

Лабораторна робота №2. Дослідження напівпровідникових діодів




* У даному лабораторному практикумі використовується пакет *National Instruments Multisim*, призначений для моделювання та дослідження електронних схем. Усі операції з цим пакетом та зображення його форм були отримані для версії *Multisim 13.0*. В інших версіях цього пакету дані операції теж виглядають подібним чином.

Завдання

Для вказаних у завданні напівпровідникових діодів побудуйте вольт-амперні характеристики. Для цього необхідно вольтметром вимірювати напругу, прикладену до діода, а амперметром – струм через діод. Результати вимірювань занести до таблиці і побудувати відповідні графіки $I(V)$. Доцільно порівняти одержані результати з паспортними даними радіоелементів (постійну пряму напругу, максимальну зворотну напругу, максимальний зворотній струм тощо).

Хід роботи

1. Дослідження випрямних діодів

1. Зібрати схему подану на рис.1. Для швидкого розміщення елементів схеми на панелі елементів слід натиснути кнопку з відповідним умовним позначенням:  – діодів (Diodes → DIODE),  – резисторів та інших пасивних елементів,  – для вибору джерел постійної напруги (*DC_Power*) та землі (*Ground*). При цьому запускається вікно вибору компонентів (рис.2). Також це вікно можна запустити через меню *Place > Component...* або комбінацією клавіш *Ctrl+W*. Для зміни параметрів вже розміщеного на схемі елемента слід двічі на ньому клацнути мишею (лівою кнопкою) та переписати номінал у вкладці *Value*. Для з'єднання елементів потрібно підвести мишу до вивода елемента, з'явиться хрестик, один раз клацнути лівою кнопкою миші, протягнути лінію до вивода іншого елемента і ще раз клацнути. Замінити елемент можна натиснувши на ньому правою кнопкою миші та вибравши у контекстному меню пункт *Replace components...*

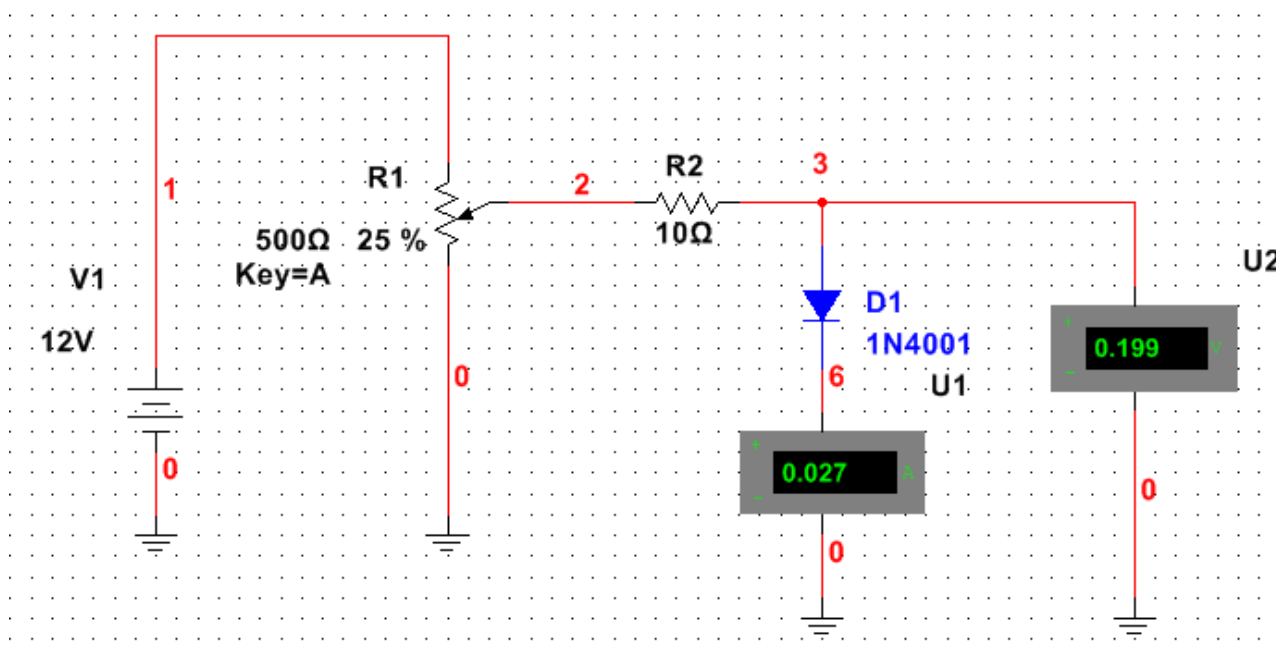


Рис.1.

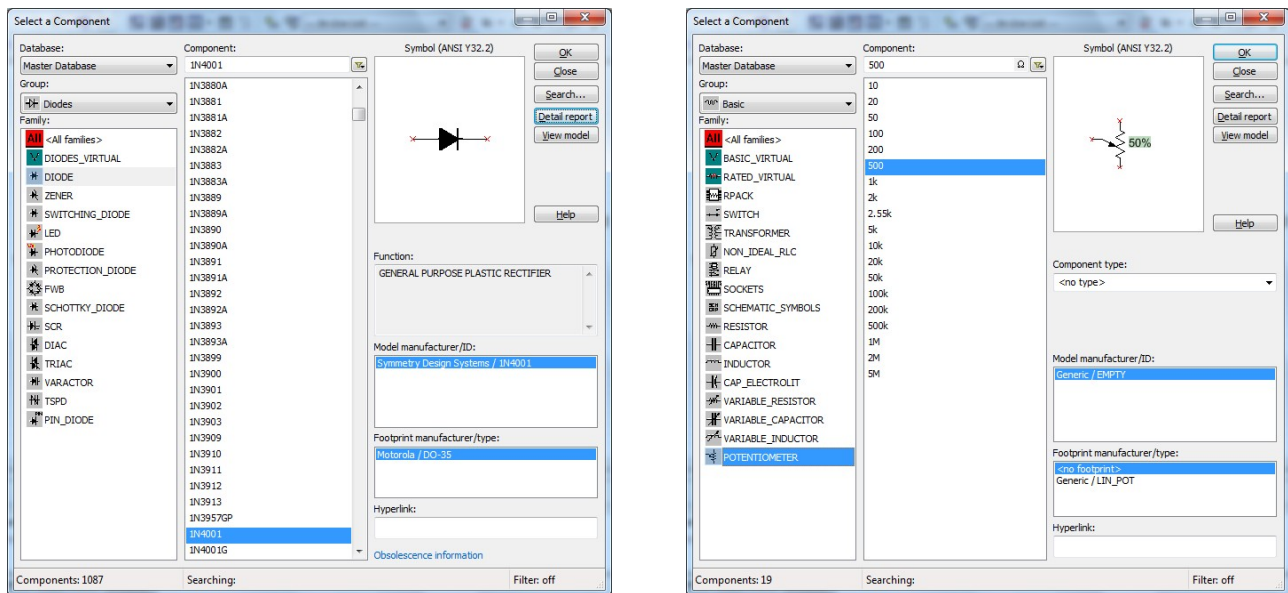



Рис.2.

Діод 1N4001 на рис.1 і далі вказано як приклад. Для виконання роботи можна вибрати будь який з доступного списку компонентів.

Для вимірювання струмів і напруг можна використати відповідні індикатори з групи *Indicators*, які можна знайти через загальне меню вибору компонентів або відразу викликати натиснувши відповідну кнопку на панелі елементів . Також можна замість індикаторів використовувати віртуальні вимірювальні прилади з панелі інструментів, наприклад, мультиметр (рис. 3).

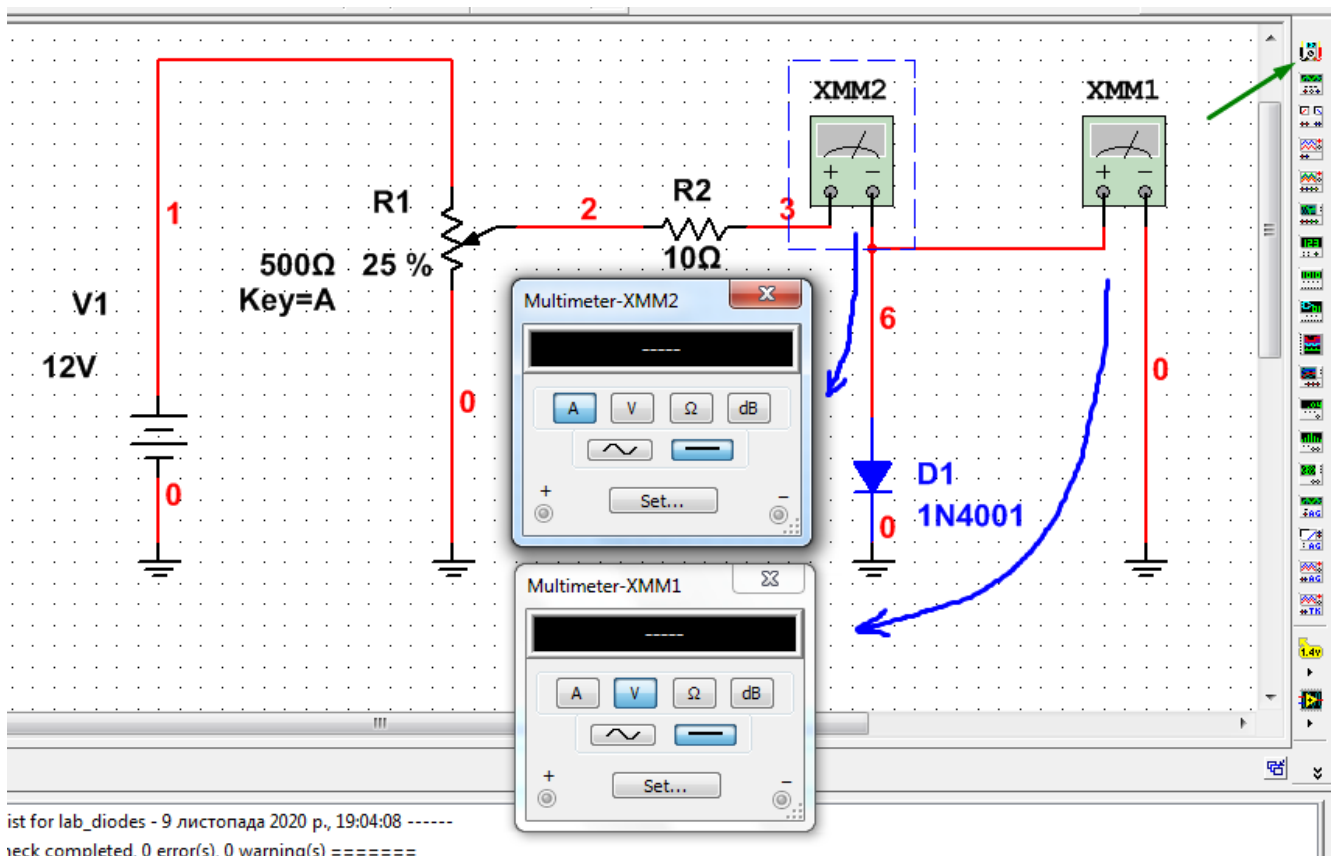


Рис. 3

Мультиметр ХММ1 має працювати в режимі вольтметра, а ХММ2 – амперметра. Для встановлення режиму слід двічі клацнути на позначенні мультиметра. Тоді з'явиться вікно його налаштування та зняття показів. У цьому вікні слід вибрати кнопку А (амперметр) чи V (вольтметр) та кнопку з відрізком прямої лінії – вимірювання постійного струму.

2. Для вимірювань необхідно запустити режим інтерактивного моделювання, який можна увімкнути, натиснувши у панелі інструментів кнопку із зеленим трикутником (Run), або F5 на клавіатурі. Після цього у вікнах мультиметрів з'являться покази (виміряне значення струму та напруги).

Резистор R1 працює як дільник вхідної напруги. Таким чином, змінюючи у реальному часі положення повзунка резистора можна змінювати напругу, прикладену до діода та, відповідно, і струм, що проходить крізь нього (рис. 4). Для того, щоб повзунок з'явився, необхідно навести курсор на номінал резистора. Його положення можна регулювати захопивши курсором, або за допомогою клавіатури – відповідна клавіша задається у властивостях елемента як параметр Key на вкладці Value, там же можна зменшити крок Increment для більш плавного регулювання (рис. 5). Для зсуву ліворуч, разом з гарячою клавішею необхідно затиснути Shift.

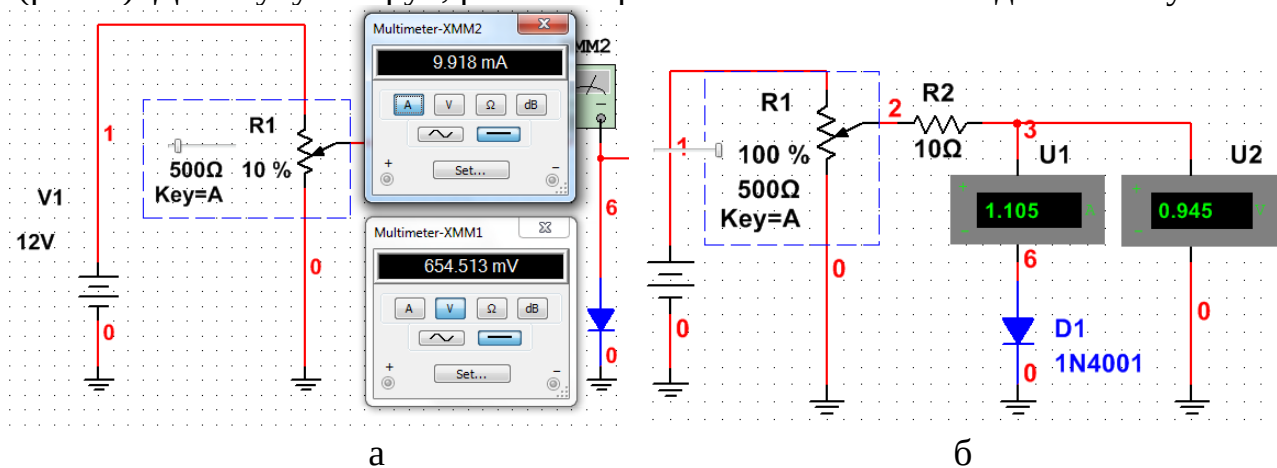


Рис.4.

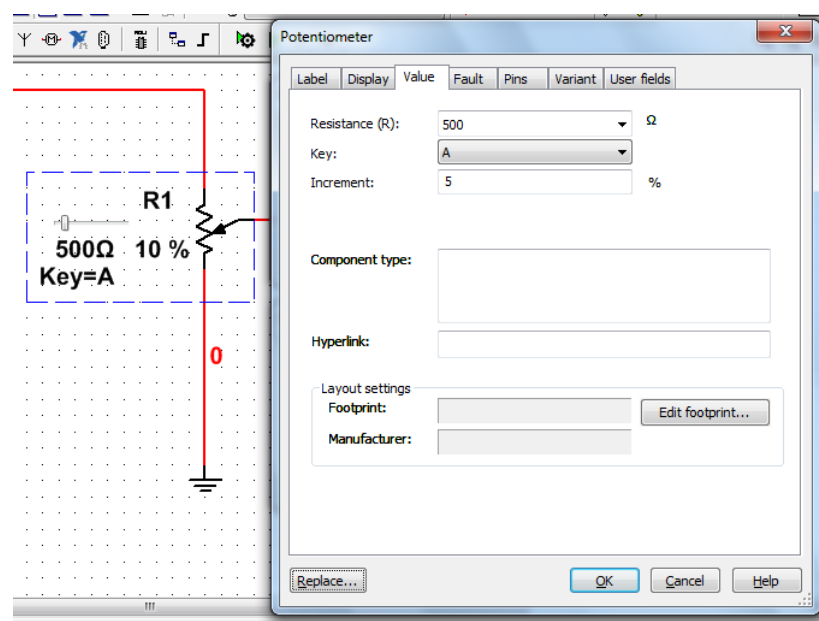


Рис. 5.

Отже, для побудови прямої гілки вольт-амперної характеристики у режимі інтерактивної симуляції змінюйте положення повзунка потенціометра R1 та зберігайте пари значень напруга-струм у таблиці (MS Excel, Calc з пакету Libre Office чи Open Office, Google Spreadsheets тощо). Вимірювання струму доцільно проводити у межах 1...1000 мА, напруги – до 1 В. Точки на графіку мають розташовуватись рівномірно, тоді для побудови графіку може бути достатньо десяти точок.

3. Порівняйте значення прямої напруги на діоді із паспортними характеристиками, які можна знайти у Інтернеті. Номінальне значення прямого струму для деяких діодів та величину напруги пробою можна подивитись у полі *Function* при виборі елементів: так, для 1N5404RLG це, відповідно 3 А та 400 В (рис.6). Для діодів зі номінальним прямим струмом більшим за 1А параметри елементів вимірювальної схеми на рис.1 слід змінити, наприклад, збільшити напругу джерела V1 чи зменшити опір R2 до значень, за яких при 100% положенні повзунка потенціометра R1 величина наскрізного струму через діод буде дещо перевищувати номінальне значення (найкраще – досягати максимального допустимого значення).

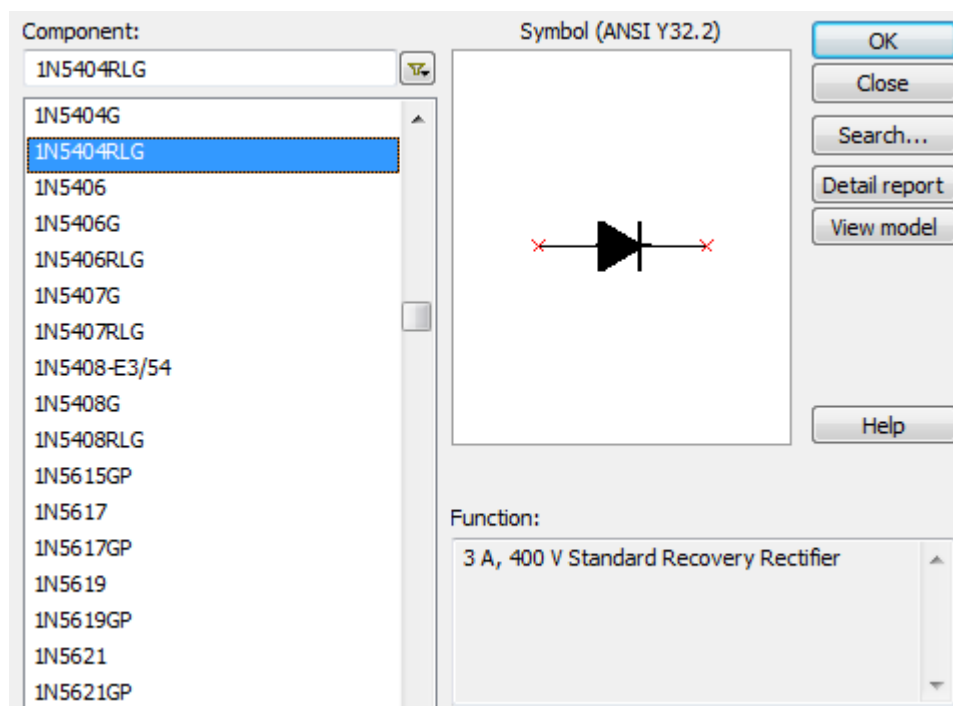


Рис. 6.

4. Для побудови зворотної гілки вольт-амперної характеристики необхідно змінити полярність увімкнення діоду чи джерела V1 (рис. 7). Крім того, величину напруги живлення схеми та опір резистора R2 слід збільшити, принаймні, на порядок. Вимірювання проводити до настання пробою. Якщо ж при максимальному значенні напруги на діоді не спостерігається суттєвого зростання струму, треба ще збільшити величину напруги V1 – воно має дещо перевищувати максимальне паспортне значення оберненої напруги. Якщо аж до настання пробою значення зворотного струму залишається рівним нулю (а фактично – менше 1 нА, це можливо для деяких діодів), то для її точного то слід побудувати вольт-амперну характеристику слід скористатись віртуальним приладом *IV analyzer*. Принцип його застосування описано у наступному розділі.

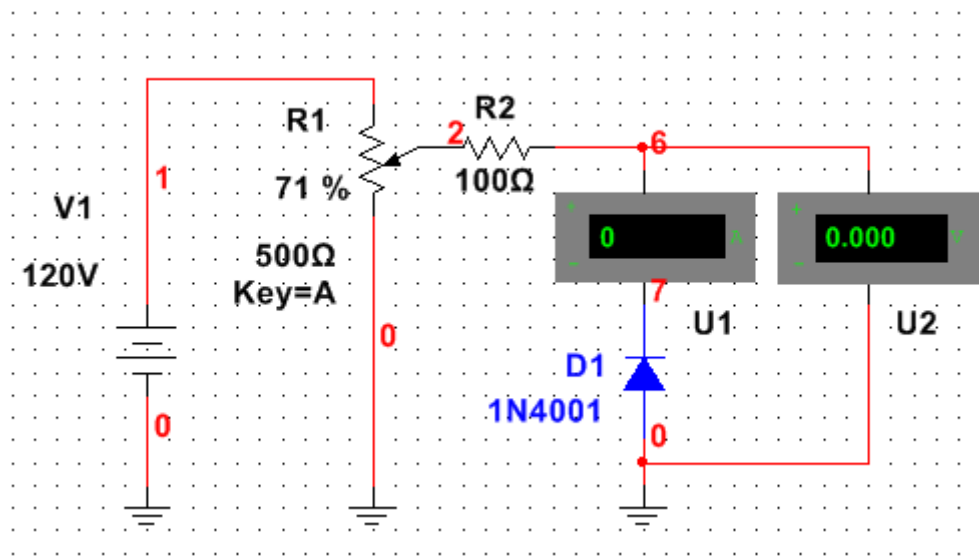


Рис. 7.

5. З отриманого графіку визначте величини зворотного струму і напруги пробую та порівняйте з паспортними даними.

У вищенаведеному випадку величину зворотного струму можна оцінити і з прямої гілки вольт-амперної характеристики діода. Дійсно, оскільки струм через діод визначається рівнянням Шоклі як $I_d = I_0 (\exp(eV_d/nkT) - 1)$, де I_0 – струм насичення, обумовлений неосновними носіями. I_0 , фактично, і є максимальним зворотним струмом діода (без урахування пробую), тому його величину можна визначити шляхом лінеаризації залежності $\ln(I_d) = f(V_d)$ (рис. 8). Видно, що з цієї залежності можна також знайти коефіцієнт неідеальності діода n .

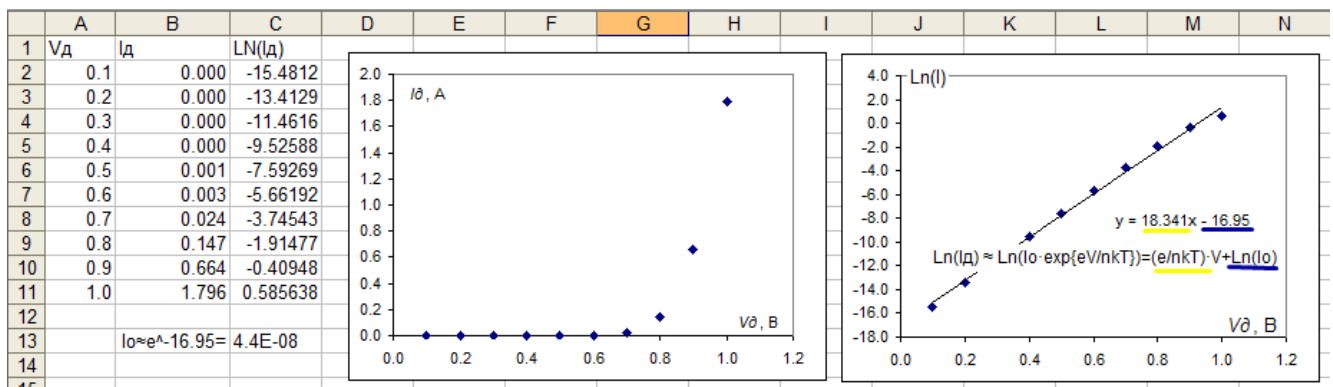


Рис. 8.

Будьте уважні – при логарифмуванні струму I_d його значення мають бути лише додатніми!

6. Складіть схему найпростішого випрямлювача напруги (рис. 9).

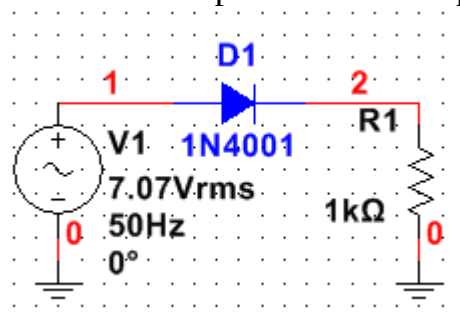


Рис. 9.

Проведіть аналіз сигналу за часом *Transient analysis*. Час аналізу обмежте кількома періодами ($TSTOP = N / f$, де N – бажана кількість періодів, f – частота змінної напруги). На вкладці *Output* задайте змінні, які б ви хотіли подивитись – напругу на вході (тобто, на вузлі 1 у даному прикладі) $V(1)$ та напругу на виході $V(2)$ (тобто, напругу на вузлі 2).

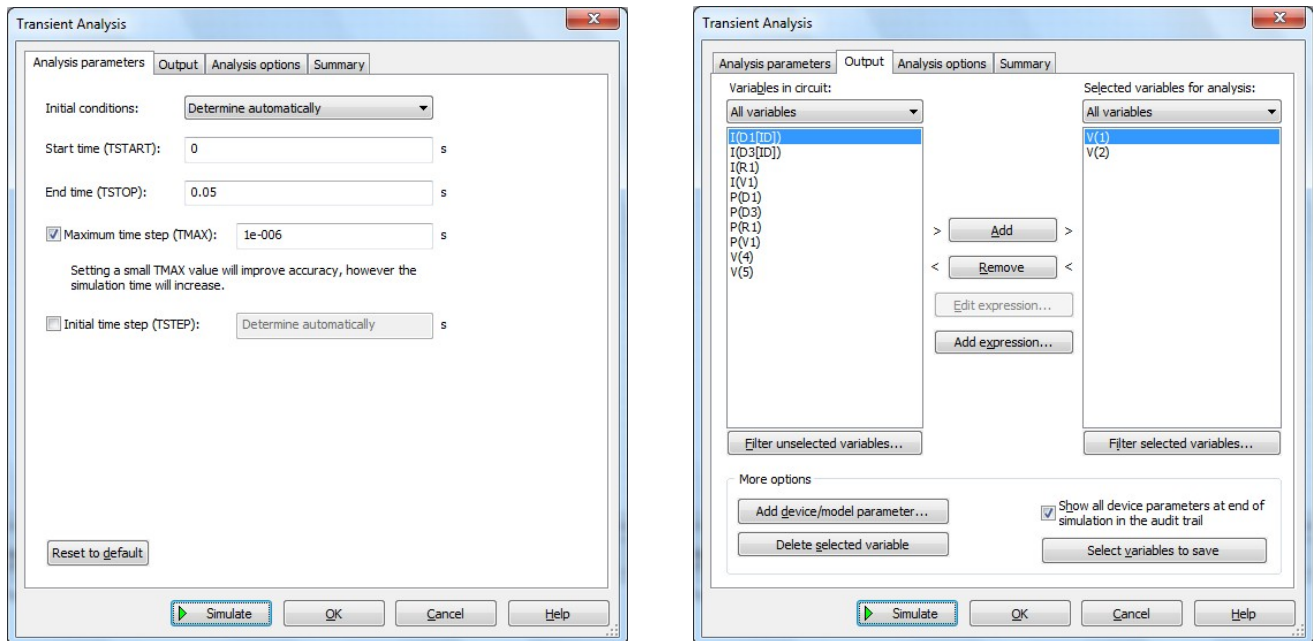


Рис. 10.

Кнопка *OK* лише зберігає налаштування симуляції, для її запуску слід натиснути кнопку *Simulate*. Результат симуляції представляється у вигляді графіка. За допомогою курсорів можна визначити миттєві значення вимірної величини.

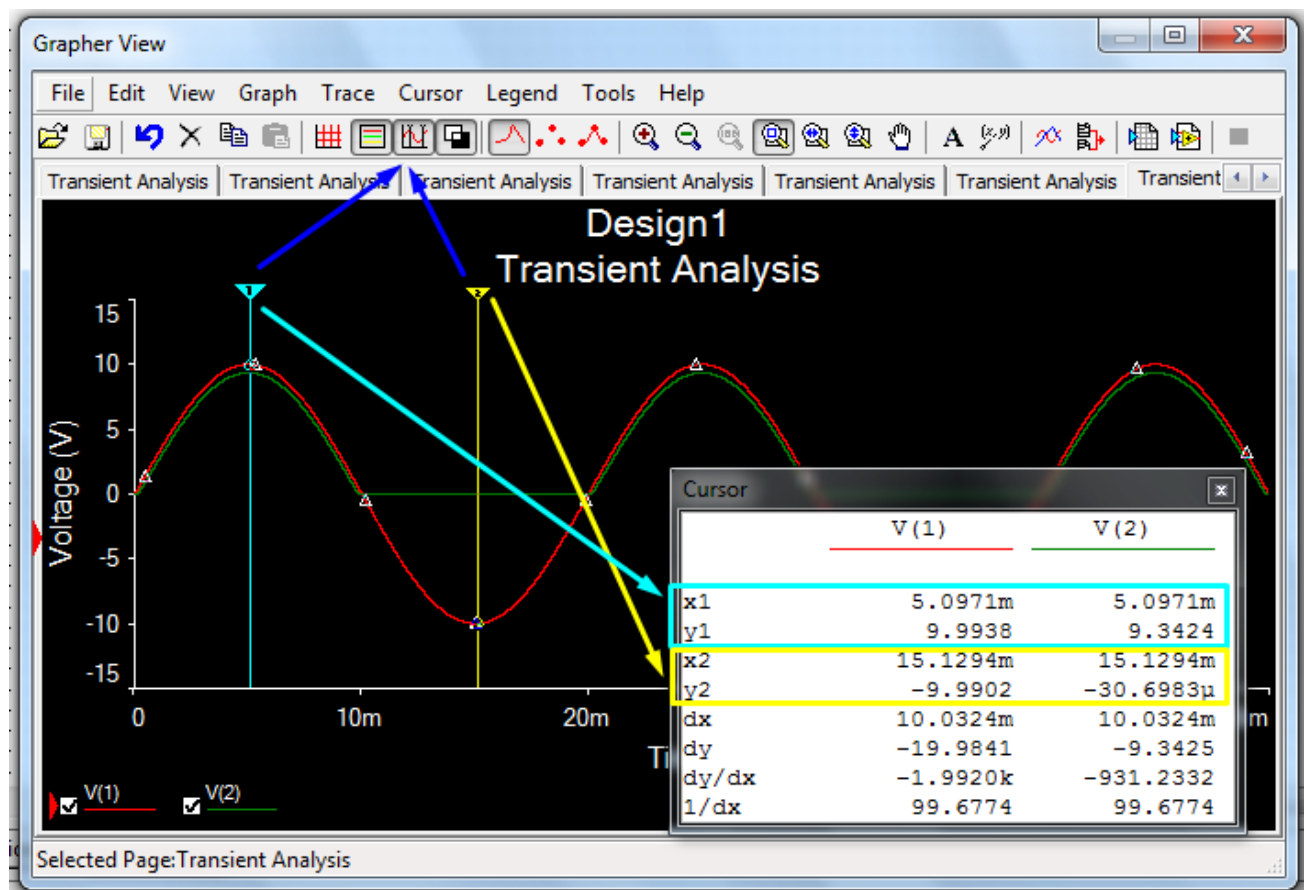


Рис. 11.

Зверніть увагу, що при від'ємному напівперіоді вхідної напруги V(1) напруга на резисторі R1 V(2) буде фактично нульовою. Дійсно, за законом Ома $U_{R1}=R1 \cdot I_{R1}= R1 \cdot I_d$, а струм через діод у цей напівперіод майже нульовий.

7. Поступово збільшуючи частоту напруги (можна у 10 разів з кожним кроком) оцініть, до якої межі заданий діод зберігає випрямляючі властивості, тобто діод не буде встигати перемикатись і напруга на виході також буде приймати від'ємні значення (рис. 12). Не забувайте пропорційно збільшенню частоти джерела зменшувати час симуляції TSTOP.

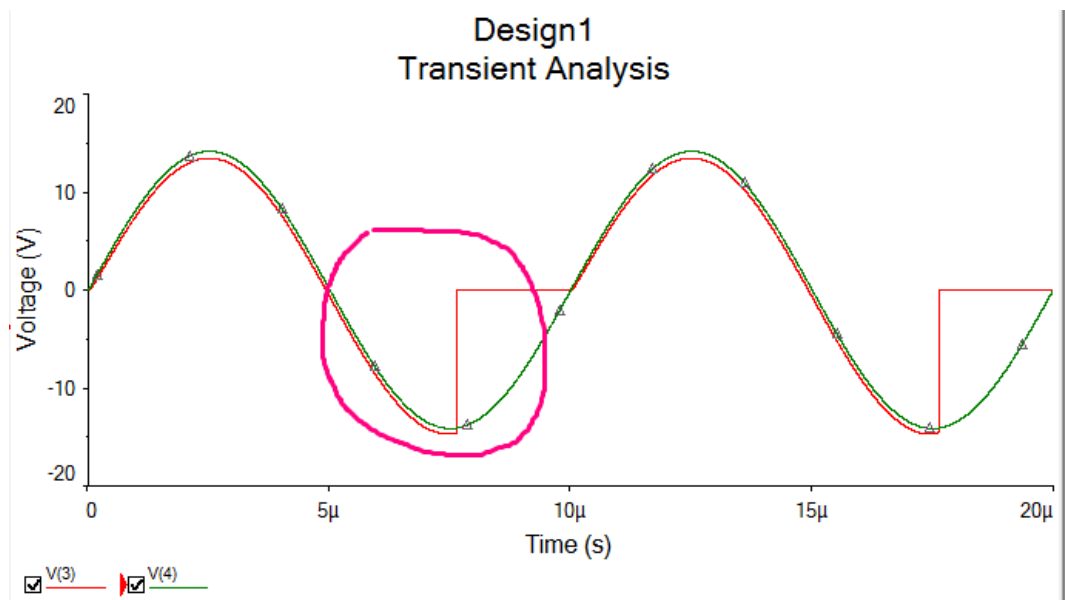


Рис. 12.

При досягненні частоти, коли діод втрачає випрямляючі властивості, спробуйте замінити його на діод Шоткі (SCHOTTKY_DIODE). Порівняйте результати.

2. Дослідження стабілітронів.

1. У програмі Multisim вольт-амперну характеристику напівпровідникових елементів також зручно одержувати за допомогою віртуального приладу *IV analyzer* (рис. 13). У полі Components має бути вказано тип приладу – Diode. Діод, що досліджується, під'єднується до відповідних входів згідно підказці внизу вікна приладу. У меню Simulate param. слід обрати межі моделювання так, щоб у них потрапив робочий діапазон приладу. Після запуску моделювання (Simulate>Run, або F5) можна змінювати границі діапазону відображення вольт-амперної характеристики: по вертикалі – для струму (*Current range*), від I(nitial) до F(inal), по горизонталі – для напруги (*Voltage range*). Відносно заданих за замовчанням їх доцільно зменшити: до одиниць ампер чи навіть десятків-сотень міліампер для струму, і від напруги пробою (для випрямних діодів) чи стабілізації (для стабілітронів) до максимального значення прямої напруги (з деяким запасом) для напруги.

Результати моделювання можна зберегти у кілька способів. По-перше, можна зберігти графік як знімок екрану, попередньо встановивши відповідні межі діапазону вимірювань. По-друге – вручну занести до таблиці пари значень струм-напруга, які відображуються внизу вікна приладу, пересуваючи по графіку курсор у вигляді вертикальної лінії, безпосередньо затиснувши його лівою кнопкою мишки, чи покроково, натискаючи стрілки під графіком.

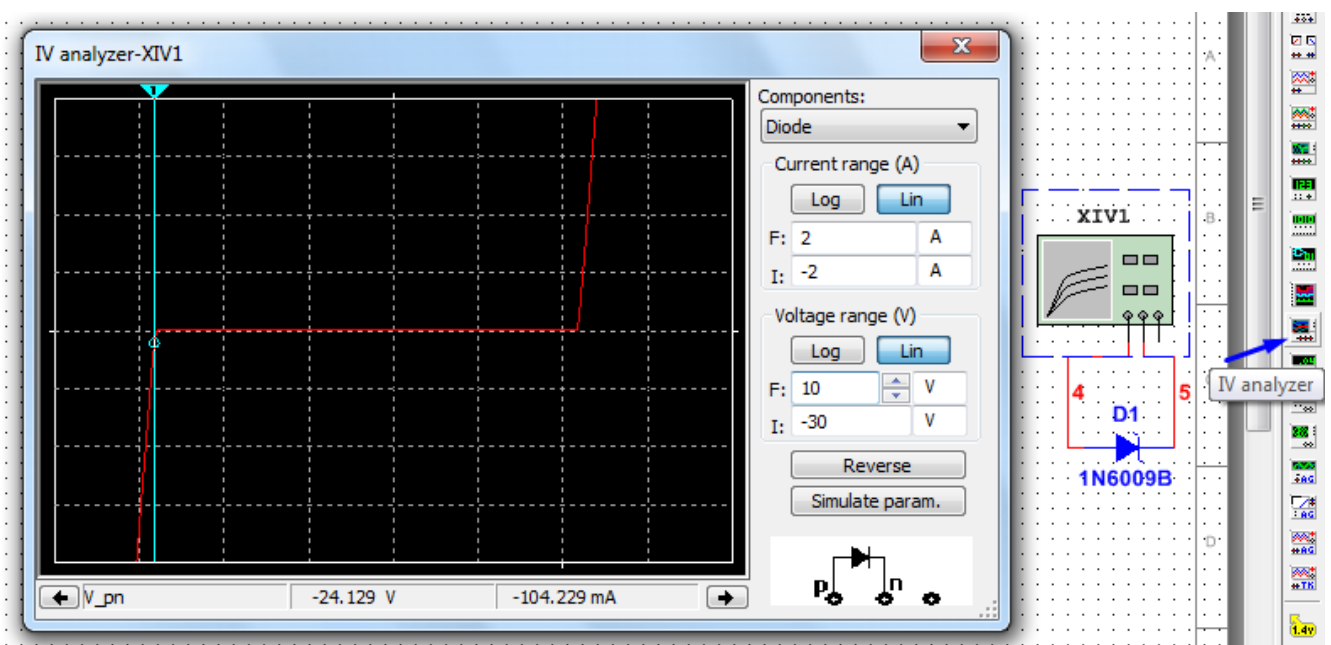


Рис. 13.

Найбільш повне представлення можна отримати у вигляді файлу з парою стовбців напруга-струм. Для цього необхідно спочатку запустити модуль *Grapher* (кнопкою на головній панелі або через меню View > Grapher) і у його вікні вибрати відповідну команду (рис.14). Зверніть увагу, що у цьому вікні представлені результати моделювання у діапазоні і з кроком, задані у меню Simulate param., тому графік може мати дещо дивний вигляд зі значеннями струмів навіть у гігаампери, оскільки для більшості моделей не передбачено руйнування по досягненню граничних значень струмів чи напруг реальних елементів.

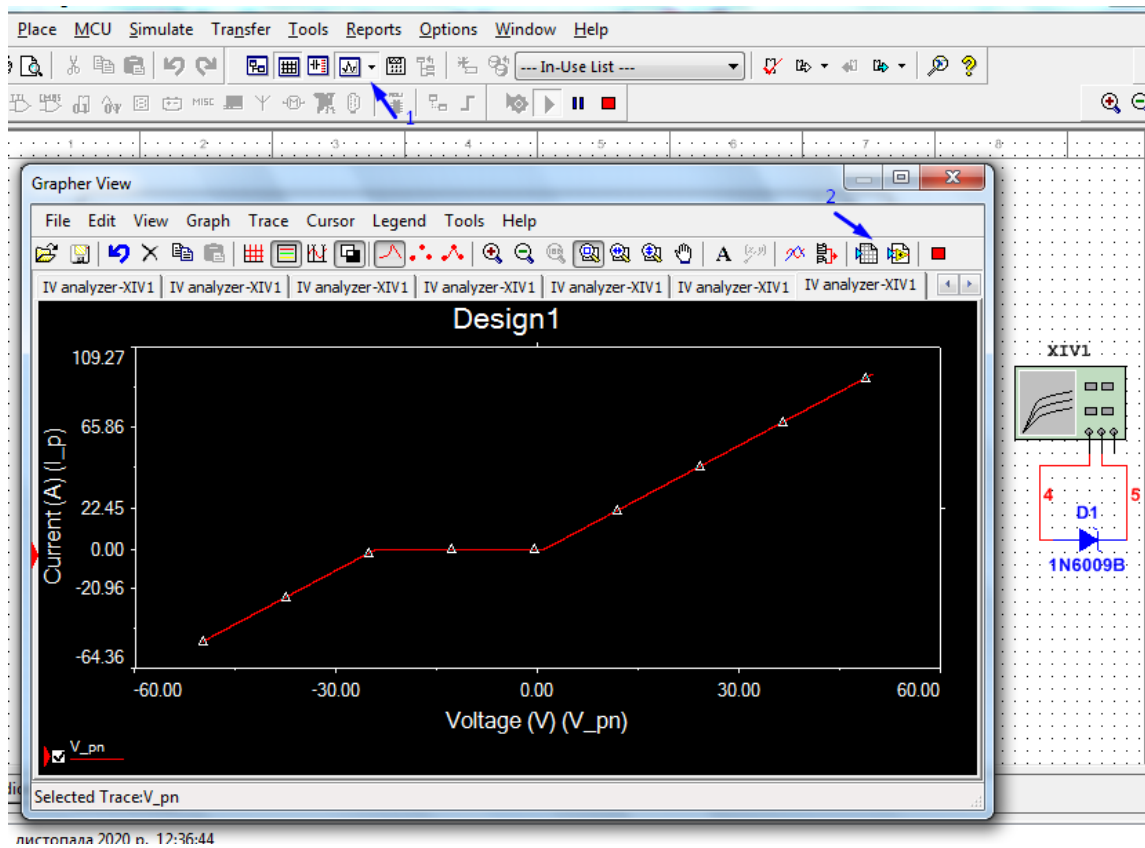


Рис. 14.

За таким графіком достатньо легко за допомогою курсорів визначити зокрема омичний чи диференційний опір радіоелемента у заданій робочій точці. Так, для стабілітрона з прикладу при струмі 500 мА диференційний опір дорівнюватиме $r_d = du/di = 1 / (dy/dx) = 0,55 \text{ Ом}$ (рис. 15). Для визначення ж омичного опору слід один з курсорів розмістити у точці (0;0); тоді для даного прикладу одержимо значення $R = U/I = 1 / (dy/dx) = 1/ 38\text{m} = 26 \text{ Ом}$.

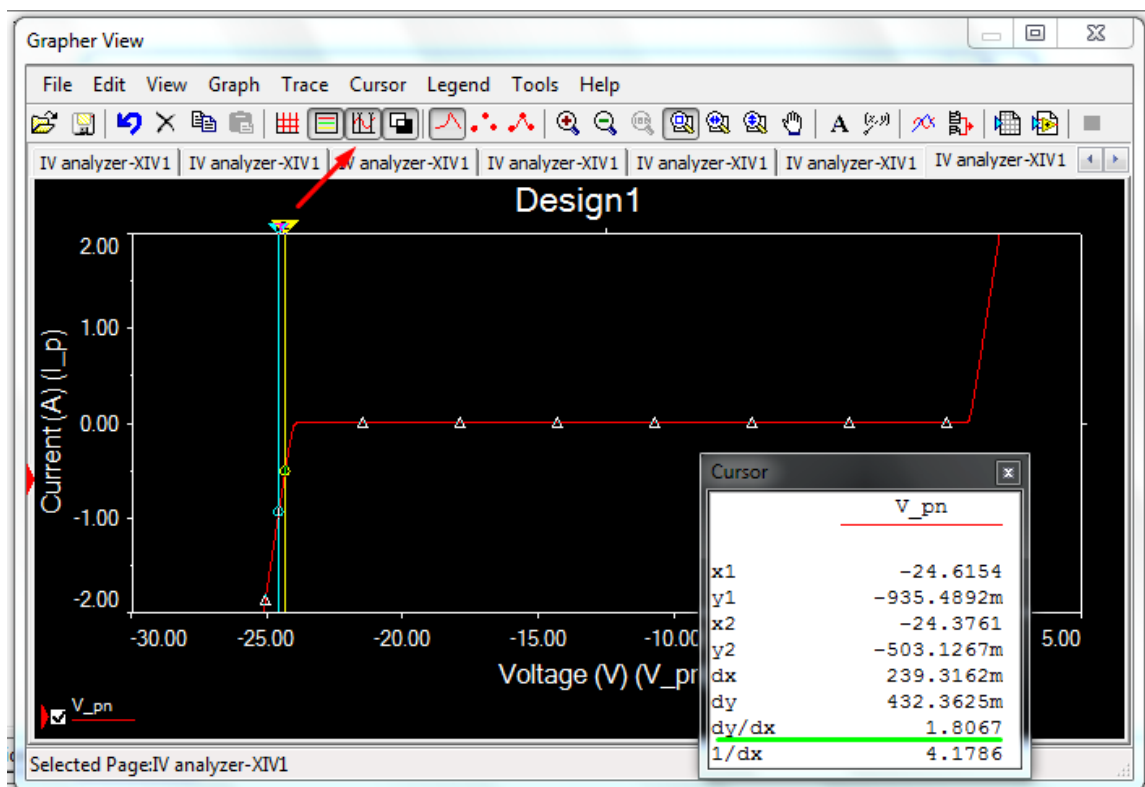


Рис. 15.

2. Отже, для заданого стабілітрона за допомогою IV analyzer'а визначте напругу стабілізації, а також омичний та диференційний опір для номінального значення струму стабілізації. Вимірювання та розрахунки проведіть або безпосередньо у вікні приладу підчас інтерактивної симуляції, або ж у пост-обробці за допомогою модуля Grapher. Значення струму стабілізації, як і у першому розділі, знайдіть з паспортних даних у Інтернеті.

3. Складіть схему параметричного стабілізатора напруги (рис. 16). У параметрах джерела змінної напруги AC Power V1 задайте постійну складову напруги *Voltage offset* дещо більшою за напругу стабілізації, середньоквадратичну величину коливань *Voltage (RMS)* порядку десятих долей Вольт (не більше 1В), опір резистора R розрахуйте за законом Ома: $R = (V_1 - V_{CT}) / I_{CT}$.

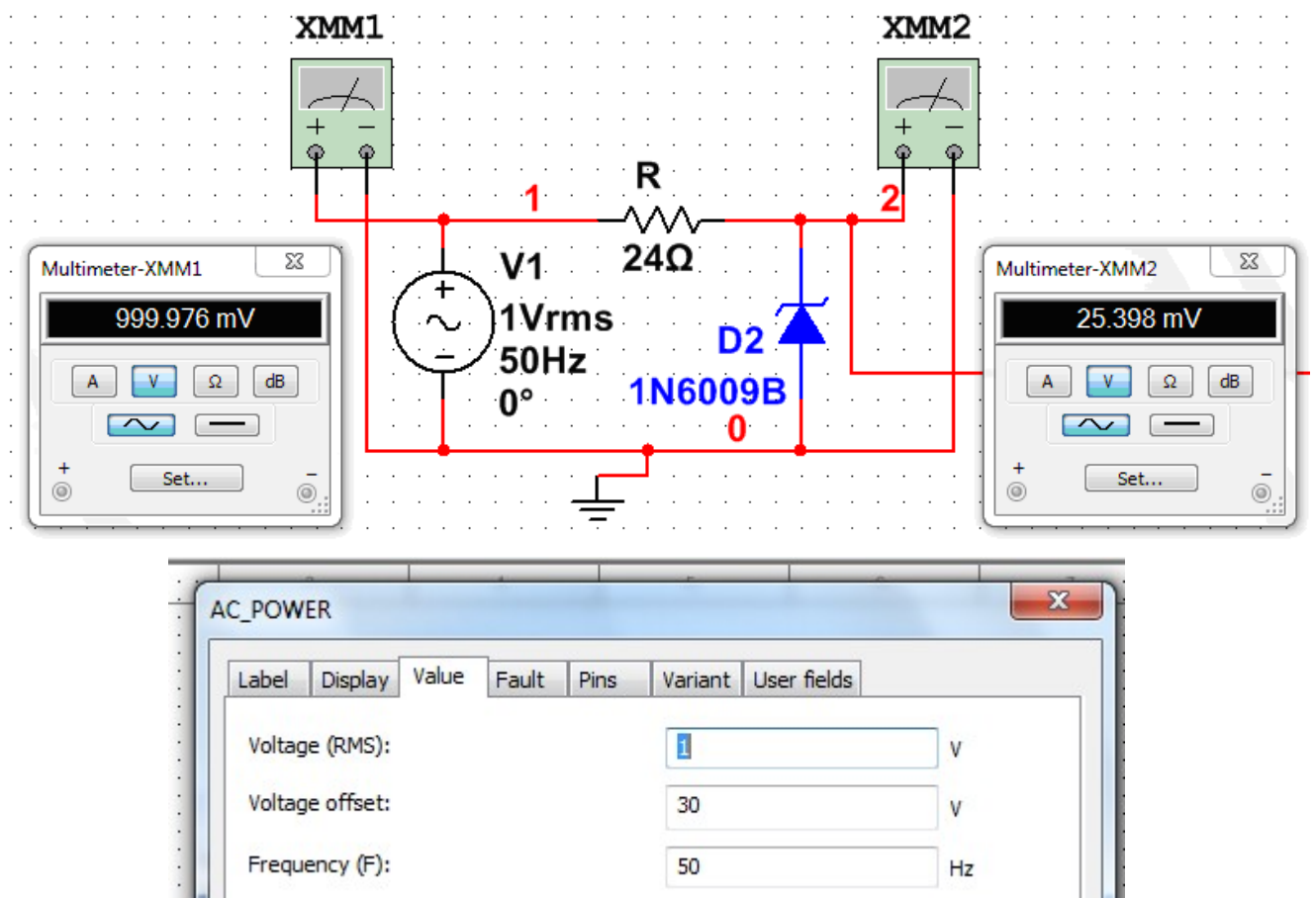


Рис. 16.

Встановивши на мультиметрах режим вимірювання змінної напруги, розрахуйте коефіцієнт стабілізації як відношення відносних приростів напруг на вході і на виході:

$$k_{CT} = (\Delta U_{BX} / U_{BX}) / (\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}) = (V1_{RMS} / V1_{offset}) / (V_{XMM2 RMS} / V_{CT}).$$

Порівняйте це значення з теоретичним:

$$k_{CT} = \frac{R + r_d}{r_d} \cdot \frac{R_o}{R + R_o},$$

де R_o – омичний опір стабілітрона, r_d – диференційний.

Варто слід зауважити, що оскільки задаються і вимірюються діючі значення змінної складової напруги, то $\Delta U_{\text{BX}} = \sqrt{2} \cdot V_{1\text{RMS}}$, $\Delta U_{\text{ВІХ}} = \sqrt{2} \cdot V_{\text{XMM2 RMS}}$, але множники-корні скорочуються. Якщо все ж таки є бажання мати справу з амплітудними значеннями величин, то можна використати інші віртуальні прилади: як джерело змінної напруги – генератор *Function generator*, а замість мультиметрів осцилограф *Oscilloscope* (рис.17).

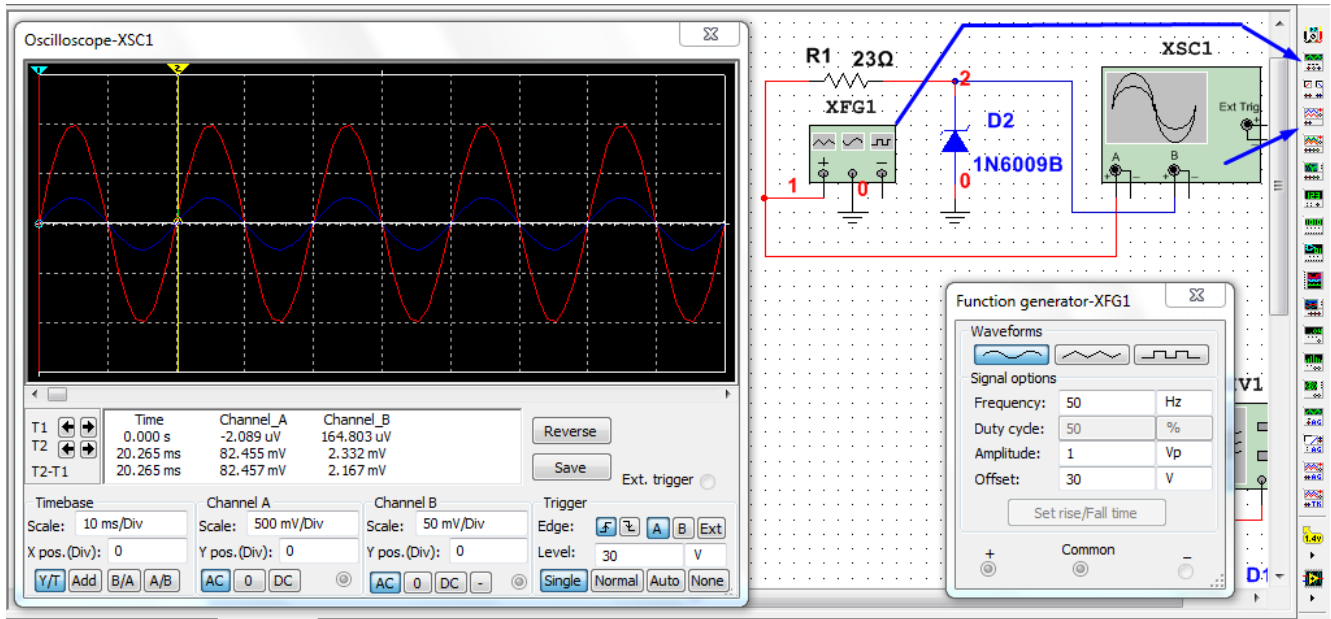


Рис. 17.

4. Одержіть ті самі залежності для схеми на рис. 12 за допомогою аналізу сигналу за часом *Transient analysis*. Час аналізу обмежте кількома періодами (TSTOP = N / f, де N – бажана кількість періодів, f – частота змінної напруги). На вкладці *Output* задайте змінні, які б ви хотіли подивитись – напругу на вході (тобто, на вузлі 1 у даному прикладі) V(1) та напругу на виході V(2) (тобто, напругу на вузлі 2).

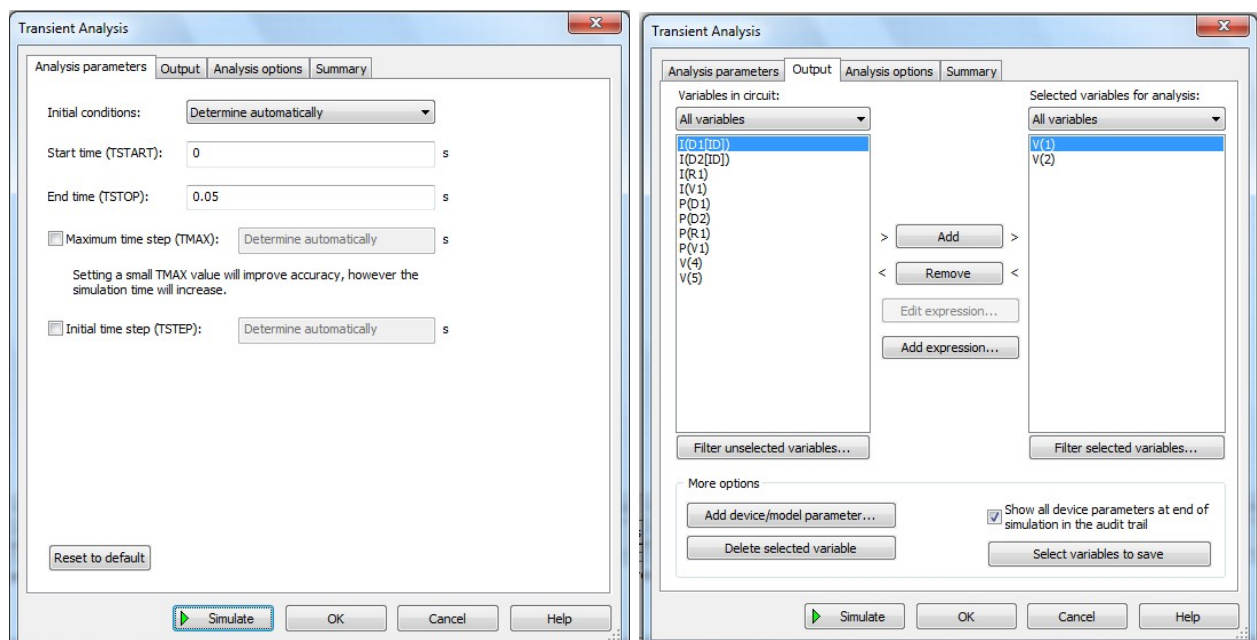


Рис. 18.

5. Пакет Multisim дозволяє провести дослідження, аналогічні наведеним у пп. 1.1–1.4 та 2.1, також в інший спосіб, у якому напругу (чи струм) вхідного джерела можна змінювати автоматично та досліджувати залежність напруг і струмів на елементах кола від цього вхідного значення. Таке моделювання можна провести, вибравши у головному меню Simulate розділ Analyses, і в ньому пункт DC Sweep.

У формі, що відповідає цьому режимові моделювання, слід спочатку задати, у яких межах і з яким кроком змінюватиметься напруга джерела. Все це встановлюється у першій закладці цієї форми (Analysis parameters):

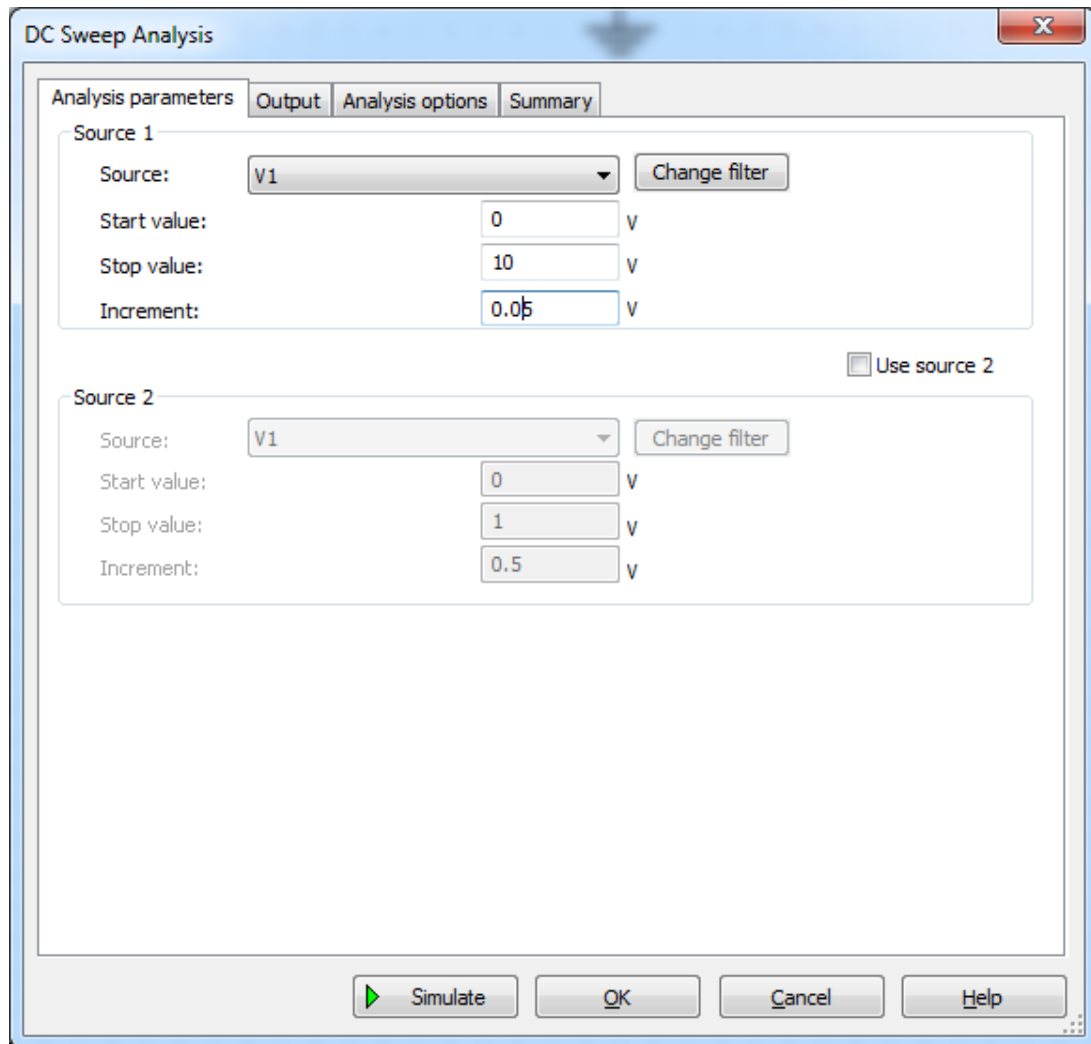


Рис.19

У даному випадку встановлено, що змінним джерелом (Source 1) є джерело V1 (у випадку, якщо коло містить декілька джерел, змінним можна зробити будь-яке з них, вибравши його у спадному меню Source). Також встановлено, що напруга джерела змінюватиметься від (Start Value) 0 В до (Stop Value) 10 В. Слід відзначити, що встановлена раніше напруга цього джерела (12В, рис.4) у цьому режимі на моделювання не впливатиме, і напруга дійсно змінюватиметься від 0 до 10 Вольт. Крок напруги V1, із яким будуть проводитися розрахунки (Increment), встановлений у 0.05 В (50 мВ).

Також обов'язково слід встановити, для якої вихідної величини ми проводимо моделювання. Саме залежність цієї величини від напруги джерела ми і отри-

маємо як результат. Для вибору вихідної величини служить наступна закладка (Output, рис.16).

У лівому вікні цієї закладки (Variables in circuit) наведено список величин (напруг, струмів, потужностей) на різних елементах схеми. Для кожної з цих величин ми можемо отримати графік її залежності від вхідної напруги V1. Напруги в цьому списку мають вигляд V(n), де n – номер вузла, а значення напруги дається відносно нульового вузла, яким завжди є заземлення. Струми та потужності ж виглядають як I(e) та P(e), де e – найменування елемента схеми, на якому ми розглядаємо струм чи потужність.

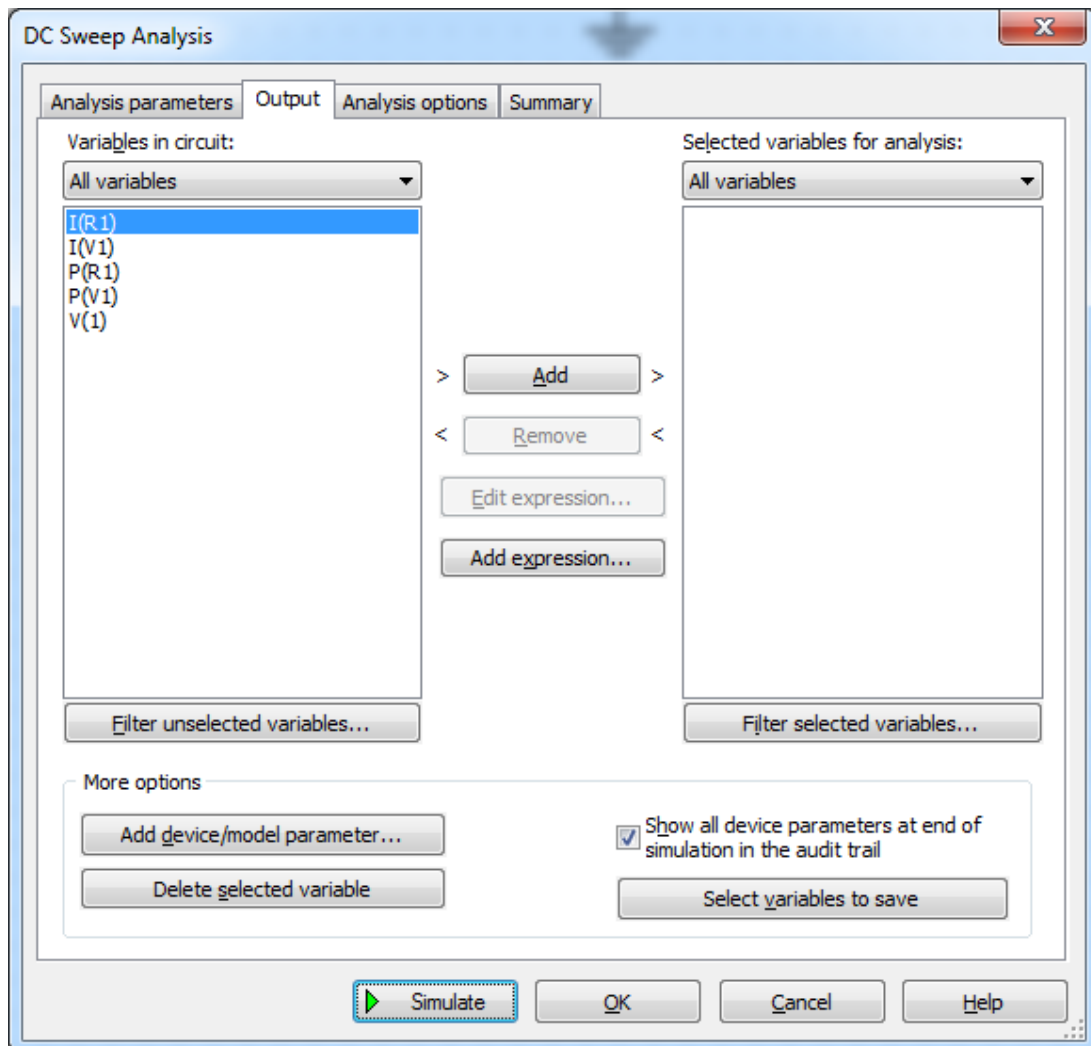


Рис.20

Контрольні питання

1. Які напівпровідникові матеріали використовують для виготовлення напівпровідникових електронних приладів?
2. Що таке домішковий напівпровідник, напівпровідник n-типу, p-типу?
3. Якою домішкою буде алюміній для кремнію - донорною чи акцепторною? Поясніть чому.
4. Що називають основними та неосновними носіями зарядів в напівпровіднику?
5. Чи існує збіднений шар на границі p-n-переходу, якщо зовнішня різниця потенціалів рівна нулю?
6. Що таке зворотний струм p-n-переходу, чим він обумовлений та як він залежить від температури?
7. В чому різниця між омичним та диференціальним опорами відкритого p-n-переходу? Який з них більше?
8. Що таке бар'єрна ємність p-n-переходу? Як вона залежить від знаку та величини прикладеної напруги?
9. Що таке пробій p-n-переходу? Опишіть основні фізичні процеси, які можуть обумовити це явище.
10. Що називають напівпровідниковим діодом?
11. Яка властивість p-n-переходу використовується для побудови випрямляючих діодів? Чим відрізняються низькочастотні випрямляючі діоди від високочастотних?
12. Перелічіть основні параметри, якими характеризуються випрямляючі діоди. Порівняйте за цими параметрами германієві та кремнієві випрямляючі діоди.
13. Яке фізичне явище лежить в основі роботи стабілітрона? Чим відрізняється стабістор від стабілітрона? Порівняйте ці прилади.
14. Яке фізичне явище лежить в основі роботи варикапа? Як залежить величина ємності варикапа від величини та полярності прикладеної напруги?
15. Які основні особливості вольт-амперної характеристики тунельного діода? У якій області частот знаходять застосування тунельні та обернені діоди? З якою метою?