

Ю.О. Мягченко, Ю.М. Дулич, А.В.Хачатрян

**ВИВЧЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ
МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

для студентів фізичного факультету

УДК 681.518.3:621.3.049.77:681.325.5
ББК 32.85 : 32.97

Рецензенти:

канд. фіз.-мат. наук, ст. викладач В.П. Михайленко

канд. фіз.-мат. наук, асистент В.М. Прокопець

*Затверджено вченою радою фізичного факультету
(протокол №5 від 30 січня 2006 року)*

Ю.О. Мягченко, Ю.М. Дулич, А.В.Хачатрян

“Вивчення радіоелектронних схем методом комп’ютерного моделювання” :

Методичне видання. – К.:

2006.- с.

ISBN 966-594-501-7

Розглянуті приклади комп’ютерного моделювання радіоелектронних схем, аналізу та синтезу сигналів.

УДК 681.518.3:621.3.049.77:681.325.5
ББК 32.85 : 32.97

© М’ягченко Ю.О., Дулич Ю.М., Хачатрян А.В., 2006

ISBN 966-594-501-7

ПЕРЕДМОВА

Автори методичного видання “Вивчення радіоелектронних схем методом комп’ютерного моделювання” вважають насамперед доцільним використовувати його як доповнюючу складову методичних вказівок до практикуму з “Основ радіоелектроніки”, які (в електронному варіанті) вже багато років успішно використовуються під час виконання лабораторних робіт студентами 2 курсу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. В такому разі краще було б (з методичної точки зору) керуючись матеріалами видання здійснювати попередню перевірку рівня підготовки студентів до виконання лабораторної роботи шляхом побудови ними комп’ютерної моделі радіоелектронної схеми, яка потім буде реалізована і досліджена ними безпосередньо на макеті за допомогою конкретних приладів (блока живлення, осцилографа, генераторів).

Також (дещо модифікуючи варіанти комп’ютерних моделей) можливе використання матеріалів цього видання для проведення поточної перевірки рівня знань студентів шляхом тестування, що цілком відповідає тенденціям в розвитку освітніх процесів.

Ще один перспективний напрямок застосування пропонованого видання - це проведення лекційного експерименту за допомогою сучасних комп’ютерних технологій.

Початкова інформація про пакет Work Bench 5.12.

Моделювання радіоелектронних схем, що представлені в цьому методичному виданні, здійснюється за допомогою пакету **Work Bench 5.12** із доповненою вітчизняною елементною базою. Даний пакет дуже простий у засвоєнні та роботі, має здатність досить точно моделювати дію електричних схем, чудовий для швидкої та якісної перевірки схем на дієздатність. Після запуску пакету та повідомлення „Could not open file” відповідаємо „Ok”, ми бачимо робоче вікно програми (рис.1)

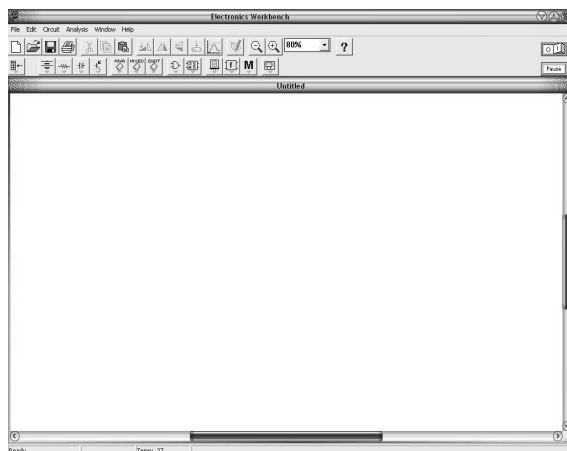


Рис.1 Робоче вікно програми

Тепер детальніше розглянемо всі необхідні нам меню програми.

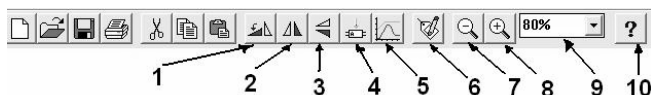


Рис.2. Меню схеми

перші сім кнопок часто зустрічаються у будь-яких програмах і тому всім відомі, ми не будемо їх перераховувати. Інші 10 кнопок ми перерахуємо:

1. повернути елемент,
2. дзеркально відобразити по вертикалі елемент,
3. дзеркально відобразити по горизонталі елемент,
4. створити підсхему,
5. графіки,
6. властивості елемента,
- 7, 8, 9 зміна масштабу,

10. варіанти опису схеми.

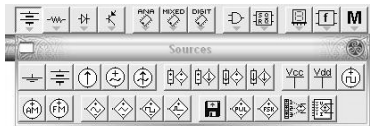


Рис.3. Меню „ **Sources** ”

В цьому меню знаходяться: “заземлення”, а також джерела живлення,
(зліва направо, зверху вниз):

батарея, джерело постійного струму (**DC Current Source**);

джерело змінної напруги (**AC Voltage Source**);

джерело змінного струму (**AC Current Source**);

керовані напругою джерела:

напруги (**Voltage-Controlled Voltage Source**) та струму (**Voltage-Controlled Current Source**);

керовані струмом джерела:

напруги (**Current Controlled Voltage Source**) та струму (**Current Controlled Current Source**);

Vcc джерело (джерело певної напруги “+5В”);

Vdd джерело (джерело певної напруги “+15В”);

Clock (генератор прямокутних імпульсів, в якому можна регулювати амплітуду, частоту та тривалість імпульсів, а також використовувати як джерело синхроімпульсів);

AM source (Amplitude Modulation source – джерело амплітудно-модульованих коливань);

FM source (Frequency Modulation source - джерело частотно-модульованих коливань);

керовані напругою генератори:

синусоїдних сигналів (**Voltage-Controlled Sine Wave Oscillator**);

трикутних імпульсів (**Voltage-Controlled Triangle Wave Oscillator**);

прямокутних імпульсів (**Voltage-Controlled Square Wave Oscillator**);

керований одновібратор (**Controlled One-Shot**) - універсальний генератор імпульсів із різними формами імпульсів та різними способами запуску цього генератора;

джерело сигналів, форма яких може бути задана як послідовність точок, з’єднаних прямими лініями (**Piecewise Linear Source**);

кероване напругою джерело сигналів (**Voltage-Controlled Piecewise Linear Source**), форму яких задають парами величин напруг вхідного та вихідного сигналів (максимальна кількість пар - п’ять), наприклад, для перетворення трикутного вхідного сигналу у параболічний вихідний сигнал;

джерело напруги, що має три входи, керовані напругою (**Polynomial Source**), а вихідна напруга є поліномом (максимально третього ступеня) від

вхідних сигналів;

джерело напруги, що має чотири входи, керовані напругою та два входи, керовані струмом (**Nonlinear Dependent Source**), при цьому вхідні сигнали можна задавати, як математичні функції, а вихідний сигнал є суперпозицією вхідних сигналів.

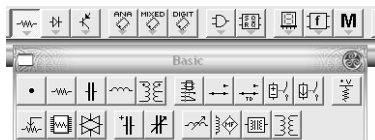


Рис.4. Меню „**Basic**”

В цьому меню знаходяться: роз'єм (**Connector**), резистор (**Resistor**), конденсатор (**Capacitor**), котушка індуктивності (**Inductor**), трансформатор (**Transformer**), реле (**Relay**), перемикач (**Switch**), перемикач із затримкою спрацьовування (**Time-Delay Switch**), перемикач, керований напругою (**Voltage-Controlled Switch**), перемикач, керований струмом (**Current-Controlled Switch**), навантажувальний резистор (**Pull-up Resistor**), потенціометр (**Potentiometer**), блок із 8 резисторів (**Resistor Pack**), керований напругою аналоговий перемикач (**Voltage-Controlled Analog Switch**), полярний (електролітичний) конденсатор (**Polarized Capacitor**), змінний конденсатор (**Variable Capacitor**), котушка змінної індуктивності (**Variable Inductor**), котушка індуктивності без осердя (**Coreless Coil**), магнітне осердя (**Magnetic Core**), нелінійний трансформатор (**Nonlinear Transformer**).



Рис.5. Меню „**Diodes**”

В цьому меню знаходяться: діод (**Diode**), стабілітрон (**Zener Diode**), світлодіод (**LED - light-emitting diode**), мостовий випрямлювач (**Full Wave Bridge Rectifier**), кремнієвий керований випрямлювач (тіристор) (**Silicon Controlled Rectifier**), діністор (**Shockley Diode**), двосторонній тіристорний перемикач (сімістор) (**Triac**).



Рис.6. Меню „**Transistors**”

В цьому меню знаходяться: біполярні транзистори, польові каналні транзистори (**JFETs (Junction Field-Effect Transistors)**), польові транзистори із ізолюваним затвором (**MOSFETs (metal-oxide-semiconductor field-effect transistors)**), а також надвисокочастотні польові транзистори виготовлені із арсеніда галія (**GaAsFET**).



Рис.7. Меню „**Analog ICs**”

В цьому меню знаходяться: варіанти операційних підсилювачів з 3, 5, 7 або 9 виводами, наприклад, **3-Terminal Op-Amp**, (чим більша кількість виводів, тим більшу кількість характеристик операційного підсилювача можливо залучати до процесу моделювання); компаратор (**Comparator**); система фазової автоматичної підстройки частоти (**Phase-Locked Loop**).



Рис.8. Меню „**Indicators**”

В цьому меню знаходяться: вольтметр (**Voltmeter**), амперметр (**Ammeter**), лампочка розжарювання (**Bulb**), лампочка перестає світитися, якщо напруга, прикладена до лампочки, або споживана нею потужність, перевищать максимальні величини, характерні для певного типу лампочки).



Рис.9. Меню „**Instruments**”

В цьому меню знаходиться: мультиметр (**Multimeter**, використовують для вимірювання напруги змінного чи постійного струму, струму, опору або втрат (дБ) між двома точками ланки, працює в режимі автоматичного вибору діапазону вимірювання, тому не потребує встановлення меж вимірювання, а його власні характеристики близькі до параметрів ідеального приладу і можуть змінюватися шляхом натискування “Setting”); функціональний генератор (**Function Generator**, є джерелом напруги сигналів синусоїдної, трикутної чи прямокутної форми із керованими характеристиками сигналу на виході генератора); осцилограф (**Oscilloscope**, двоканальний осцилограф); пристрій для побудови амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) (**Bode Plotter**, цей пристрій використовують для аналізу ланок із фільтрами, для вимірювання коефіцієнта підсилення за напругою чи зсуву фази).

Більш детально кожний елемент, інструмент, кнопку, елемент меню і

т.п. ми розглянемо в процесі моделювання.

Як і в будь-якій іншій програмі у Work Bench 5.12 є “tool bar”, який складається із таких меню: File, Edit, Circuit, Analysis, Window, Help. Перші та останні два всім відомі і тому немає потреби їх розглядати детально; можна сказати, що меню Circuit відповідає за теж саме, що і меню схеми (див. рис.2).

Необхідним у нашому моделюванні буде меню Analysis

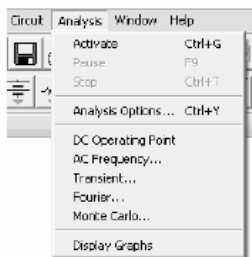


Рис.10. Меню „ **Analysis** ”

Використовуючи це меню можна аналізувати форму сигналів в певних контрольних точках досліджуваної схеми. В даному пакеті нам доступні такі види аналізу: **DC Operating Point** (вимірювання величин для режиму роботи схеми із постійним струмом), **AC Frequency Analysis** (вимірювання величин для режиму роботи схеми із синусоїдним струмом певної частоти і малої амплітуди), **Transient Analysis** (визначення перехідної характеристики, тобто залежності напруги від часу, в певному вузлі схеми), **Fourier Analysis** (перетворення представлення напруги як функції, що залежить від часу в представлення напруги, як набору гармонічних сигналів з певними амплітудами, фазами та частотами), **Monte Carlo Analysis** (статистичний аналіз, що дає змогу досліджувати, як впливають випадкові зміни параметрів елементів на характеристики схеми).

Вид аналізу необхідно вибирати відповідно до вимог і задач конкретної лабораторної роботи.

Моделювання пасивних RC фільтрів

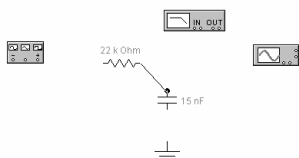
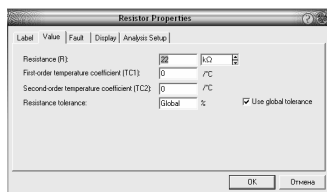






Рис.11

В даній роботі моделюють такі пасивні RC фільтри: ФНЧ, ФВЧ, смуговий та загороджувальний.

Почнемо із ФНЧ, а наступні типи фільтрів моделювати будемо аналогічно. Почнемо із складання схеми. Ідемо в меню **Basic** затискуємо

ЛКМ на піктограмі резистора і перетягуємо на робочу частину, відпускаємо кнопку. Те ж саме пророблюємо для конденсатора та “заземлення” (воно знаходиться в меню **Sources** і **необхідне у будь-якій схемі**), а в меню **Instruments** виберемо осцилограф, Bode Plotter та генератор (рис.11). Звичайно (“автоматично”, так передбачено в цьому

програмному пакеті) встановлюються номінали резистора і конденсатора 1кОм та 1 мкФ відповідно. Щоб змінити номінал двічі натискаємо на елемент і в діалоговому вікні встановлюємо всі необхідні значення $R=22\text{ k}\Omega$, $C=15\text{ nF}$. Щоб повернути елемент необхідно виділити необхідний елемент та в залежності від необхідного положення натискаємо на піктограми    

Коли встановлені номінали елементів та їх положення, необхідно елементи з'єднати провідниками: підводимо курсор до необхідного кінця елемента, з'являється точка, затискаємо ЛКМ і ведемо необхідного кінця іншого елемента.

Таким чином з'єднуємо всі елементи схеми, як показано на рис.12.

Тепер детальніше розглянемо властивості наших приладів: осцилографа, Bode Plotter-а та генератора. Як видно з рис.13 генератор може генерувати три типи сигналів: синусоїдний, трикутний та меандр; можемо виставляти частоту (максимум до 999 МГц) робочий цикл, амплітуду та зміщення. Генератор має три клеми: спільний контакт (common), „+” та „-”.

Ми будемо працювати на частоті 100 Гц з амплітудою 10 В; робочі контакти: спільний та „+”.



Рис.13

Робочий вигляд двох каналного осцилографа, зображеного на рис.14 надзвичайно простий: є дві клеми для підключення до каналів „А” та „В”, клема спільного контакту. Щоб спостерігати розгортку сигналу в часі працюємо в режимі Y/T, щоб спостерігати фігури Лісажу – в режимах A/B чи B/A. Щоб детальніше спостерігати осцилограму натискаємо на кнопку Expand.

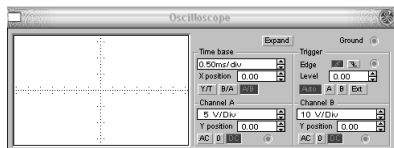



Рис.14

(див.рис.1, правий верхній кут лінійки інструментів).

За допомогою Bode Plotter-а (рис.15) ми можемо безпосередньо спостерігати АЧХ чи ФЧХ, для цього необхідно лише переключати режими Magnitude чи Phase відповідно.

Тепер необхідно запустити схему, це робиться за допомогою кнопки .

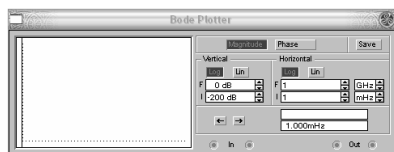



Рис.15

Якщо все правильно зроблено, то осцилограф та Bode Plotter повинні показати те ж саме що зображено на рис. 16. Для того щоб отримати більш детальні дані та зберегти їх, скористаємось Analysis Graph, який можна викликати за допомогою піктограми  (див. рис.1).

Ми маємо дані отримані із осцилографа в режимі фігур Лісажу, а також від Bode Plotter-а на рис.17 та рис.18.

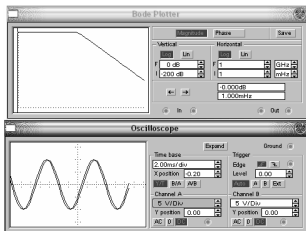


Рис. 16

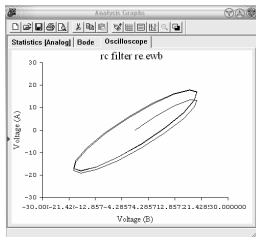


Рис. 17

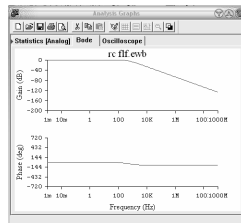


Рис.18

Тепер таким самим чином моделюємо ФВЧ, смуговий та загороджувальний фільтри. Складаємо схеми ФВЧ та смугового фільтрів, але щоб скоротити час та удосконалити схему складемо комбіновану схему з цих 2-х фільтрів, зображену на рис.19. Але тоді потрібно використати перемикачі **Switch** (звертаємося до меню **Basic**). Після встановлення цього елементу звичайно встановлюється така його властивість, за якої перемикання відбувається шляхом натискування клавіші Space, тобто клавіші Пробіл. Коли перемикачів декілька це створює певні труднощі. Для зручності можна перепозначити перемикачі, наприклад, цифрами. Для цього двічі тиснемо ЛКМ на зображенні вибраного елемента, в діалоговому вікні **Switch Properties** вибираємо **Value**, і у віконці **Key** замість Space записуємо цифру 1, якщо хочемо привласнити цьому вибраному перемикачу номер 1. Тепер перемикання здійснюємо однократним натискуванням клавіші із цифрою 1, відводимо курсор на вільне місце робочого поля і тиснемо на ЛКМ один раз. Щоб зробити підпис-“коментар” LF-HF наприклад, на перемикачі 3, двічі тиснемо ЛКМ на зображенні вибраного елемента, в діалоговому вікні вибираємо **Label**, у віконці **Label** записуємо LF-HF.

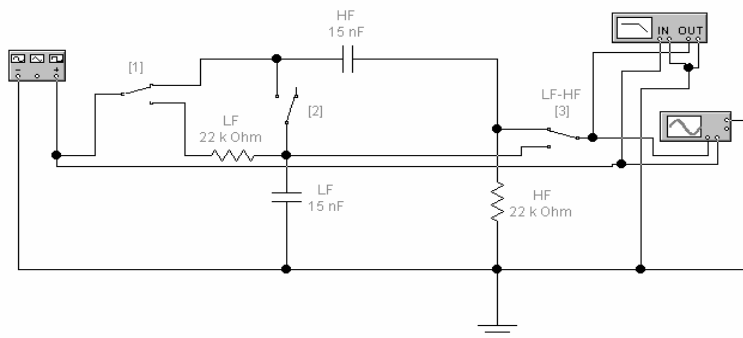


Рис. 19

Пояснення до схеми: елементи, позначені LF і HF відповідають елементам фільтрів ФНЧ та ФВЧ відповідно, ключ LF- HF дозволяє досліджувати ці фільтри окремо по черзі (переключення ключів проводиться за допомогою натискань клавіш на клавіатурі, які вказані в дужках; на даній схемі це [1], [2], [3]), тобто ми тут будемо лише маніпулювати перемиканням ключів. Почнемо дослідження. Для дослідження ФВЧ: ключі 1 та 3 встановлюємо у верхнє положення, ключ 2 - у праве положення, встановлюємо частоту 1кГц, амплітуду 10В; запускаємо програму і

отримуємо такі результати: вигляд фігури Лісажу на виході фільтра для вхідного сигналу з частотою 1кГц та амплітудою 10V наведено на рис. 20, АЧХ та ФЧХ такого фільтра наведено на рис. 21.

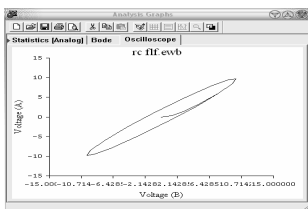


Рис. 20

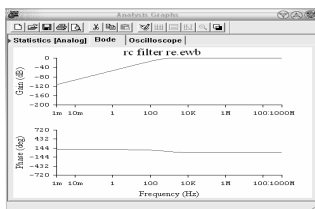


Рис. 21

Збираємо схему, зображену на рис. 22 для дослідження загороджувального фільтра.

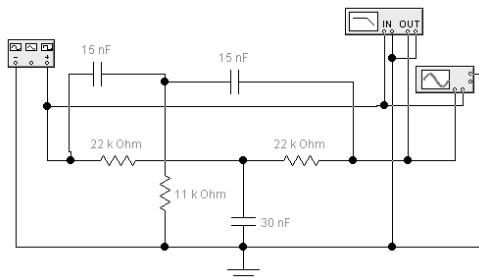


Рис. 22

Вигляд фігури Лісажу на виході фільтра для вхідного сигналу з частотою 1кГц та амплітудою 10V наведено на рис. 23. АЧХ та ФЧХ такого фільтра наведено на рис. 23.

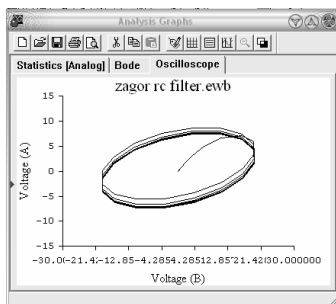


Рис. 22

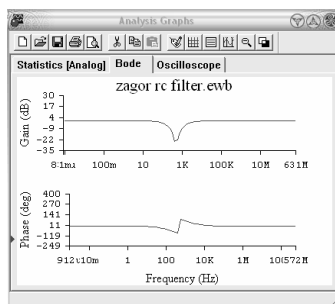


Рис.23

Реакція фільтрів ФНЧ та ФВЧ на вхідний сигнал у вигляді послідовності прямокутних двополярних імпульсів наведена на рис. 24 та на рис.25 відповідно.

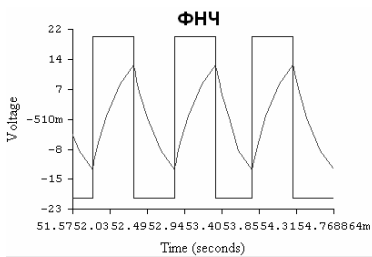


Рис. 24

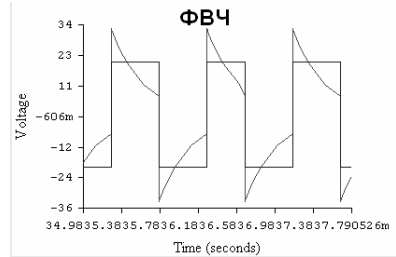


Рис. 25.

Тепер, коли ми набули певного досвіду роботи із інструментами та деякими засобами Work Bench-а, можемо приступати до більш розширеного моделювання схем.

Дослідження ВАХ діодів

Спочатку складаємо схему для моделювання ВАХ діодів. Для цього в меню

„**Instruments**” вибираємо прилади **Function Generator** та **Oscilloscope**. Із меню „**Basic**” по черзі вибираємо два резистора **Resistor**. Краще відразу вибрати необхідні для даної схеми величини опорів цих елементів. Для цього встановлюємо курсор на обраному резисторі і двічі тиснемо ЛКМ, таким чином активуємо вікно **Resistors Properties** в якому встановлюємо потрібну величину опору. Із меню „**Diodes**” вибираємо діод, а із меню „**Sources**” вибираємо “заземлення”. Після виконання з’єднання елементів отримуємо схему, подібну до зображеної на рис. 26.

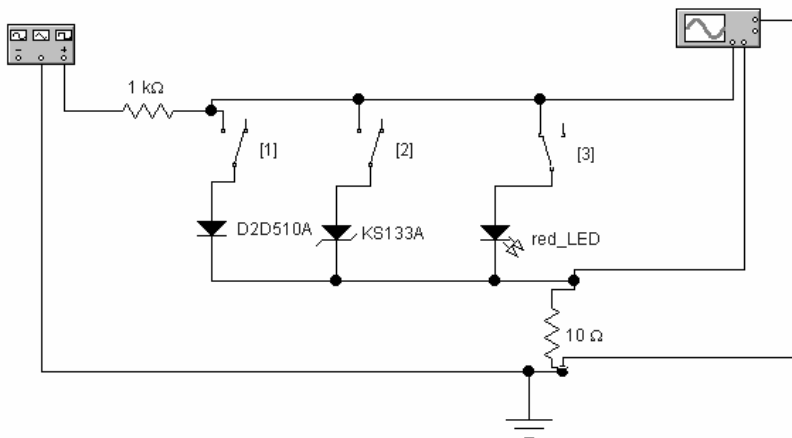


Рис.26

Активуємо по черзі **Function Generator** та **Oscilloscope**. У вікні генератора встановлюємо частоту 1 Гц, амплітуду 10 В та пилкоподібну форму сигналу. У вікні осцилографа встановлюємо режим вимірювань В/А, чутливість каналу А вибираємо рівною 2В/поділ., чутливість каналу В вибираємо рівною

50мВ/поділ. Вмикаємо (на короткий час) моделювання і спостерігаємо на екрані осцилографа BAX того діода, який підключено до генератора. Більш детальну картинку можна одержати, якщо на панелі осцилографа натиснути кнопку **Expand** (для повернення в попередній стан треба натиснути кнопку **Reduce** в правому нижньому кутку панелі осцилографа). Для аналізу одержаної BAX із меню схеми (віконце 5 на рис.2) активуємо вікно **Analysis Graphs** і в меню якого беремо інструмент **Toggle Cursors**. Після цього на фоні графіка BAX з'являються дві вертикальні рухомі риски (курсори, ще їх називають візирними лініями), а у віконечку справа подано координати точки перетину вертикальних курсорів із BAX. Коли рухаємо вертикальний курсор, то відповідно змінюються і координати.

Дослідження BAX транзисторів

Спочатку складемо схему для дослідження властивостей біполярного транзистора. В цій схемі будуть застосовані нові для нас елементи. Із меню „**Sources**” беремо джерело постійної напруги (**Battery**), із меню „**Basic**” беремо потенціометр (**Potentiometer**), із меню „**Instruments**” беремо вольтметр (як один із варіантів використання приладу **Multimeter**). Послідовність вибору інших елементів схеми та їх з'єднання нам вже відома із попередніх робіт. В результаті повинні одержати схему, подібну до зображеної на рис.27.

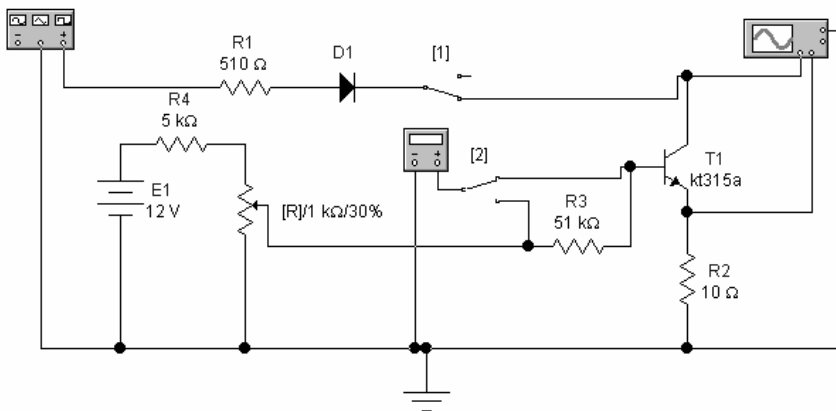


Рис. 27

Насамперед задамо параметри потенціометра. Для цього подвійним

натискуванні ЛКМ на зображенні потенціометра в схемі активуємо вікно **Potentiometer Properties**, в якому відкриваємо закладку **Value** (рис. 28).

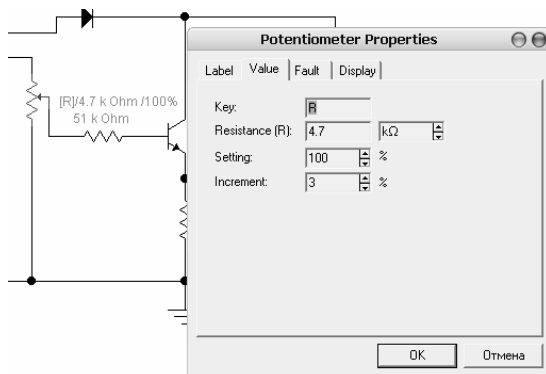


Рис. 28

Потім в рядку **Key** вибираємо букву або цифру, яка дозволить нам керувати положенням рухомого (у вигляді “стрілочки”) виводу потенціометра. Звичайно в програмі автоматично встановлюється буква **R**. В рядку **Resistance** встановлюємо величину максимального опору потенціометра (в одиницях Ом або кОм). В рядку **Setting** встановлюємо величину опору (в процентах від максимального), який має ділянка потенціометру між середнім та верхнім виводами (для випадку вертикальної орієнтації зображення потенціометра). Звичайно, автоматично, встановлюється величина 50%. В рядку **Increment** встановлюємо крок зміни (в процентах). Перевірити дієздатність потенціометра можна шляхом натискування встановленої клавіші, наприклад, **R**. Після натискування клавіші бачимо біля зображення потенціометра зміну величини від 50% в бік зменшення, тобто в даному випадку моделюється переміщення “стрілочки” вгору, а потенціал бази транзистора відносно “землі” зростає. Протилежний рух “стрілочки” реалізуємо натискуванням клавіш **Shift+R**. В цьому разі потенціал бази зменшується. Доцільно також перевірити тип досліджуваного транзистора. Для цього підводимо курсор до зображення транзистора і двічі тиснемо ЛКМ. У діалоговому вікні вибираємо необхідний тип (у лівій колонці “**Library**” транзистори виробництва СРСР позначені як r-p-n), потім у правій колонці вибираємо конкретну модель транзистора (наприклад, КТ315А) і тиснемо **Ok**.

Перед вимірюванням ВАХ необхідно:

1. ключем [1] роз'єднати колектор транзистора і вихід генератора;
2. базу транзистора ключем [2] з'єднати із вольтметром;
3. запустити схему і виміряти напругу (вольтметром), яка подається на базу транзистора;
4. ключем [2] з'єднати вольтметр із лівим контактом резистора R3;
5. запустити схему і виміряти напругу.

Потім підключити ключем [1] колектор транзистора до генератора і на екрані осцилографа одержати ВАХ, яка відповідає певній напрузі на базі

транзистора (дії 2-3), та струму бази (після здійснення дій 4-5 струм бази можна визначити за законом Ома, оскільки відоме падіння напруги на опорі R3 та його величина, в даному випадку 51 кОм).

Для одержання іншої BAX активуємо потенціометр (підводимо курсор до зображення потенціометра, натискуємо ЛКМ, колір елемента змінюється на червоний). Після цього, користуючись клавішами клавіатури **R** та **Shift+R**, встановлюємо іншу величину напруги і повторюємо попередні дії (1-5) для одержання BAX.

Для аналізу BAX із меню схеми (віконце 5 на рис.2) активуємо вікно **Analysis Graphs** в меню якого беремо інструмент **Toggle Cursors**, користуючись курсором визначаємо струм колектора транзистора для певної напруги колектор-емітер, напруги на базі транзистора та струму бази. Володіючи таким масивом експериментальних даних можна визначити деякі параметри транзистора, наприклад, крутість, коефіцієнт передачі струму бази, вихідний опір транзистора.

Моделювання BAX польового транзистора із керуючим р-п переходом робимо за допомогою схеми, яка наведена на рис. 29. Порядок складання схеми та аналіз BAX подібний до викладеного вище. Треба тільки звернути увагу на полярність напруги, що прикладається до затвора польового транзистора. Для транзистора із n-каналом на затвор подається “-” (на відміну від біполярного транзистора із структурою n-p-n, де до затвора прикладеться “+”).

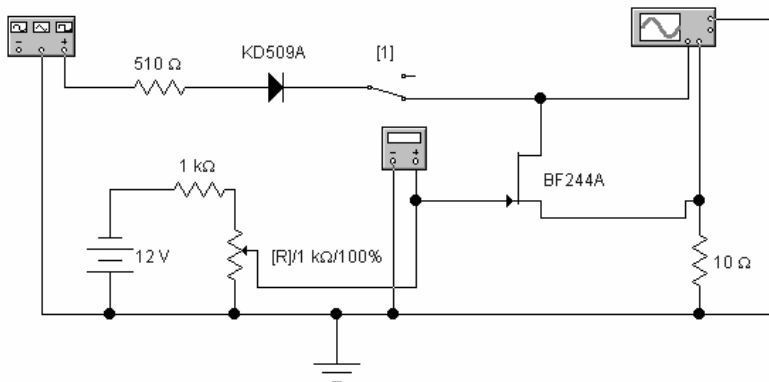


Рис. 29

На рис.30 показано вікно **Analysis Graphs** із двома курсорами. В таблиці зліва наведено координати $\{x1, y1\}$ точки перетину лівого курсора із BAX: $x1$ - величина напруги між стоком і виток, та $y1$ - величина напруги, що виділяється на резисторі із опором 10 Ом і який розміщений в ланці біля витоку транзистора, що дозволяє визначити струм стока $I_s = y1/10$ [A]. Координати точки перетину правого курсору із BAX стосуються величин $x2, y2$. Різниці координат також подані в цій таблиці: $dx = x2 - x1$; $dy = y2 - y1$. Необхідно також відмітити для себе те, що даної BAX, напруга на затворі дорівнювала нулю.

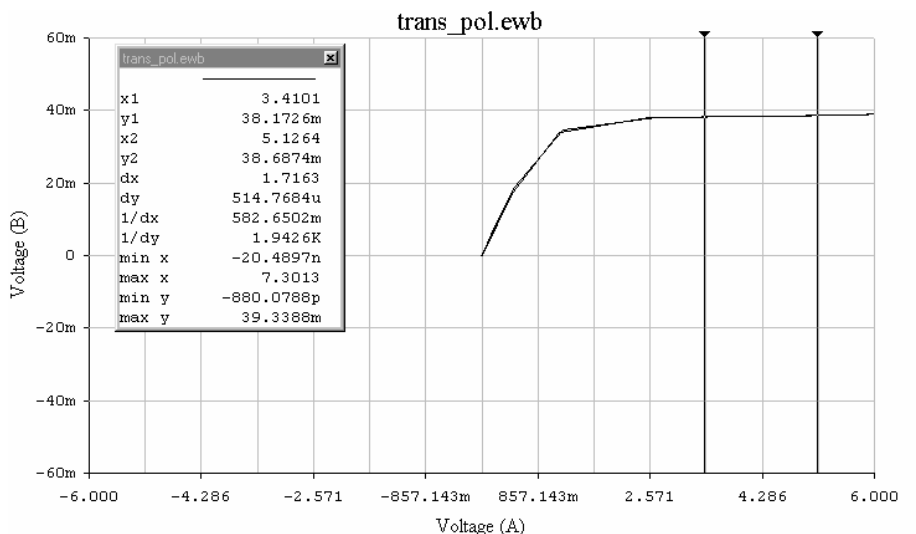


Рис.30

Модельовання підсилювачів на транзисторах

На даному етапі ми будемо моделювати поведінку транзисторних підсилювачів. Вихідні сигнали та характеристики будемо знімати за допомогою діалогових вікон **Transient Analysis** та **AC Frequency Analysis**, що знаходяться в меню **Analysis**. Тепер докладніше про кожний тип аналізу.

Transient Analysis (аналіз перехідних процесів) (рис.31) використовують для побудови вихідних та вхідних сигналів у вибраних

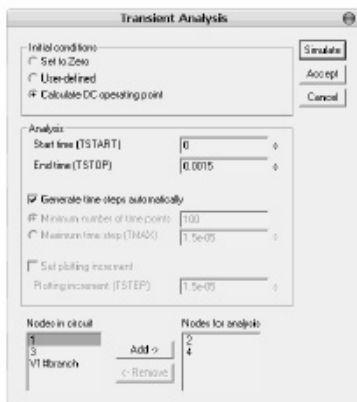


Рис. 31

контрольних вузлах на схемі, за заданий проміжок часу (**Start** та **End time**). Проміжок часу вимірювань та контрольні вузли задаємо вручну. Ми будемо працювати в режимі **Calculate DC operating point (виконання розрахунків режиму на постійному струмі)**. Декілька слів про те як визначити номер вибраного вузла на схемі. Це робиться так: підводимо курсор до вибраного вузла, повинно з'явитися зображення „руки”, тоді двічі натиснемо ЛКМ (вузол червоніє), у діалоговому вікні **Connector Properties** (рис.32) ставимо галочку у віконці **Display node label** і тиснемо **Ok**. Тоді біля вибраного вузла з'являється зображення прямокутника із номером вузла.

Далі в меню **Analysis** активуємо вікно **Transient Analysis**, в якому із

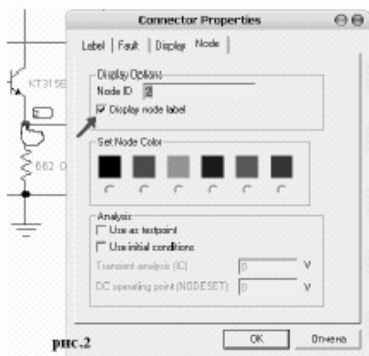


Рис.32

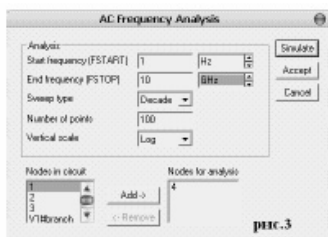


Рис.33

віконця **Nodes in circuit** за допомогою **Add (Remove** для видалення) переміщуємо вибрані для аналізу номера вузлів у віконце **Nodes for analysis**. Для запуску на виконання натискаємо **Simulate**.

AC Frequency Analysis (частотний аналіз змінного струму) (рис.33) потрібний для побудови АЧХ та ФЧХ у вибраних вузлах схеми, та діапазоні частот (Start та End

Frequency), все аналогічно до **Transient Analysis**, тому детально ми зупинятись не будемо. Тепер коли ми детальніше дізнались про **Transient Analysis** та **AC Frequency Analysis** почнемо сам процес моделювання роботи транзисторних підсилювачів.

Почнемо із **емітерного повторювача**.

Складаємо схему, наведену на рис.34 із вибраними вузлами. На генераторі задаємо такі параметри: частота 2кГц, робочий цикл 50%, амплітуда 0,7В, вид сигналу - синусоїда. Досліджуємо за допомогою **Transient Analysis**,

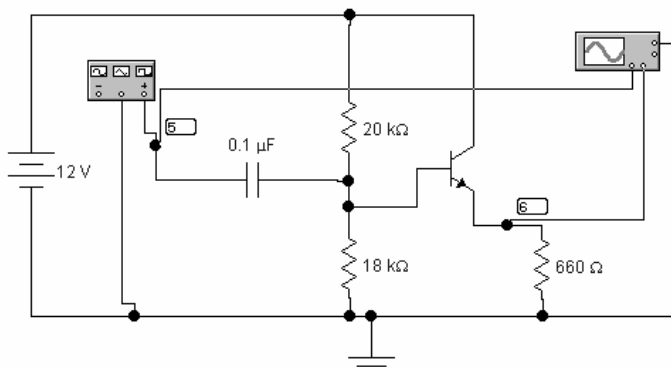


Рис.34

встановлюємо кінцевий час (**End time**) 0,0015с, натискаємо **Simulate** і отримуємо такий результат (рис 35). Після натискання на **Toggle Cursors** з'являються зображення вертикальних курсори і таблиці.

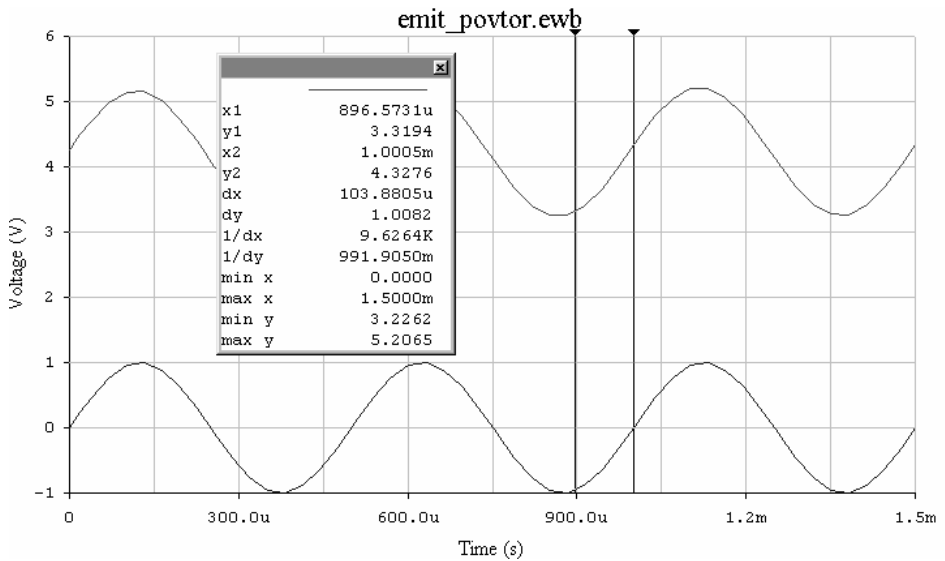


Рис.35

Зауважимо, що для спостереження вихідного сигналу за допомогою осцилографа можливе тільки в режимі **AC** (режим вимірювання змінної складової сигналу). Використовувати такий режим ми змушені тому, що вихідний сигнал, який вимірюємо на колекторі транзистора T2 містить велику постійну складову. Тому розгортка сигналу зміщується настільки далеко за межі екрану, що діапазону регулювання зміщення (Y position) недостатньо для повернення розгортки в межі екрану осцилографа. Ця вада відсутня у випадку використання меню **Analysis**. На рис. 35 верхня розгортка і таблиця стосуються сигналу, що спостерігається у вузлі 5 (рис.34). Про це можна дізнатися, якщо наблизити курсор до розгортки і натиснути на праву кнопку "миші". Тоді з'являється вікно **Graph Properties**, і на закладці **Traces** у віконці **Label** буде вказано номер вузла, якому належить розгортка. Для того, щоб перейти до аналізу іншої розгортки потрібно наблизити курсор до цієї розгортки і натиснути ЛКМ. У верхній частині таблиці також зображується кольорова лінія, колір якої той самий, що і у розгортки.

Для дослідження схеми **парафазного** підсилювача (його ще називають – розщеплювач фази) складаємо схему, наведену на рис.36. На генераторі встановлюємо такі параметри: частота 2кГц, робочий цикл 50%, амплітуда 0,6В. Вибираємо вузли схеми і встановлюємо їх у віконці **Nodes for analysis** аналогічно тому, як це було викладено вище. Запускаємо модель тим самим способом, що і для схеми для емітерного повторювача та отримуємо результат, наведений на рис.37.

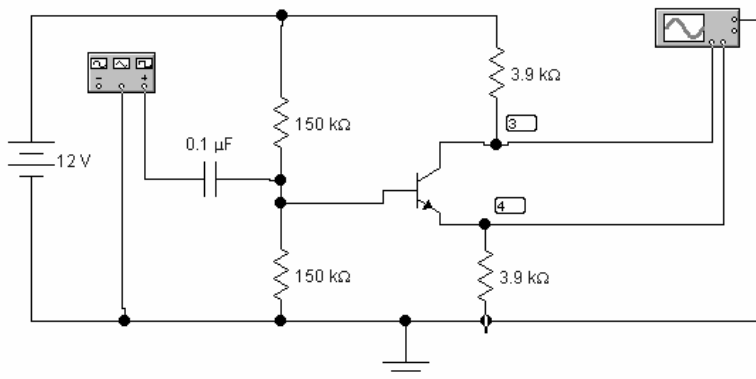


Рис. 36

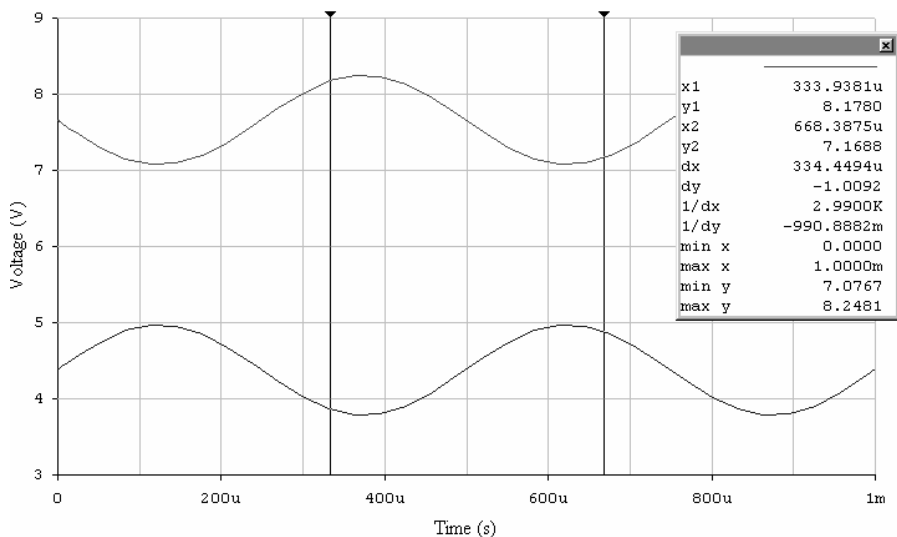
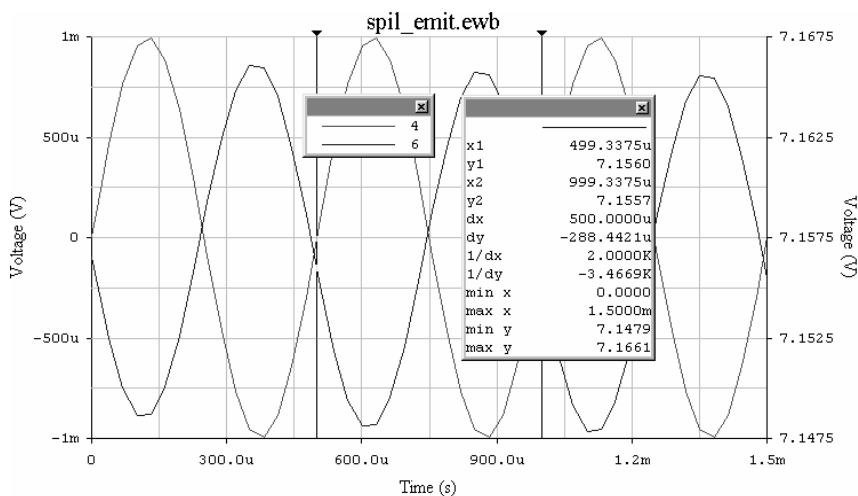
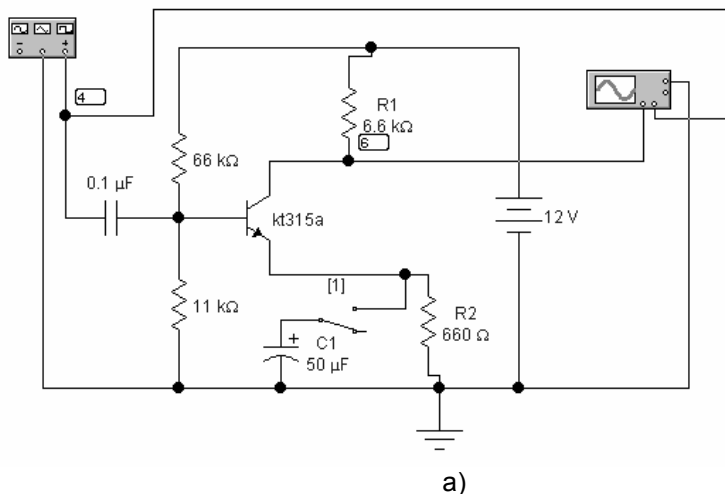


Рис.37

Зверніть уваги на те, що розгортки на рис. 37 та розгортка вихідного сигналу (вузол 6 на рис. 35) у схемі емітерного повторювача вказують на те, що вихідні сигнали містять як постійну так і гармонічну складові. Величину постійної складової та амплітуду гармонічної складової легко можна визначити із таблиць, які наведені на рис. 35 та рис. 37. Величина постійної складової надає інформацію про положення робочої точки транзистора. Коефіцієнт підсилення напруги змінного сигналу певної (вибраної нами на генераторі) частоти можна визначити, користуючись даними про амплітуди вхідного і вихідного сигналів.

Дослідження підсилювача із спільним емітером, схема якого наведена на рис. 38а, можна провести як за допомогою осцилографа, так і використовуючи **Transient Analysis (аналіз перехідних процесів)** для сигналів у вузлах 4 і 6 (результати наведено у вікні **Analysis Graphs** (рис.

38 в). Параметри вхідного сигналу вказані у віконцях генератора (рис. 38в).



в)

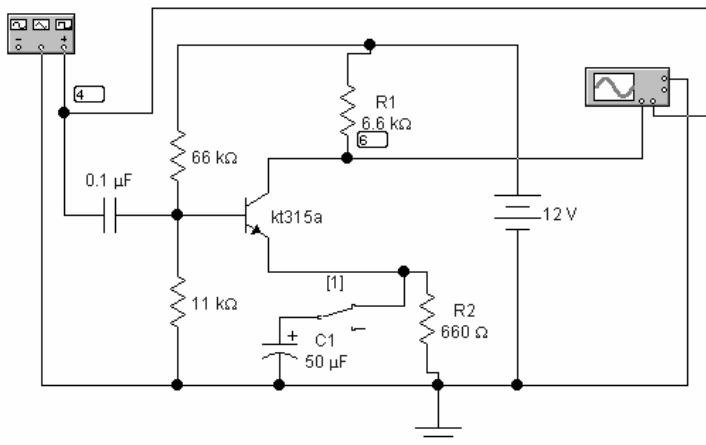
Рис. 38

Звернімо увагу на панель осцилографа. Перш за все на чутливості каналу В (1 mV/Div , вхідний сигнал) та каналу А (10 mV/Div, вихідний сигнал). Крім того, режим вимірювання встановлено тільки для змінної складової сигналів (в обох каналах на панелі активовані кнопки AC). Для зручності спостереження розгортка каналу А зміщена вниз (на панелі осцилографа для каналу А вказано

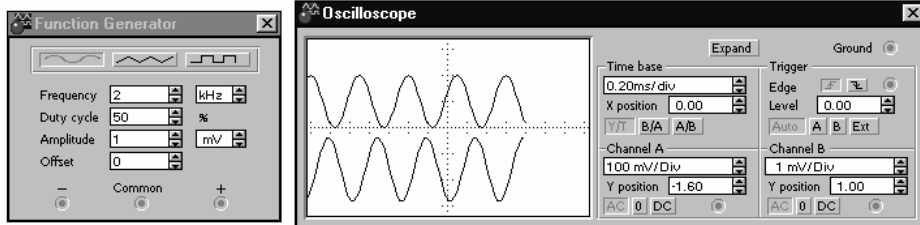
Y position = - 1.20), а розгортка каналу В зміщена вгору (на панелі осцилографа для каналу А вказано Y position = 1.00) . Можна оцінити коефіцієнт підсилення. Візуально амплітуди вхідного та вихідного сигналів

приблизно однакові. Тому можемо дійти висновку, що у даному випадку коефіцієнт підсилення за напругою для гармонічного сигналу із амплітудою 1 мВ та частотою 2 кГц приблизно дорівнює 10. Більш точні та детальні результати наведені на рис. 38с. Маленьке віконце із цифрами 4 та 6 допомагає за кольором ідентифікувати зображення сигналів, одержаних для вузлів 4 та 6 на схемі (рис. 38а). Це віконце з'являється після натискування кнопки **Toggle Legend** у вікні **Analysis Graphs**. У більшому віконці наведена інформація для вузла 6 (на це вказує колір лінії у верхній частині віконця із таблицею даних). Крім того треба звернути увагу на те, що Y табличні дані вузла 6 стосуються правої вертикальної шкали, а ліва вертикальна шкала стосується вузла 4 (місце спостереження вхідного сигналу для схеми на рис.38а).

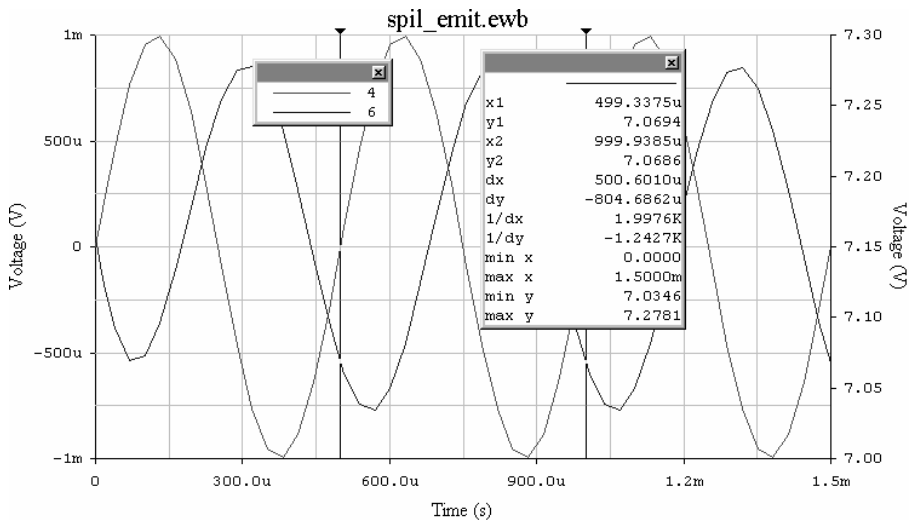
Наступним кроком буде дослідження впливу ємності C1 на характеристики підсилювача. Для цього ми ключем [1] під'єднаємо C1 до опору R2 (рис. 39а). Повторюємо всі попередні дії. Результати наведені на рис. 39в та рис. 39с.



а)



в)



c)

Рис. 39

Оцінити коефіцієнт підсилення можна із вигляду осцилограм на рис. 39в. Але цього разу чутливість каналу А вже складає 100 mV/Div при тій ж самій чутливості каналу В. Тобто для сигналу із частотою 2 кГц коефіцієнт підсилення наближено дорівнює 100. Більш точно порівняти чутливості підсилювачів цих двох модифікацій можна за допомогою табличних даних на рис.38с та рис. 39с. Для першої модифікації підсилювача коефіцієнт підсилення складає

$K_1 = 0.5 * (\max y - \min y) / 10^{-3} = 0.5 * (7.1661 - 7.1469) / 10^{-3} = 7.05$. Для другої модифікації $K_2 = 0.5 * (7.2781 - 7.0346) / 10^{-3} = 121.7$.

Залежності амплітуди вихідного сигналу від частоти та зсуву фаз між вхідним та вихідним сигналами одержуємо шляхом використання діалогового вікна **AC Frequency Analysis**, що знаходяться в меню **Analysis**. В цьому вікні ми повинні задати початкову і кінцеву частоту та вказати у віконці **Nodes for analysis** номери вузлів, які використовують для вимірювань. У нашому випадку ми використали тільки вузол 6. Після цього натискуємо **Simulate**. Результати наведено на рис.40.

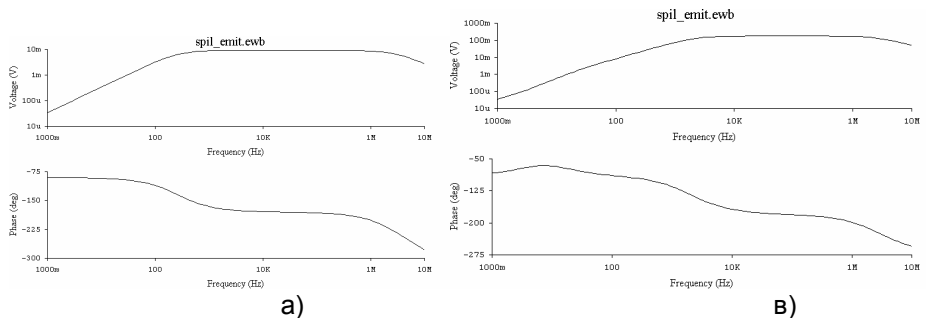


Рис. 40

На рис. 40а наведені залежності амплітуди вихідного сигналу та зсуву фази від частоти для першої модифікації підсилювача (конденсатор C1 на рис. 38а не підключений до резистора R2). На рис. 40в наведені характеристики другої модифікації підсилювача (конденсатор C1 підключений до резистора R2 на рис. 39а).

Результати дослідження підсилювачів цих двох модифікацій у випадку прямокутних двополярних вхідних сигналів наведено на рис. 41 (для першої модифікації) та на рис. 42 (для другої модифікації). Необхідно звертати увагу на те, що розгортки каналів зміщені (для каналу А – донизу, для каналу В – вгору), а також стежити за чутливостями каналів.

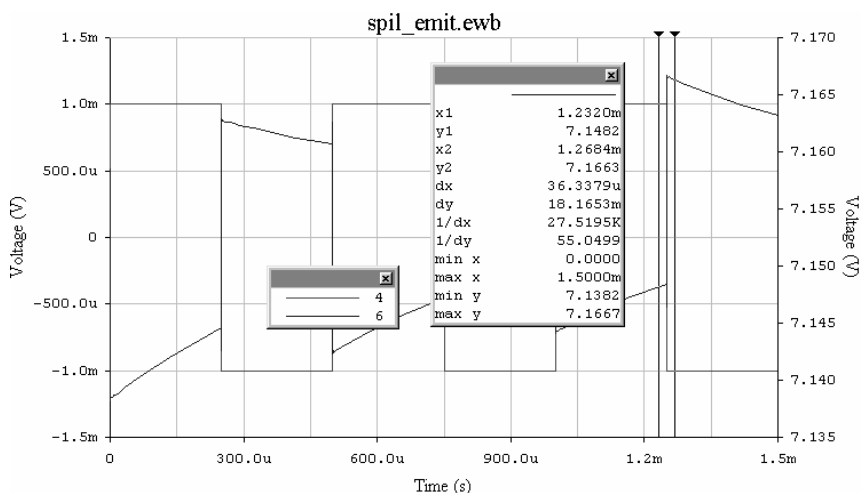
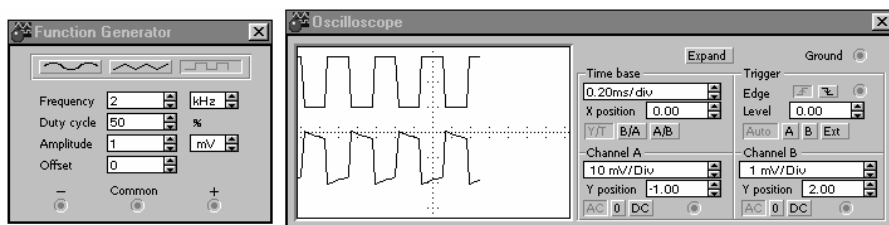


Рис. 41

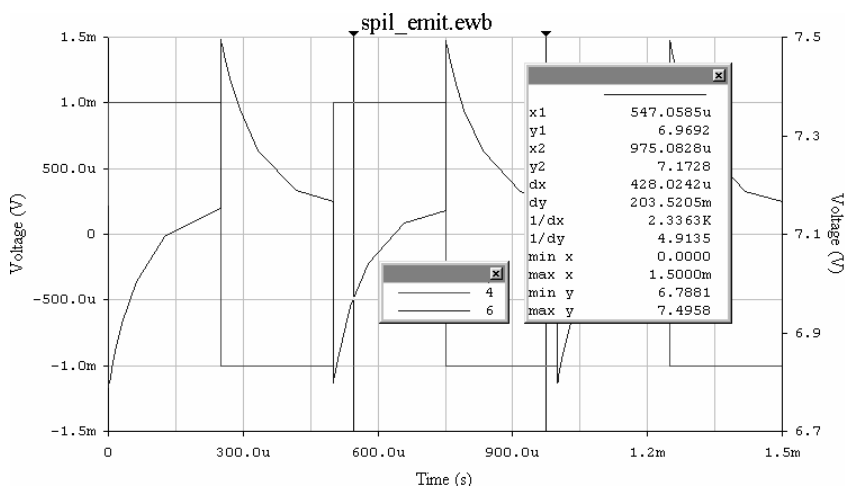
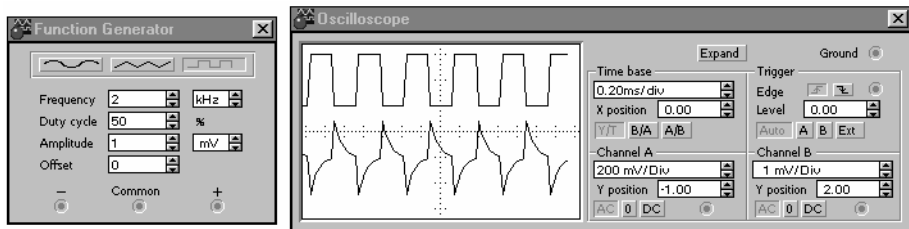
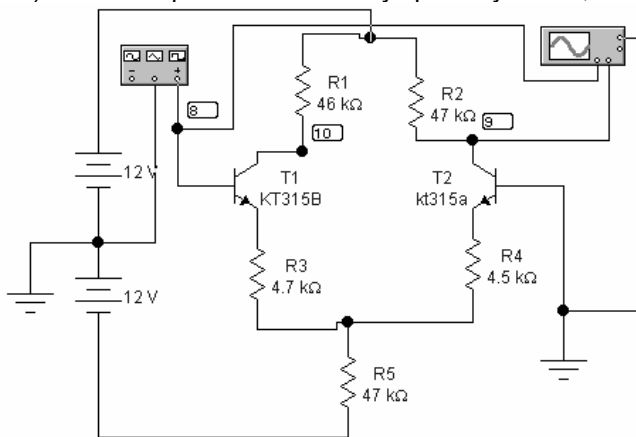


Рис. 42

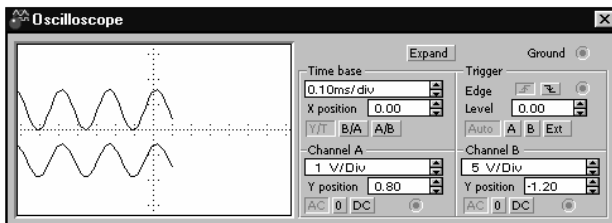
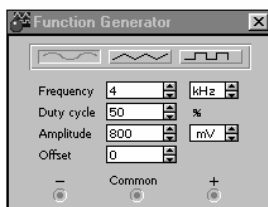
Дослідження властивостей диференціального підсилювача почнемо із моделювання процесу вимірювання коефіцієнта підсилення диференціального сигналу. Модель підсилювача, що містить ідентичні симетричні елементи (наприклад, $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$) та транзистори із однаковими характеристиками не дає можливості відтворити властивості реального підсилювача. Отже доцільно зразу, при складанні схеми моделі самому імітувати розбіжності параметрів елементів підсилювача. Найбільш широковживані типи резисторів мають відхилення порядку 20% від номінального значення опору. Для транзисторів процедуру імітації ми реалізуємо шляхом використання транзисторів із близькими параметрами, наприклад, КТ315А та КТ315В. Більш детальну інформацію з цього питання можна одержати із меню **Analysis**, в якому передбачена можливість досліджувати моделі методами статистичного аналізу, наприклад, методом Монте-Карло.

Схема моделі наведена на рис. 43а. Вхідний сигнал подаємо на базу транзистора Т1, а базу транзистора Т2 “заземлюємо”. Параметри вхідного сигналу вказані на панелі генератора (рис.43в). За допомогою осцилографа (рис.43в) спостерігаємо як вхідний сигнал (канал А, його розгортка зміщена

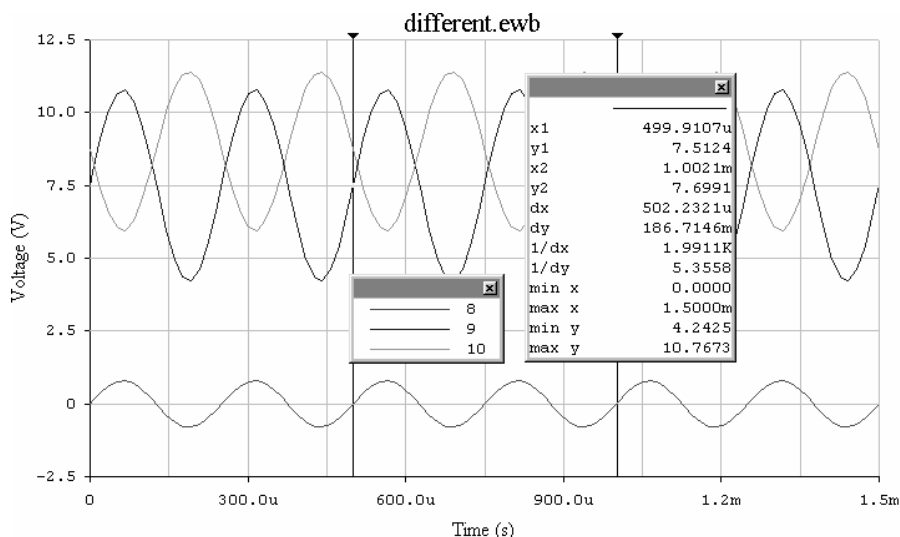
вгору), так і вихідний сигнал (канал В, розгортка зміщена вниз). Обидва канали працюють в режимі вимірювання тільки змінної складової сигналу (активовані кнопки **AC**). Зауважимо, що використовувати такий режим ми змушені тому, що вихідний сигнал, який вимірюємо на колекторі транзистора T2 містить велику постійну складову. Після використання меню **Analysis** (рис. 43с) ми спостерігаємо сигнали у трьох вузлах 8, 9 та 10 на рис. 43а.



а)

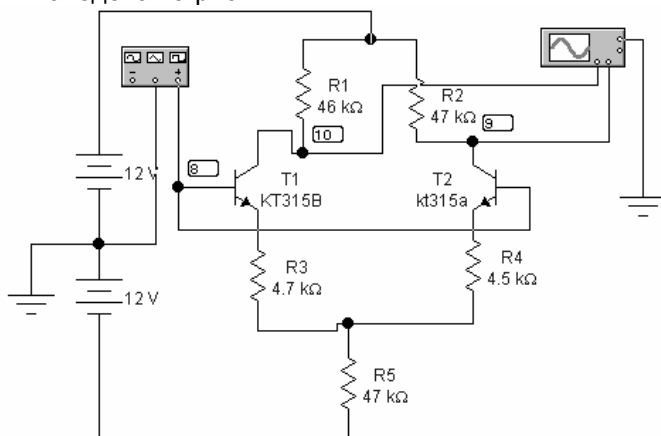


б)

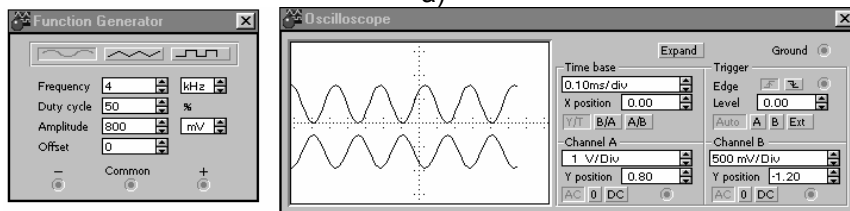


с)
Рис. 43

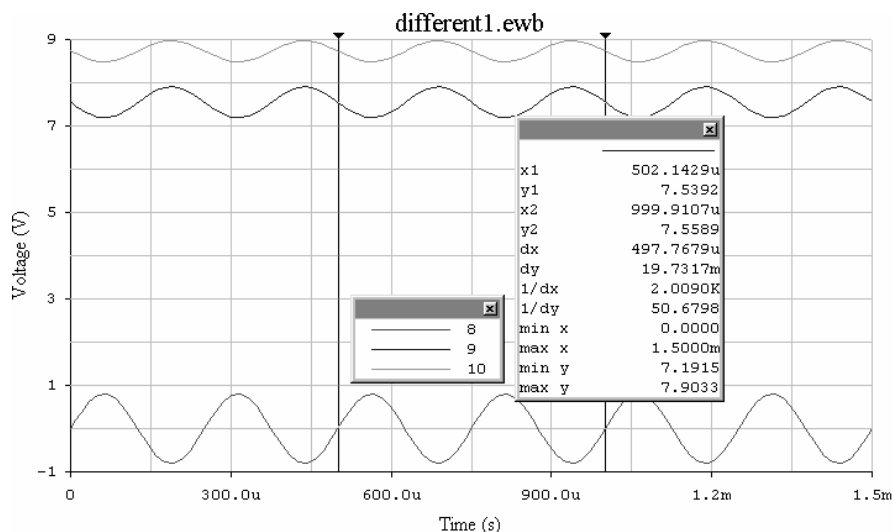
Схема моделі для вимірювання коефіцієнта підсилювання синфазного сигналу, параметри сигналів та осцилограми, а також сигнали у відповідних вузлах схеми наведена на рис. 44.



a)



В)

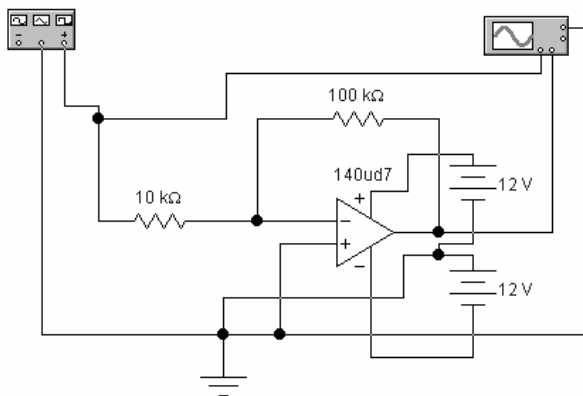


c)

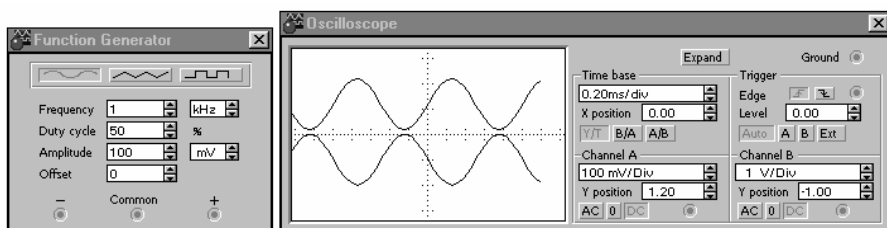
Рис.44

Моделювання операційних підсилювачів з негативним зворотнім зв'язком

Порядок складання схем моделей, в яких застосовуються операційні підсилювачі такий самий, як і у попередніх випадках, але у вікнці **Analog ICs** потрібно правильно вибрати модель. Модель із 3 виводами "працює" найбільш швидко, але не є повною. В ній неможливо моделювати, наприклад, позитивний зворотній зв'язок. Доцільно вибрати модель **5 – Terminal Opamp**, тобто модель, що містить 5 виводів. В цій моделі враховані деякі властивості реального операційного підсилювача, наприклад, обмежену величину напруги живлення, обмеження величини вихідної напруги та струму. Схема моделі інвертувального підсилювача та сигнали наведені на рис. 45.



а)

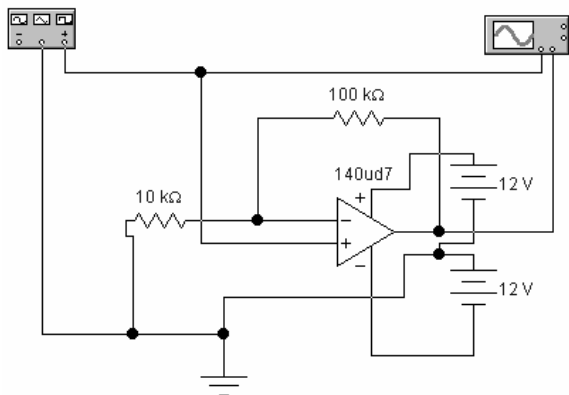


в)

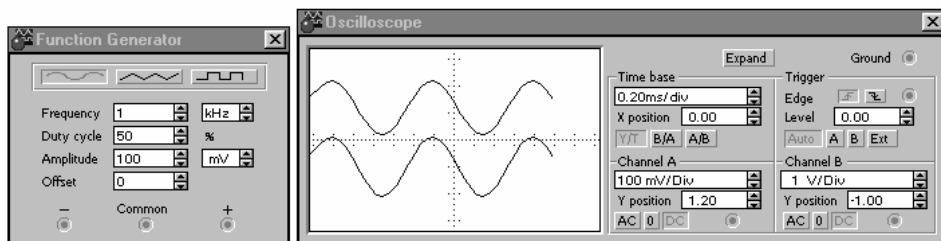
Рис. 45

Схема моделі неінвертувального підсилювача та сигнали наведені на рис. 46.

В обох схемах вимірювання сигналів за допомогою осцилографа проводимо у режимі **DC**, тобто вимірюємо як постійну, так і змінної складової сигналу. Розгортки сигналів у каналах А і В зміщені для зручності спостереження.



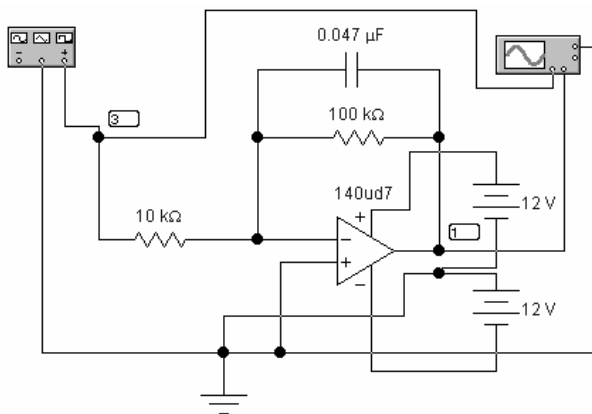
а)



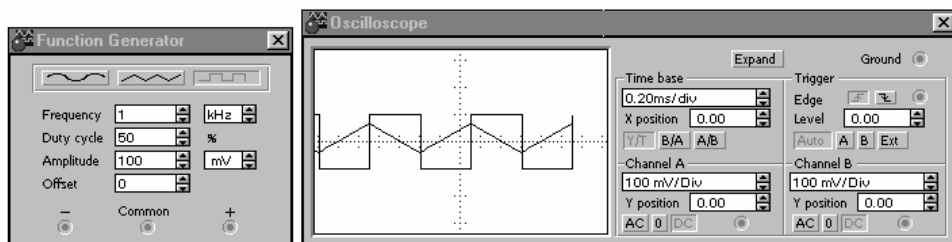
в)
Рис.46

Схема моделі інтегратора на базі інвертувального підсилювача наведена на рис. 47а.

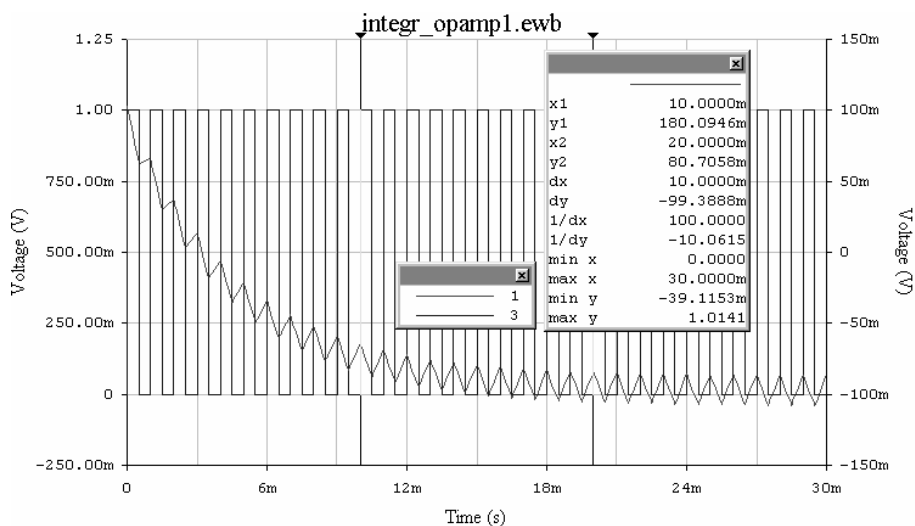
Параметри вхідного сигналу наведені на панелі генератора (рис. 47в), а сигнали – на екрані осцилографа (рис. 47в). Цікаво порівняти осцилограми на рис. 47в та розгортки сигналів на рис. 47с.



а)



в)

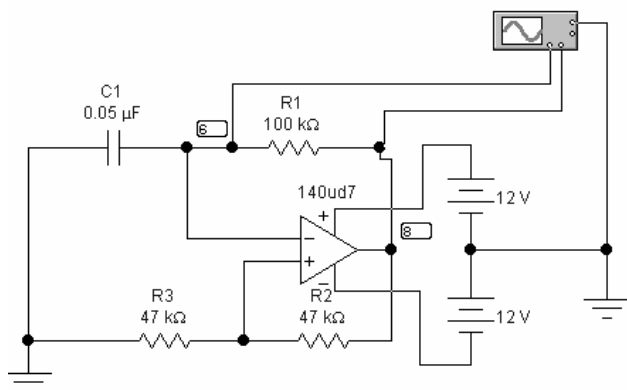


с)
Рис. 46

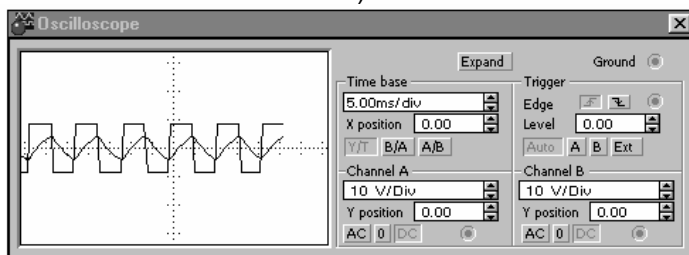
Якщо на екрані осцилографу (як і під час реального експерименту) ми спостерігаємо форму вихідного сигналу після великої кількості періодів двополярного прямокутного сигналу амплітудою 0,1 В, то за допомогою процедури **Transient Analysis (аналіз перехідних процесів)** із меню **Analysis** ми маємо змогу спостерігати розвиток процесу встановлення вихідного сигналу. В даному випадку вихідний сигнал набуває усталеної форми через 30 мсек (для цього сигналу використана ліва вісь відліку Y).

Генератори на операційних підсилювачах

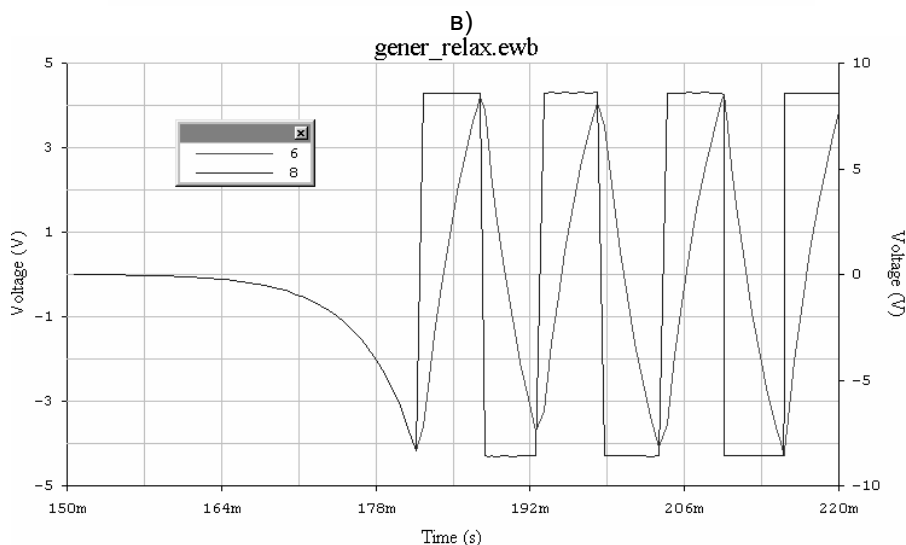
Дослідження генераторів почнемо із моделювання релаксаційного генератора, або



a)



b)



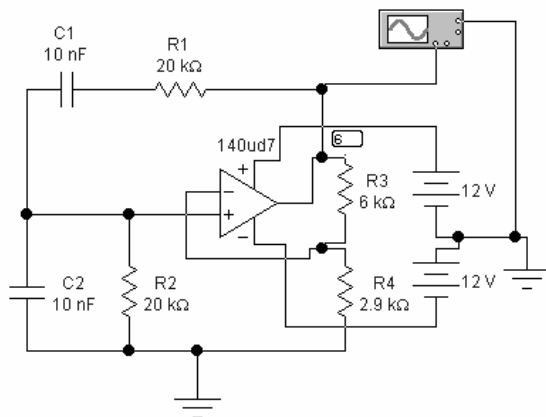
c)

Рис. 47

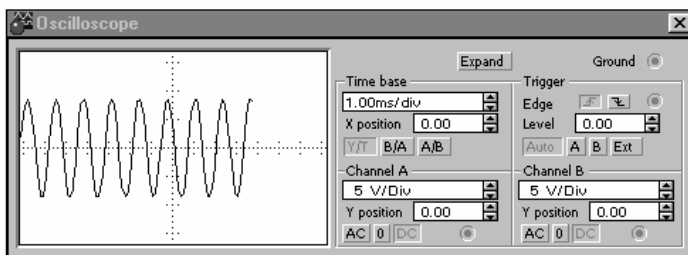
як його часто називають – мультивібратора. Схема такого генератора імпульсів наведена на рис. 47а. Доцільно вибрати модель операційного підсилювача із 5 виводами. Тоді можна уникнути проблем із запуском коливального процесу, що трапляється у випадку використання моделі із 3 виводами. Як і раніше, можна побачити різницю між осцилограмами на

екрані осцилографа (рис. 47в, дуже подібними до тих, що ми спостерігаємо під час дослідження реального макета генератора) та розгортками сигналів (рис. 47с) у вузлах 6 і 8 схеми на рис. 47а. Ліва вісь Y стосується розгортки сигналу у вузлі 6, а права вісь Y стосується розгортки сигналу у вузлі 8. На рис. 47с можна спостерігати початок розвитку коливального процесу (приблизно через 0,15 с після запуску генератора). На екрані осцилографа спостерігаються лише осцилограми вже розвинутого процесу генерації.

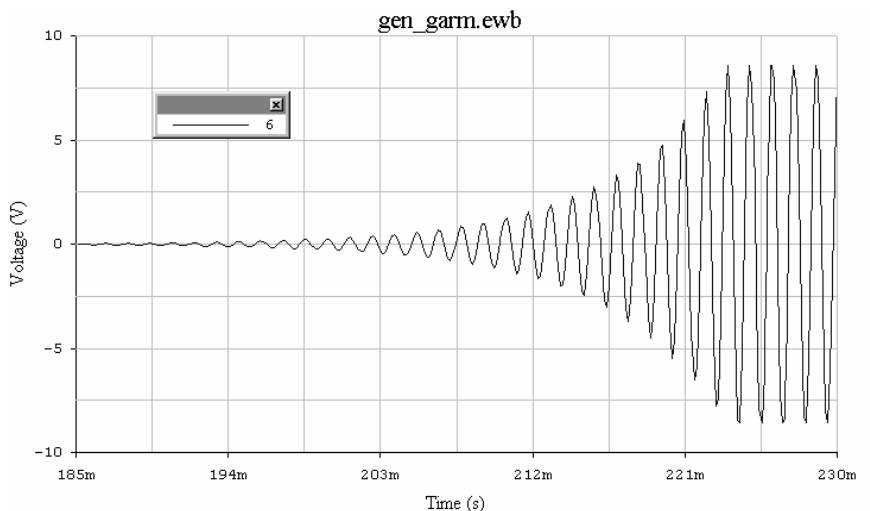
Схема моделі генератора гармонічних коливань наведена на рис. 48а. Слід уважно добирати величини R_3 та R_4 . Бажано, щоб опір резистора R_3 трохи (на декілька процентів) перевищував величину $2R_4$. Чим меншим буде це перевищення, тим більший час встановлюються коливання. На рис. 48в наведена осцилограма вихідного сигналу генератора. А на рис. 48с можна спостерігати процес розвитку коливань, амплітуда яких стає досить помітною через 0,18 с. Коливання повністю встановлюються через 0,23 с.



а)



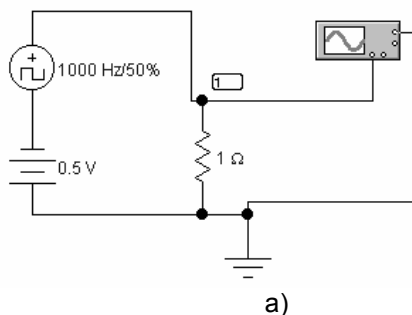
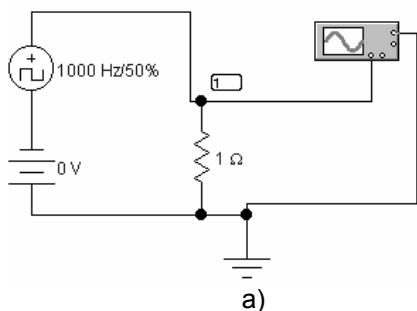
в)

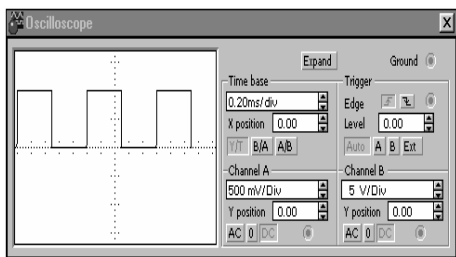


с)
Рис. 48

Застосування метода Фур'є аналізу для дослідження моделей радіоелектронних схем

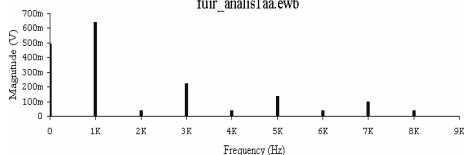
Для демонстрації можливостей Фур'є аналізу періодичних сигналів використовуємо послідовності прямокутних одно- та двополярних сигналів певної частоти із різним заповненням періоду (ще іноді кажуть – “скважністю”). Для складання схеми раціонально використати послідовне включення джерела послідовності однополярних сигналу **“Clock”** та джерела постійної напруги **“Battery”** із меню **“Sources”**. При цьому джерело **“Battery”** включаємо із протилежною полярністю до полярності прямокутних імпульсів. Якщо вибрати величину напруги джерела **“Battery”** рівною нулю, то на резисторі формується послідовність однополярних імпульсів (рис. 49 а, в). Якщо вибрати величину напруги джерела **“Battery”** рівною половині амплітуди прямокутних імпульсів, то на резисторі формується симетричний двополярний сигнал (рис. 50 а, в).





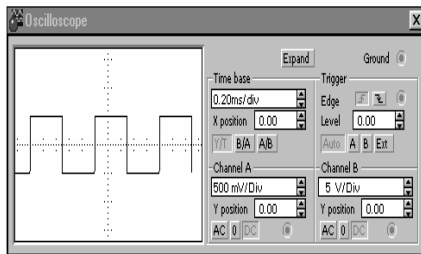
В)

fuir_analis1a.ewb



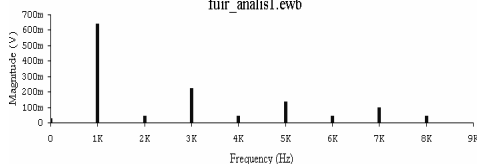
с)

Рис. 49



В)

fuir_analis1.ewb

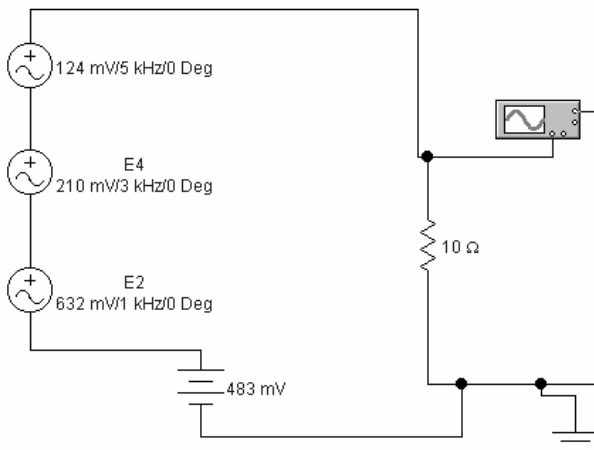


с)

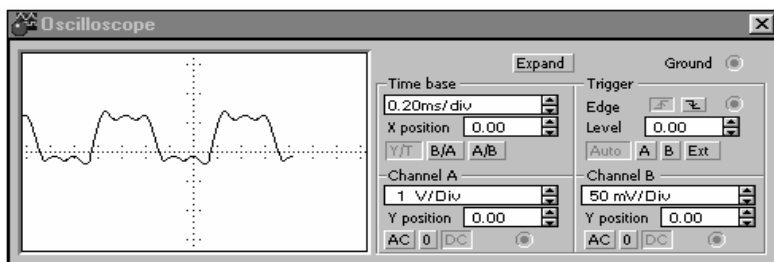
Рис. 50

Для проведення Фур'є аналізу вибираємо в меню **"Analysis"** рядок **Fourier Analysis**. На рис. 49с та рис. 50с наведені Фур'є спектри. Детальну інформацію про ці величини можна одержати, якщо використати кнопки вертикальних курсорів **Toggle Cursors** у вікні **Analysis Graphs**.

Можна зробити обернену операцію – синтезувати сигнал, скориставшись сумою декількох гармонік. Для цього складаємо схеми із послідовно включених джерел гармонічних сигналів, амплітуди яких вибираємо відповідно до тих, які ми попередньо визначили на рис. 49 с, 50 с та джерела певної постійної напруги (для гармоніки із нульовою частотою). Так для синтезу сигнала, який аналізували на схемі 49, складаємо схему, яка наведена на рис. 51а.



а)



в)

Рис. 51

Для синтезу сигнала в даному випадку використали чотири гармоніки (три гармоніки з частотами 1 кГц, 3 кГц, 5 кГц та постійна складова). Результат синтезу чотирьох гармонік наведено на рис. 51в. Видно, що форма синтезованого сигналу подібна до форми початкового сигналу. Ступінь подібності зростає з ростом кількості гармонік, які використовують для синтезування сигналу.

Застосовуючи такий метод аналізу та синтезу сигналів можна моделювати вплив пасивного фільтра на форму сигналів, що проходять через фільтр. Звичайно, треба мати інформацію про параметри фільтра. Це дає можливість оцінити вплив фільтра на певні гармоніки вхідного сигналу, які, в свою чергу, ми визначаємо під час аналізу вхідного сигналу.

Список літератури

1. Физика твердого тела: Энциклопедический словарь /Гл. ред. В.Г. Барьяхтар, зам. глав. ред. В. Л. Винецкий. Т. 1, 2. Киев: Наукова думка, 1998.
2. Sah C.-T. Fundamentals of solid-state electronics /C.-T. Sah. World Scientific, 1991. 1011 p.
3. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств/ М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 260 с.
4. Джонс М.Х. Электроника – практический курс: Пер. с англ. – М.: Постмаркет, 1999.- 528 с.
5. Завадский В.А. Компьютерная электроника. - Киев: БЕК, 1996. – 368 с.
6. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). - М.: СК Пресс, 1996. – 272 с.
7. Сворень Р.А. Электроника шаг за шагом: Практическая энциклопедия юного радиолюбителя. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. 540 с.
8. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум по Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова, В 2 т. – М.: Додэка, 1999 – 2000 с.
9. Leaver K. Microelectronic devices /K. Leaver. Imperial College Press, UK 1997, 236 p.
10. Brennan K.F. Physics of semiconductors with application to optoelectronic devices /K.F. Brennan. Cambridge University press, 1999. 762 p.
11. Dimitrijevic S. Understanding semiconductor devices /S. Dimitrijevic. New York: Oxford University, 1998. 574 p.
12. Streetman B.G. Solid state electronic devices /B.G. Streetman, S. Banerjee, New Jersey: Prentice Hall, 2000. 558 p.
13. Драгунов В.П. Основы наноэлектроники: учеб. пособие /В.П. Драгунов, И.П. Неизвестный, В.А. Гридчин. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.332 с.
14. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. /В.И. Гаман. Томск: Изд-во НТЛ, 2000. 426 с.
15. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов /В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. 6-е изд., стер. СПб.: Лань, 2002. 480 с.

Додаток

Список використовуваних скорочень та термінів

АЧХ – Амплітудно-Частотна Характеристика
ВАХ – ВольтАмперна Характеристика
ГСС – Генератор Стабільного Струму
ДК – Диференціальний Каскад
ЗЗ – Зворотний Зв'язок
ІМС – Інтегральна МікроСхема
ЛКМ – Ліва Кнопка “Миші”
КПСС - Коефіцієнт Підсилення Синфазного Сигналу
КПДС – Коефіцієнт Підсилення Диференціального Сигналу
КПСС – Коефіцієнт Придушення Синфазного Сигналу
НЗЗ – Негативний Зворотний Зв'язок
ОП – Операційний Підсилювач
ПЗЗ – Позитивний Зворотний Зв'язок
ПКМ – Права Кнопка “Миші”
ППС – Підсилювач Постійного Струму
ФВЧ – Фільтр Високої Частоти
ФНЧ – Фільтр Низької Частоти
ЕРС – ЕлектроРушійна Сила

А

AC – Alternate Current (змінний струм)
AF – Audio Frequency (звукові частоти)
AM – Amplitude Modulation (амплітудна модуляція)
AGC – Automatic Load Control (автоматичне регулювання підсилення)

Д

DC – Direct Current (постійний струм)
DR – Dynamic Range (динамічний діапазон)

Е

EHF – Extremely High Frequency (надзвичайно високі частоти, міжнародне позначення діапазону частот 30 – 300 ГГц, міліметрові хвилі)
EWB – Electronics Workbench (назва комп'ютерної програми)

F

FM – Frequency Modulation (частотна модуляція)
FSK – Frequency Shift Keying (частотна маніпуляція)

Н

HFO - High Frequency Oscillator (генератор високих частот)

К

KW - Kurz Wellen (короткі хвилі, 3 – 30 МГц)

L

LF – Low Frequency (низькі частоти, довгі хвилі 30 – 300 кГц)
LMO – Linear Master Oscillator (керований генератор з лінійною залежністю частоти від керуючої напруги)

LW – LangWellen (довгі хвилі, 30 – 300 кГц)

M

MC – Micro-Cap (назва комп'ютерної програми)

MF – Medium Frequency (середні частоти, офіційна назва частот 300 – 3000 кГц,

середні хвилі)

MW – MittelWellen (середні хвилі, 300 – 3000 кГц)

N

NB – Noise Blanker (придушувач шуму)

NF – Noise Figure (коефіцієнт шуму, в дБ)

O

OK – okay (“добре” – підтвердження команди)

Op Amp – operational amplifier (операційний підсилювач)

P

PA – Power Amplifier (підсилювач потужності)

PLL - Phase Locked Loop (система автоматичної фазової підстройки частоти)

PM – Phasen Modulation (фазова модуляція)

R

RF – Radio Frequency (радіочастоти, загальна назва високих частот)

S

SHF – Super High Frequency (надвисокі частоти, офіційна назва діапазону частот

3 – 30 ГГц, сантиметрові хвилі)

SNR – Signal to Noise Ratio (відношення сигнал/шум)

SW - Short Wave (короткі хвилі)

U

UHF – Ultra High Frequency (ультрависокі частоти, офіційна назва діапазону частот

300 – 3000 МГц, дециметрові хвилі)

UKW - UltraKurzWellen (ультракороткі хвилі, 30 – 300 МГц)

V

VCO – Voltage Controlled Oscillator (генератор змінної частоти, що керується напругою)

VFO – Variable Frequency (генератор із змінною частотою)

VHF – Very High Frequency (дуже високі частоти, офіційна назва діапазону частот

30 – 300 МГц, метрові хвилі)

VLf - Very Low Frequency (дуже низькі частоти, офіційна назва діапазону частот

3 – 30 кГц, дуже довгі хвилі)

Зміст

Передмова	3
1. Початкова інформація про пакет Work Bench 5.12.	4
2. Моделювання пасивних RC фільтрів	8
3. Дослідження ВАХ діодів	12
4. Дослідження ВАХ транзисторів	13
5. Моделювання підсилювачів на транзисторах	16
6. Моделювання операційних підсилювачів з негативним зворотнім зв'язком	26
7. Генератори на операційних підсилювачах	29
8. Застосування метода Фур'є аналізу для дослідження моделей радіоелектронних схем	31
Список літератури	34
Додаток	
Список використовуваних скорочень та термінів	35

Навчальне видання

Мягченко Юрій Олександрович,

Дулич Юрій Миколайович,

Хачатрян Айзек Вазгенович

**ВИВЧЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ
МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

Друкується за авторською редакцією