

**В.В. Макаренко, В.М. Співак**



**NI Multisim**

**Цифрова та імпульсна  
схемотехніка  
Моделювання та аналіз**

**Навчальний посібник**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

В.В. Макаренко, В.М. Співак

Цифрова та імпульсна схемотехніка  
Моделювання та аналіз

Рекомендовано Вченою радою НТУУ "КПІ"  
як навчальний посібник для студентів, які навчаються  
за напрямом підготовки "Акустотехніка"

НТУУ "КПІ"

Київ

УДК 621.382.2 / 3. (075.8)  
ББК 32.844 1я73  
С92

Гриф "Рекомендовано Методичною радою НТУУ "КПІ"  
(протокол від 30 червня 2015 р. № 6)

Автори: В.В. Макаренко, В.М. Співак,

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. Г.М. Розорінов (Державний університет телекомунікацій);

к-т техн. наук, проф. М.Б. Гумен (Національний Авіаційний університет).

Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз. Електронний навчальний посібник / В.В. Макаренко, В.М. Співак, – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 314 с. іл.

У посібнику розглянуто широкий круг питань, пов'язаних з вивченням, проектуванням, аналізу, моделюванням та використанням елементів та вузлів цифрових та імпульсних пристроїв за допомогою програми NI Multisim.

Посібник призначений для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.382.2 / .3 (075.8)  
ББК 32.844 1я73

© В.В. Макаренко, В.М. Співак, 2015  
© В.І. Бойко, В.Я. Жуйков, В.М. Співак,  
А.А. Зорі, В.В. Багрій, О.В. Богдан,  
Т.О. Терещенко, 2010, зі змінами.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Програма моделювання ni multisim.....	10
1.1 Призначення програми NI Multisim .....	10
1.2 Початок роботи із програмою NI Multisim.....	13
1.3 Компоненти й прилади Multisim.....	15
1.4 Контрольні питання .....	24
2 Сигнали і методи їх дослідження .....	24
2.1 Загальні характеристики сигналів .....	24
2.2 Імпульсні сигнали.....	30
2.3 Основні характеристики змінних електричних сигналів .....	33
2.4 Вимірювання параметрів сигналів за допомогою програми NI Multisim .	36
2.4.1 Джерела сигналів у Multisim.....	36
2.4.2 Інструменти аналізу сигналів у Multisim.....	38
2.4.3 Налаштування параметрів аналізу.....	43
2.4.4 Приклад дослідження спектру сигналів .....	50
2.5 Основні правила роботи з вимірювальними пристроями .....	54
2.5.1 Осцилограф .....	54
2.5.2 Плоттер Боде.....	57
2.5.3 Генератор слів.....	61
2.5.4 Аналізатор спектру.....	67
2.5.5 Логічний аналізатор .....	69
2.6 Контрольні питання .....	77
3 Проходження імпульсних сигналів через RC-кола .....	78
3.1 Диференціюючі, розділові та інтегруючі RC-кола .....	78
3.2 Обмежувачі послідовного і паралельного типу на діодах .....	86
4 Транзисторні насичені ключі .....	92
4.1 Призначення транзисторних ключів .....	92
4.2 Лінійні моделі транзисторів в режимі великого сигналу.....	93

4.3 Розрахунки параметрів транзисторних ключів .....	97
4.4 Контрольні питання .....	104
5 Математичні основи побудови цифрових пристроїв .....	104
5.1 Системи числення .....	104
5.2 Коди та їх характеристика.....	109
5.3.1 Коди з паралельною формою представлення інформації.....	109
5.3.2 Коди з послідовною формою представлення інформації .....	113
5.3 Виконання арифметичних операцій у двійковій системі.....	115
5.4 Основи булевої алгебри.....	117
5.4.1 Основні визначення.....	117
5.4.2 Закони і тотожності алгебри логіки .....	120
5.4.3 Способи задання логічних функцій.....	122
5.5 Спрощення булевих функцій .....	126
5.5.1 Доцільність спрощення.....	126
5.5.2 Задачі мінімізації.....	127
5.5.3 Спрощення логічних функцій за допомогою карт мінтермів.....	128
5.5.4 Способи об'єднання мінтермів на картах Вейча або Карно .....	129
5.5.5 Позначення логічних елементів.....	130
5.6 Контрольні питання .....	135
6 Структури базових логічних елементів.....	136
6.1 Характеристики цифрових сигналів.....	136
6.2 Схеми найбільш поширених логічних елементів .....	139
6.3 Транзисторно-транзисторна логіка .....	144
6.3.1 Базовий елемент ТТЛ-логіки.....	144
6.3.2 Елемент з відкритим колектором .....	147
6.3.3 Схеми з трьома станами вихода.....	148
6.4 Логічні елементи на МДН-транзисторах.....	150
6.5 Логічні елементи інтегрально-інжекційної логіки .....	155
6.7 Контрольні питання .....	158
7 Комбінаційні схеми.....	159

7.1	Дешифратори .....	159
7.1.1	Загальні зауваження .....	159
7.1.2	Лінійні дешифратори .....	161
7.1.3	Прямокутні (матричні) дешифратори .....	162
7.1.4	Пірамідальні дешифратори .....	163
7.2	Шифратори.....	165
7.3	Мультиплексори і демюльтиплексори.....	166
7.3.1	Мультиплексори .....	166
7.3.1	Демюльтиплексори .....	169
7.4	Суматори кодів .....	170
7.5	Схеми порівняння кодів або цифрові компаратори.....	175
7.6	"Небезпечні змагання" у комбінаційних пристроях.....	178
7.7	Контрольні запитання .....	180
8	Тригерні елементи .....	181
8.1	Призначення та класифікація тригерів .....	181
8.2	Асинхронні та синхронні RS-тригери.....	183
8.2.1	Асинхронний RS-тригер .....	183
8.2.2	Асинхронний RS-тригер з інверсними входами .....	185
8.2.3	Синхронний RS-тригер.....	186
8.3	Тригери T-типу .....	188
8.4	Тригери D-типу.....	189
8.5	Тригери JK-типу .....	190
8.6	Універсальні RSD- та RSJK-тригери.....	192
8.7	Приклади використання тригерів .....	193
8.8	Контрольні запитання .....	200
9	Регістри.....	201
9.1	Загальні зауваження .....	201
9.2	Паралельні регістри на D-тригерах .....	202
9.3	Послідовні регістри.....	204
9.4	Паралельно-послідовні і послідовно-паралельні регістри.....	206

9.5	Послідовні регістри зі зворотними зв'язками.....	208
9.6	Приклади використання регістрів .....	209
9.6.1	Робота декількох регістрів на загальну шину .....	209
9.6.2	Формувач квазігармонічного сигналу.....	210
9.6.3	Перетворювач паралельного коду в послідовний.....	211
9.6.3	Перетворювач послідовного коду в паралельний.....	213
9.7	Контрольні запитання .....	214
10	Лічильники імпульсів .....	214
10.1	Призначення та класифікація лічильників імпульсів.....	214
10.2	Двійкові лічильники.....	216
10.3	Реверсивні лічильники.....	219
10.4	Синхронні двійкові лічильники .....	220
10.5	Недвійкові лічильники.....	221
10.5.1	Загальні зауваження .....	221
10.5.2	Синтез лічильника з заданим коефіцієнтом ділення .....	222
10.5.3	Побудова недвійкового лічильника з використанням готового лічильника .....	226
10.5.4	Використання програмованих лічильників для побудови лічильників з довільним коефіцієнтом ділення .....	229
10.5.5	Побудова недвійкових лічильників за допомогою дешифраторів .....	234
10.6	Лічильники на регістрах зсуву.....	235
10.7	Застосування регістрів і лічильників для побудови схем затримки імпульсних сигналів .....	237
10.8	Контрольні запитання.....	238
11	Генератори імпульсів .....	239
11.1	Загальні зауваження .....	239
11.2	Чекаючі мультивібратори, або одновібратори.....	241
11.2.1	Одновібратор на RS-тригері.....	241
11.2.2	Одновібратор на RS-тригері з інверсними входами.....	244
11.2.3	Одновібратор не чутливий до тривалості вхідного імпульсу.....	246

11.2.4	Одновібратори на логічних елементах .....	247
11.2.5	Одновібратори в інтегральному виконанні .....	248
11.3	Мультивібратори .....	249
11.3.1	Мультивібратори на RS-тригерах.....	249
11.3.2	Мультивібратори на логічних елементах .....	251
11.3.3	Мультивібратори на основі інтегральних одновібраторів.....	257
11.3.4	Мультивібратори на основі інтегрального таймеру NE555.....	258
12	Запам'ятовуючі пристрої .....	264
12.1	Оперативні запам'ятовуючі пристрої .....	264
12.2	Мікросхеми масочних ПЗП.....	271
12.3	Мікросхеми програмуємих ПЗП.....	273
12.4	Мікросхеми репрограмовані ПЗП .....	279
13	застосування цифрових інтегральних мікросхем .....	286
13.1	Завади та завадостійкість цифрових пристроїв.....	286
13.2	Рекомендації з монтажу інтегральних мікросхем.....	296
13.3.	Контрольні запитання .....	310
	Список рекомендованої літератури.....	311



## ВСТУП

Значний прогрес у розвитку багатьох областей науки й техніки обумовлений розвитком електроніки. Сьогодні неможливе знайти галузь промисловості, у якій не використовувалися б електронні прилади або електронне обладнання вимірювальної техніки, автоматики й обчислювальної техніки. Причому тенденція розвитку така, що частка електронних інформаційних та автоматичних пристроїв безупинно збільшується. Це є результатом розвитку інтегральної технології, впровадження якої дозволило налагодити масовий випуск дешевих, високоякісних мікроелектронних функціональних вузлів різного призначення.

На сьогоднішній день промисловість випускає велику кількість електронних функціональних вузлів, необхідних для створення пристроїв автоматики, вимірювальної й обчислювальної техніки, перетворювачів інформації та ін.: інтегральні підсилювачі, комутатори, логічні елементи, лічильники, регістри, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, формувачі і т.д. Типові електронні вузли дозволяють зібрати потрібний електронний блок без детального розрахунку його окремих складових частин.

Необхідно тільки вірно підібрати інтегральні мікросхеми, розробити схему їх з'єднання й увести зворотні зв'язки необхідного виду. Але для цього потрібно розуміти не тільки принципи функціонування окремих елементів, а і принципи побудови складних пристроїв та систем, у яких взаємодіє велика кількість елементів. До того ж велика кількість пристроїв та систем містить як аналогові, так і цифрові компоненти, що потребує узгодження їх параметрів.

Дисципліна "Цифрова схемотехніка" являється базовою дисципліною і забезпечує вивчення схемотехніки цифрових пристроїв та їх використання в різних модулях електронних систем. Дисципліна спрямована на вивчення фізичних основ перетворення аналогових сигналів в цифрову форму і обробки цифрових сигналів на основі методів і засобів дискретної математики, а також пристроїв, що реалізують ці задачі.

Для проектування навіть нескладних електронних пристроїв необхідне розуміння процесів, що відбуваються як в окремих його частинах, так і в пристрої в цілому. Зважаючи на те, що більшість студентів не можуть перевірити

роботу електронних пристроїв на фізичних макетах, то для засвоєння принципів роботи основних цифрових, аналогових та аналого-цифрових пристроїв доцільно провести моделювання їх роботи за допомогою програми-симулятора.

Найбільш зручною з погляду інтерфейсу користувача є програма схемотехнічного моделювання NI Multisim. Вона дозволяє студентам закріпити матеріал, який вивчається в рамках курсу, одержати навички роботи з вимірювальною апаратурою різного призначення (хоча й віртуальною) і засвоїти методику організації й проведення експериментів відповідно до поставленого завдання.

Спеціально для компанії Analog Devices компанією National Instruments була розроблена безкоштовна версія програми, у якій трохи обмежене число компонентів у базі користувача й встановлені тверді обмеження на число компонентів, які можуть бути використані для створення схеми, не більш ніж 25.

Як показує практика такого числа елементів на схемі досить для того щоб створити кожний із пристроїв, які вивчаються в базових курсах схемотехніки.

Цим і пояснюється структура навчального посібника. Спочатку знайомство з основами роботи в програмі схемотехнічного моделювання, а потім розгляд основних розділів дисципліни "Цифрова схемотехніка" з ілюстрацією основних положень за допомогою моделей, що можуть бути легко повторені навіть малокваліфікованим користувачем.

В результаті вивчення курсу "Цифрова схемотехніка" студент повинен знати: принципи побудови та функціонування цифрових та аналого-цифрових пристроїв; принципи вибору методів аналізу та розрахунку електронних пристроїв з заданими характеристиками, а також вміти: розрахувати електронні кола; узагальнити вплив характеристик окремих вузлів електронних пристроїв на їх параметри; виконати синтез різноманітних електронних пристроїв та провести їх моделювання.

## 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 доцільно застосовувати при проектуванні програми математичного моделювання, які не тільки дозволяють знизити строки й вартість розробки, але й надають розроблювачеві 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 і інші [1].

Найбільш зручними для моделювання є два пакети програм – Orcad і 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 шести тисяч доларів. На сьогоднішній день вже випущена версія програми 3.01.

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

У повну версію пакета 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 й моделювання мікропроцесорних систем). Крім того, знімаються багато обмежень, які введені в безкоштовній версії (наприклад, на число елементів схеми, яке в безкоштовній версії не повинне перевищувати 25).

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

- моделювати аналогові схеми, використовуючи більш 800 бібліотечних елементів – операційних підсилювачів, ключів, комутаторів і ін.;
- досліджувати схеми із числом елементів не перевищуючим 25;
- використовувати для аналізу вбудовані інструменти й алгоритми, включаючи аналіз найгіршого випадку (, що передбачає аналіз самого несприятливого варіанта умов);
- можливість заміни компонентів і зміни їх параметрів, для детального вивчення властивостей схеми;
- здійснювати online зв'язок з Analog Devices Design Center для одержання додаткових інструментів аналізу;
- негайно одержати 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 із кращих інструментів для розрахунків лінійних і нелінійних електричних кіл і розробки друкованих плат. Серед користувачів програми такі відомі корпорації, як Sony, Boeing, а також передові академічні установи, такі як Масачусетський технологічний інститут. В 2005 г компанія Electronics Workbench була придбана американською корпорацією National Instruments з метою розвитку більш тісному зв'язку між вимірювальним устаткуванням, що використовується при створенні електронних пристроїв, і програмами, призначеними для розрахунків електричних кіл. Угода відбулася після того як кілька років National Instruments співро-

бітничала з Electronics Workbench для інтеграції програми Multisim у графічне середовище "віртуальних приладів" NI Labview. Незважаючи на укладений контракт, компанія Electronics Workbench залишається незалежним підрозділом у складі National Instruments і в найближчі кілька років буде незалежно поширювати програми через власну дистриб'юторську мережу.

Основні достоїнства 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 під конкретне завдання. Приклади схем, пропоновані компаніями National Instruments і Analog Devices, можна знайти в [2].
4. Широкий вибір віртуальних вимірювальних приладів, що дозволяють виконати будь-яке вимірювання (і не тільки електричний вимір). Робота із цими вимірювальними приладами максимально наближена до роботи з реальними приладами. Підключивши віртуальний прилад до будь-якої точки схеми можна одержати вичерпну інформацію про процеси в даному вузлі.
5. Простий по інтерфейсу набір моделюючих засобів, що дозволяє крім традиційного моделювання електронної схеми по постійному й змінному струму, провести моделювання спектральних, нелінійних, амплітудно-частотних, фазо-частотних характеристик, вплив температури на окремі компоненти й на схему в цілому, можливість зміни будь-яких параметрів компонентів, 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, одержання твердої копії

як електричної схеми, так і параметрів моделювання, інформації з екрана вимірювальної апаратури, добре оформлених графічних результатів дослідження.

8. Низькі вимоги до швидкодії комп'ютера. Можлива робота починаючи з 386 моделі процесора.
9. Не вимагає знань по програмуванню. Потрібно лише знайомство із середовищем Windows. Інтуїтивний інтерфейс дозволяє швидко навіть непідготовленому користувачеві (буквально за півгодини) познайомитися з основами й приступитися безпосередньо до електронних досліджень.
10. Ретельно підготовлений довідковий матеріал (Help), забезпечує контекстну допомогу як по меню, компонентам, опціям моделювання, так і по загальних питаннях моделювання.

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

## **1.2 Початок роботи із програмою NI Multisim**

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

Відкриється вікно, у якому є чотири закладки. В Parts вибираються:

- спосіб відображення елементів схеми – у стандарті DIN або ANSI;
- спосіб вводу елементів схеми;

одиначний елемент;

вводу всіх частин елемента (наприклад, ІС у якій містяться чотири ОУ);

вводу елементів необмежене число раз при натисканні лівої кнопки "миші";

- аналіз схеми з використанням ідеальних або реальних моделей елементів.

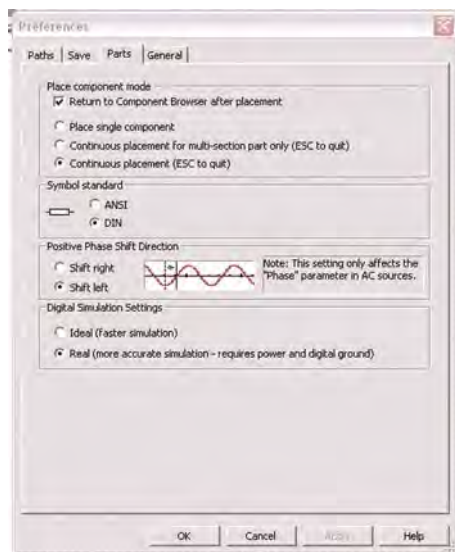


Рис. 1.1. Вікно установки основних параметрів програми

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

Додатково встановлюються параметри для робочого аркуша програми через меню Options/Sheet Properties (рис. 1.2). Тут можна задати колір фону й колір елементів. Доступно 5 варіантів установки параметрів: білий або чорний фон й колір елементів і ліній за замовчуванням, чорний фон й білі елементи й лінії, білий фон й чорні елементи й лінії. У режимі Custom користувач може задати колір усіх елементів і фону самостійно (рис. 1.3). В Sheet Properties задаються товщина ліній, режим відображення сітки, вибирається розмір і тип шрифту, розмір і орієнтація робочого аркуша й ще цілий ряд параметрів. Докладно з пунктами меню і їх призначенням або за допомогою підказки програми (англ. мовою).

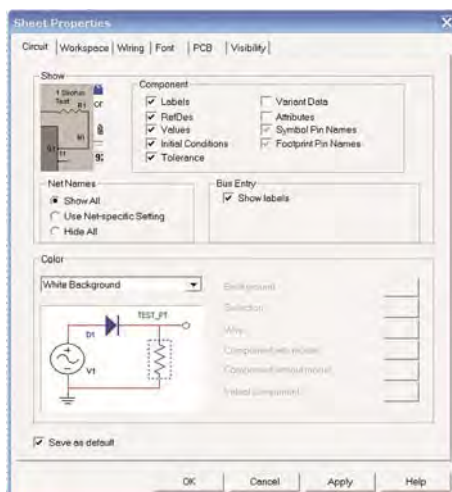


Рис. 1.2. Вікно установки параметрів робочого аркуша

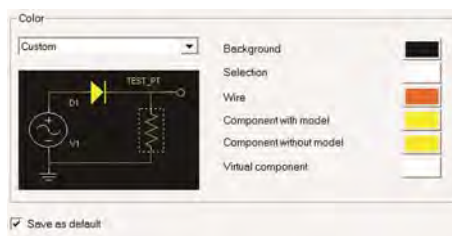


Рис. 1.3. Установка кольору елементів робочого аркуша

Настроїти вид робочого вікна й панелі інструментів легко. Для цього досить помістити курсор "миші" в область аркуша з панелями інструментів і натиснути праву клавішу "миші". У контекстному меню, що відкрився, необхідно поставити пташки біля тих панелей інструментів, які бажано відображати.

### 1.3 Компоненти й прилади Multisim

Після установки параметрів програми й робочого аркуша можна приступати до малювання принципової схеми.

Для цього спочатку розміщують елементи схеми на робочому аркуші. 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 про-



грами (рис. 1.5). Користувачеві 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 і ін.).



Рис. 1.4. Фрагмент робочого вікна програми з бібліотеками елементів

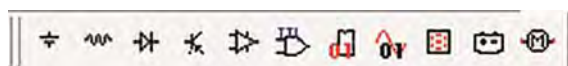


Рис. 1.5. Панель компонентів

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

Табл. 1.1. Елементи бібліотек джерел потужності й генераторів сигналів

POWER_SOURCES							SIGNAL_SOURCES	
DC_Power	DGND	Ground	VCC	VDD	VEE	VSS	Clock_Voltage	AC_Voltage
Джерело постійної напруги	Цифровий загальний	Загальний	Джерело +U <sub>ж</sub> для ІМС ТТЛ	Джерело +U <sub>ж</sub> для ІМС КМОП	Джерело -U <sub>ж</sub>	Джерело живлення КМОП	Генератор імпульсів позитивної полярності	Генератор змінної напруги

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, дрововий, композитний, для поверхневого монтажу (різного типу) і ін. Точність резистора (відхилення від номінального значення) вибирається у вікні Tolerance (%) з ряду 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1 і 2.

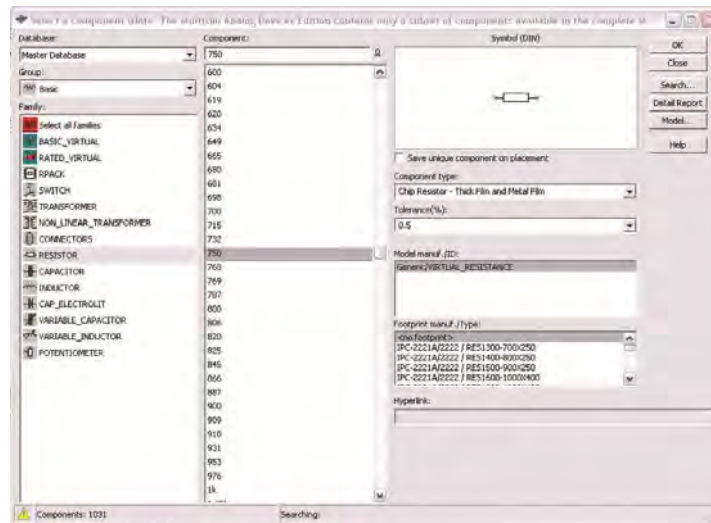


Рис. 1.6. Вікно вибору пасивних компонентів

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

Розглянемо на прикладі фільтра нижніх частот 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 загасання в смузі непропускання  $a_s \geq 30$  дБ, частота зрізу фільтра  $f_c = 3400$  Гц, частота гарантованого загасання  $9000$  Гц. При розрахунках отриманий порядок фільтра  $n = 3$  для апроксимації по Чебишеву й  $n = 5$ , для апроксимації по Баттерворту. Вибираємо апроксимацію по Чебишеву.

Схема реалізується послідовним з'єднанням кола першого порядку з добротністю 0,5, під'єднаної через повторювач напруги, і другого порядку реалізованої за схемою Саллен-Кі, що реалізує добротність полюса, рівну 2,02. Розрахована програмою Filter Wiz Pro, АЧХ фільтра наведена на рис. 1.7, а значення опорів резисторів і ємностей конденсаторів наведені на принциповій схемі (рис. 1.8). Колір провідників і компонентів на схемі залишені встановленими в програмі за замовчуванням. Слід зауважити, що набір резисторів, пропонує меню програми, відповідає ряду E96 і на схемі були розміщені компоненти відповідні до цього ряду, хоча розрахункові значення резисторів становлять:  $R1 = 94,72 \text{ кОм}$ ,  $R2 = R3 = 99,89 \text{ кОм}$ .

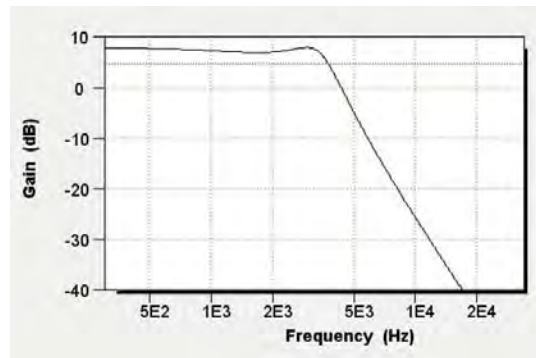


Рис. 1.7. Розрахована АЧХ фільтра нижніх частот

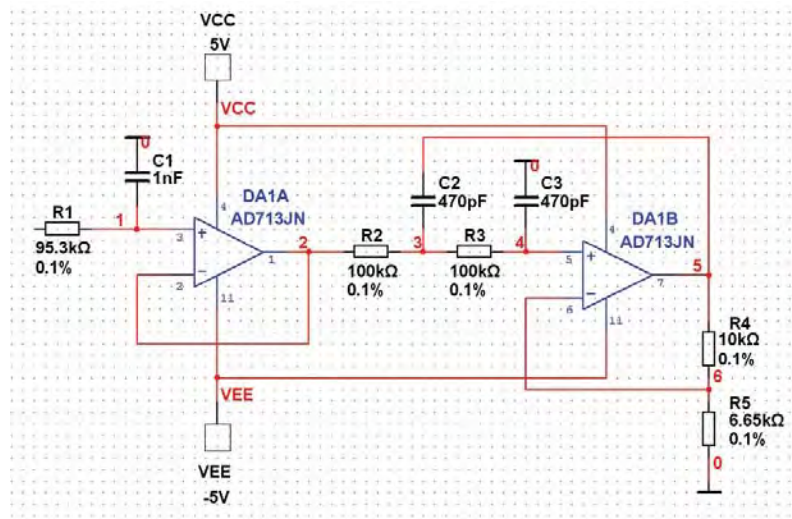


Рис. 1.8. Принципова схема ФНЧ

При необхідності можна ввести резистори необхідного номіналу вручну.

Для реалізації фільтра буде потрібно використати два операційні підсилювачі зі смугою одиничного посилення (GBW – Guaranteed Bandwidth) не менш 1 МГц. Вибираємо зчетверений ОП типу AD713, частота одиничного посилення якого дорівнює 3 МГц.

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

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

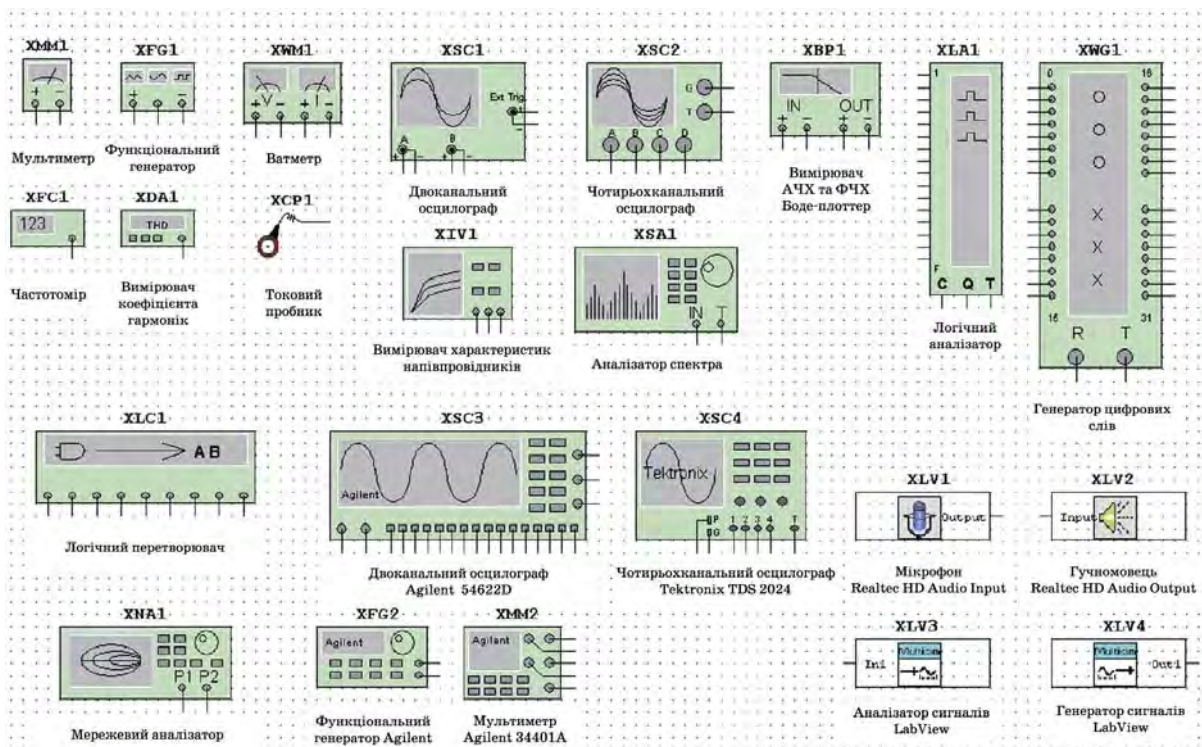


Рис. 1.9. Віртуальні вимірювальні прилади програми Multisim

Кожний з віртуальних приладів має безліч параметрів, з якими ми будемо

знайомитися в міру необхідності. Для аналізу схеми обмежимося поки трьома приладами:

- функціональним генератором у якості джерела вхідного сигналу;
- двоканальним осцилографом для аналізу форми сигналу на вході й виході фільтра;
- графопобудовником АЧХ і ФЧХ (Vode Plotter).

Для розміщення приладу досить клацнути лівою кнопкою "миші" на піктограмі приладу, розміщеної з правої сторони робочого вікна програми, і перетягнути зображення в потрібне місце робочого аркуша.

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

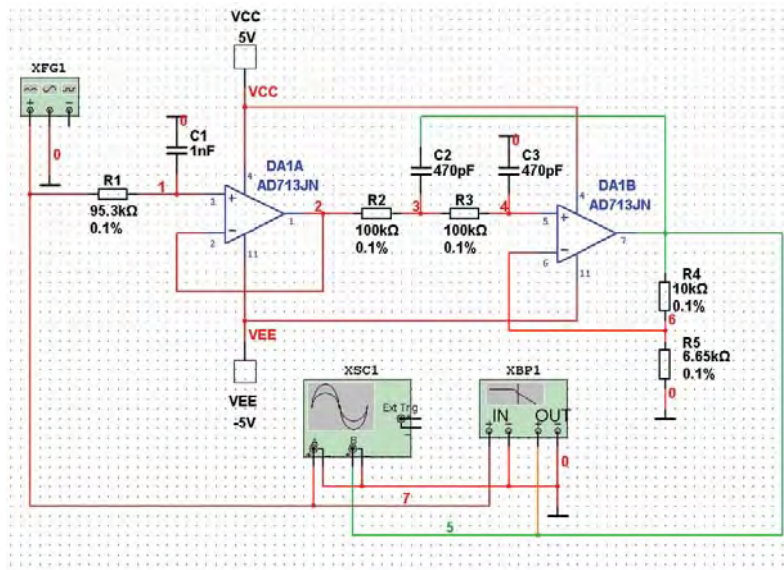


Рис. 1.10. Схема ФНЧ з підключеними вимірювальними приладами

Після цього можна задати параметри іспитового сигналу. Для цього необхідно клацнути на зображенні приладу лівої кнопки "миші". У вікні, що відкрилося, встановлюємо параметри сигналу на виході функціонального генератора (рис. 1.11). Можна вибрати форму сигналу: синус, трикутник, прямокутник.

Частота сигналу задається в рядку Frequency у діапазоні від 1 фГц до 103 ТГц. Амплітуда в діапазоні від 1 фВ до 103 ТВ. Напряга зсуву задається в тому ж діапазоні. За замовчуванням на виході генератора формується двополярна напруга. Наприклад, задана амплітуда 10 В для гармонічного сигналу. На виході генератора будуть сформований сигнал з позитивною і негативною амплітудами 10 В. Якщо потрібно сформувати однополярний сигнал (наприклад, прямокутні імпульси амплітудою 5 В), потрібно задати амплітуду сигналу рівну половині необхідної (для прикладу 2,5 В) і задати позитивний зсув напруги рівний +2,5 В.

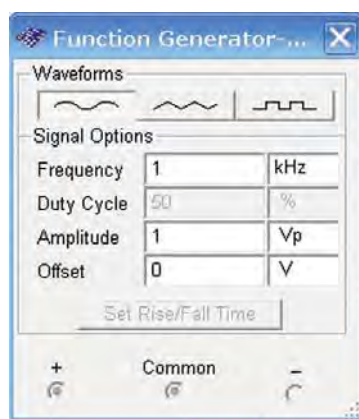


Рис. 1.11. Установка параметрів вхідного сигналу

Після цього приступаємо до аналізу роботи схеми. Для цього досить 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/діл, а каналу В – 2 В/діл. Форма сигналу на вході й виході ФНЧ показана на рис. 1.12. Для рознесення сигналів на екрані осцилографа по вертикалі вводимо зсув Y position у каналі А рівний +1.6 В, а в каналі В – -1.4 В.

Після цього можна здійснити перевірку АЧХ і ФЧХ спроектованого філь-

тра за допомогою Bode Plotter. Отримана в результаті моделювання АЧХ наведена на рис. 1.3., а ФЧХ – на рис. 1.14. Крім того, можна зберегти файл із результатами виміру АЧХ і ФЧХ. Файл із розширенням .bod являє собою текстовий файл, фрагмент якого показаний на рис. 1.15. Аналіз результатів показав, що максимальна нерівномірність АЧХ у смузі пропускання небагато менше 1 дБ, що цілком задовольняє поставленим умовам.

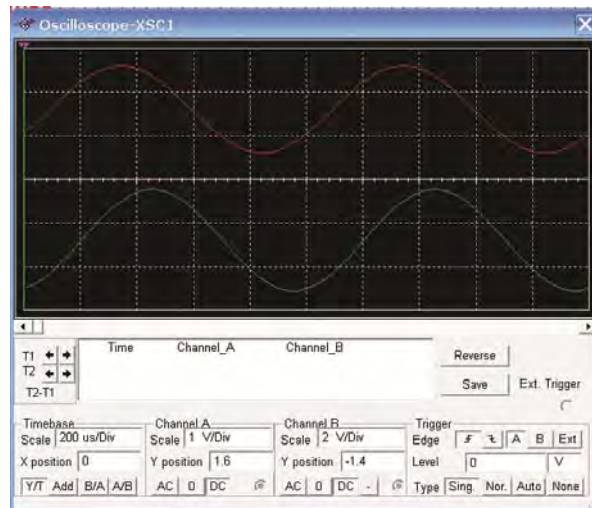


Рис. 1.12. Форма сигналу на вході (червоний) і виході (зелений) ФНЧ

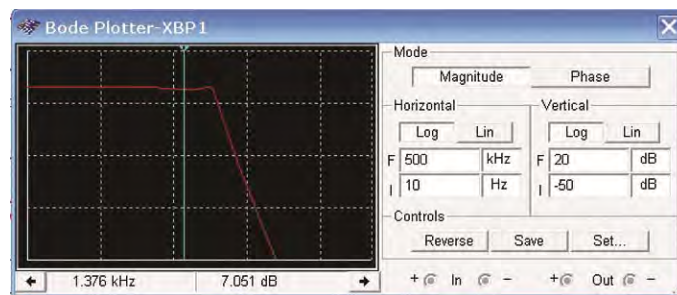


Рис. 1.13. Форма АЧХ змодельованого ФНЧ

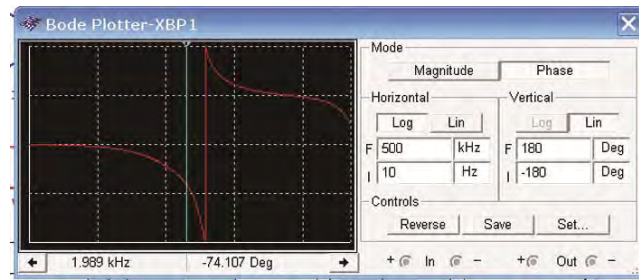


Рис. 1.14. Форма ФЧХ змодельованого ФНЧ

```

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
-----
  1.00000e+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

З безкоштовною версією програми поставляється один приклад (Getting Started), що складається із трьох різних файлів: аркуш із розміщеними компонентами (Getting Started 1), компоненти, з'єднані 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 освоїти роботу із програмою.



## **1.4 Контрольні питання**

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

## **2 СИГНАЛИ І МЕТОДИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **2.1 Загальні характеристики сигналів**

Форма й способи перетворення електричних сигналів нерозривно пов'язані із принципами побудови електронних пристроїв автоматики й управління й у великому ступені визначають їхні характеристики й особливості.

Електричні сигнали в електронних пристроях по своїй фізичній суті можна розділити аналогові й дискретні. Аналогові сигнали являють собою безперервні в часі функції напруги або току й, у свою чергу, діляться на постійні й змінні.

Постійні аналогові сигнали являють собою однополярні сигнали напруги або струму що повільно змінюються у часі.

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

Дискретними називаються такі електричні сигнали, які являють собою розривні в часі функції напруги або струму й можуть мати обмежене число рівнів. Найбільш часто в електроніці використовуються дискретні сигнали, які