dots 10^9$ Ом;

- RAMPTIME – початкова точка відліку часу при аналізі перехідних процесів;

- CONVSTEP, CONVABSSTEP відносний і абсолютний розміри автоматично контрольованого кроку ітерації при розрахунку режиму по постійному струмі;

- CONVLIMIT – вмикання або вимикання додаткових засобів, вбудованих у моделі деяких компонентів, для забезпечення збіжності ітераційного процесу;

- ACCT – вкл./викл. виводу отриманих в результаті моделювання статистичних даних, які можуть бути корисними для налаштування процесу моделювання при виникненні проблем (дані виводяться в діалоговому вікні Grapher).

Усі рекомендовані за замовчуванням параметри наведені в підказці до таблиці Global tab програми. Кнопка Restore to Recommended Settings у всіх діалогових вікнах призначена для відновлення значень параметрів аналізу, встановлених за замовчуванням. Використовується в тому випадку, якщо після редагування необхідно повернутися до даних за замовчуванням.

Слід враховувати, що результатом зміни параметрів

ABSTOL, RELTOL, VNTOL, CHGTOL, наприклад, з метою зменшення часу моделювання, може стати незадовільна збіжність ітераційного процесу при наявності в схемі вузлів і кіл, що мають близькі значення шуканих значень напруги, струму або заряду.

На вкладці вікна установки параметрів **DC-аналізу** проводяться налаштування для розрахунку режиму за постійним струмом (статичний режим) за допомогою діалогового вікна, в якому задаються такі параметри (рис. 2.25):

- ITL1 – максимальна кількість ітерацій; при повідомленні "N« convergence in DC analysis" »незадовільна збіжність при DC-аналізі) значення параметра необхідно збільшити до 500...1000;

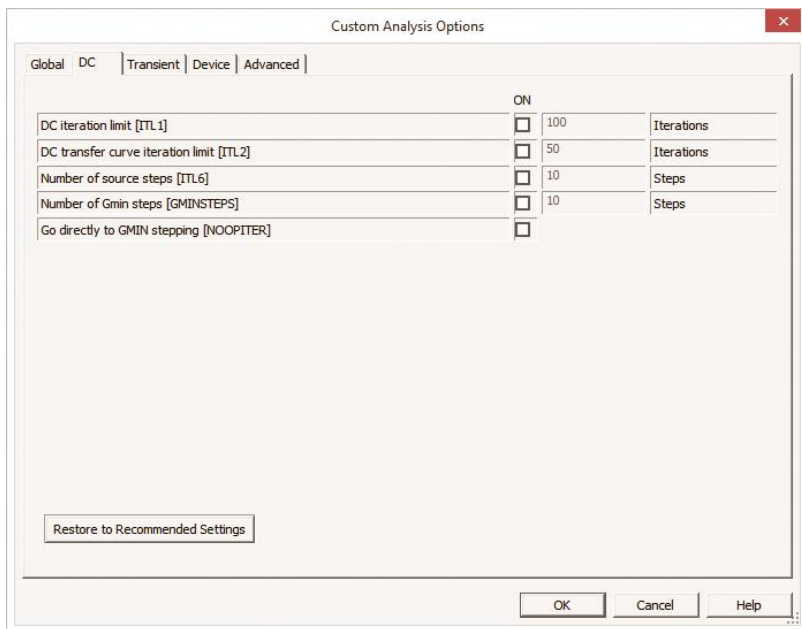


Рис. 2.25. Вікно установки параметрів аналізу на постійному струмі

- ITL2 – максимальна кількість кроків додаткового алгоритму Source stepping, що використовується при незадовільній збіжності розв'язку для нелінійних кіл. При виконанні цього алгоритму здійснюється "р«зподіл" »лянки характеристики нелі-

нійного компонента на задану параметром SRCSTEPS ("S«eps in source stepping algorithm")»кількість кроків;

- ITL6 – кількість кроків додаткового Gmin stepping алгоритму, який використовується при незадовільній збіжності;
- GMINSTEPS – кількість ітерацій з кроком Gmin (мінімальна провідність кола) додаткового Gmin stepping алгоритму;
- NOOPITER – перехід безпосередньо до покрокового виконання алгоритму Gmin.

На вкладці вікна (рис. 2.26) встановлення параметрів режиму аналізу перехідних процесів (**Transient**) задаються такі параметри:

- ITL4 – максимальна кількість ітерацій для розрахунку однієї точки перехідного процесу; при повідомленні "T«me step too small" »крок часу дуже малий) або "N« convergence in the transient analysis" »немає сходження) значення параметра доцільно збільшити до 15 і повторити аналіз;

- Maxcord – максимальний порядок інтегрування – параметр, який необхідно задати для наближеного інтегрування системи диференціальних рівнянь методом Гіра (GEAR), що передбачає можливість роботи зі змінним кроком, який, залежно від швидкості зміни змінної (потенціалу V_i), може автоматично змінюватися; при збільшенні порядку точність розрахунків збільшується з одночасним зменшенням швидкості процесу моделювання; за замовчуванням параметр дорівнює 2, діапазон зміни від 2 до 6;

- TRTOL – константа, що визначає точність розрахунків; наприклад, у найпростіших випадках така константа, що називається характеристикою кроку, визначається співвідношенням $|dV/dt| h = \text{const}$, де h – крок ітерації, тобто при зміні $|dV/dt|$ має відповідно мінятися і крок ітерації; встановлене за замовчуванням значення TRTOL дорівнює 7, а змінювати його не рекомендується;

- METHOD – метод наближеного інтегрування системи диференціальних рівнянь TRAPEZOIDAL (метод Ейлера з вирівнюванням), що реалізує формулу

$$V_{n+1} = V_n + (h/2)(dV_n/dt + dV_{n+1}/dt),$$

де h – крок ітерації, V_{n+1} та V_n – значення потенціалу в i -й точці

схеми на поточному та попередньому кроках ітерації.

Цей метод використовується, якщо в процесі моделювання виникають небажані коливання числових значень розрахованих параметрів або у випадку використання в схемі ідеальних перемикачів. За замовчуванням цей метод використовується для аналізу схем генераторів.

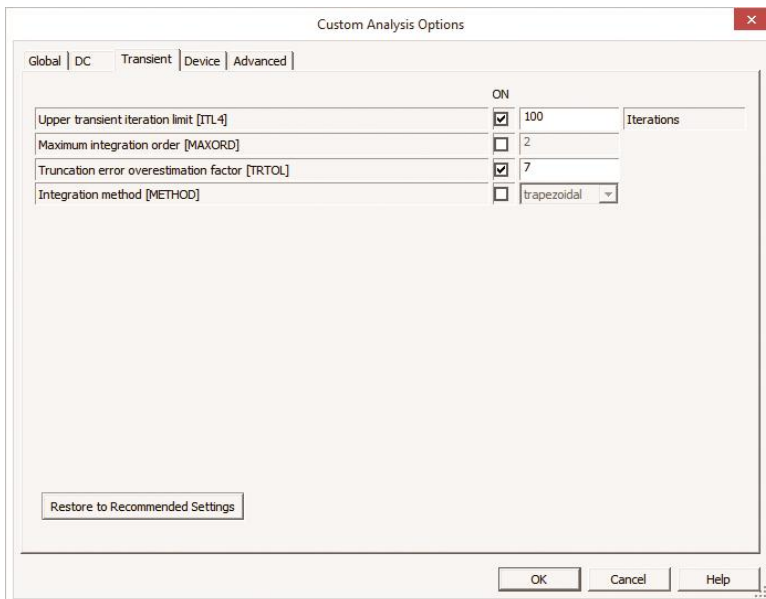


Рис. 2.26. Вікно установки параметрів аналізу перехідних процесів (Transient)

На вкладці вікна (рис. 2.27) установки параметрів **Device** (МОН-транзисторів) задаються такі параметри:

- TNOM – номінальна температура компонента;
- BYPASS – вмикання або вимикання нелінійної частини моделі компонента;
- DEFAD – площа дифузійної області стоку, м²;
- DEFAS – площа дифузійної області джерела, м²;
- DEFL – довжина каналу польового транзистора, м;
- DEFW – ширина каналу, м;
- TRYTCOMPACT – вмикання або вимикання лінійної частини моделі компонента;

- **OLDLIMIT** – вмикання або вимикання обмежень SPICE2-моделі для МОН-транзисторів (MOSFET), за замовчуванням виключене.

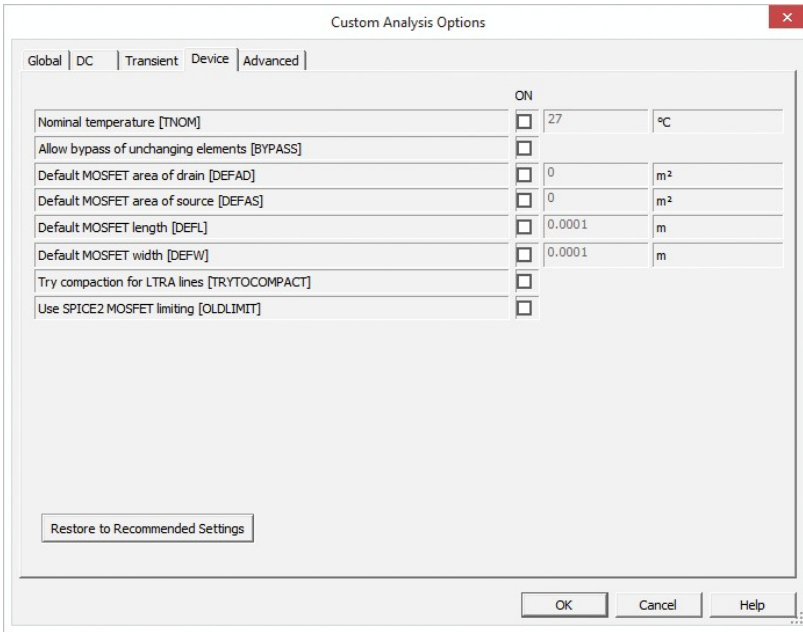


Рис. 2.27. Вікно установки параметрів аналізу *Device* (МОН-транзисторів)

Остання вкладка в цьому пункті меню – **Advanced** (рис. 2.28), на якій можна встановити такі параметри:

- **AUTOPARTIAL** – використання розрахунку auto-partial для всіх моделей;
- **BADMOS3** – використання старої моделі mos3;
- **KEEROPINFO** – запис кожної точки при обчисленні параметрів малого сигналу;
- **MAXEVTITER** – максимальна кількість ітерацій в точці аналізу;
- **MAXOPALTER** – максимальна кількість ітерацій в точці аналізу (альтернативний метод) для аналізу кіл за постійним струмом (DCOP);
- **MINBREAK** – мінімальний часовий інтервал між точ-

ками переривання;

- NOOPALTER – не використовувати альтернативний метод для аналізу кіл за постійним струмом (DCOP).

Більш докладну інформацію про настроювання пунктів меню "С«stom Analyzes Option" »ожна отримати в [4], що входить до складу документації до програми і розміщено за замовчуванням у папці C:\Program Files\National Instruments\Circuit Design Suite 10.0\documentation\Multisim 10 User Guide.pdf.

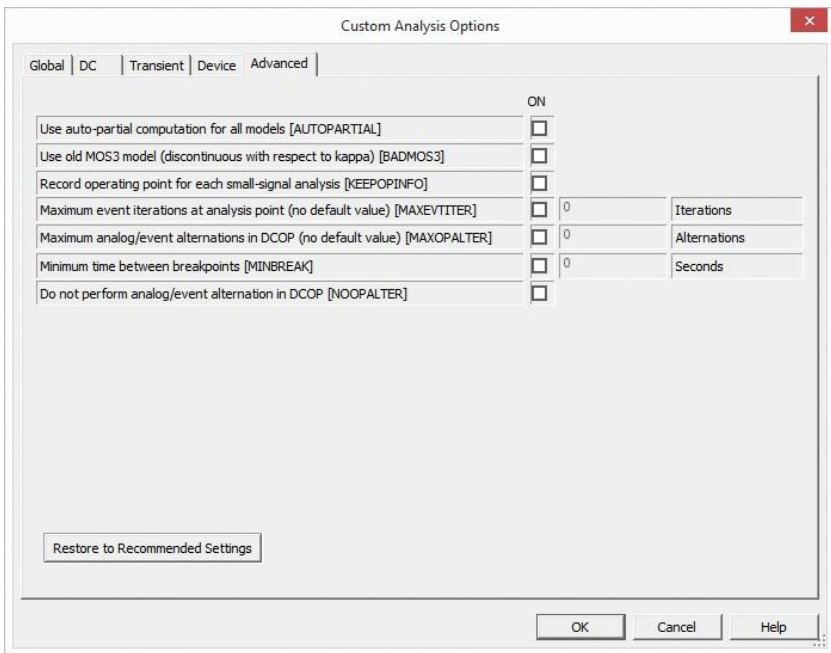


Рис. 2.28. Вікно установки параметрів аналізу Advanced

2.5. Основні правила роботи з вимірювальними приладами

2.5.1. Осцилограф

В програмі Multisim доступно 4 типи осцилографів. Розглянемо особливості роботи з дво- і чотиріканальним осцилог-

рафами. Органи керування двоканальним осцилографом показані на рис. 2.29.

Масштаб зображення по вертикалі регулюється дискретно і незалежно в кожному каналі органами регулювання чутливості входу. Масштаб зображення по горизонталі регулюється тривалістю розгортки. В кожному каналі передбачена можливість зсуву зображення по вертикалі як вгору, так і вниз. Зсув по горизонталі здійснюється за допомогою зміни значення "X«position"». Для того, щоб зображення не зміщувалося по горизонталі, необхідно синхронізувати розгортку осцилографа з початком наступного періоду сигналу. Для синхронізації зазвичай вибирають режим "N«tr" » задають рівень синхронізації в рядку "L«vel", який дорівнює від 10% до 50% амплітуди сигналу, яким здійснюється синхронізація. Це може бути сигнал каналів А або В (за фронтом або спадом), а також сигнал зовнішнього джерела сигналу, що підключається до входу "«xt Trg"». При дослідженні сигналів різної частоти слід вибирати для синхронізації сигнал з мінімальною частотою.

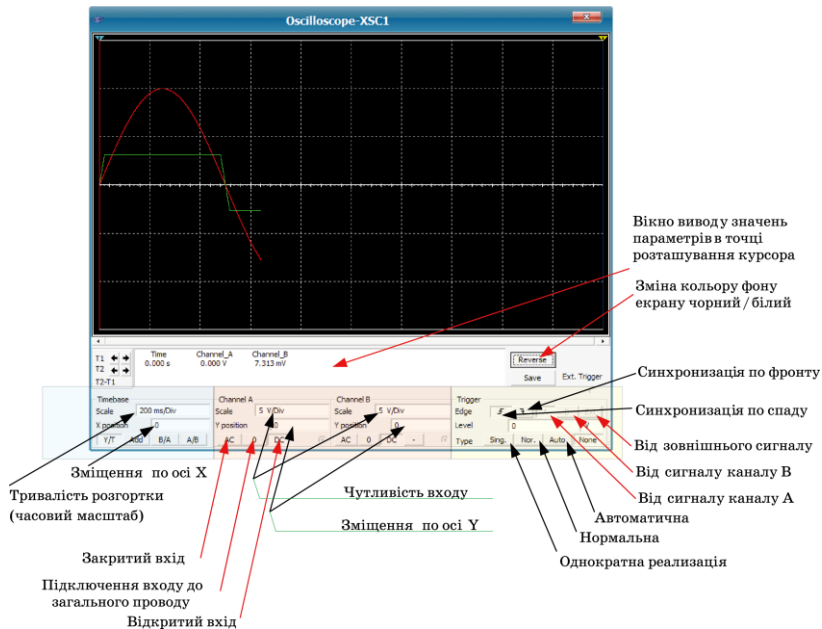


Рис. 2.29. Органи керування двоканальним осцилографом

У чотириканальному осцилографі замість роздільних вікон регулювання чутливості і зміщення по вертикалі використовується одне вікно і перемикач каналів (рис. 2.30). Для регулювання в потрібному каналі необхідно встановити покажчик (біла рисочка) на необхідну літеру і задати параметри у вибраному каналі. Аналогічно здійснюється регулювання і в інших каналах.

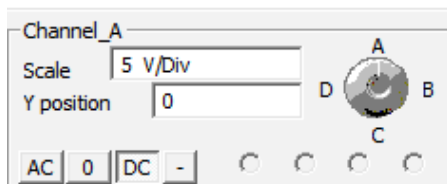


Рис. 2.30. Органи керування чутливістю чотириканального осцилографа

Вимірювання параметрів сигналу в будь якій точці (наприклад, амплітуди і часового інтервалу від початку розгортки) можна здійснювати як за поділками, нанесеним на екрані, так і за допомогою курсорів (зелений і жовтий трикутники у верхній частині екрана осцилографа). Досить перемістити курсор в потрібну точку екрана і у вікні виводу значень параметрів в точці розміщення курсора прочитати покази (рис. 2.31).

Як впливає з рис. 2.31, напруга в точці, поміченій червоним курсором, складає величину 994,954 мВ для каналу А і 2,487 В для каналу В, а в точці, поміченій синім курсором – відповідно 999,436 мВ і 2,499 В. У нижньому рядку вказується часовий інтервал між курсорами і різниця напруг, виміряних в цих точках.

2.5.2. Плотер Боді

Для того, щоб використати даний інструмент, необхідно натиснути на кнопку Bode Plotter на панелі інструментів, і перемістити курсор на місце, де потрібно розмістити іконку на робочій області. Іконка з умовним позначенням плотера (рис. 2.32, а) використовується для його підключення до схеми.

Плотер використовується для побудови амплітудно- і

фазочастотних характеристик (АЧХ і ФЧХ). Коли плотер підключається до схеми, виконується спектральний аналіз у заданому діапазоні частот. Для роботи Бодє-плотера на вході схеми обов'язково потрібно включити джерело сигналів змінного струму (АС), як показано на рис. 2.32, б. Спільний провід можна до плотера не підключати, оскільки за замовчуванням це з'єднання здійснюється автоматично, хоча на схемі це і не відображається. Частота сигналу джерела АС не впливає на результати роботи плотера і може бути встановлена будь-якою.

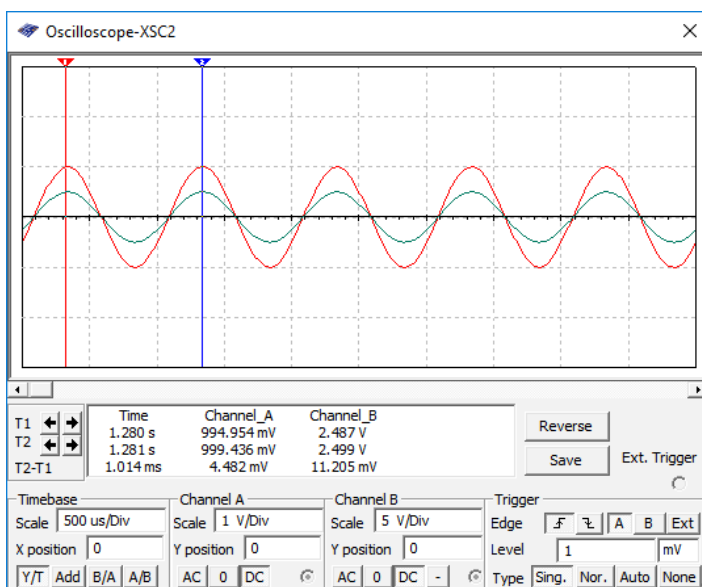


Рис. 2.31. Вимірювання параметрів сигналу в точці, позначеній курсором

Подвійне клацання по іконці відкриває панель інструменту, яка використовується для вводу установок і перегляду результатів вимірювань (рис. 2.33).

Початкове і кінцеве значення масштабу по вертикалі та горизонталі встановлені за замовченням на максимум. Ці значення можуть змінюватися для перегляду графіка в різних масштабах. Якщо масштаб збільшувався або змінювалась база після закінчення симуляції, вам може знадобитись повторна активація

схеми, щоб отримати більш детальне зображення. Якщо виводи плотера Бодє переносяться до інших вузлів, необхідно повторно активувати схему, щоб отримати правильні результати.

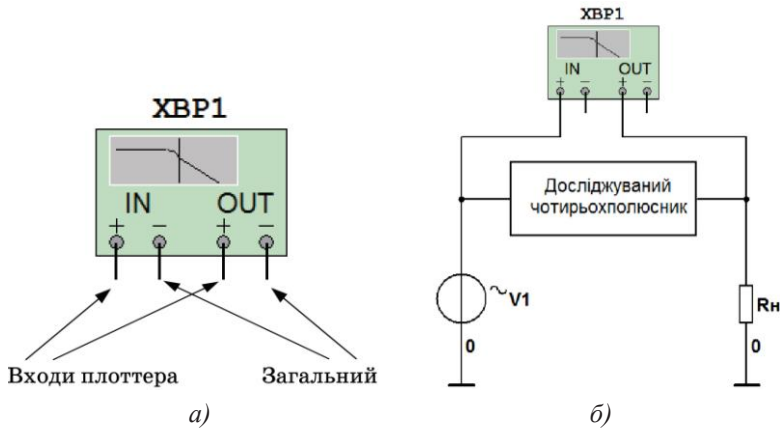


Рис. 2.32. Призначення входів (а) та схема підключення (б) плотера Бодє

Для налаштування кількості точок, що відображають АЧХ або ФЧХ, необхідно натиснути кнопку Set (рис. 2.33) і у вікні Settings dialog, що відкривається, встановити потрібну кількість точок (Resolution Points) і натиснути кнопку Accept. Максимальне значення кількості точок дорівнює 1000. Бажано завжди використовувати максимальне значення для підвищення точності отриманих результатів.

Вимірювання АЧХ та ФЧХ (Magnitude або Phase).

В режимі вимірювання АЧХ (Magnitude) вимірюється відношення величин напруги між двома вузлами в схемі, які під'єнані до входів In та Out. В режимі вимірювання ФЧХ між цими вузлами вимірюється зсув фаз.

Установки масштабу вертикальної та горизонтальної осей.

Логарифмічна шкала використовується, коли значення, які порівнюються, значно відрізняються за рівнем.

Налаштування частотного діапазону аналізу здійснюється у вікні Horizontal шляхом установки верхнього значення частоти (вікно F на рис. 2.34) і нижнього значення частоти (вікно I

на рис. 2.34).

Настроювання максимального і мінімального рівнів вхідного сигналу здійснюється у вікні Vertical (відповідно вікна F та I на рис. 2.34).

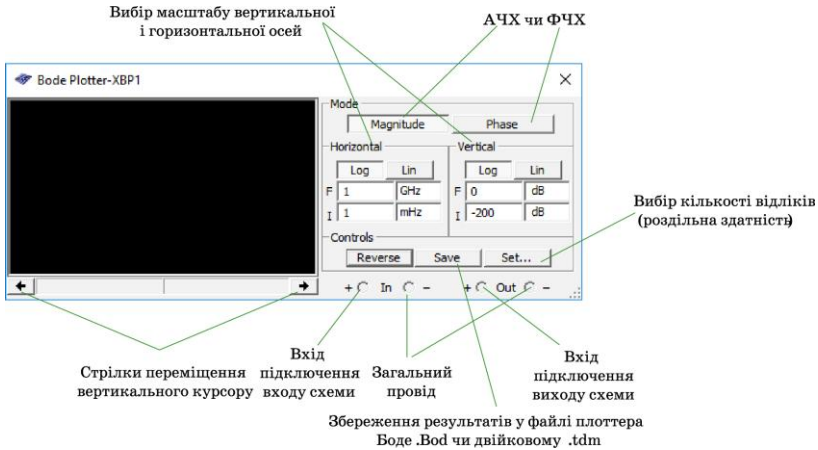
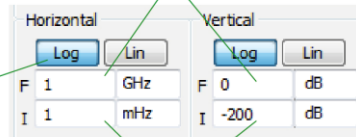


Рис. 2.33. Вікно відображення результатів та настроювання параметрів плотера Боде

Кінцеві значення

Базові установки
Log – логарифмічна шкала
Lin – лінійна шкала



Початкові значення

Рис. 2.34. Установки масштабу вертикальної та горизонтальної осей

В табл. 2.1 наведені діапазони вимірювань в лінійному та логарифмічному масштабах.

Перегляд результатів вимірювання плотером Боде.

Для ілюстрації вимірювання за допомогою Боде-плотера скористаємось моделлю 2_izm_magnitude.ms10, що наведена на рис. 2.35. Схема складається з коливального контуру з елементів L1 та C1 і резистора навантаження Rn. У вікні відображення ре-

зультатів спостерігається резонансна крива цього контуру. Для більш детального дослідження АЧХ діапазон аналізу встановлений від 10 кГц до 1 МГц, а мінімальне значення коефіцієнта передачі встановлено на рівні -50 дБ. Під час настоювання цих значень АЧХ на екрані перебудовується одночасно зі зміною параметра, що дозволяє вибрати найкращий масштаб для перегляду.

Табл. 2.1. Залежність одиниць і масштабу по вертикальній осі

Режим вимірювання	Використаний масштаб	Значення за замовчуванням	Максимальне кінцеве значення
Magnitude (gain)	Logarithmic	-200 дБ	200 дБ
Magnitude (gain)	Linear	0	10 ⁹
Phase	Linear	-720°	720°

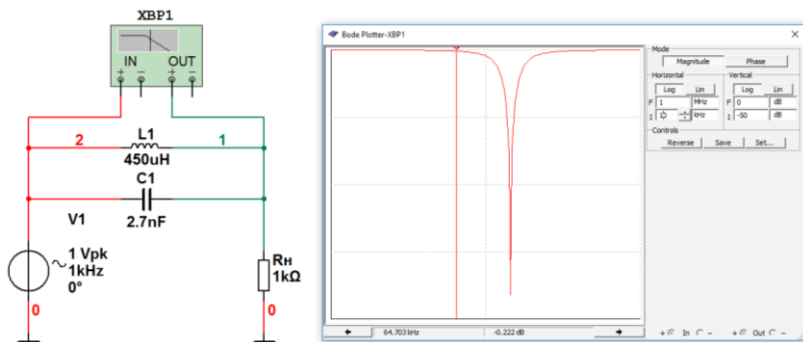


Рис. 2.35. Значення частоти і коефіцієнта передачі кола на перетині вертикального курсора і графіка

Для того, щоб прочитати значення частоти і коефіцієнта передачі схеми (або фазового зсуву) у будь-якій точці на графіку, потрібно змістити курсор, який знаходиться з лівого боку вікна відображення результатів вимірювання плотера Бode, у потрібну точку.

Для того, щоб перемістити вертикальний курсор, необхідно натиснути на стрілку в нижній частині плотера або пере-

тягнути вертикальний курсор від лівого краю дисплея плотера до точки на графіку, в якій необхідно виміряти значення відповідного параметра (рис. 2.35).

Частотна характеристика, що відображається на рис. 2.35, має дуже гострий резонанс, тому потрапити курсором в точку мінімального коефіцієнта передачі досить важко. Для точного переміщення до точки мінімуму або максимуму АЧХ потрібно розмістити курсор "м«ші" »а лінії курсору і натиснути праву кнопку "м«ші"»В результаті цього на екран буде виведено контекстне меню для переміщення курсору, в якому передбачено (рис. 2.36):

- переміщення курсору ліворуч або праворуч по осі X на задане значення частоти;
- переміщення до точки (ліворуч або праворуч) із заданим значенням коефіцієнта передачі (або фазового зсуву при вимірюванні ФЧХ);
- переміщення до точки наступного максимуму (мінімуму) АЧХ ліворуч або праворуч.

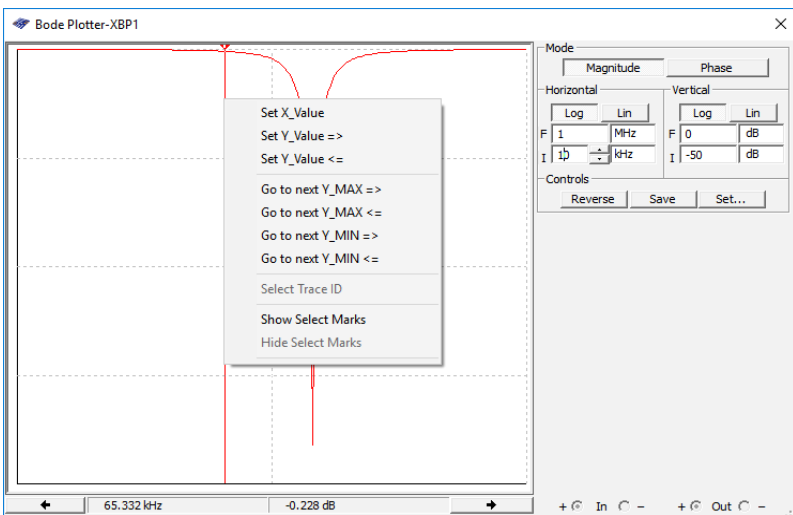


Рис. 2.36. Контекстне меню для переміщення курсора Бодє-плотера

Для точного вимірювання частоти резонансу можна скористатися пунктом контекстного меню Go to next Y_MIN зі

стрілкою, що вказує праворуч, і курсор автоматично переміститься до точки мінімального коефіцієнта передачі (рис. 2.37).

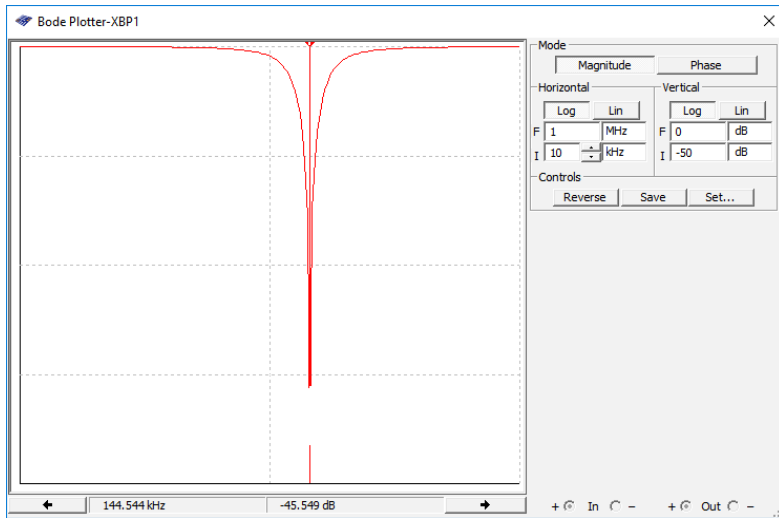


Рис. 2.37. Результати точного вимірювання частоти резонансу за допомогою контекстного меню

2.5.3. Генератор слова

Для формування тестових багаторозрядних цифрових сигналів використовується Word Generator (генератор слова), умовне позначення і вікно налаштувань параметрів якого показані на рис. 2.38. Генератор дозволяє формувати 32-розрядні кодові слова, які можна ввести з клавіатури безпосередньо у вікні введення коду.



Рис. 2.38. Умовне позначення і вікно налаштувань параметрів генератора слова

Для вводу і збереження введених слів іншими способами необхідно натиснути кнопку Set у вікні настроювання параметрів генератора слова (рис. 2.39). У вікні попередніх настроювань у стовпці Preset Patterns можна вибрати один з восьми варіантів формування та збереження слова:

- No Change – не змінюється автоматично (ручне введення значень);
- Load – завантажити з файлу;
- Save – зберегти файл;
- Clear buffer – очистити буфер;
- Up Counter – автоматично збільшувати кожне наступне значення на 1;
- Down Counter – автоматично зменшувати кожне наступне значення на 1;
- Shift Right – зміщувати праворуч на одну позицію кожне наступне значення;
- Shift Left – зміщувати ліворуч на одну позицію кожне наступне значення.

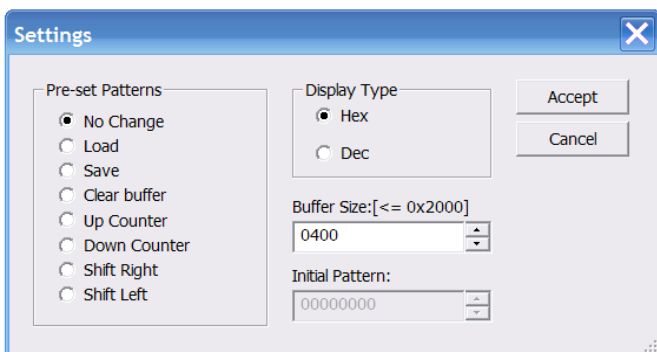


Рис. 2.39. Вікно настроювань генератора слова

Перед введенням кодів слів необхідно у вікні Buffer Size (рис. 2.39) ввести необхідну кількість кодів слів, яка задається в шістнадцятковому або десятковому коді залежно від типу виводу на дисплей – в шістнадцятковому (Hex) або десятковому (Dec) форматах, що задається у вікні Display Type. Гра-

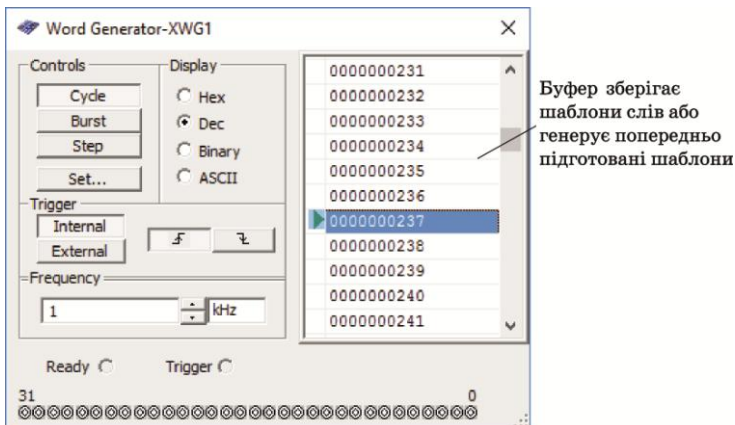
ничний розмір буфера складає 8192 кодових слова (2000 в шістнадцятковому коді).

При використанні попередніх налаштувань генератора слова Up Counter, Down Counter, Shift Right та Shift Left у вікно Initial Pattern необхідно ввести початкове значення коду.

Розглянемо на прикладі, як буде виглядати набір кодів слів при таких налаштуваннях:

- Display Type – Dec;
- Buffer Size – 10;
- Shift Right;
- Initial Pattern – 2147483648 (відповідає шістнадцятковому коду 80000000).

Сформовані кодові слова показані на рис. 2.40. Для наочного представлення сформованого цифрового сигналу результат у вікні Word Generator представлений в десятковому коді.



Вихідні виводяки відповідають тим, що відображаються на іконці генератора

Рис. 2.40. Основне вікно генератора слова

Щоб встановити об'є, значення і порядок зміни коду, необхідно натиснути кнопку Set (рис. 2.40) і у вікні Settings, що відкриється (рис. 2.41), провести необхідні установки.

До введення значень коду в будь-якому режимі необхідно вибрати, в якому коді відображати дані – шістнадцятковому (Hex) чи десятковому (Dec). Для цього необхідно задати об'є

буфера (не більше ніж 8192 символи) та номер початкової позиції, з якої почнеться зчитування коду (Initial Pattern), і натиснути кнопку Accept.

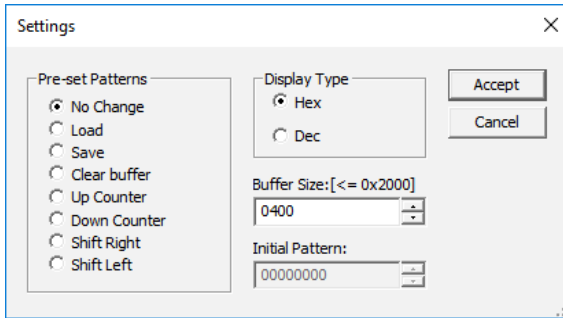


Рис. 2.41. Вікно Settings генератора слова

Для введення значень коду в режимі No Change курсором "м«ші" необхідно клацнути по одній з кнопок вибору режиму формування коду (рис. 2.40): циклічному (Cycle), одноразовому (Burst) або покроковому (Step). В покроковому режимі після кожного натискання кнопки Run (на панелі інструментів кнопка позначена зеленим трикутником) виводиться чергове кодове слово. Після перебору всіх введених значень коду буде знову виводитися перше слово, потім друге і т. ін.

Після цього необхідно вибрати режим відображення в секції Display (Hex, Dec, Binary або ASCII) і ввести з клавіатури потрібні значення коду в кожний рядок. Подальші переміщення по полю екрану зручніше проводити не за допомогою "м«ші", а клавішами управління курсором. Вміст екрану можна стерти і завантажити нове значення (або записати результати у файл). Для запису необхідно натиснути кнопки Save і Accept, попередньо натиснувши кнопку Set (рис. 2.41). В діалоговому вікні необхідно вказати ім'я файлу (за замовчуванням пропонується ім'я схемного файлу). В отриманому таким чином текстовому файлі з розширенням .dr будуть записані у вигляді таблиці всі набрані на екрані комбінації. За необхідністю файл можна відредагувати в будь-якому текстовому редакторі і завантажити знову натисканням кнопки Load.

Окрім режиму ручного вводу коду передбачена можли-

вість автоматичного формування коду відповідно до змін коду на виході підсумовувального (Up Counter) або віднімального (Down Counter) двійкового лічильника, а також автоматичного зміщення коду на одну позицію двійкового коду (тобто зміна у 2 рази) ліворуч (Shift Left) або праворуч (Shift Right).

Для введення і збереження введених слів іншими способами необхідно натиснути кнопку Set у вікні настроювання параметрів генератора слова (рис. 2.41). При цьому у вікні попередніх настроювань у стовпці Preset Patterns необхідно вибрати один з восьми варіантів формування та збереження слова (розглянуто раніше).

На вихід R (Ready) генератора слова виводиться сигнал тактової частоти, який може бути використаний для синхронізації інших пристроїв. Сигнал з цього виходу супроводжує кожну кодову комбінацію, що подається на вихід і може бути використаний в тому випадку, коли досліджуваній пристрій має властивість квітування (підтвердження). В цьому випадку після отримання чергової кодової комбінації і супроводжуючого його сигналу READY досліджуваній пристрій формує сигнал підтвердження отримання даних, який подається на вхід зовнішньої синхронізації генератора T і виробляє черговий запуск генератора, якщо він працює в режимі зовнішньої синхронізації.

На рис. 2.42 наведено приклад формування 4-розрядного цифрового сигналу з періодом повторення 16 тактів (режим виводу Cycle) і часові діаграми цього сигналу, отримані за допомогою чотириканального осцилографа.

Текст файлу, що містить інформацію про сформовані сигнали, наведено на рис. 2.43. Частота виводу сигналів задається в рядку Frequency (рис. 2.40). За замовчуванням задається частота виведення сигналу 1 кГц.

Сформовані слова знімаються з чотирьох виходів (від 0 до 3) молодших розрядів XWG1 (рис. 2.42). На інших виходах формуються нулі відповідно до таблиці програмування генератора. Передбачена можливість підключення зовнішнього сигналу синхронізації по входу T. За замовчуванням включена синхронізація від внутрішнього тактового генератора.

Для очищення буфера від введених кодових слів необ-

хідно натиснути кнопку Clear buffer.

Генератор кодових слів зручно використовувати для тестування різних цифрових пристроїв, тому що він дозволяє формувати довільні послідовності нулів та одиниць.

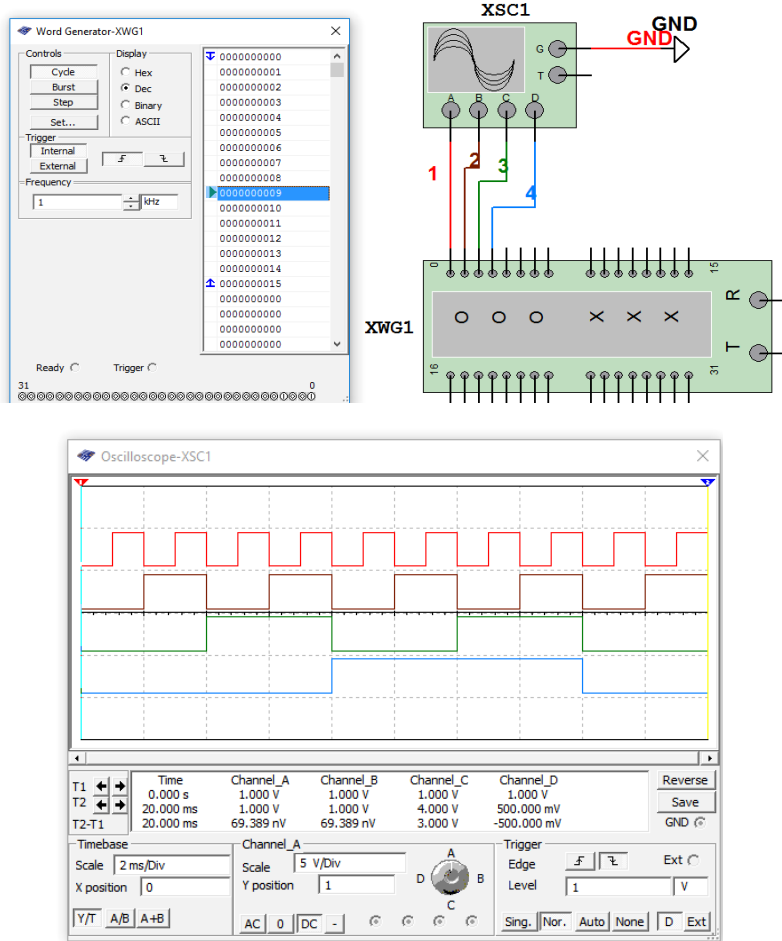


Рис. 2.42. Формування 4-розрядного двійкового зростаючого коду генератором слова в циклічному режимі

2.5.4. Аналізатор спектру

Аналізатор спектру призначений для вимірювання спектрів сигналів. Аналіз спектру відбувається з використання швидкого перетворення Фур'є' (ШПФ). На рис. 2.44 наведений зовнішній вигляд та органи керування аналізатором спектру.

Перед проведенням аналізу необхідно задати параметри спектрального аналізу:

- діапазон частот аналізу (Span);
- початкове і кінцеве значення частоти (Start та End);
- центральну частоту (Center);
- динамічний діапазон аналізу (Range), який задається як ціла поділкі по вертикалі у В/поділку або дБ/поділку;
- опорний рівень в дБ і розділову здатність аналізу (Resolution Freq.);
- кількість точок спектрального аналізу, максимальний рівень вхідного сигналу і джерело синхросигналу (внутрішнє або зовнішнє) задають, натиснувши кнопку Set.

Data:
00000000
00000001
00000002
00000003
00000004
00000005
00000006
00000007
00000008
00000009
0000000A
0000000B
0000000C
0000000D
0000000E
0000000F
Initial:
0000
Final:
000F

Рис. 2.43. Таблиця, що зберігається в файлі word.dp

Чим менше значення розділової здатності, тим точніше значення спектру. Розділова здатність аналізу також залежить від кількості усереднених реалізацій сигналу, яка задається після натискання кнопки Set у вікні (рис. 2.44).

Чим більша кількість усереднень, тим більша точність аналізу, однак і більший час для його проведення. Значення кількості усереднень може вибиратись в діапазоні від 1024 до 32768. Після вибору потрібної кількості усереднень потрібно натиснути кнопку Accept. Після цього можна проводити аналіз, натиснувши кнопку початку моделювання у Multisim.

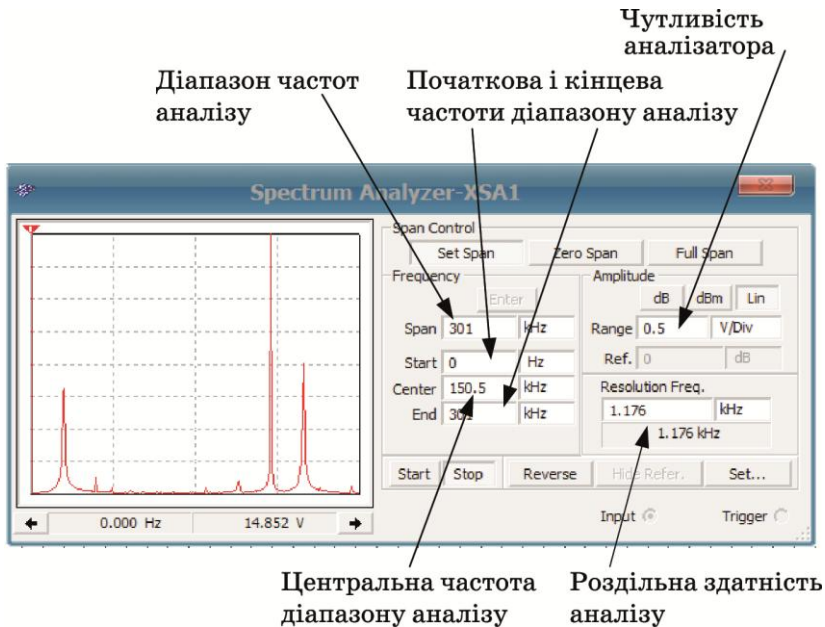


Рис. 2.44. Органи керування аналізатором спектру

Ілюстрацію роботи аналізатора спектру покажемо на прикладі аналізу спектра послідовності однополярних прямокутних імпульсів. Модель для дослідження спектру 2_spectr_imp.ms10 наведена на рис. 2.45 і складається всього з двох елементів – генератора прямокутних однополярних імпульсів V1 (CLOCK VOLTAGE) і резистора R1.

Для аналізу подаємо на вхід аналізатора спектру послідовність прямокутних імпульсів з амплітудою 5 В і частотою 1 кГц, тривалість яких складає 50% від тривалості періоду.

Аналіз отриманої спектрограми (рис. 2.45) показує, що в спектрі в заданому діапазоні аналізу від 0 Гц до 30 кГц присутній цілий ряд непарних гармонік. Парні гармоніки у спектрі відсутні, що видно в точці розташування курсору.

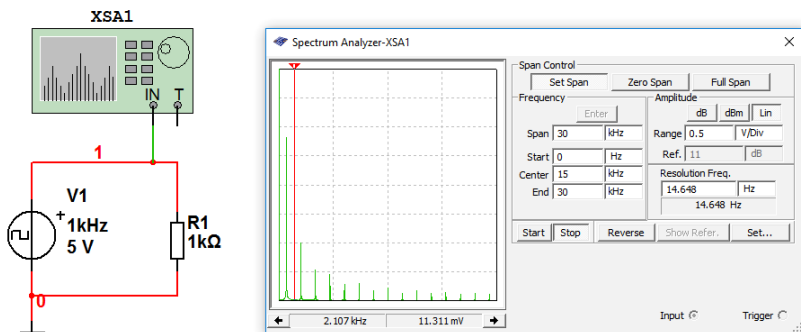


Рис. 2.45. Схема моделі та результати аналізу спектру послідовності прямокутних імпульсів з частотою слідування 1 кГц та коефіцієнтом заповнення 50%

2.5.5. Логічний аналізатор

Логічний аналізатор призначений для одночасного відображення на одному екрані до 16 процесів, що протікають в цифрових схемах. Щоб використати інструмент, потрібно натиснути на кнопку Logic Analyzer на панелі інструментів і перемістити іконку на робочій лист. Іконка використовується для підключення логічного аналізатора до схеми. Подвійне клацання по іконці відкриває панель інструмента, яка використовується для введення установок і перегляду результатів вимірювання.

Логічний аналізатор та призначення його входів наведені на рис. 2.46, а вікно настроювання та відображення результатів аналізу – на рис. 2.47.

У цьому вікні 16 кіл з лівого боку показують під'є'нані входи. Коли входи з'є'нані з вузлами схеми, кола відображаються з чорними крапками всередині, а поруч з ними відображаються імена вузлів, при цьому колір діаграми на даному вході збігається з кольором проводу на схемі, який під'є'наний до цього входу. Вільні входи кіл виводів відображаються без чорних крапок, а діаграми сигналів біля цих входів не відображаються (рис. 2.47).

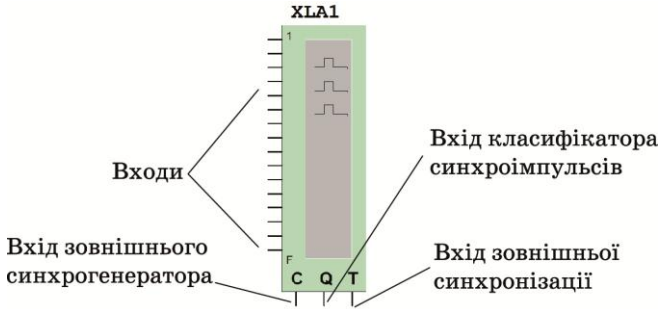


Рис. 2.46. Зовнішній вигляд іконки логічного аналізатора

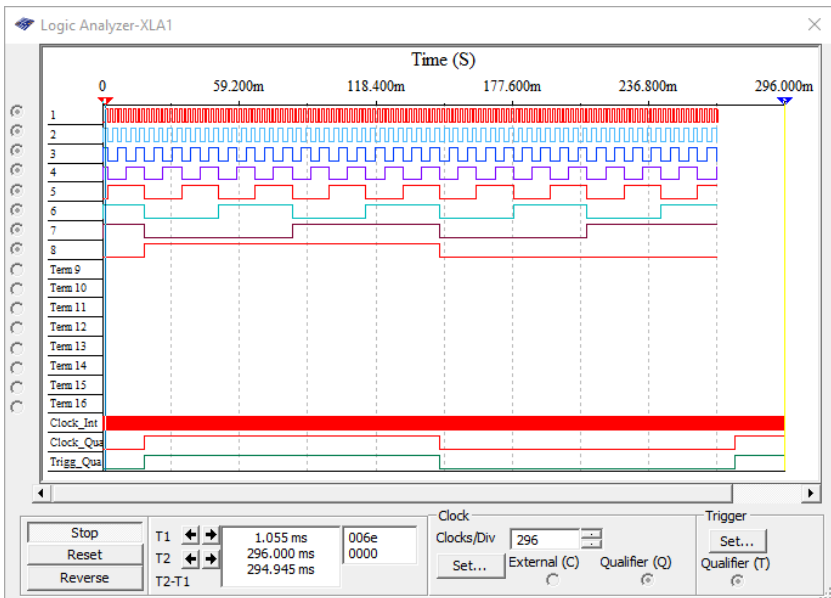


Рис. 2.47. Вікно налаштування та відображення результатів аналізу логічного аналізатора

В центральній частині панелі керування знаходиться вікно показань курсорів, в якому розташовано три поля:

- "Т«" »показання курсора T1);
- "Т«" »показання курсора T2);
- "Т«-T1" »часовий зсув між курсорами).

Кнопки стрілок дозволяють змінювати положення кур-

сорів. Часове положення сигналів можна виміряти в точках перетину курсорів T1 і T2, коли робота аналізатора зупинена. Також автоматично перший курсор T1 переміщується в точку моменту синхронізації, коли робота аналізатора зупиняється.

Коли схема активується, логічний аналізатор записує сигнали, що подаються на його входи, і відображає їх у вигляді часових діаграм. Сигнали відображаються як прямокутні імпульси. Верхня діаграма відображає сигнал каналу 1, наступна – каналу 2 та ін. У цьому ж вікні також відображається сигнал внутрішнього або зовнішнього тактового генератора, сигнал зовнішньої синхронізації і сигнал на вході класифікатора синхроімпульсів (рис. 2.46).

Логічний аналізатор збирає і виводить дані, доки не досягне кількості відліків, яка задається користувачем після натискання кнопки Set.

Після вмикання режиму симуляції логічний аналізатор автоматично починає проводити аналіз. Для перезапуску приладу потрібно натиснути кнопку Reset. Це призведе до очистки всієї інформації у вікні логічного аналізатора і початку нового циклу збору інформації.

Щоб відображати збережені дані без їх подальшої зміни, потрібно натиснути кнопку Stop. Щоб знову почати процес аналізу даних після зупинки аналізатора, потрібно натиснути кнопку Reset або знову запустити процес симуляції Multisim.

Для правильного відображення сигналів, що подаються на входи логічного аналізатора, потрібно враховувати принцип його роботи. Він полягає у тому, що з вхідного сигналу зчитуються відліки з частотою, яка задається користувачем. Сигнал цієї частоти у логічному аналізаторі має назву Clock rate (частота дискретизації) і задається від внутрішнього або зовнішнього генератора. Частота цього сигналу має перевищувати частоту найбільш високочастотного вхідного сигналу не менше ніж у 10 разів. Однак її потрібно вибирати набагато більшою для випадку, якщо потрібно досліджувати короткі імпульси. Приблизно частоту сигналу Clock rate можна розрахувати за такою формулою $f_{clk} \geq 1/t_{i.min}$, де $t_{i.min}$ – тривалість найкоротшого імпульсу.

Встановлення параметрів тактового генератора логі-

чного аналізатора.

Генератор сигналів Clock rate може бути внутрішнім або зовнішнім. Для настроювання установок тактового генератора потрібно виконати декілька простих операцій.

1. Натиснути кнопку Set в області Clock логічного аналізатора (рис. 2.47). При цьому з'явиться діалогове вікно Clock Setup (рис. 2.48).

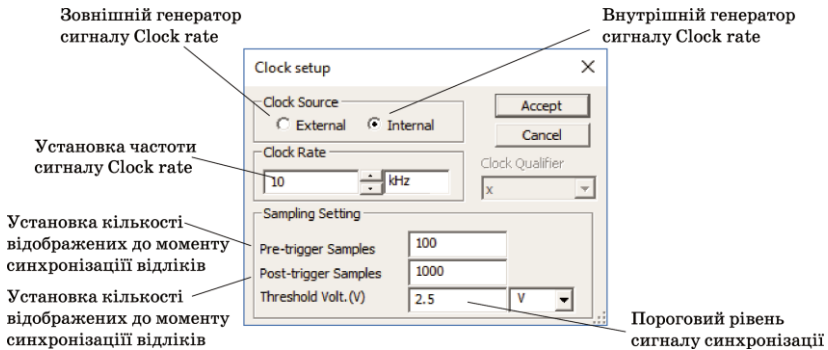


Рис. 2.48. Діалогове вікно Clock Setup

2. Вибрати режим роботи із зовнішнім або внутрішнім тактовим генератором.

3. Встановити частоту тактового генератора, яка має бути набагато більшою за частоту самого високочастотного сигналу на входах аналізатора. Краще вибирати значення цієї частоти у 10...100 разів більшим за частоту сигналу.

Класифікатор сигналу зовнішньої синхронізації (Clock Qualifier) дозволяє змінювати рівень спрацьовування від сигналу синхронізації. Якщо він встановлений в "X« (рис. 2.48), класифікатор вимкнений і не впливає на роботу аналізатора. Якщо він встановлений в "1« або "0«, то синхронізація буде відбуватися в той момент часу, коли рівень сигналу синхронізації збігається з заданим класифікатором сигналом.

4. Встановити кількість відліків, яку потрібно показувати до моменту синхронізації (Pre-trigger samples) і після нього (Post-trigger samples). Кількість відліків для відображення можна приблизно розрахувати, знаючи кількість періодів сигналу, які потрібно відображати у вікні аналізатора.

Розглянемо, як це зробити, на прикладі. Нехай потрібно відобразити дещо більше, ніж повний цикл зміни 8-розрядного коду, що відповідає 256 періодам сигналів. Додаємо ще 40 періодів і отримаємо загальну кількість 296, що вводимо у вікно Clocs/Div (рис. 2.47). Після цього натискаємо кнопку Set і у вікні Clock Setup (рис. 2.48) потрібно задати кількість Pre-trigger samples і Post-trigger samples. Для цього потрібно помножити кількість періодів сигналу на відношення частот сигналів Clock rate і найбільш високочастотного сигналу на вході аналізатора. Для розглянутого на рис. 2.47 прикладу це відношення складає 10 і тому кількість Post-trigger samples має бути встановлена рівною або більше, ніж 2560. Значення Pre-trigger samples потрібно встановити 40.

5. Для запам'ятовування встановлених параметрів клацнути по кнопці Ассерт.

Встановлення параметрів синхронізації

Логічний аналізатор може бути настроений або на перемикання по читанню заданого слова або комбінації слів, або фронту чи спаду сигналу синхронізації.

Для того, щоб задати до трьох слів, при яких відбувається синхронізація, або комбінації слів, необхідно виконати такі дії.

1. Клацнути по Set в області Trigger логічного аналізатора. Відкриється вікно Trigger Settings (рис. 2.49).

2. Вибрати Positive, Negative або Both для позитивного і негативного фронтів тактового сигналу.

3. Клацнути в області, яка позначена Pattern A, Pattern B або Pattern C, і ввести двійкове число. "X« означає або 1, або 0. Можливі комбінації сигналу синхронізації роботи аналізатора наведені на рис. 2.50.

4. З випадаючого списку Trigger Combination вибрати потрібну комбінацію.

5. З випадаючого списку Trigger Qualifier вибрати потрібний рівень сигналу синхронізації – 0 або 1.

6. Натиснути кнопку ОК.

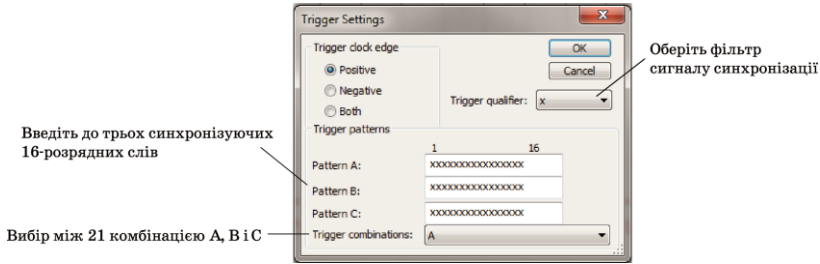


Рис. 2.49. Діалогове вікно *Trigger Settings*

A	B	C
A OR B	A OR C	B OR C
A OR B OR C	A ANDB	A AND C
A AND C	A AND B AND C	A NOT B
A NOT C	B NOT C	A THEN B
A THEN C	B THEN C	(A OR B) THEN C
A THEN (B OR C)	A THEN B THEN C	A THEN (B WITHOUT C)

Рис. 2.50. Можливі комбінації сигналу синхронізації роботи аналізатора

Приклад використання логічного аналізатора.

Проілюструємо роботу з логічним аналізатором на прикладі. Для аналізу сформуємо восьмирозрядний зростаючий код за допомогою генератора слова (рис. 2.51).

Для моделювання була задана частота вхідного сигналу 1 кГц, а тактова частота внутрішнього генератора аналізатора – 10 кГц. Для розглянутого прикладу кожному періоду вхідного сигналу відповідає 10 відліків (samples). З урахуванням цього у вікно Post-trigger sample необхідно ввести число не менше 2560 (у прикладі введене число 2660) для того, щоб на екран був виведений один повний цикл роботи генератора слова. Більш зручно розглядати процеси, коли на екран виводиться не один період, щоб бачити початок і закінчення процесу, а дещо більше. Для цього і введено число 2660 відліків.

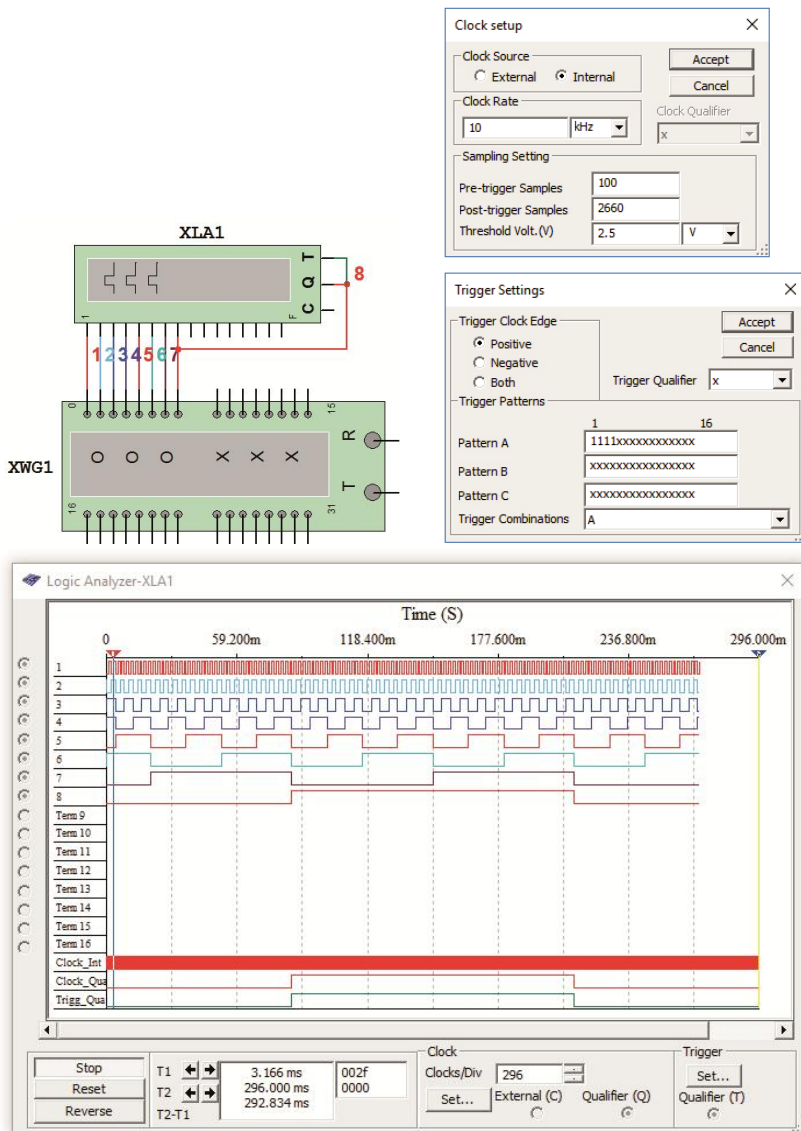


Рис. 2.51. Схема підключення, часові діаграми та установки параметрів логічного аналізатора

Масштаб по осі часу можна змінювати, задаючи число