

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ18

## Вивчення електричних кіл постійного струму з нелінійними елементами

### 18.1. Мета роботи

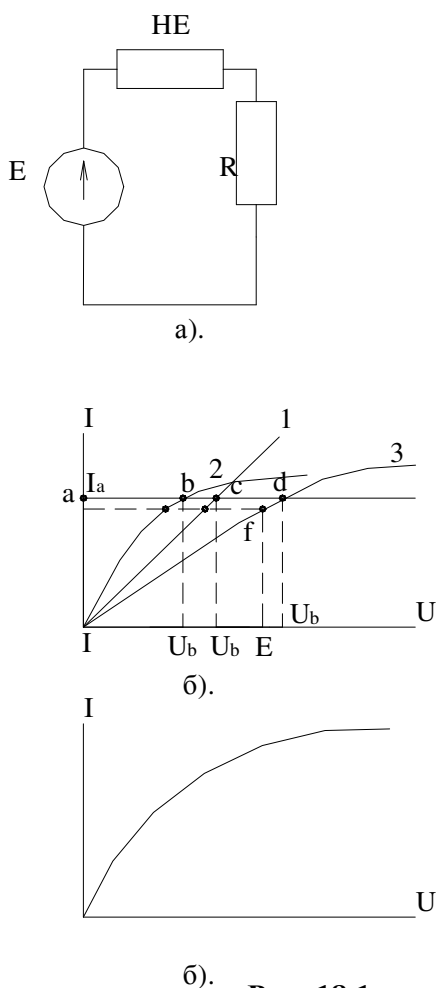
Вивчення особливостей експериментальних досліджень ВАХ нелінійних елементів та розрахунку електричних кіл при наявності лінійних і нелінійних опорів із послідовним і паралельним їх з'єднанням.

### 18.2. Основні теоретичні положення

До нелінійних електричних кіл належать такі, в яких містяться нелінійні електричні елементи (НЕ). *Нелінійними елементами називаються такі, вольт-амперна характеристика (ВАХ) яких в робочому діапазоні напруг або струмів має нелінійний характер.* В електротехніці всі електричні компоненти можуть бути нелінійними. Більш того, всі напівпровідникові електронні компоненти є нелінійними. ВАХ НЕ можуть бути симетричними відносно початку координатних осей і несиметричними.

Нелінійні елементи дають змогу реалізувати процеси, що не можуть проходити у лінійних колах. Наприклад, дозволяють стабілізувати напругу та струм, підсилювати струм та інше. Нелінійні елементи бувають керованими та некерованими. Некеровані елементи працюють без впливу керуючого чинника (напівпровідникові діоди, термістори та інше). Керовані елементи працюють під впливом керуючих чинників (транзистори, тиристори та інше). Некеровані елементи мають одну вольт-амперну характеристику, керовані – сім'ю характеристик. Параметром цих характеристик є керуючий чинник.

Нелінійні кола розраховують, як правило, графічним методом, за яким струм та напруга кола визначаються по вольт-амперним характеристикам елементів, що входять у коло, або з використанням ЕОМ, якщо функціональна залежність задається у вигляді таблиці, або в аналітичній формі. Розглянемо наглядний приклад графічного вирішення задач.



б). **Рис. 18.1.**

З'єднання нелінійного елемента (НЕ) і лінійного резистора ( $R$ ). На рис.18.1а наведена схема з'єднання з джерелом живлення  $E$ , а на рис.18.1б – ВАХ лінійного 1 і

нелінійного елементів. Один з способів розв'язання задачі полягає в тому, що будується загальна ВАХ послідовно з'єднаних елементів, виходячи з тої умови, що при послідовному з'єднанні струм через лінійний і нелінійний елементи протікає однаковий. В результаті напруга, що прикладається від джерела, розподіляється між нелінійним елементом та лінійним. Тому побудова загальної ВАХ полягає в тому, що при обраному струмі  $I_a$  напруга  $U_d$  загальної характеристики знаходиться з формули:

$$U_d = U_b + U_c$$

Після побудови характеристики з легко визначити струм, що протікає в колі при будь-якій прикладеній напрузі. Для цього необхідно лише з точки  $e$ , що лежить на осі напруги і відповідає напрузі зовнішнього джерела підняти перпендикуляр до перетину з загальною характеристикою. Перетин перпендикуляра з точки  $f$  на вертикальну вісь дає можливість встановити величину струму в колі, а відповідні перетини з характеристиками елементів – падіння напруги на кожному з них.

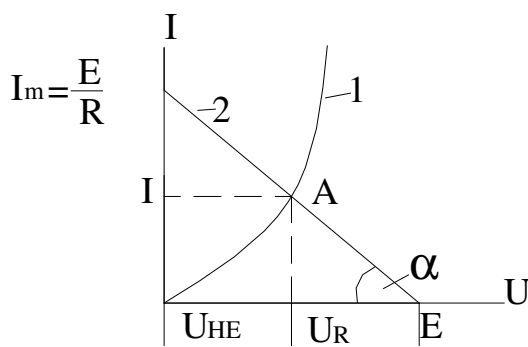


Рис. 18.2.

напруг в точці з координатами  $U=E$ ;  $I=0$ , а вісь струму – в точці з координатами:

$$I = \frac{E}{R}; \quad U=0 \quad (\text{Рис.18.2, лінія 2})$$

Кут  $\alpha$  нахилу визначається з співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E/R}{E} = \frac{1}{R} = \frac{I_A}{U_R}$$

Тому точка  $A$  дає можливість визначити як струм, що протікає через елементи, так і падіння напруг на активному опорі і нелінійному елементі.

З уже відомих методів розрахунку електричних кіл до розрахунку нелінійних кіл можна використовувати наступні: метод двох вузлів, заміна декількох паралельно ввімкнених гілок однією еквівалентною, метод еквівалентного генератора.

Інший спосіб обчислення параметрів електричного кола полягає в наступному: виходячи з другого закону Кірхгофа для кола з послідовно з'єднаними елементами маємо:

$$E = U_{HE} + U_R,$$

або

$$U_{HE} = E - U_R = E - IR \quad (1)$$

Останнє рівняння представляє собою рівняння прямої лінії, яка перетинає вісь

Аналогічно виконуються обчислення при послідовному з'єднанні двох і більшої кількості НЕ. В таких випадках спочатку з допомогою графічних побудов знаходиться ВАХ двох НЕ і т.п.

При наявності лише нелінійних елементів в послідовному колі можна використовувати й інший спосіб графічних обчислень.

З формули (1) і схеми на рис.18.3а витікає:

$$U_{He1} = E - U_{He2} \quad (2)$$

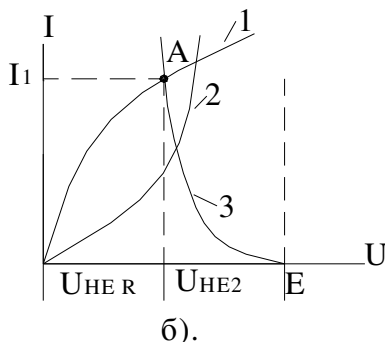
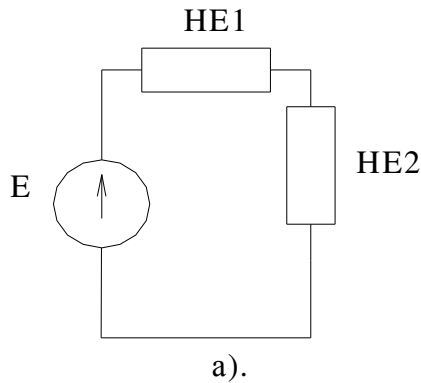
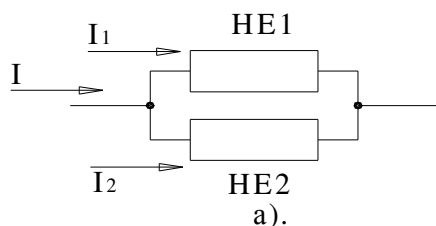


Рис. 18.3.

Так як  $U_{He1} = f(I)$ ;  $U_{He2} = f(I)$ , то точка А перетину кривих  $U_{He1}(I_1)$ ;  $E - U_{He2}(I)$  дає нам параметри, які ми шукаємо. Для побудови залежної  $E - U_{He2}(I)$  необхідно перенести початок координат кривої 2 осі напруг в точку E, а потім зробити її дзеркальне відображення (Рис.18.3б).

Якщо в складній електричній схемі маємо гілку з нелінійним опором, то для визначення струму через нього і величини напруги можна використати метод холостого ходу і короткого замикання для лінійної частини, виділивши лінійну частину схеми як активний двополюсник. Для такого двополюсника обчислюється або вимірюється напруга холостого ходу на клеммах при відсутності

нелінійного елемента, а також обчислюється або заміряється струм короткого замикання при замкнутих накоротко клеммах. З рівняння



$$U_{xx} = R_{вх} I_{K3}$$

знаходиться внутрішній опір  $R_{вх}$ . Його можна обчислити за допомогою відомих методів перетворення опорів. Після одержання схеми заміщення двополюсника подальше розв'язання задачі не викликає складності.

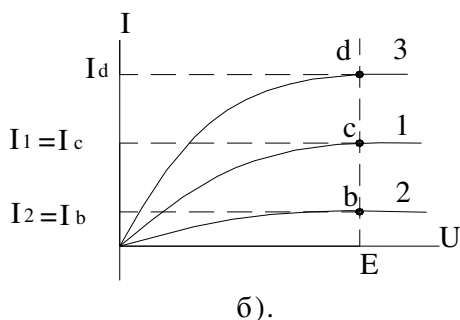


Рис. 18.4.

При паралельному з'єднанні нелінійних опорів HE1 і HE2 (Рис.18.4а) з ВУХ відповідно 1 і 2 виходимо з умови, що напруга E, яка прикладається, однакова для обох елементів, а тому знаходження результуючої ВАХ забезпечується шляхом додавання струмів  $I_1$  і  $I_2$ , що відповідають робочим точкам b і c, тобто:

$$I_p = I_d = I_1 + I_2$$

Так знаходиться і решта необхідних точок результуючої кривої 3.

Особливість напівпровідникових діодів, як нелінійних приладів, полягає в тому, що вони мають несиметричні ВАХ по відношенню до початку координат. Тому, отримання експериментальних даних ВАХ слід проводити окремо для прямої і зворотної частини.

Для дослідження ВАХ конкретного діода достатньо мати лише джерело керованого струму й вольтметр постійної напруги, який призначений для проведення заміру падіння напруги на досліджуваному приладі.

### **18.3. Використання віртуальної лабораторії EWB для виконання роботи**

Діоди, що використовуються в схемі, вибираються з панелі **Diode**. Вибір діода забезпечується бібліотекою діодів. В кожному з елементів бібліотеки можна редагувати параметри. Для цього необхідно натиснути кнопку *Edit*, після чого з'являється вікно з двома сторінками параметрів:

*Saturation current* (IS) – струм насичення.

*Ohmic resistance* (RS) – об'ємний опір діода.

*Zero-bias junction capacitance* (CJO) – бар'єрна ємність *p-n* переходу при нульовій напрузі.

*Junction potential* (VJ) – контактна різниця потенціалів.

*Transit time* (Tt) – час переносу зарядів.

*Grading coefficient* (M) – конструктивний параметр *p-n* переходу.

*Reverse breakdown voltage* (BV) – максимальна зворотна напруга (для стабілітронів не нормується).

*Emission coefficient* (N) – коефіцієнт інжекції.

*Activation energy* (EG) – ширина забороненої зони.

*Temperature exponent for effect on IS* (XTI) – температурний коефіцієнт струму насичення.

*Flicker noise coefficient* (KF) – коефіцієнт фліккер-шуму.

*Flicker noise exponent* (AF) – показник ступеня у формулі для фліккер-шуму.

*Coefficient for forward-bias depletion capacitance formula* (FC) – коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямо зміщеного переходу.

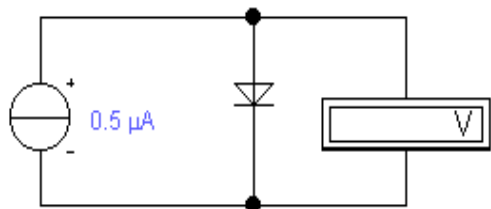
*Current at reverse breakdown voltage* (IBV) – початковий струм пробою при напрузі BV.

*Parameter measurement temperature* (TNOM) – температура діоду.

### **18.4. Порядок виконання роботи**

Схема проведення досліджень прямої частини ВАХ приведена на рис.18.5. При проведенні досліду необхідно особливу увагу звертати на вимірювання при малих падіннях напруги на приладі. Для того, щоб провести заміри зворотної частини ВАХ у приведеній схемі, необхідно змінити напрям включення джерела струму, або змінити полярність включення діода.

18.4.1. Зібрати схему у відповідності до рис. 18.5.



**Рис. 18.5.**

18.4.2. Створити таблицю з двома стовпцями. В один із них записати задані значення струму від джерела струму, а в другу – відповідні йому заміряні значення напруги, що показує вольтметр. При установці вольтметра слід перевірити, щоб його внутрішній опір мав значення, не менше, ніж 1 МОм.

Дослідження характеристик виконується для

трьох приладів різних фірм, які задаються викладачем.

18.4.3. Два діоди, включені для роботи на прямій гілці ВАХ, з'єднати послідовно і зняти їх загальну ВАХ.

18.4.4. Два діоди включити для роботи на прямій гілці ВАХ, з'єднати паралельно. Зняти їх загальну ВАХ.

18.4.5. Після проведення вимірювань побудувати графіки ВАХ для кожного приладу і для групи нелінійних приладів.

### ***18.5. Вимоги до звіту***

18.5.1. В звіті необхідно провести такі розрахункові роботи:

- A. У відповідності до варіанта вибрати послідовний опір і джерело живлення і для послідовної схеми обчислити робочу точку нелінійного елемента.
- B. Аналогічні розрахунки виконати для двох послідовно з'єднаних нелінійних елементів.
- C. Вибрати паралельний зовнішній опір і джерело живлення і обчислити струми в кожному з паралельних приладів.
- D. Для послідовного з'єднання лінійного й нелінійного приладів знайти робочу точку з використанням методу холостого ходу і короткого замикання. Для вибраної робочої точки розрахувати величину диференційного опору нелінійного елемента.
- E. Дати пояснення особливостям послідовного й паралельного з'єднання нелінійних приладів. Провести порівняльний аналіз характеристик досліджуваних діодів.
- F. Для вибраних робочих точок виконати розрахунки опору приладу для постійної напруги та диференційного опору і дати їх порівняльну характеристику.
- G. Визначитись з рекомендованим робочим діапазоном напруг і струмів для кожного з досліджуваних приладів.
- H. Використовуючи кусочно-лінійну апроксимацію ВАХ напівпровідникових приладів, розробити спрощену математичну модель для одного з досліджуваних приладів і реалізувати її за допомогою одного з компіляторів.
- I. Використовуючи спрощену математичну модель напівпровідникового приладу, розробити алгоритм визначення положення його робочої точки при послідовному з'єднанні з активним опором і постійній напрузі, яка докладається.

18.5.2. Дати письмові пояснення по кожному з пунктів.

### 18.6. Питання до атестації

18.6.1. Як побудувати ВАХ двох послідовно або паралельно з'єднаних діодів.

18.6.2. Як виконувати розрахунки електричних кіл постійного струму з послідовним або паралельним з'єднанням активного опору з одним або декількома діодами.

18.6.3. Як визначити робочу точку напівпровідникового приладу при його роботі з лінійним елементом, а також диференційні параметри для визначеної робочої точки.

### 18.7. Задачі

18.7.1. Для діода ДЗ12 при змінюванні прямої напруги від 0,2 до 0,8В прямий струм збільшується від 2,5 до 16мА. Визначити крутизну характеристики та диференційний опір діода.

18.7.2. Визначити змінювання прямого струму для діода ДЗ11А, якщо відомо, що при змінюванні прямої напруги від 0,2 до 0,6В крутизна характеристики  $S=150\text{мСм}$ .

18.7.3. Намалюйте вольт-амперну характеристику тунельного діода.

18.7.4. Чим обмежується найбільший прямий струм через діод?

18.7.5. Як можна ввімкнути в електричне коло два однакових діода, що розраховані на максимально допустимий струм 100мА кожний, якщо в колі проходить струм  $I=150\text{мА}$ ?

18.7.6. Для діодів КД103А найбільша зворотна напруга дорівнює 50В. Як можна ввімкнути такі діоди в коло, в якому напруга дорівнює 80В?

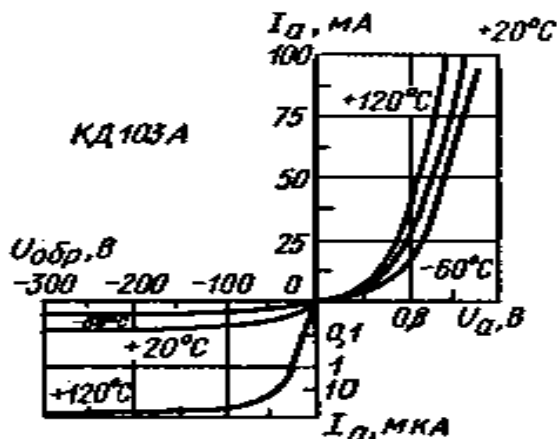


Рис. 18.6.

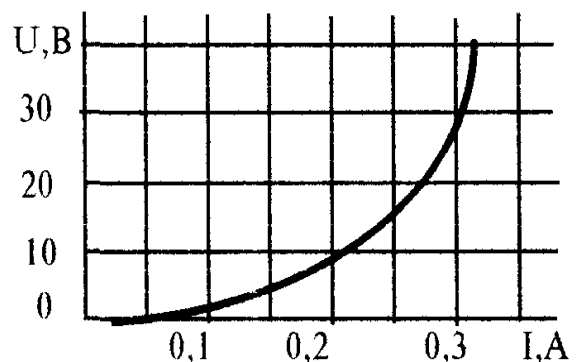


Рис. 18.7.

18.7.7. По вольт-амперній характеристиці кремнієвого випрямляючого діода КД103А при температурі 20°C (Рис.18.6), визначити опір постійному струму, якщо діод ввімкнули в прямому напрямку для напруг  $U_{пр}=0,4; 0,6; 0,8\text{В}$ . Побудувати графік залежності  $R_o=f(U_{пр})$ .

18.7.8. Використовую вольт-амперну характеристику діода КД103А при температурі 20°C (Рис.18.6), визначити опір постійному струму, якщо діод

ввімкнути в зворотному напрямку для напруг  $U_{ЗВ} = -50; -100; -200\text{В}$ . Побудувати графік залежності  $R_o = f(U_{ЗВ})$ .

18.7.9. Побудувати залежність опора постійному струму діода КД103А (якщо діод ввімкнути в прямому напрямку) від температури оточуючого середовища, використовуючи характеристики на рис.18.6, для напруг  $U_{ПР} = 0,4; 0,6; 0,8\text{В}$ .

18.7.10. Використовуючи вольт-амперну характеристику діода КД103А при температурі  $20^\circ\text{C}$  (Рис.18.6), визначити диференційний опір і крутизну прямої гілки для напруги  $U_{ПР} = 0,8\text{В}$ .

18.7.11. Визначити диференційний опір і крутизну зворотної гілки вольт-амперної характеристики діода КД103А при температурі  $20^\circ\text{C}$  (Рис.18.6), для напруги  $U_{ЗВ} = -50\text{В}$ .

18.7.12. Побудувати графік залежності опора постійному струму діода КД103А (якщо діод ввімкнути в зворотному напрямку), від температури оточуючого середовища, використовуючи вольт-амперні характеристики рис.18.6, для напруг  $U_{ЗВ} = -50; -100\text{В}$ .

18.7.13. По вольт-амперним характеристикам діода КД103А (Рис.18.6) визначити змінювання зворотного струму діода при змінюванні температури від  $-60$  до  $+120^\circ\text{C}$  для значень  $U_{ЗВ} = -50; -100; -200\text{В}$ .

18.7.14. По вольт-амперним характеристикам діода КД103А (Рис.18.6) визначити змінювання прямого струму діода при змінюванні температури від  $-60$  до  $+120^\circ\text{C}$  для значень  $U_{ПР} = 0,4; 0,6; 0,8; 1\text{В}$ .

18.7.15. Во скільки разів зміниться прямий струм діода КД103А при збільшенні температури  $-60$  до  $+120^\circ\text{C}$  для значень  $U_{ПР} = 0,4; 0,6; 0,8\text{В}$ . Вольт-амперні характеристики діода – на рис.18.6.

18.7.16. Послідовно з'єднані лінійний елемент з опором  $R = 100\ \text{Ом}$  та нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.7. Напряга мережі  $60\text{В}$ . Який струм проходить через елементи, якщо напруга на елементах однакова?

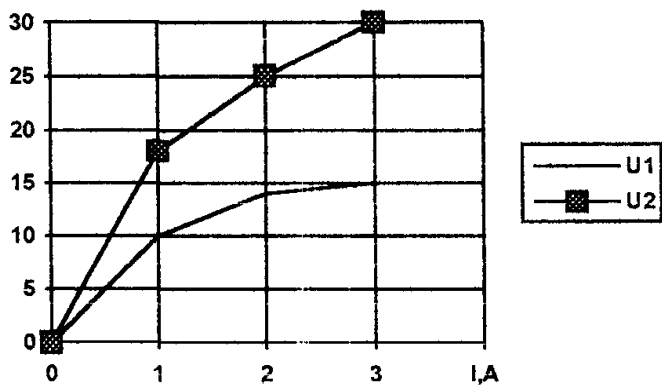


Рис. 18.8.

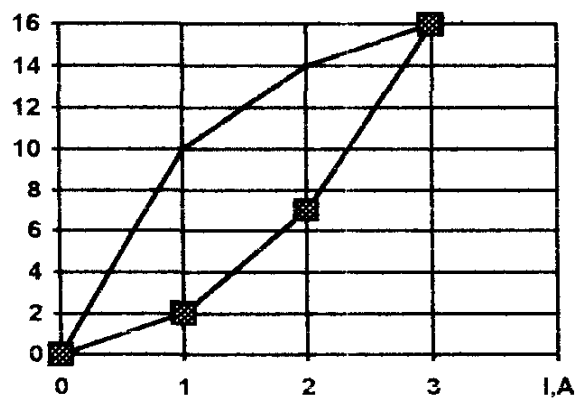


Рис. 18.9.

18.7.17. Послідовно з'єднані лінійний елемент та нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.7. Напряга мережі  $60\text{В}$ . Який опір лінійного елемента, якщо струм кола  $0,3\text{А}$ ?

18.7.18. Послідовно з'єднані лінійний елемент та нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.7. Напряга мережі  $54\text{В}$ . Який опір лінійного елемента, якщо струм кола  $0,3\text{А}$ ?

18.7.19. Два нелінійних елемента з'єднані послідовно. На рис.18.8 зображені їх вольт-амперні характеристики. При якому значенні струму напруги на елементах будуть однаковими?

18.7.20. Два нелінійних елемента з'єднані послідовно. На рис.18.9 зображені їх вольт-амперні характеристики. При якому значенні струму напруги на елементах будуть однаковими?

18.7.21. На основі зображених на рис.18.10 вольт-амперних характеристик двох послідовно з'єднаних нелінійних елементів визначити графічно струм, при якому напруга  $U_2=2U_1$ .

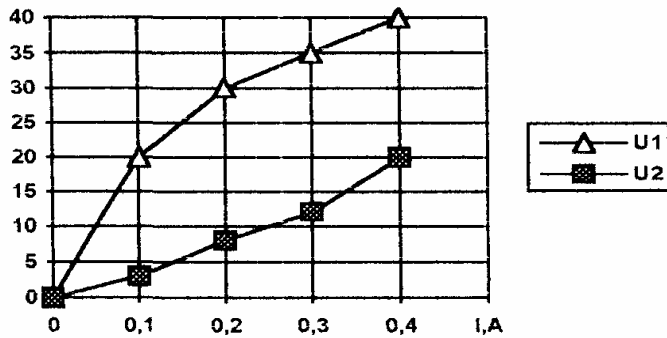


Рис. 18.10.

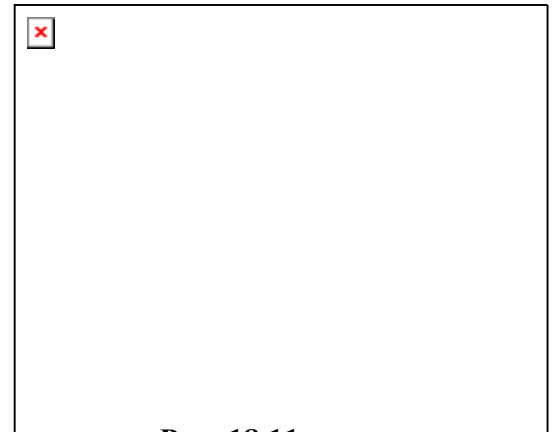


Рис. 18.11.

18.7.22. Два нелінійних елемента вольт-амперні характеристики яких зображені на рис.18.11, з'єднані послідовно. Напруга на першому елементі  $U_1=200\text{В}$ . Визначити напругу на другому елементі.

18.7.23. Нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.12, та лінійний елемент з опором  $R=100\ \Omega$  з'єднані паралельно. Знайти напругу  $U$ , при якій струми в елементах будуть однакові.

18.7.24. Нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.12, та лінійний елемент з опором  $R=100\ \Omega$  з'єднані паралельно. Напруга на лінійному елементі –  $20\text{В}$ . Знайти загальний струм.

18.7.25. Нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.12, та лінійний елемент з опором  $R=50\ \Omega$  з'єднані паралельно. Напруга на лінійному елементі дорівнює  $20\text{В}$ . Знайти загальний струм.

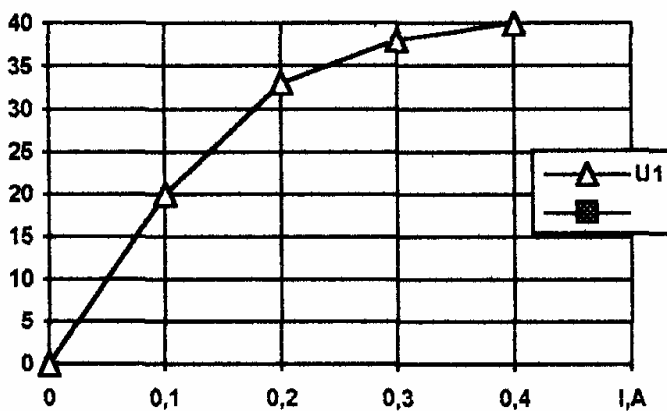


Рис. 18.12

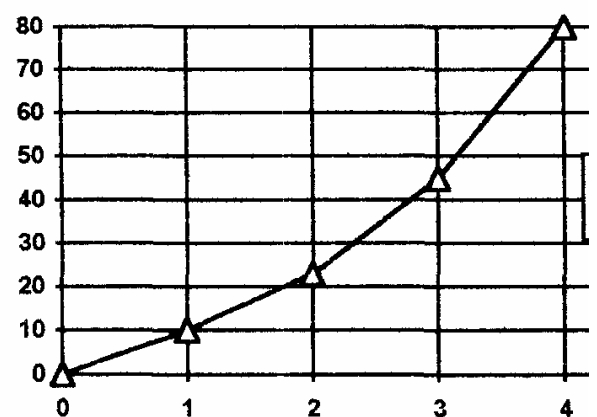


Рис. 18.13

18.7.25. Нелінійний елемент, вольт-амперна характеристика якого показана на рис.18.13, та лінійний елемент з опором  $R=50\ \Omega$  з'єднані паралельно. При якій напрузі  $U$  струми в паралельних вітках будуть однакові?



18.7.26. Два однакових нелінійних елемента, вольт-амперна характеристика яких показана на рис.18.12, з'єднані паралельно. Напруга мережі дорівнює 20В. Знайти загальний струм.

18.7.27. Два однакових нелінійних елемента, вольт-амперна характеристика яких показана на рис.18.12, з'єднані послідовно. Напруга мережі 40В. Знайти струм кола.

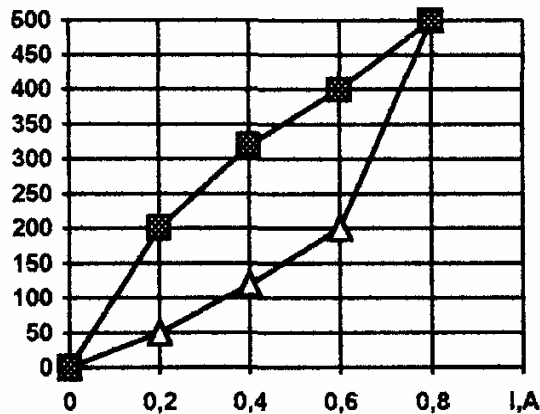


Рис. 18.14.

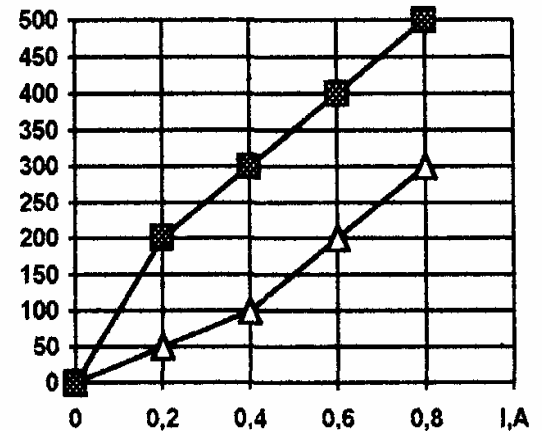


Рис. 18.15.

18.7.28. Два нелінійних елемента вольт-амперні характеристики яких зображені на рис.18.14, з'єднані послідовно. Напруга на другому елементі  $U_2=200В$ . Визначити напругу на першому елементі

18.7.28. Два нелінійних елемента вольт-амперні характеристики яких зображені на рис.18.15, з'єднані паралельно. Струм в другому елементі  $I_2=0,4А$ . Визначити струм у першому елементі кола.

18.7.29. Два нелінійних елемента вольт-амперні характеристики яких зображені на рис.18.14, з'єднані послідовно. Напруга на другому елементі  $U_2=400В$ . Визначити напругу на першому елементі.

18.7.30. Два нелінійних елемента вольт-амперні характеристики яких зображені на рис.18.14, з'єднані послідовно. Струм в колі  $I=0,2А$ . Визначити напругу в мережі.

18.7.31. Два нелінійних елемента вольт-амперні характеристики яких зображені на рис.18.14, з'єднані паралельно. Струм в першому елементі  $I_1=0,6А$ . Визначити струм у нерозгалуженій частині електричного кола.

18.7.32. Побудувати вольт-амперну характеристику двополюсника, що зображений на рис.18.16. Діод - ідеальний.

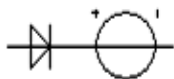


Рис. 18.16.

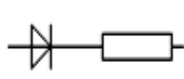


Рис. 18.17.

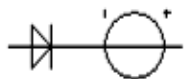


Рис. 18.18.

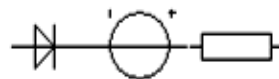


Рис. 18.19.

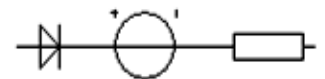


Рис. 18.20.

18.7.33. Побудувати вольт-амперну характеристику двополюсника, що зображений на рис.18.17. Діод - ідеальний.

18.7.34. Побудувати вольт-амперну характеристику двополюсника на рис.18.18. Діод - ідеальний.

18.7.35. Побудувати вольт-амперну характеристику двополюсника, що зображений на рис.18.19. Діод - ідеальний.

18.7.36. Побудувати вольт-амперну характеристику двополюсника, що зображений на рис.18.20. Діод - ідеальний.

18.7.37. Нелінійний опір  $R_1$ , вольт-амперна характеристика якого зображена на рис.18.22 і лінійний опір  $R_1=500$  Ом, з'єднані послідовно (Рис.18.21). Напруга на затискачах кола  $U=600$ В. Визначити струм кола і напругу на її ділянках.

18.7.38. З умов задачі 18.7.37 визначити диференційний опір і крутизну характеристики.

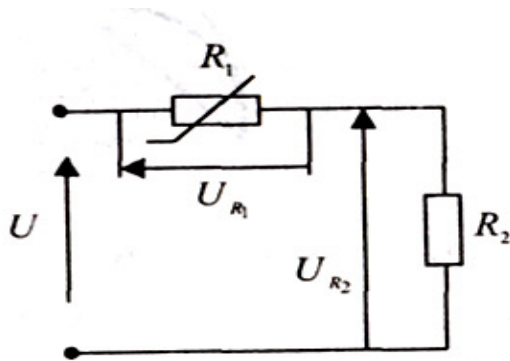


Рис. 18.21.

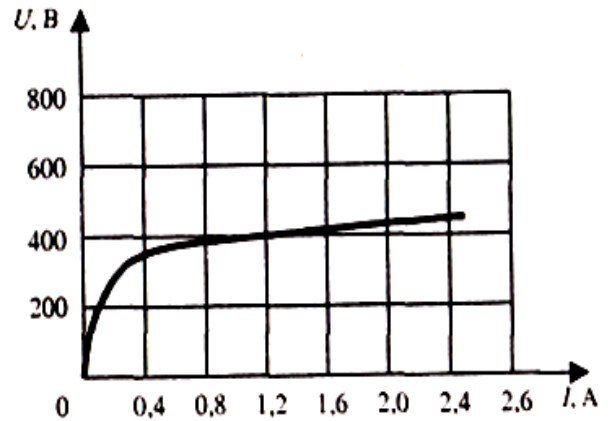


Рис. 18.22.

18.7.38. Коло складається з паралельно з'єднаних лінійного і нелінійного опорів (Рис.18.23). Струм в нерозгалуженій частині  $I=1,2$ мА;  $R_1=550$  Ом. Визначити напругу на затискачах кола і струми у гілках. Вольт-амперна характеристика нелінійного опора наведена на рис.18.22.

18.7.39. Визначити значення опору  $R$ , який включено послідовно з терморезистором, щоб забезпечити струм кола  $3$ мА при напрузі на її затискачах  $60$ В. Вольт-амперна характеристика терморезистора наведена на рис.18.24.

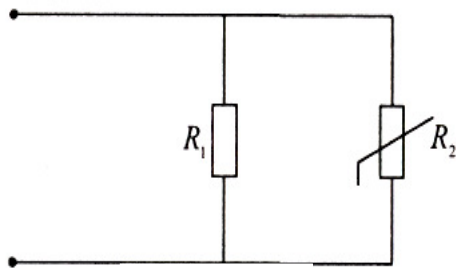


Рис. 18.23.

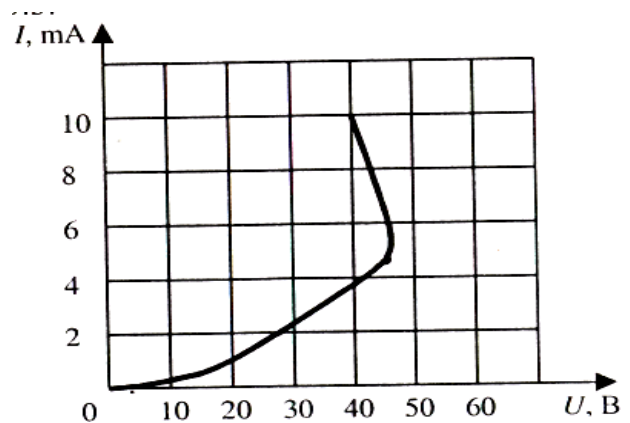


Рис. 18.24.

18.7.40. Нелінійний елемент заданий ВАХ, що приведена на рис.18.24. При зовнішній напрузі  $8$ В визначити величину опору при якому падіння напруги на НЕ буде рівнятись половині напруги живлення.

18.7.41. Нелінійний елемент заданий ВАХ, що приведена на рис.18.24. Визначити величину опору, що необхідно ввімкнути послідовно з НЕ, щоб струм через нього мав величину  $6$ А при напрузі живлення  $180$ В.

### 18.8. Додаток

Таблиця варіантів до лабораторної роботи.

Номер варіанту	Модель1	Модель2	Модель3	R, Ом
1	BYM10-50	D1N4001GP	GP02-20	2
2	BYM10-100	D1N4002GP	GP02-25	3
3	BYM10-200	D1N4003GP	GP02-30	5
4	BYM10-400	D1N4004GP	GP02-35	6
5	BYM10-600	D1N4005GP	GP02-40	7
6	BYM10-800	D1N4006GP	GP10A	8
7	BYM11-50	D1N4007GP	GP10B	9
8	BYM11-100	D1N4245GP	GP10D	10
9	BYM11-200	D1N4246GP	GP10G	12
10	BYM11-400	D1N4247GP	GP10J	15
11	BYM11-600	D1N4248GP	GP10K	16
12	BYM11-800	D1N4249GP	GP10M	19
13	BYM11-1000	D1N4383GP	GP10N	20
14	BYM10-1000	D1N4384GP	GP10Q	21
15	BYM11-1000	D1N4385GP	GP10T	22