

## Лекція 1. Пасивні компоненти аналогової схемотехніки

Пасивними компонентами є резистори, конденсатори, котушки індуктивності та трансформатори.

### 1.1 Резистори

Резистори є найбільш розповсюдженими компонентами. Важко уявити електронний пристрій без резисторів.

Основною властивістю резистора є перетворення електричної енергії в теплову, хоча в більшості пристроїв ця властивість не тільки не використовується, а іноді є шкідливою.

Функціональним призначенням резисторів є регулювання і розподілення електричної енергії між колами й елементами електронного пристрою.

Резистори бувають постійними та змінними. Умовне позначення резисторів наведено на рисунку 1.1, а правила їхнього креслення на схемах пояснює рисунок 1.2.

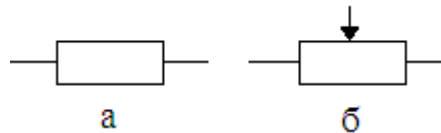


Рисунок 1.1 - Умовне позначення резисторів: а - постійного; б - змінного

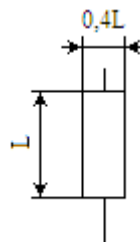


Рисунок 1.2 - Розміри умовного позначення резистора

Основним параметром резистора є його електричний опір  $R$ . Опір є коефіцієнтом пропорційності у співвідношенні між струмом  $I_R$ , який протікає через резистор, та напругою  $U_R$ , яка прикладена до резистора  $R$ :

$$U_R = R \cdot I_R \quad (1.1)$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad (1.2)$$

Із співвідношень (1.1) та (1.2), які є законом Ома, видно основну дію резистора, а саме: резистори перетворюють напругу на струм або струм на напругу.

Якщо до резистора з опором  $R$  прикладена напруга  $U_R$ , то через резистор тече струм  $I_R$  (рис. 1.3).

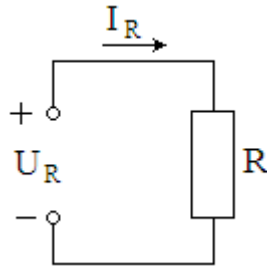


Рисунок 1.3 - Резистор з опором  $R$  під напругою  $U_R$

Навпаки, якщо через резистор з опором  $R$  тече струм  $I_R$ , то на резисторі виникає падіння напруги  $U_R$  (рис. 1.4).

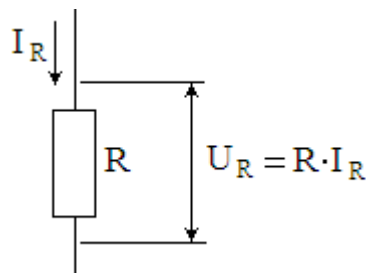


Рисунок 1.4 - Резистор з опором  $R$  під струмом  $I_R$

Розмірністю й одиницею опору є Ом:

$$[R] = \frac{1\text{В}}{1\text{А}} = 1\text{Ом}, \quad (1.3)$$

тобто, якщо до резистора прикладена напруга  $U_R = 1\text{ В}$  і при цьому через нього протікає струм  $I_R = 1\text{ А}$ , то опір резистора дорівнює  $1\text{ Ом}$ . Опір  $1\text{ Ом}$  є відносно малим і тому поруч з одиницею Ом застосовуються також найбільше розповсюджені одиниці кОм (кілоом) та МОм (мегом).

$$1\text{ кОм} = 10^3\text{ Ом}; 1\text{ МОм} = 10^6\text{ Ом}. \quad (1.4)$$

Резистор під напругою завжди виділяє потужність у виді тепла:

$$P_R = U_R \cdot I_R = \frac{U_R^2}{R} = I_R^2 \cdot R, \quad (1.5)$$

де  $U_R$  та  $I_R$  - середньоквадратичні відповідно напруга й струм.

Формула (2.5) справедлива тільки для постійного струму. Для змінного струму слід урахувати так званий коефіцієнт форми. Для синусоїдальної форми напруги або струму коефіцієнт форми дорівнює  $\sqrt{\frac{1}{2}}$ , через що потужність становить:

$$P_{зм} = \frac{1}{2} U_m \cdot I_m = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R} = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot R, \quad (1.6)$$

де  $U_m$  та  $I_m$  - амплітуди напруги та струму.

Резистор також характеризується провідністю, яка є зворотною величиною до опору:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.7)$$

Розмірністю й одиницею провідності є сименс, См:

$$[G] = \frac{1}{[R]} = \frac{1A}{1B} = 1См. \quad (1.8)$$

$$1 \text{ мСм} = 10^{-3} \text{ См}; \quad 1 \text{ мкСм} = 10^{-6} \text{ См}. \quad (1.9)$$

Щодо форми струму  $I_R$  резистора і напруги  $U_R$  на резисторі, то вони завжди збігаються. На рисунку 1.5 наведена часова діаграма роботи резистора, тобто епюри напруги  $U_R$ , яка прикладена до резистора, та струму  $I_R$  для двох опорів резисторів  $R_1$  і  $R_2 < R_1$ . З цього рисунку видно, що чисто резистивне коло не змінює форму струму і залишає її завжди такою ж, що й форма напруги. Воно не вносить також фазового зсуву між струмом і напругою. Тому точки переходу через нуль напруги  $U_R$  та струму  $I_R$  завжди збігаються.

Основними параметрами резисторів є номінальний опір  $R$ , допуск номінального опору (точність виготовлення) та номінальна потужність  $P$  (2.5) та (2.6), яку вони можуть розсіювати при збереженні інших параметрів.

Умовні позначення цих параметрів наносяться на резистори. Вони стандартизовані і наведені в таблицях 1.1, 1.2, 1.3.

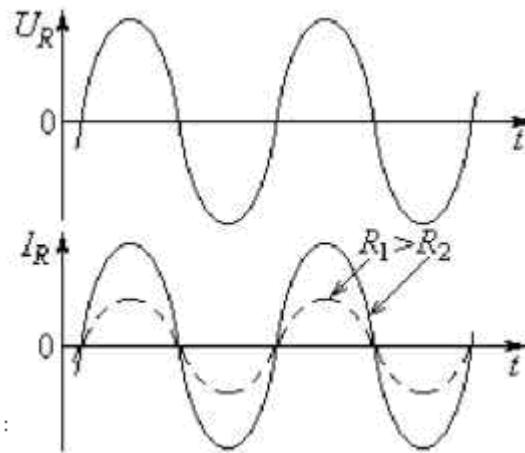


Рисунок 1.5 – Часова діаграма роботи резистора

Таблиця 1.1 – Ряд опорів резисторів з допуском  $\pm 5\%$  (ряд E 24)

Ряд опорів					
1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Таблиця 1.2 – Допуски номіналів резисторів

Допуск, %	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	30
Позначення	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф

Таблиця 1.3 - Позначення потужностей резисторів на схемах

Потужність, Вт	0,25	0,5	1	2	3	4	5
Позначення на схемі							

Матеріали, з яких виготовляють резистори визначають їхній тип: дротяні та недротяні.

Недротяні резистори підрозділяють на тонкошарові та композиційні.

Тонкошарові резистори у свою чергу підрозділяються на металоокисні, металізовані, вуглецеві та боровуглецеві.

Композиційні резистори бувають плівкові та об'ємні.

Матеріал і технологія виготовлення резисторів суттєво впливають на параметри та властивості резисторів. Так, дротяні резистори мають високі точність виготовлення та температурну стабільність. Але поруч з цим вони відносно низькочастотні.

На високих частотах слід використовувати недротяні резистори.

## 1.2 Конденсатори

Конденсатор, умовне позначення якого наведене на рисунку 1.6, являє собою дві струмопровідні поверхні (пластини), які відділені одна від одної діелектриком.

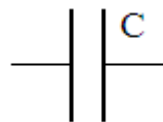


Рисунок 1.6 – Умовне позначення конденсатора

Основною властивістю конденсатора є накопичення енергії електричного поля.

Конденсатори характеризуються ємністю

$$C = \frac{Q}{U_c}, \quad (1.10)$$

де  $Q$  - заряд, який накопичив конденсатор під прикладеною до нього напругою  $U_c$  (рис. 1.7).

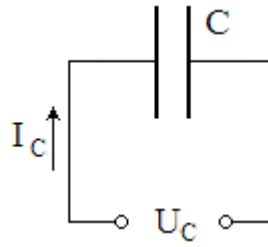


Рисунок 1.7 – Конденсатор під напругою

Розмірністю й одиницею ємності є фарада, Ф.

$$[C] = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = 1\text{Ф}. \quad (1.11)$$

Якщо конденсатор знаходиться під постійною напругою  $U_C = 1\text{ В}$  і при цьому накопичив заряд в  $Q = 1$  кулон, то його ємність дорівнює 1 фараді.

Ємність в 1 фараду дуже велика. Тому застосовуються часткові одиниці: мікрофарада, мкФ, нанофарада, нФ та пікофарада, пФ.

$$1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}; 1\text{ нФ} = 10^{-9}\text{ Ф}; 1\text{ пФ} = 10^{-12}\text{ Ф}. \quad (1.12)$$

Струм  $I_C$  в колі конденсатора (рис. 1.7) зв'язаний з напругою  $U_C$  на ньому через співвідношення:

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt}, \quad (1.13)$$

тобто струм конденсатора є пропорційним до швидкості зміни напруги на ньому. Тому є ще одне визначення фаради: якщо напруга на конденсаторі  $U_C$  змінюється на 1 В за 1 с і викликає при цьому струм  $I_C = 1\text{ А}$ , то ємність конденсатора становить 1 Ф.

Для розгляду принципу дії конденсатора перш за все з'ясуємо, який струм (постійний чи змінний) може протікати в колі конденсатора. Якщо до конденсатора прикладена постійна напруга  $U_C = \text{const}$  (рис. 2.7), то  $dU_C = 0$  і, як видно з формули (1.13),  $I_C = 0$ , тобто під постійною напругою струм у колі конденсатора не тече.

Тоді виникає питання, як же має змінюватись  $U_C \neq \text{const}$ , щоб у колі конденсатора протікав постійний струм  $I_C = \text{const}$ .

Після інтегрування (1.13) одержуємо

$$U_c = \frac{1}{C} \int I_c dt \quad (1.14)$$

Підставляючи в (1.14)  $I_c = I_{c0} = \text{const}$  і виносячи з під інтегралу  $I_{c0}$ , одержуємо

$$U_c = \frac{I_{c0}}{C} \int dt = \frac{I_{c0}}{C} t. \quad (1.15)$$

З формули (1.15) видно, що в колі конденсатора може текти постійний струм, якщо змінювати напругу  $U_c$  на конденсаторі за лінійним законом. І навпаки, якщо конденсатор заряджати постійним струмом, то напруга  $U_c$  на ньому необмежено зростає теж за лінійним законом (рис. 1.8).

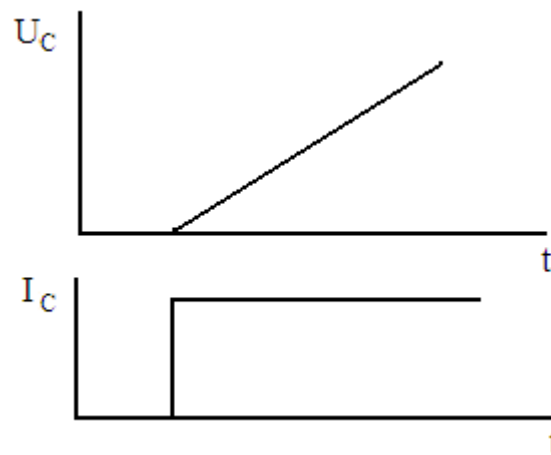


Рисунок 1.8 – Напруга  $U_c$  та постійний струм  $I_c$  конденсатора

Ця властивість конденсатора широко використовується для одержання напруг, які змінюються лінійно залежно від часу (рис. 1.9).

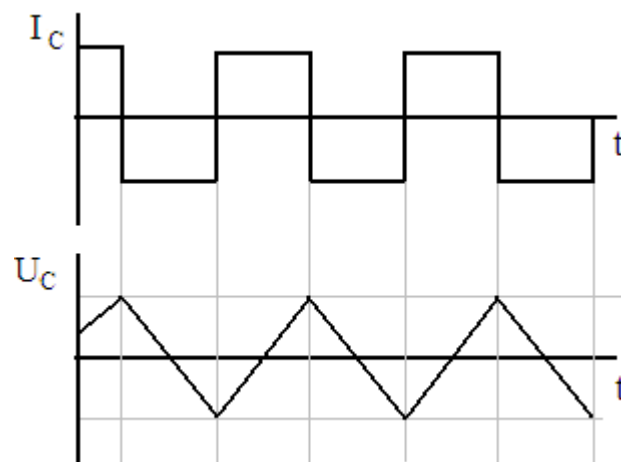


Рисунок 1.9 – Одержання лінійного змінення напруги

Щодо знаходження конденсатора під гармонічною напругою (рис. 1.10), то в його колі тече змінний струм, незважаючи на те, що між пластинами конденсатора є діелектрик.

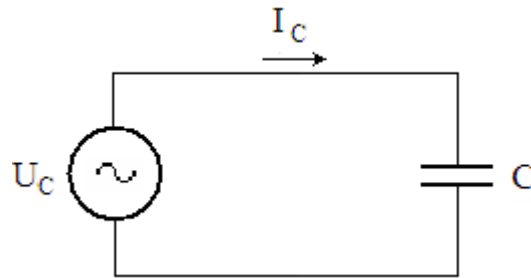


Рисунок 1.10 – Конденсатор під змінною напругою

Механізм струмопроходження в колі конденсатора наступний.

Позитивна напівхвиля напруги  $U_C$ , яка прикладена до конденсатора  $C$  (рис.1.11), в інтервалі моментів  $t_1 \dots t_2$  відбирає електрони “-“ від лівої пластини і направляє їх до правої. Під час цього переходу електронів у колі конденсатора тече струм  $I_{C1}$ .

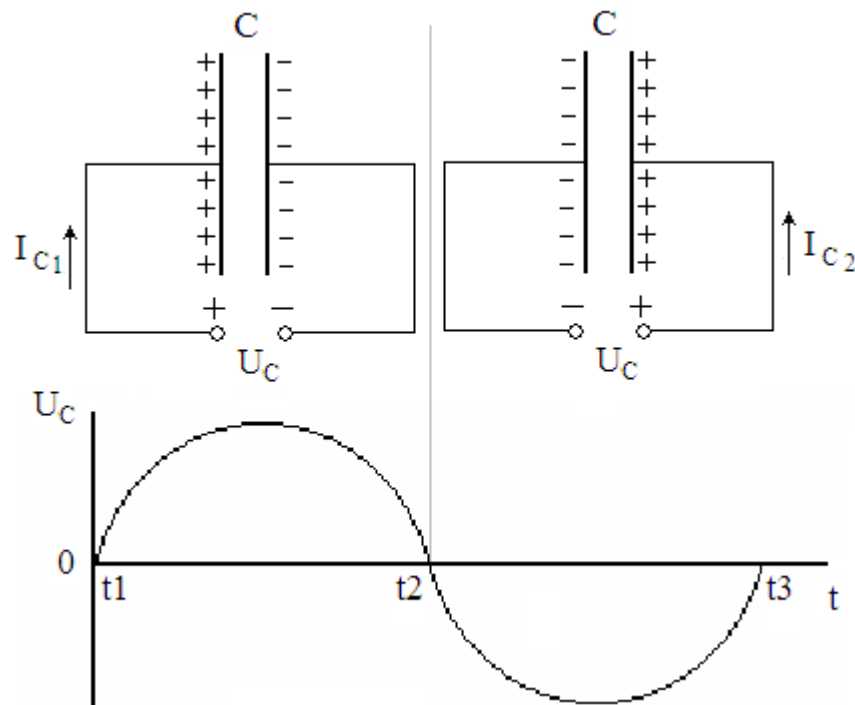


Рисунок 1.11 – Струмопроходження в колі конденсатора



В інтервалі ж моментів  $t_2 \dots t_3$ , полярність  $U_C$  змінюється на протилежну. Конденсатор перезаряджається до цієї протилежної полярності і тому струм  $I_{C2}$  протікає в протилежному напрямі.

Отже, в колі конденсатора струм  $I_C$  протікає лише тоді, коли напруга  $U_C$  на конденсаторі змінюється. При цьому через сам конденсатор ніякого руху електронів немає.

Струм протікає в колі конденсатора, а не через конденсатор.

Конденсатор чинить опір протіканню струму тим, що струм тече під різницею двох напруг: прикладеної напруги  $U_C$  та напруги  $U_3$ , до якої зарядився конденсатор. Тому струм  $I_C$  створює різниця  $(U_C - U_3)$ , тобто  $U_3$  чинить опір. Чим триваліше заряджається конденсатор, тим більше  $U_3$  і тим менше струм  $I_C$ , тобто більше опір.

На відміну від резистора цей опір не є омичним. На ньому не виділяється потужність і він є частотно залежним:

$$|X_c| = \frac{1}{\omega C}. \quad (1.16)$$

Основними параметрами конденсатора є номінальна ємність та припустима напруга.

Номінальна ємність стандартизована і регламентується тими ж номіналами, що й опори резисторів (табл. 1.1).

Матеріал діелектрика визначає і тип конденсатора, і його властивості. За матеріалом діелектрика конденсатори бувають паперові, слюдяні, керамічні та електролітичні.

В електролітичних конденсаторах діелектриком є електронно-дірковий перехід (p-n перехід). Його ширина не перевищує одиниць мікрометрів, через що відстань між пластинами, однією з яких є електроліт, дуже мала, бо електроліт як рідина цілком заповнює нерівності металеві пластилини. Тому найбільшу ємність за інших рівних умов мають електролітичні конденсатори (сотні тисяч мкФ).

Щодо частотних властивостей, то самими високочастотними конденсаторами є керамічні.

### 1.3 Котушки індуктивності

Котушка індуктивності, умовне позначення якої наведене на рисунку 1.12, являє собою соленоїд з осердям (а) або без нього (б). Осердя застосовуються для збільшення індуктивності. Матеріалом для осердя частіше за все є пластини з трансформаторного заліза або ферит.

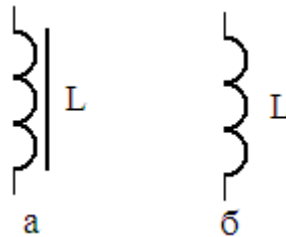


Рисунок 1.12 - Умовне позначення котушок: а - з осердям; б- без осердя

Основною властивістю котушки є накопичення енергії магнітного поля. Основним параметром котушки є індуктивність  $L$ .

$$L = \frac{\Psi}{I_L}, \quad (1.17)$$

де  $\Psi$  - сумарний магнітний потік, який викликається струмом котушки  $I_L$  (рис. 1.13).

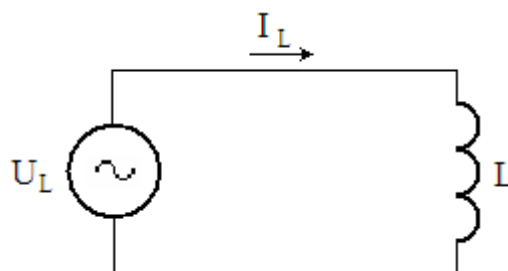


Рисунок 1.13 – Котушка індуктивності під напругою

Розмірністю й одиницею індуктивності є Генрі, Гн. Якщо через котушку протікає струм  $I_L = 1$  А і при цьому він створює магнітний потік  $\Phi = \Psi$  в один вебер (Вб), то така котушка має індуктивність 1 Гн.

$$[L] = \frac{[\Psi]}{[I_L]} = \frac{1\text{Вб}}{1\text{А}} = 1\text{Гн}. \quad (1.18)$$

Існують також часткові одиниці:

$$1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн} - \text{мілігенрі}; 1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн} - \text{мікрогенрі}; \quad (1.19)$$

$$1 \text{ нГн} = 10^{-9} \text{ Гн} - \text{наногенрі}; 1 \text{ пГн} = 10^{-12} \text{ Гн} - \text{пікогенрі}.$$

Напруга  $U_L$  на котушці та її струм  $I_L$  (рис. 1.13) зв'язані співвідношенням:

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt}. \quad (1.20)$$

З формули (1.20) можна дати інше визначення 1 Гн: якщо під прикладеною до котушки змінною напругою  $U_L = 1 \text{ В}$  швидкість зміни струму становить 1 А за 1 с, то індуктивність котушки дорівнює 1 Гн.

Як і конденсатор, котушка має частотно залежний опір, на якому потужність не виділяється:

$$|X_L| = \omega L. \quad (1.21)$$

Цей опір котушка створює наступним чином.

Струм котушки  $I_L$  створює магнітний потік, який пересікає витки котушки і наводить в них електрорушійну силу (ЕРС). За законом Джоуля-Ленца будь-яка наведена ЕРС має таку полярність, щоб перешкоджати причині, що її викликала. Тому струм тече під різницею прикладеної напруги  $U_L$  та проти-ЕРС, тобто проти-ЕРС чинить опір.

Параметри котушок не стандартизовані і можуть бути будь-якими на вимогу.

Щодо осердя, то трансформаторне залізо використовують на відносно низьких частотах, які не перевищують верхню межу звукового діапазону. На вищих частотах використовують котушки з феритовим осердям.

## 1.4 Трансформатори

Трансформатори призначені для перетворення первинної напруги в іншу - вторинну напругу.

Трансформатор складається в найпростішому випадку з двох магнітно зв'язаних котушок  $W_1$  та  $W_2$ , які називають обмотками (рис. 1.14).

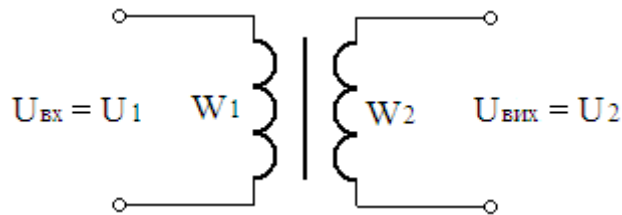


Рисунок 1.14 – Схема трансформатора

Магнітні потоки цих котушок зчеплені, через що трансформатор перетворює первинну (вхідну) напругу  $U_1$  у вторинну (вихідну) напругу  $U_2$  наступним чином.

Під вхідною змінною напругою  $U_1$  через первинну обмотку  $W_1$  тече змінний струм  $I_1$ , який створює змінний магнітний потік. Цей потік перетинає витки вторинної обмотки  $W_2$  і наводить в них ЕРС. Так створюється вторинна вихідна напруга  $U_2$ . Вона тим вища, чим більша кількість витків вторинної обмотки  $W_2$ .

Основним параметром трансформатора є коефіцієнт трансформації:

$$N = \frac{W_2}{W_1}, \quad (2.22)$$

де  $W_1$  та  $W_2$  - числа витків первинної та вторинної обмоток відповідно. Через напруги коефіцієнт трансформації визначається як:

$$N = \frac{U_2}{U_1}, \quad (2.23)$$

Якщо  $N < 1$ , тобто  $U_2 < U_1$ , то трансформатор знижувальний (він зменшує напругу). При  $N > 1$  ( $U_2 > U_1$ ), трансформатор підвищувальний (збільшує

напругу). При  $N = 1$  ( $U_2 = U_1$ ), трансформатор розподільний. Він гальванічно розриває первинне та вторинне кола, не змінюючи напруги.

Трансформатор діє наступним чином.

На холостому ході навантаження вторинної обмотки немає (рис. 1.14). Тому вторинний струм не тече, через що первинний струм  $I_1$  малий.

Це пояснюється наступним чином.

Струм  $I_1$  створює магнітний потік, який перетинає витки первинної обмотки і наводить в них проти-ЕРС. За законом Джоуля-Ленца будь-яка наведена ЕРС завжди має таку полярність, щоб перешкоджати причині, яка її викликає. Тому ця проти-ЕРС діє назустріч первинній напрузі  $U_{вх}$ , тобто чине опір, через що на холостому ході струм малий.

Якщо трансформатор працює під навантаженням  $R_n$  (рис. 1.15), то його вторинна обмотка знаходиться під струмом  $I_2$ , від якого прямо пропорційно залежить  $I_1$ , тобто під навантаженням первинний струм збільшується.

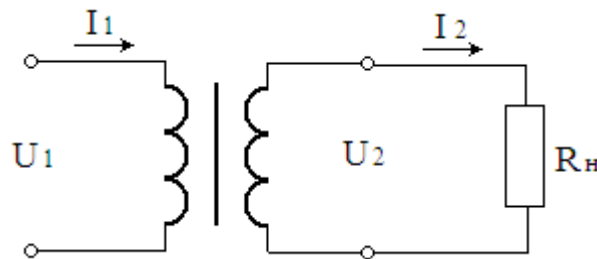


Рисунок 1.15 – Трансформатор під навантаженням

Це пояснюється тим, що  $I_2$  створює магнітний потік, який спрямований проти первинного магнітного потоку, який створює струм  $I_1$ . Тому під навантаженням  $R_n$  осердя трансформатора дещо розмагнічується, через що проти-ЕРС зменшується і первинний струм  $I_1$  зростає. Струми  $I_1$  та  $I_2$  зв'язані через коефіцієнт трансформації  $N$ :

$$I_1 = NI_2 \quad (1.24)$$

Таким чином, для знижувального трансформатора вторинна напруга в  $N$  разів менше за первинну, а вторинний струм в  $N$  разів більше, ніж первинний.

Опір навантаження  $R_n$ , перераховується до первинної обмотки через  $N^2$ :

$$R_{n1} = N^2 R_{n2}, \quad (1.25)$$

де  $R_{n1}$  - опір, перерахований до первинної обмотки.

Коефіцієнт корисної дії становить близько 100%, тобто потужності у первинній та вторинній обмотках майже збігаються.

Якщо вторинна обмотка не одна (рис. 1.16), то потужність первинної обмотки  $P_1$  складається з суми потужностей усіх вторинних обмоток:

$$P_1 = P_{21} + P_{22} + \dots + P_{2n} \quad (1.26)$$

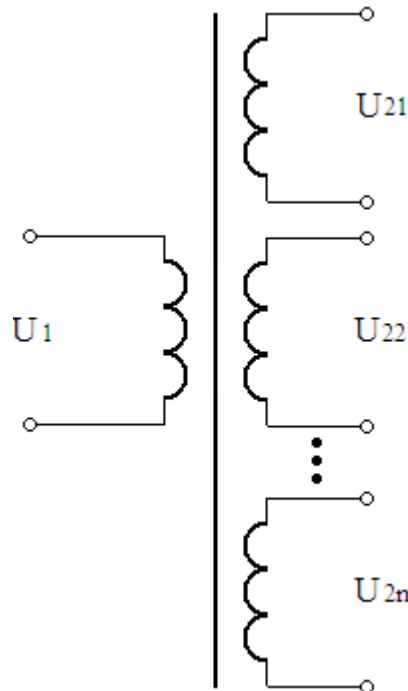


Рисунок 1.16 – Трансформатор з багатьма вторинними обмотками

Матеріалом осердя є трансформаторне залізо або ферит. Трансформаторне залізо використовують на відносно низьких частотах, які не перевищують звукового діапазону. На вищих частотах використовують трансформатори з феритовим осердям.

Крім коефіцієнта трансформації, до основних параметрів трансформатора належить його потужність, яка визначається об'ємом осердя. Чим більше об'єм, тим потужніше трансформатор.

## 1.5 Подільники напруги

Подільники напруги набули найбільшого розповсюдження і складають основу різноманітних схемотехнічних пристроїв. Вони, в основному, призначені для зменшення напруги і саме тому називаються подільниками.

Однак, слід зазначити, що застосування резисторів у подільниках має призначенням не тільки зменшення напруги. Комбінація резистора з іншими приладами створює різноманітні електронні пристрої.

Так, подільник з резистора та конденсатора створює фільтр вищих або нижніх частот. Подільник з резистора та діода створює випрямляч. Зі стабілітроном подільник є стабілізатором напруги. Подільник з резистора та транзистора створює підсилювач або ключ і т. ін.

Отже, без структури подільника напруги не можна уявити жодного самого простішого електронного пристрою. Тому вивчення подільників напруги є фундаментом для засвоєння подальших електронних пристроїв.

Схема найпростішого резистивного подільника напруги на холостому ході, тобто без навантаження, наведена на рисунку 1.17.

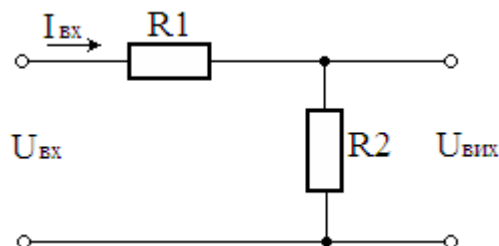


Рисунок 1.17 – Подільник напруги

Резистори R1 та R2 називаються плечами. R1 – верхнє плече, R2 – нижнє. Послідовне з'єднання резисторів R1 та R2 перетворює вхідну напругу  $U_{вх}$  у струм:

$$I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R1 + R2}, \quad (1.27)$$

який створює падіння напруги на резисторах R1 та R2. Вихідна напруга, яка знімається з резистора R2, становить:

$$U_{\text{вих}} = I_{\text{вх}} R_2 = U_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (1.28)$$

З (1.28) видно, що вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  менше вхідної  $U_{\text{вх}}$  в  $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$  разів, тобто є поділеною. Це пояснюється законом Кірхгофа, за яким вхідна напруга  $U_{\text{вх}}$  розподіляється між резисторами  $R_1$  та  $R_2$ :

$$U_{\text{вх}} = U_{R_1} + U_{R_2}. \quad (1.29)$$

З (1.29) випливає, що напруга на кожному з резисторів менша за вхідну.

Діленням обох частин (1.28) на  $U_{\text{вх}}$  одержуємо коефіцієнт передавання:

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.30)$$

Вхідний опір подільника напруги становить:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = R_1 + R_2 \quad (1.31)$$

Вихід подільника напруги, як і вихід будь-якого пристрою, завжди працює на якесь навантаження  $R_{\text{н}}$  (рис. 1.18) - низькоомне чи високоомне, але воно завжди є. Тоді опір нижнього плеча визначається паралельним з'єднанням  $R_2$  та  $R_{\text{н}}$ :

$$R_e = \frac{R_2 R_{\text{н}}}{R_2 + R_{\text{н}}}. \quad (1.32)$$

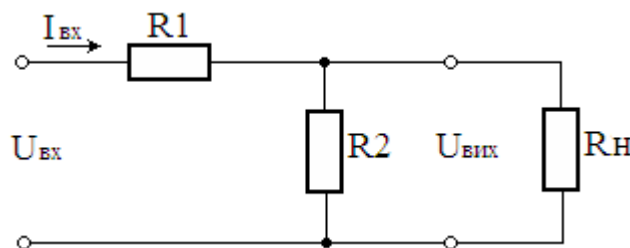


Рисунок 1.18 – Подільник напруги під високоомним навантаженням

При низькоомному навантаженні  $R_{\text{н}} \ll R_2$  співвідношення (1.32) перетворюється на  $R_e = R_{\text{н}}$  і тоді резистор  $R_2$  не потрібний і навантаження  $R_{\text{н}}$  живиться тільки через резистор  $R_1$  (рис. 1.19).



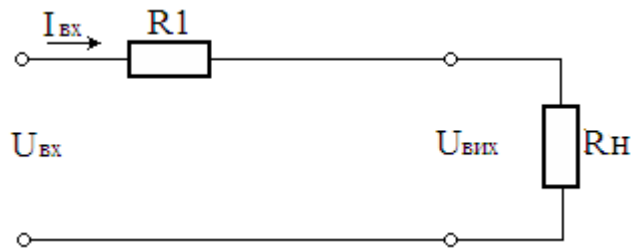


Рисунок 1.19 – Подільник напруги під низькоомним навантаженням

Нижнім плечем у цьому випадку є  $R_n$  і тому коефіцієнт передавання становитиме:

$$K_n = \frac{R_n}{R_1 + R_n}. \quad (1.33)$$

Одним із пояснень дії подільника, як і подальших пристроїв, є часова діаграма роботи, тобто епюри вхідної та вихідної напруг. Часова діаграма роботи подільника напруги наведена на рисунку 1.20 на постійному (а) та змінному (б) струмах.

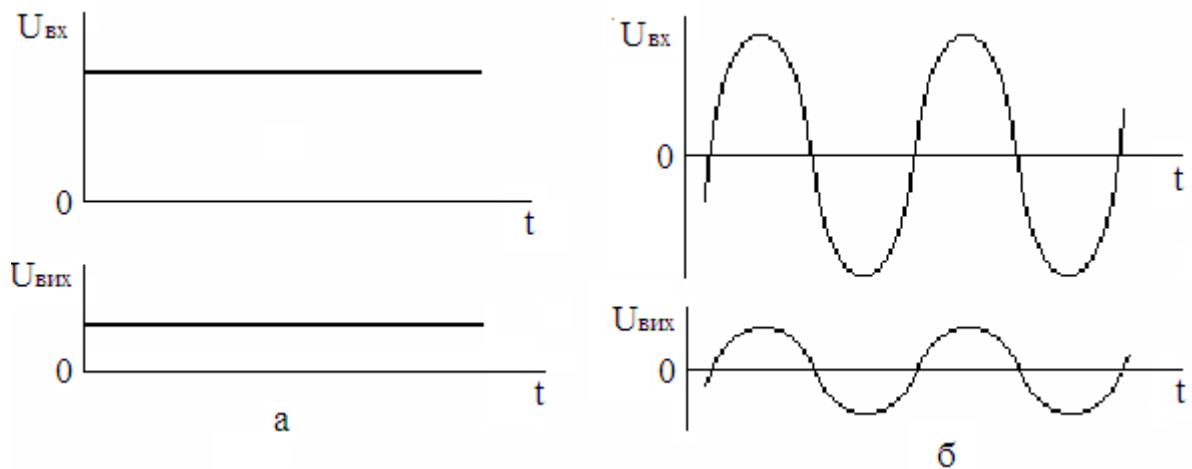


Рисунок 1.20 – Часова діаграма подільника напруги: а – на постійному струмі; б – на змінному струмі

Ця діаграма роботи показує, що вихідна напруга  $U_{вих}$  як на постійному, так і на змінному струмах менше за вхідну  $U_{вх}$ , причому форми  $U_{вх}$ , та  $U_{вих}$  завжди збігаються.

Основними параметрами подільника напруги є коефіцієнт передавання, вхідний та вихідний опори.

Коефіцієнт передавання визначається формулою (1.30), а вхідний опір - формулою (1.31).

Вихідний опір без навантаження дорівнює опору паралельного з'єднання R1 та R2:

$$R_{\text{вих}} = \frac{R1R2}{R1 + R2}. \quad (1.34)$$

## 1.6 Регулятори напруги

Найпростішим, але разом з тим надто розповсюдженим регулятором є подільник, у плечах якого стоять змінні резистори (рис. 1.21).

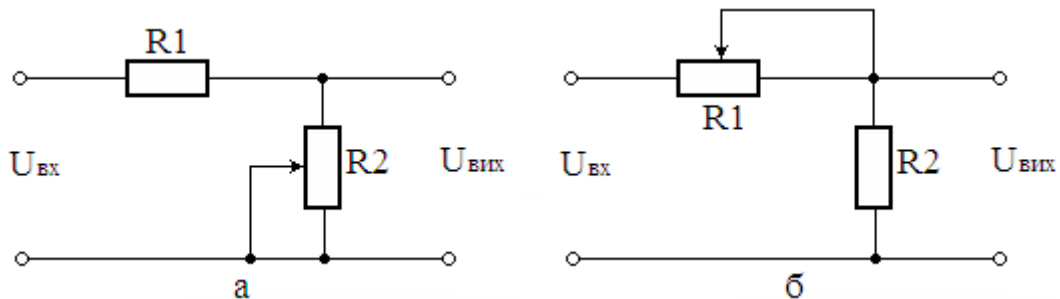


Рисунок 1.21 – Схеми регуляторів напруги

Оскільки коефіцієнт передавання подільника напруги однозначно визначається співвідношенням опорів резисторів R1 та R2, то змінюючи будь-який з них, можна регулювати коефіцієнт передавання і саме тим змінювати вихідну напругу.

Якщо регулювати нижнє плече R2 (рис. 1.21 а), то межі регулювання вихідної напруги становитимуть:

$$0 \leq U_{\text{вих}} \leq U_{\text{вх}} \frac{R1R2}{R1 + R2}. \quad (1.35)$$

У нижньому положенні повзунка:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R1R2}{R1 + R2}.$$

У верхньому положенні повзунка:

У нижньому положенні повзунка:  $U_{\text{вих}} = 0$ .

При регулюванні верхнього плеча  $R1$  (рис. 1.21,б) межі регулювання вихідної напруги становитимуть:

$$U_{\text{вх}} \frac{R1R2}{R1 + R2} \leq U_{\text{вих}} \leq U_{\text{вх}}. \quad (1.36)$$

Коли повзунок знаходиться ліворуч, то  $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}$ , а коли праворуч, то

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R1R2}{R1 + R2}. \quad (1.37)$$

Якщо треба регулювати  $U_{\text{вих}}$  у межах від нуля до вхідної напруги:  $0 \leq U_{\text{вих}} \leq U_{\text{вх}}$ , то змінний резистор слід включити за схемою потенціометра (рис. 1.22).

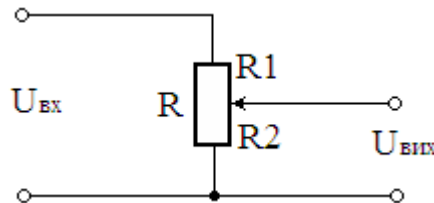


Рисунок 1.22 – Потенціометричний регулятор

У верхньому стані повзунка  $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}$ , а у нижньому  $U_{\text{вих}} = 0$ .

Робота регулятора стане зрозумілою, якщо весь опір  $R$  розподілити на  $R1$  та  $R2$ . Тоді маємо подільник напруги з опором  $R1$  у верхньому плечі та  $R2$  - у нижньому. Коефіцієнт передавання регулятора (рис. 1.22) визначається формулою (2.30), як і будь-якого подільника.

Перевагою регулятора є широкий діапазон регулювання, який дорівнює усій вхідній напрузі, а недоліком - грубе регулювання.

## 1.7 Гасники напруги

Часто виникає необхідність живлення каскадів напругами різних величин. Якщо ці каскади енергоємні, то доцільно кожний каскад живити від окремого джерела напруги.

Однак є випадки, коли потужність, споживана каскадами, невелика і доцільно для їхнього живлення використовувати тільки одне джерело з най-

більшою потрібною напругою, а надлишок напруги для інших каскадів десь гасити. Для цієї мети використовують резистори гасіння, які мають бути включені послідовно з каскадом, який живиться (рис. 1.23).

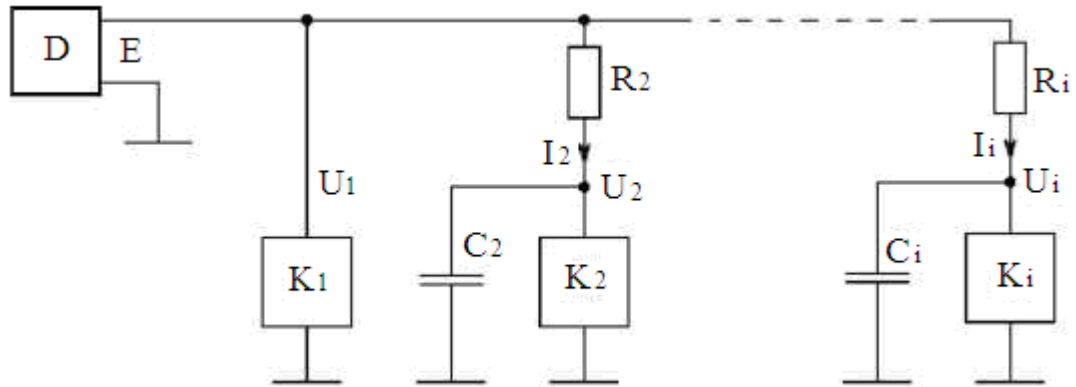


Рисунок 1.23 – Живлення каскадів через резистори гасіння

Джерело напруги  $D$  виробляє напругу  $E$ , яка призначена для живлення каскаду  $K_1$  з напругою  $U_1 = E$ .

Інші каскади  $K_i$  живляться напругами  $U_i$  і споживають струми  $I_i$ . Струм  $I_i$  створює на резисторі  $R_i$  падіння напруги, яка дорівнює надлишку  $E - U_i$ .

Тоді опір резистора  $R_i$  визначається формулою:

$$R_i = \frac{E - U_i}{I_i}. \quad (1.38)$$

Бувають випадки, коли струм споживання  $I_i$  не залишається постійним, а наприклад, зазнає пульсацій. Через це набуде пульсацій падіння напруги  $I_i R_i$ . Тому буде пульсуючим і  $U_i$ . Для усунення пульсацій  $U_i$ , їх “згладжують” конденсаторами

## 1.8 Напівпровідникові резистори

Напівпровідникові резистори представляють обширний клас напівпровідникових приладів, принцип дії яких заснований на властивостях напівпровідників змінювати свій опір під дією температури, електромагнітного випромінювання, прикладеної напруги і інших чинників. До найбільш розповсюджених напівпровідникових резисторів відносяться:

- терморезистори – прилади, опір яких значно змінюється при зміні температури;

- фоторезистори – прилади, принцип дії яких заснований на фоторезистивному ефекті – зміні опору напівпровідникового матеріалу під дією електромагнітного випромінювання;

- варистори – прилади, робота яких заснована на ефекті зменшення опору напівпровідникового матеріалу при збільшенні прикладеної напруги.

### Терморезистори.

Форма, габарити і конструктивні особливості сучасних терморезисторів вельми всілякі: їх виконують у вигляді дисків, мініатюрних намистинок, плоских прямокутників і ін.

Залежно від типу використовуваного напівпровідникового матеріалу і габаритів чутливого елемента початковий опір терморезисторів складає від декількох ом до десятків мегом.

На рисунку 1.24 представлено просте електричне коло, яке складається з терморезистора  $R_K$  і лінійного резистора  $R$ , величина якого не залежить від температури.

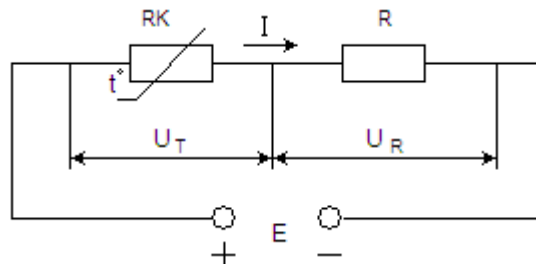


Рисунок 1.24 – Простіше коло з терморезистором

Якщо до цього кола прикласти напругу  $E$  в ньому встановиться деякий струм  $I$ , величина якого визначається з вирішення системи рівнянь:

$$E = U_T + U_R = UT + I R,$$

$$U_T = f(I),$$

де  $U_T$  – падіння напруги на терморезисторі в сталому режимі.

Залежність  $U_T = f(I)$  - вольтамперна характеристика терморезистора (рис. 1.25) з трьома основними ділянками:  $OA$ ,  $AB$  і  $BC$ . На початковій ділянці  $OA$

характеристика лінійна, оскільки при малих струмах потужність, яка виділяється у терморезисторі, мала і практично не впливає на його температуру.

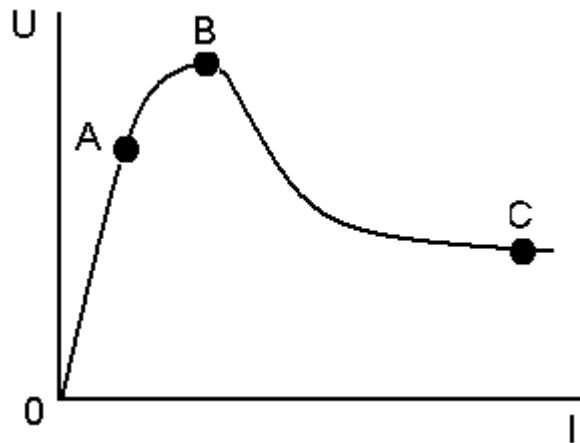


Рисунок 1.25 – Вольтамперна характеристика терморезистора

На ділянці А В лінійність характеристики порушується. Із зростанням струму температура терморезистора підвищується, а його опір (унаслідок збільшення числа електронів і дірок провідності в матеріалі напівпровідника) зменшується. При подальшому збільшенні струму на ділянці ВС зменшення опору виявляється настільки значним, що зростання струму веде до зменшення напруги на терморезисторі. В кінці ділянки ВС вольтамперна характеристика усе більш наближається до горизонтальної лінії паралельної осі абсцис. Це і дозволяє використовувати деякі типи терморезисторів для стабілізації напруги.

Окрім вольтамперної характеристики, найважливішою характеристикою терморезистора є залежність його опору від температури. Типова температурна характеристика  $R = f(T)$  терморезистора з негативним температурним коефіцієнтом приведена на рисунку 1.26.

Найважливішими параметрами терморезисторів є:

**Номінальний (холодний) опір** – опір робочого тіла терморезистора при температурі довкілля  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом.

**Температурний коефіцієнт опору  $\alpha_T$** , який виражає у відсотках зміну абсолютної величини опору робочого тіла терморезистора при зміні температури на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Звичайне значення  $\alpha_T$  наводиться для температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

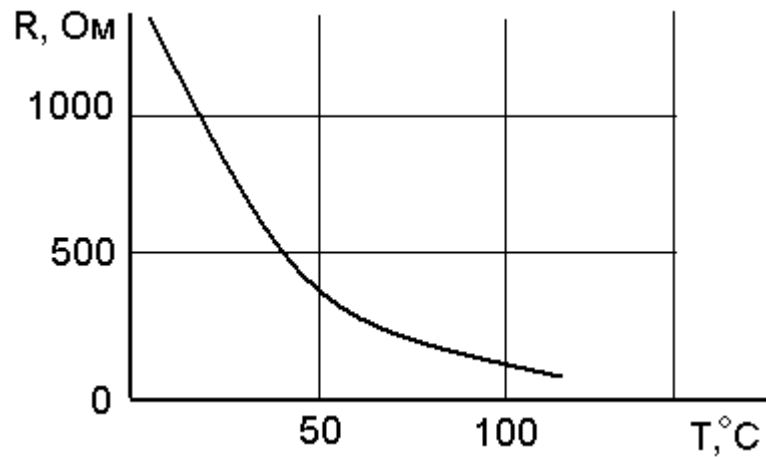


Рисунок 1.26 – Температурна характеристика терморезистора з негативним коефіцієнтом

Значення  $\alpha_T$  для будь-якої, температури в діапазоні 20 –150 °С визначається із співвідношення

$$\alpha_T = \frac{B}{T^2},$$

де  $B = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}$  - коефіцієнт температурної чутливості, залежний від

фізичних властивостей матеріалу, К;  $T_1$  – вихідна температура робочого тіла;  $T_2$  – кінцева температура робочого тіла, для якої визначається значення  $\alpha_T$ ;  $R_{T_1}$  і  $R_{T_2}$  – опори робочого тіла терморезистора при температурах відповідно  $T_1$  і  $T_2$ .

**Найбільша потужність розсіювання** – потужність, при якій терморезистор, який знаходиться при температурі 20 °С, розігрівається протікаючим струмом до максимальної робочої температури.

**Максимальна робоча температура** – температура, при якій характеристики терморезистора залишаються стабільною тривалий час (протягом зазначеного терміну служби).

**Постійна часу  $\tau$**  – час, протягом якого температура терморезистора стає рівною 63 °С при перенесенні його з повітряного середовища з температурою 0°С в повітряне середовище з температурою 100 °С, с. Таким чином, параметр  $\tau$  характеризує теплову інерцію терморезистора. Постійна часу  $\tau$  є відношенням теплоємності  $C$  до коефіцієнта розсіювання  $b$ .

$$\tau = \frac{C}{b}$$

Теплоємність  $C$  – кількість тепла, яке необхідне передати терморезистору, аби підвищити температуру робочого тіла на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Дж/ $^{\circ}\text{C}$ .

Коефіцієнт розсіювання  $b$  – потужність, яка розсіюється терморезистором при різниці температур робочого тіла і довкілля в  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Вт/град.

Терморезистори з негативним температурним коефіцієнтом використовуються для виміру і регулювання температури, термокомпенсації різних елементів електричних кіл, які працюють в широкому інтервалі температур, виміру потужності височастотних коливань і індикації променистої енергії, стабілізації напруги в колах постійного і змінного струмів, як регульовані безконтактні резистори і тому подібне.

Терморезистори з позитивним температурним коефіцієнтом (позистори) виготовляються на основі титанату барію, легованого спеціальними домішками, які у визначеному інтервалі температур збільшують свій питомий опір на декілька порядків. Існуюча технологія дозволяє виготовляти позистори з позитивним  $\alpha_T$ , який становить  $0,15 - 0,2$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ ). По своєму конструктивному оформленню позистори подібні терморезисторам типа пігулки. Вони мають діаметр близько  $5\text{ мм}$  і висоту  $1,5\text{ мм}$ . Дротяні виводи припаяні до торцевих поверхонь пігулки. Від атмосферних впливів позистор захищений шаром електроізоляційної емалі.

Принцип роботи позистора ілюструє схема, приведена на рисунок 1.27.

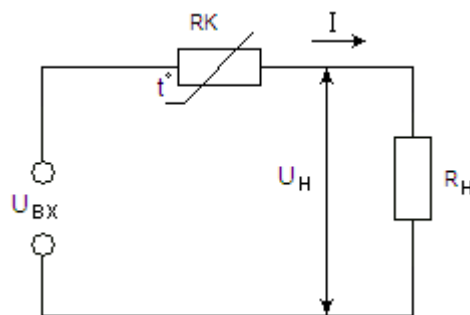


Рисунок 1.27 – Схема включення позистора

У цій схемі позистор  $R_K$ , включений послідовно з опором навантаження  $R_H$ , використовується як обмежувач струму. Коли опір навантаження па-



дає нижче за визначеного значення, в колі збільшується струм і зростає температура позистора. Опір позистора при цьому зростає, що обмежує струм в колі навантаження.

### Фоторезистори.

Фоторезистори виготовляються на основі сульфїду кадмію, селенїду кадмію, сірчистого свинцю, а також полікристалічних шарів сірчистого і селенистого кадмію. Конструкції фоторезисторів всілякі. Світлочутливі елементи зазвичай розміщуються в пластмасовий або металевий корпус, а в окремих випадках, коли потрібні малі габарити, випускаються без корпусу.

Фоторезистор включається в коло послїдовно з джерелом напруги і опором навантаження (рис. 1.28).

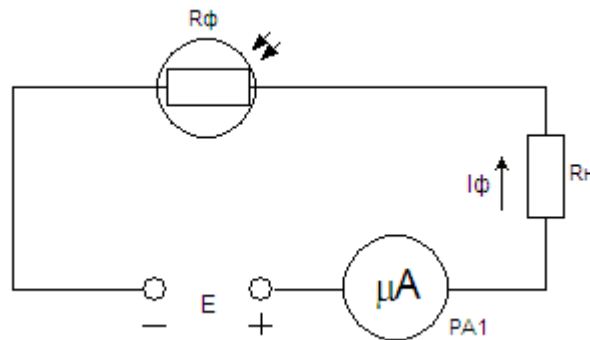


Рисунок 1.26 – Схема включення фоторезистора

Якщо фоторезистор знаходиться в темноті, то через нього тече темповою струм

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H}$$

де  $E$  – е.р.с. джерела живлення;  $R_T$  – величина електричного опору фоторезистора в темноті (темповий опір),  $R_H$  – опір навантаження.

При освітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на переведення електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар зростає, опір фоторезистора падає і через нього тече світловий струм

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H}$$

Різниця між світловим і темновим струмом дає значення струму  $I_{\Phi}$ , який отримав назву первинного фотоструму провідності.

$$I_c = I_c - I_n$$

Коли променистий потік малий, первинний фотострум провідності практично безінерційний і змінюється прямо пропорційно величині променистого потоку, падаючого на фоторезистор. У міру зростання величини променистого потоку збільшується число електронів провідності. Рухаючись усередині речовини, електрони стикаються з атомами, іонізують їх і створюють додатковий потік електричних зарядів, який отримав назву вторинного фотоструму провідності. Збільшення числа іонізованих атомів гальмує рух електронів провідності. В результаті цієї зміни фотоструму запізнюються в часі відносно змін світлового потоку, що визначає деяку інерційність фоторезистора.

Основні характеристики фоторезисторів.

**Вольтамперна**, характеризує залежність фотоструму (при постійному світловому потоці  $\Phi$ ) або темпового струму від прикладеної напруги. Для фоторезисторів ця залежність практично лінійна (рис. 1.29).

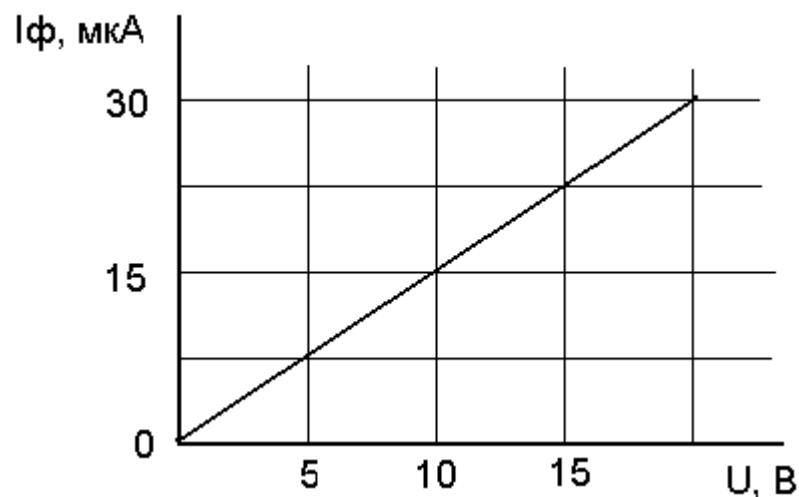


Рисунок 1.29 – Вольтамперна характеристика фоторезисторів

**Світлова (люксамперна)**, характеризує залежність фотоструму від падаючого світлового потоку постійного спектрального складу. Напівпровідни-

кові фоторезистори мають нелінійну люксамперну характеристику (рис. 1.30).

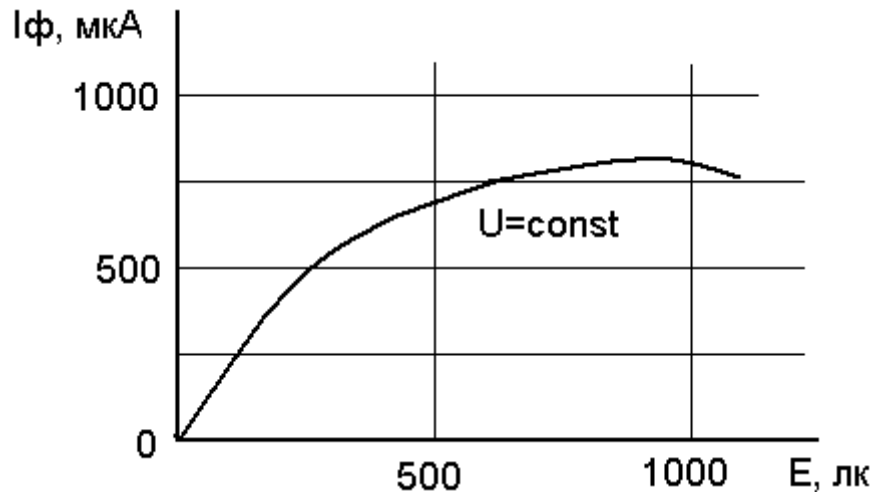


Рисунок 1.30 – Світлова характеристика фоторезисторів

Найбільша чутливість виходить при малих освітленнях. Це дозволяє використовувати фоторезистори для виміру дуже малих інтенсивностей випромінювання. При збільшенні освітленості світловий струм зростає приблизно пропорційно кореню квадратному з освітленості. Нахил люксамперної характеристики залежить від прикладеної до фоторезистора напруги.

**Спектральна**, характеризує чутливість фоторезистора при дії на нього потоку випромінювання постійної потужності певної довжини хвилі. Спектральна характеристика визначається матеріалом, який використовується для виготовлення світлочутливого елемента. Сірчисто-кадмієві фоторезистори мають високу чутливість у видимій області спектру, селенисто-кадмієві – в червоній, а сірчисто-свинцеві – в інфрачервоній (рис. 1.31).

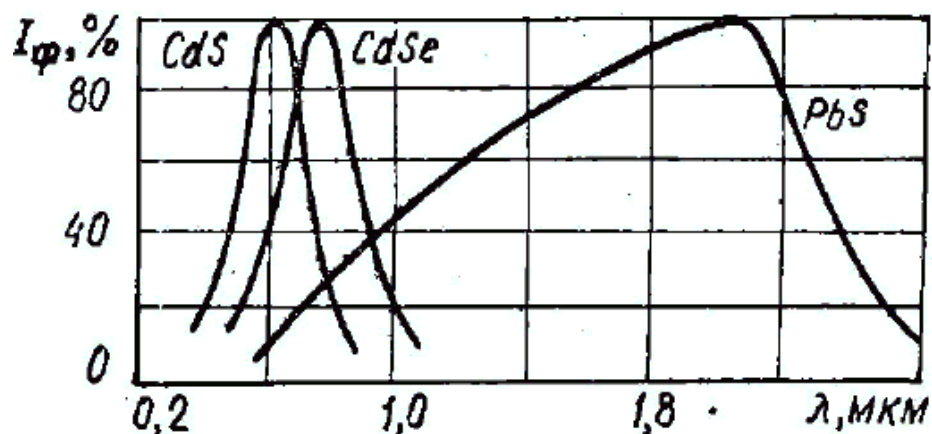


Рисунок 1.31 – Спектральна характеристика фоторезисторів

**Частотна**, характеризує чутливість фоторезистора при дії на нього світлового потоку, який змінюється з визначеною частотою. Наявність інерційності у фоторезисторів приводить до того, що величина їх фотоструму залежить від частоти модуляції падаючого на них світлового потоку – із збільшенням частоти світлового потоку фотострум зменшується (1.32). Інерційність обмежує можливості вживання фоторезисторів при роботі із змінними світловими потоками високої частоти.

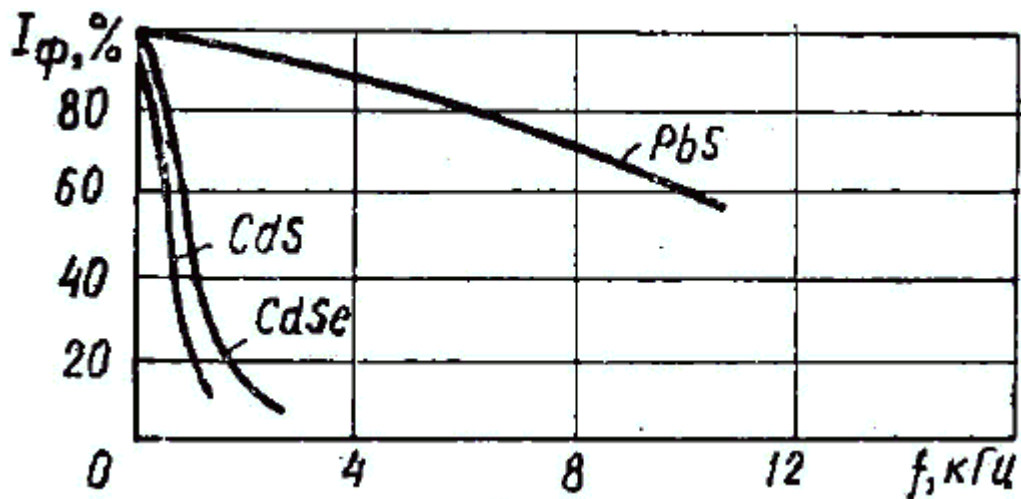


Рисунок 1.32 – Частотна характеристика фоторезисторів

### Варистори.

Варистори є напівпровідниковими резисторами із струмопровідним елементом, виконаним з карбіду кремнію і керамічного єднального матеріалу. Деякі напівпровідникові варистори призначені для використання у мікросхемах.

Схема включення варистора приведена на рисунку 1.33.

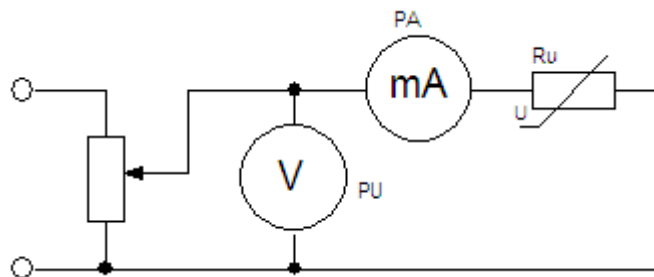


Рисунок 1.33 - Схема включення варистора

З збільшенням прикладеної напруги опір варистора зменшується, а струм, який протікає в колі, наростає. Основною особливістю варистора є нелінійність його вольтамперної характеристики (1.34), яка пояснюється явищами, які відбуваються на контактах і на поверхні кристалів карбіду кремнію.

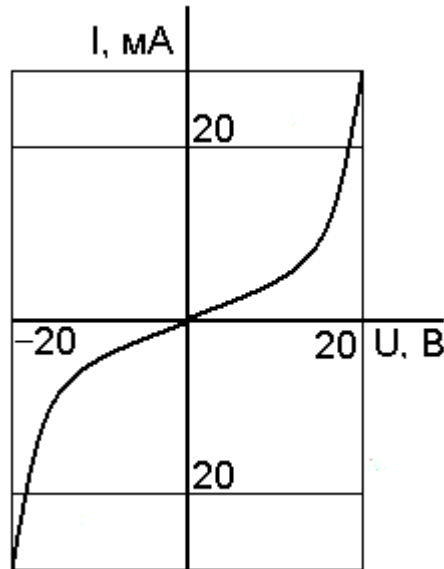


Рисунок 1.34 - Вольтамперна характеристика варистора

При підвищенні напруги, прикладеної до варистора, зростає напруженість електричного поля між окремими кристалами. Це супроводиться електростатичною емісією з гострих зубців і граней кристалів карбіду кремнію. Одночасно відбувається пробій оксидних плівок, які утворюються на поверхні кристалів, а також мікронагрів контактних точок між кристалами. Все це наводить до підвищення провідності варистора, причому полярність прикладеної напруги істотного значення не має – нелінійне зростання струму через прибор спостерігається при підвищенні напруги будь-якої полярності. Оскільки вольтамперна характеристика симетрична, варистор може бути використаний в колах і постійного, і змінного струмів.