

## ЛЕКЦИЯ 7

### Резисторы специального назначения

План занятия:

1. Варисторы, принцип работы, основные параметры, области применения
2. Тензорезисторы, принцип работы, основные параметры, области применения
3. Терморезисторы, принцип работы, основные параметры, области применения
4. Фоторезисторы, принцип работы, основные параметры, области применения

### Варисторы

*Варистор* (англ. *vari(able) (resi)stor* – переменный резистор) – резистор, сопротивление которого зависит от приложенного к нему напряжения. Варистор имеет нелинейную симметричную вольтамперную характеристику (рис.7.1).

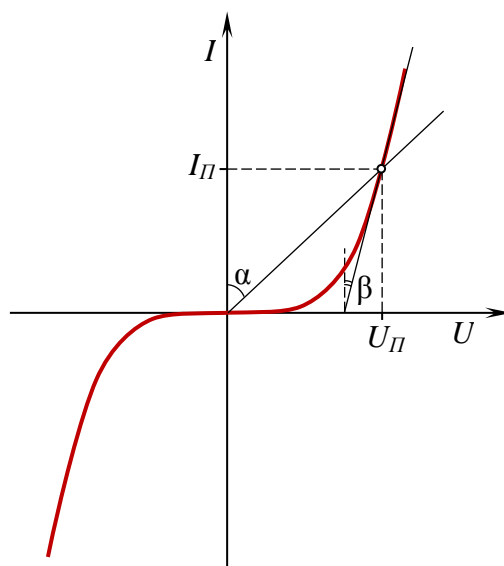


Рис.7.1. ВАХ варистора

Статическое и динамическое (дифференциальное) сопротивления нелинейных элементов широко используются при расчете нелинейных цепей. Статическое и дифференциальное сопротивление для заданного режима работы, определяемого положением рабочей точки, можно определить по ВАХ нелинейного элемента.

$$\text{Статическое сопротивление} - r_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{П}}}{I_{\text{П}}} = \frac{m_U}{m_I} \cdot \text{tg } \alpha;$$

где  $m_U$  и  $m_I$  – масштаб осей напряжения и тока.

$$\text{Динамическое сопротивление} - r_{\text{д}} = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{m_U}{m_I} \cdot \text{tg } \beta.$$

Изготавливают варисторы спеканием полупроводника при температуре около  $1700^{\circ}\text{C}$ , используют преимущественно порошкообразный карбид

кремния (SiC) или оксид цинка (ZnO), и связующее вещество (глина, жидкое стекло, лаки, смолы и др.). Гранулы оксида цинка сами по себе обладают высокой проводимостью, в то время как оксиды других металлов, которыми покрыты гранулы, обладают высоким сопротивлением. В местах спекания гранул оксида цинка образуются "микроваристоры" с уровнем защиты около 3,5 В. Затем поверхность полученного элемента металлизуют и припаивают к ней выводы, для защиты от внешних воздействий элемент покрывают электроизоляционным лаком.

Нелинейность ВАХ варисторов обусловлена локальным разогревом соприкасающихся граней между многочисленными кристаллами полупроводника (рис.7.2). Сопротивление контактных областей при этом существенно снижается, что приводит к уменьшению общего сопротивления варистора.

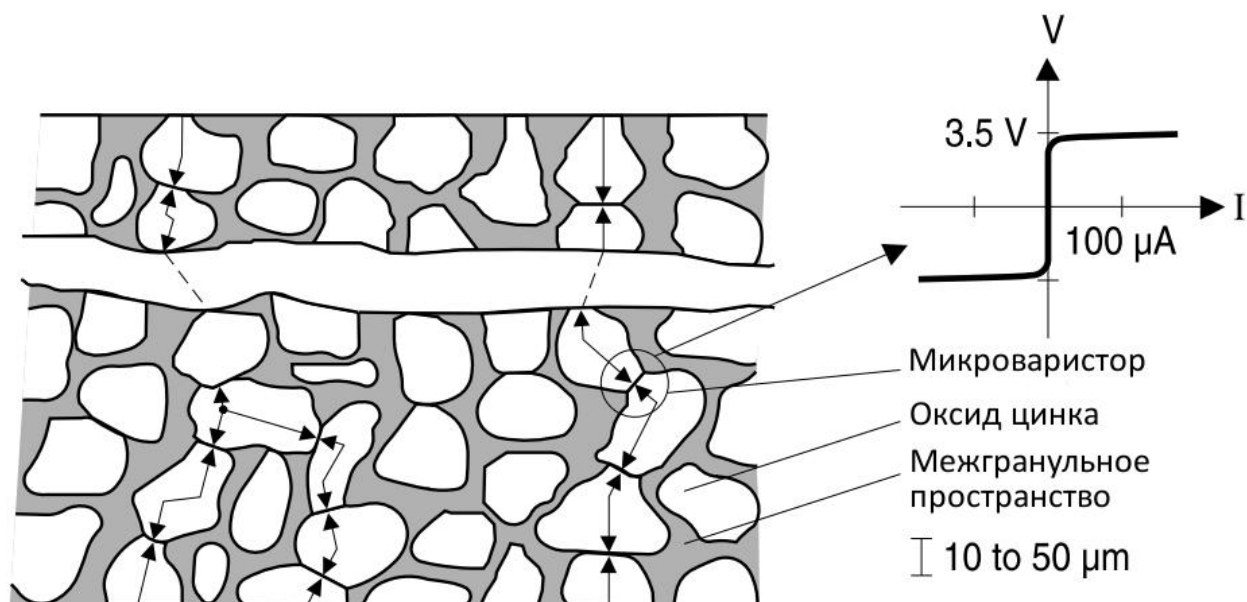


Рис.7.2. Механизм электропроводности варистора

### Параметры варисторов

*Классификационное напряжение*, В – напряжение при определённом токе (обычно при 1 мА). Иногда приводят *коэффициент защиты варистора* – отношение напряжения на варисторе при токе 100 А к напряжению при токе 1 мА. Он характеризует способность варистора ограничивать импульсы перенапряжения (для варисторов ZnO 1,4...1,6). Таким образом, при росте напряжения в 1,4...1,6 раза ток варистора возрастает в 100000 раз.

*Рабочее напряжение* (Operating voltage), В (для пост. тока  $V_{dc}$  и  $V_{rms}$  – для переменного) – максимальное напряжение, которое должно быть приложено к варистору в рабочем режиме, оно может быть превышено только (кратковременным) импульсом перенапряжения (диапазон от нескольких В до нескольких десятков кВ).

*Рабочий ток* (Operating Current), А – диапазон от 0,1 мА до 1 А.

*Максимальный импульсный ток (Peak Surge Current), А.*

*Допустимая мощность рассеивания, Вт* – определяет количество тепла, которое варистор успевает рассеивать, зависит от геометрических размеров варистора и конструкции выводов.

*Энергия абсорбции (поглощения) (Absorption energy), Дж* – энергия рассеиваемая варистором при протекании через него импульса тока заданной амплитуды и длительности.

*Коэффициент нелинейности* – определяется отношением статического сопротивления варистора  $r_{ст}$  к его динамическому сопротивлению  $r_{д}$

$$\lambda = \frac{r_{ст}}{r_{д}} = \frac{U \cdot dI}{I \cdot dU}$$

*Температурные коэффициенты* (статического сопротивления, напряжения, тока) – для всех типов варисторов не превышает 0,1% на градус.

### Применение варисторов

Основная область применения варисторов – это защита схем потребителей от импульсов перенапряжения (импульсных помех и быстрых переходных процессов). Благодаря симметричной ВАХ и высокому быстродействию варисторы имеют преимущество перед ограничительными диодами и термисторами. Варистор устанавливается параллельно защищаемой схеме (рис.7.3), при возникновении импульса перенапряжения сопротивление варистора снижается до долей Ом и шунтирует защищаемый объект.

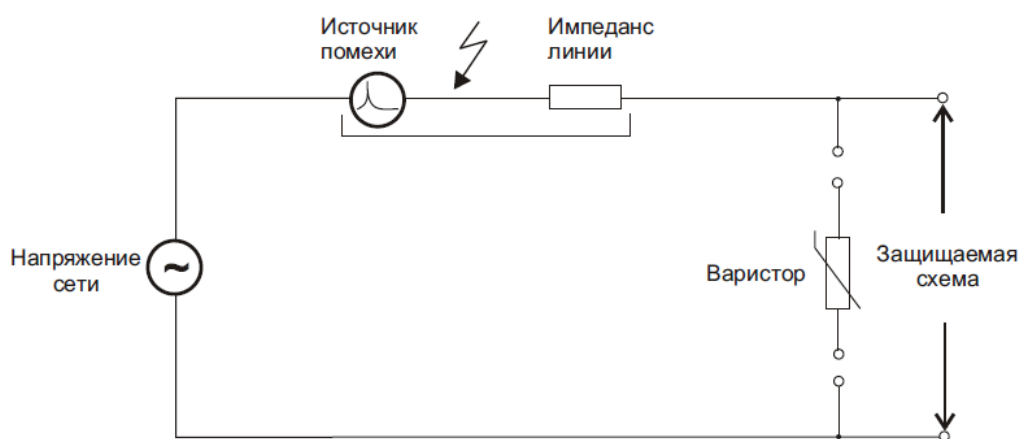


Рис.7.3. Схема включения варистора

Выбор конкретного варистора осуществляют по следующим параметрам цепи:

- по номинальному (рабочему) напряжению цепи определяют  $V_{dc}$  или  $V_{rms}$  (с учетом допуска сетевого напряжения, к примеру +10%);
- определяют требуемую рассеиваемую мощность  $P_{max}$ ;

- выбирают максимальное напряжение ограничения (величину перенапряжения).

Перегрев варистора, за счет протекания через него тока чрезмерной длительности, может привести к необратимым изменениям его ВАХ. Для обеспечения надежной защиты устройства, когда помеха проявляется в виде частых перепадов напряжения большой амплитуды, целесообразно применять комбинационную схему из нескольких защитных элементов (рис.7.4).

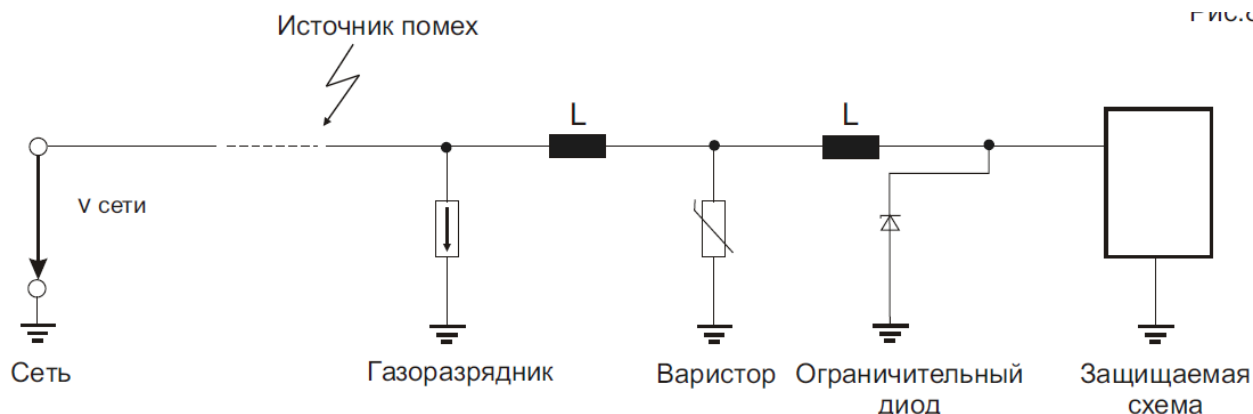


Рис.7.4. Комбинационная схема защиты от всплесков перенапряжений

Некоторым недостатком варисторов является большая собственная емкость, ограничивающая возможность их применения на высоких частотах. Емкостной фактор существенен только в отсутствие тока через варистор, поскольку с увеличением приложенного напряжения емкость варистора снижается. При максимально допустимом падении напряжения на варисторе его емкость близка к нулю.

## Тензорезисторы

*Тензорезистор* (от лат. *tensus* – напряжённый и лат. *resisto* – сопротивляюсь) – резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации. Применяются в основном в тензометрии для преобразования физической величины в электрический сигнал (тензодатчики).

По конструктивному исполнению тензорезисторы бывают:

*Намотанные тензорезисторы.* Тензопроволока наматывается с предварительным натягом в диапазоне деформаций упругого элемента. Эта конструкция применяется преимущественно с формоизменяемыми упругими элементами. Преимущество состоит в большой длине тензопроволоки, что обеспечивает большое сопротивление моста и очень хорошую передачу тепла упругому элементу. Поэтому напряжение питания моста можно поднимать до 200 В и получать выходное напряжение до 400 мВ.

*Проволочные тензорезисторы.* В настоящее время тензочувствительные элементы делаются преимущественно из константановой проволоки (диаметром около 0,02 мм), которая вклеена между двумя подложками (из специальной бумаги). Благодаря изменению размеров витков проволоки можно

изготавливать тензорезисторы с различными номинальными сопротивлениями. (Диапазон этих сопротивлений составляет примерно 100...1000 Ом.).

*Фольговые тензорезисторы.* Также изготавливаются преимущественно из константана. В большинстве случаев тензорешетку выполняют фотохимическим способом (травлением). По сравнению с проволочными фольговые тензорезисторы имеют следующие преимущества:

- малую общую толщину (порядка 25 мкм);
- большой ток питания, благодаря большой поверхности проводника и малой толщине подложки;
- большой спектр форм тензорешетки.

Именно благодаря последнему преимуществу фольговые тензорезисторы применяются прежде всего в современных конструкциях датчиков силы (например, со сдвиговыми упругими элементами), которые технически могут быть выполнены только благодаря этому типу тензорезисторов.

*Металлические тонкопленочные тензорезисторы.* Являются перспективными, поскольку все чувствительные элементы могут изготавливаться в ходе одной технологической операции, что обеспечивает высокую степень идентичности их свойств. Но технологические проблемы здесь еще не полностью решены. Это относится как к изготовлению стабильного тензочувствительного слоя, так и к изготовлению изоляционного слоя на электропроводном упругом элементе.

### Параметры тензорезисторов

*Номинальное сопротивление, Ом* – активное сопротивление тензорезистора при нулевой деформации. Для проволочных тензорезисторов выбирается из ряда 50, 100, 200, 400, 800 Ом.

*Номинальная база тензорезистора L, мм.* Все выпускаемые проволочные тензорезисторы в соответствии с размерами базы можно условно разделить на три группы:

- 1 малобазные тензорезисторы, база которых не превышает 7 мм;
- 2 среднебазные тензорезисторы, база которых лежит в пределах 7...20 мм;
- 3 большебазные тензорезисторы с базой более 20 мм.

Номинальная база тензорезисторов выбирается из ряда: 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0; 15,0; 20,0; 50,0; 100,0 и 200,0 мм, который регламентирован ГОСТ 21616-76. Отклонение от номинального значения не должно превышать  $\pm 20\%$  для баз до 5 мм и  $\pm 10\%$  для баз более 5 мм. Длина выводов для разных тензорезисторов составляет примерно 10...80 мм.

*Коэффициент тензочувствительности, определяется отношением:*

$$K = \frac{\Delta R \cdot l}{R \cdot \Delta l},$$

где  $\Delta R$  – полное изменение сопротивления при деформации  $\Delta l$ .

Коэффициент тензочувствительности серийно выпускаемых проволочных тензорезисторов, изготовленных из константановой проволоки, составляет  $2,1 \pm 0,2$ .

*Предельное отклонение сопротивления, %.*

*Максимальная измеряемая деформация, мкм/м.*

*Максимальный ток питания, мА.*

## Применение тензорезисторов

*Измерение силы.* Тензорезистор, наклеенный на рабочее тело датчика, являющегося опорой для груза или прилагаемого усилия, может измерять силу, направленную на эту опору, или вес, лежащего на ней груза.

*Измерение перемещения.* Тензорезистор, наклеенный на упругий элемент, позволяет определить изгибающее усилие на этот упругий элемент, таким образом, давая возможность измерить перемещение, вызвавшее это изгибающее усилие.

*Измерение крутящего момента.* Тензорезистор, наклеенный на карданный вал автомобильного двигателя, или торсионный вал бурильной машины, позволяет измерить силу трансмиссии, иными словами крутящий момент данного вала.

*Измерение давления.* Тензорезистор, наклеенный на диафрагму (мембрану), позволяет определить давление воздуха или жидкости на эту диафрагму. Как правило, тензорезистор приклеивают на заднюю поверхность диафрагмы, чтобы избежать его повреждения за счет непосредственного давления воздуха или жидкости.

В большинстве схем тензодатчиков применяются активные тензорезисторы с компенсационными, которые в определенной температурной области обеспечивают функцию преобразования, не зависящую от изменения температуры внешней среды.

## Схемы включения тензорезисторов

Основной измерительной схемой в тензометрировании является мостовая схема (рис.7.5). Напряжение диагонали моста свидетельствует об изменении величины составляющих его сопротивлений. Изменение выходного напряжения моста весьма мало (десятки милливольт) даже при значительных возбуждающих напряжениях (обычно  $V_a \approx 10$  В).

По числу плеч, содержащих активные резисторы, принято различать три модификации мостовой схемы. Наиболее простой схемой включения является мостовая схема с одним активным плечом (рис.7.5,а), три других плеча выполнены в виде стабильных резисторов, размещенных в промежуточном преобразователе или приборе. В настоящее время наиболее широкое применение, имеет полумостовая схема (рис.7.5,б,в), где один тензорезистор используют как активный, второй, включенный в смежное плечо моста, – для температурной компенсации; другие плечи выполнены в виде стабильных

резисторов, установленных в промежуточном преобразователе или приборе. Применяют также схему полного моста (рис.7.5,д), в которой все плечи находятся вне прибора. Эту схему используют главным образом в тех случаях, когда недостаточно постоянны переходные сопротивления соединительных линий, токосъемных или коммутационных устройств. В табл.7.1 приведены функциональные зависимости для этих схем.

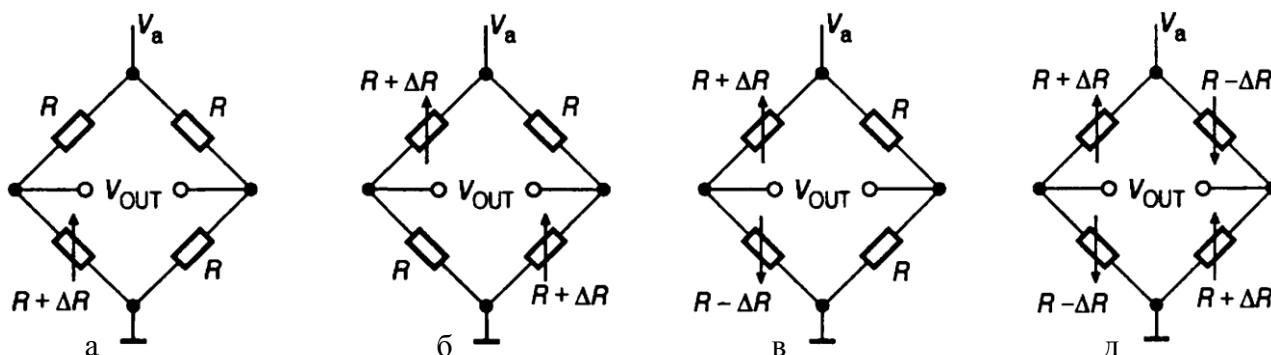


Рис.7.5. Схемы мостовых включений тензорезисторов с питанием от источников постоянного напряжения

Таблица 7.1

**Параметры мостовых схем при питании от источника постоянного напряжения**

Схема	Рис.7.5,а	Рис.7.5,б	Рис.7.5,в	Рис.7.5,д
$V_{OUT}$	$\frac{V_a}{4} \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}}$	$\frac{V_a}{4} \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}}$	$\frac{V_a}{2} \frac{\Delta R}{R}$	$V_a \frac{\Delta R}{R}$
Погрешность линейности	0,5 %/%	0,5 %/%	0	0

Следует отметить, что поскольку выход моста пропорционален возбуждению  $V_a$ , точность измерения выхода не может быть выше точности поддержания возбуждения. Как видно, наиболее часто используемая схема с одним датчиком обладает заметной погрешностью линейности. Лучшими в смысле линейности свойствами обладают мостовые схемы с питанием неизменным постоянным током, приведенные на рис.7.6, а в табл.7.2 представлены характеристики этих схем.

Стабильным током удобно питать удаленные мостовые схемы, т.к. падение напряжения на питающих проводах не сказывается на точности преобразования. Недостатком мостовых схем с токовым возбуждением является невозможность подключения нескольких мостов к одному источнику.

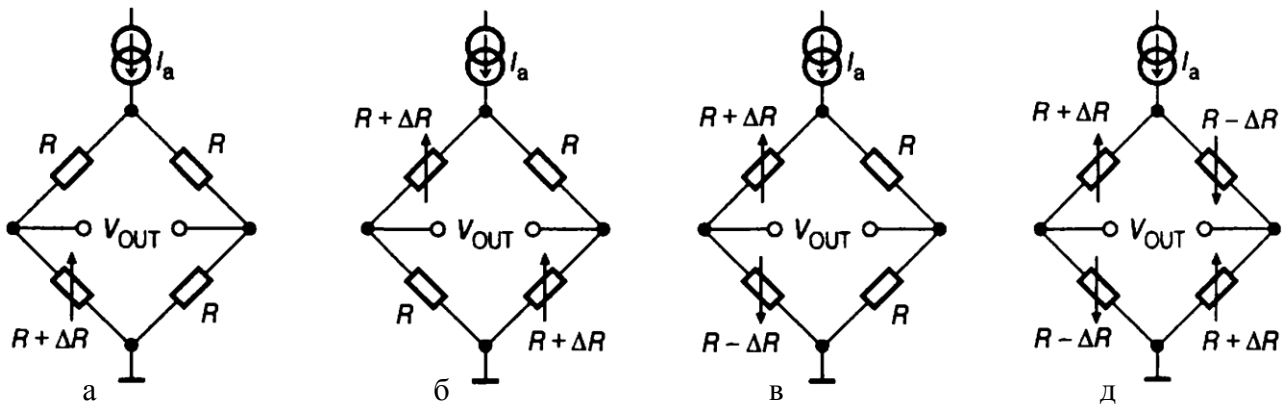


Рис.7.6. Схемы мостовых включений тензорезисторов с питанием от источников постоянного тока

Таблица 7.2

Параметры мостовых схем при питании от источника постоянного тока

Схема	Рис.7.6,а	Рис.7.6,б	Рис.7.6,в	Рис.7.6,д
$V_{OUT}$	$\frac{I_a R}{4} \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}}$	$\frac{I_a}{2} \Delta R$	$\frac{I_a}{2} \Delta R$	$I_a \Delta R$
Погрешность линейности	0,25 %/%	0	0	0

Установлены три основные причины появления температурных приращений сопротивления: температурное изменение сопротивления материала тензочувствительного элемента; тепловое расширение тензорезистора; тепловое расширение исследуемой конструкции.

### Терморезисторы

*Терморезистор* – это резистор, сопротивление которого сильно зависит от изменения температуры.

Для терморезисторов характерен большой ТКС, в десятки раз превышающий ТКС металлов. Различают терморезисторы с отрицательным ТКС (англ. NTC – Negative Temperature Coefficient) – *термисторы*, сопротивление которых снижается с ростом температуры (рис.7.7), и терморезисторы с положительным ТКС (англ. PTC – Positive Temperature Coefficient) – *позисторы*, сопротивление которых увеличивается с ростом температуры.

По *интервалу рабочих температур* различают терморезисторы низкотемпературные (рассчитанные на работу при температуре ниже 170 К), среднетемпературные (170...510 К) и высокотемпературные (выше 570 К). Кроме того, существуют терморезисторы, предназначенные для работы при 4,2 К и ниже и при 900...1300 К. Наиболее широко используются среднетемпературные терморезисторы с ТКС от –2,4 до –8,4 %/К и номинальным сопротивлением 1...10<sup>6</sup> Ом.



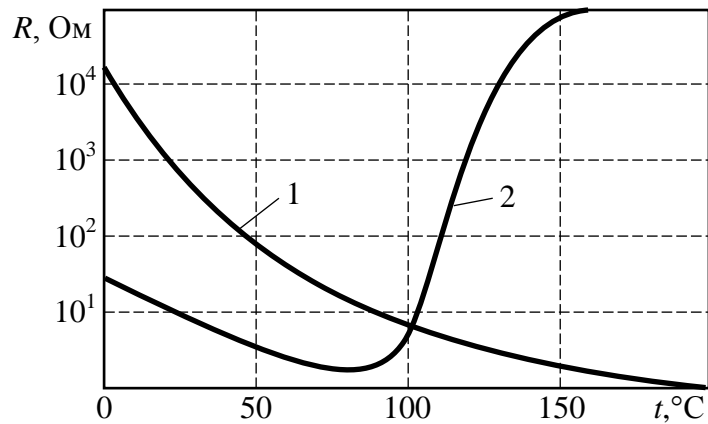


Рис.7.7. Температурные характеристики терморезисторов: 1 – термистор; 2 – позистор

Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния.

*Номинальное сопротивление терморезистора* – сопротивление при определенной температуре окружающей среды (обычно 25°C или 20°C).

*Температурный коэффициент сопротивления*

$$\alpha_R = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T} \cdot 100\% ,$$

выражает относительное изменение величины сопротивления резистора при изменении его температуры на один градус. Для выпускаемых промышленностью термисторов ТКС находится в диапазоне  $-2 \dots -6,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  для позисторов –  $10 \dots 60 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ .

*Максимально допустимая мощность рассеяния  $P_{\max}$*  – наибольшая мощность, которую терморезистор может рассеивать длительное время, не вызывая необратимых изменений характеристик. При этом его температура не должна превышать максимальную рабочую температуру.

*Коэффициент температурной чувствительности  $B$*  – характеризует температурную чувствительность терморезисторов в определенном диапазоне температур. Известен как *постоянная  $B$* , зависящая от физических свойств полупроводникового материала, из которого выполнен термочувствительный элемент, определяют по формуле

$$B = 2,303 \frac{\lg R_1 - \lg R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} ,$$

где  $R_1$  – сопротивление терморезистора, измеренное при температуре  $T_1$ , Ом;  
 $R_2$  – сопротивление терморезистора, измеренное при температуре  $T_2$ , Ом.

*Постоянная времени  $\tau$*  – характеризует тепловую инерционность терморезистора. Определяется как время в течении которого сопротивление терморезистора изменяется на 63% при переносе его из воздушной среды температурой 0 °С в воздушную среду с температурой 100 °С.

Терморезисторы используются для измерения и контроля температуры, компенсации температурных изменений параметров электрической цепей и электронных приборов, тепловой защиты, применяются в качестве пусковых реле, реле времени, измерителей мощности электромагнитного излучения на СВЧ, стабилизаторов температуры и напряжения.

## Фоторезисторы

*Фоторезистор* – это светочувствительный резистор, принцип действия которого основан на изменении проводимости полупроводникового материала под действием светового излучения. При воздействии на полупроводник электромагнитного излучения светового диапазона часть электронов материала приобретает энергию, достаточную для разрыва их связи с атомами. Это явление генерации свободных носителей заряда обуславливает увеличение проводимости полупроводника.

Фоторезисторы могут быть чувствительны к электромагнитному излучению в широком интервале длины волны (от ультрафиолетового до инфракрасного).

Для изготовления серийных фоторезисторов в настоящее время используют главным образом два типа материалов: сернистый кадмий и селенистый кадмий.

### Параметры фоторезисторов

Основные характеристики фоторезисторов – спектральная, люксамперная, вольтамперная характеристики.

*Спектральная характеристика* отображает чувствительность фоторезистора при действии на него излучения определенной длины волны (рис.7.8).

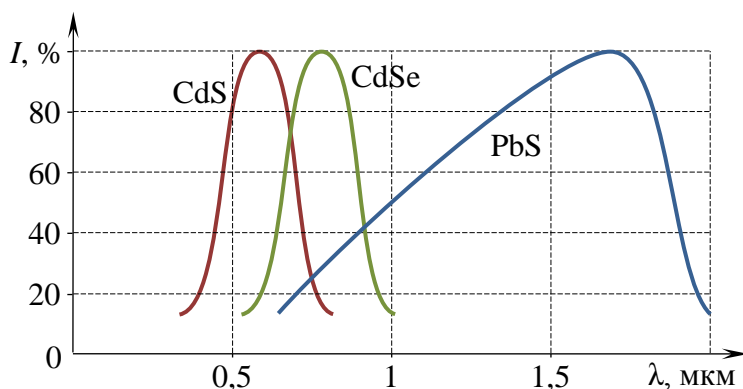


Рис.7.8. Спектральная характеристика фоторезистора

Чувствительность зависит от свойств материала светочувствительного элемента. Сернисто-кадмиевые фоторезисторы имеют высокую чувствительность в видимой области спектра, селенисто-кадмиевые – в красной и ближней инфракрасной областях, сернисто-свинцовые – в инфракрасной области спектра.

*Люксамперная характеристика* фоторезисторов показывает зависимость светового тока, протекающего через фоторезистор, от освещенности. Полупроводниковые фоторезисторы имеют обычно нелинейные люксамперные характеристики.

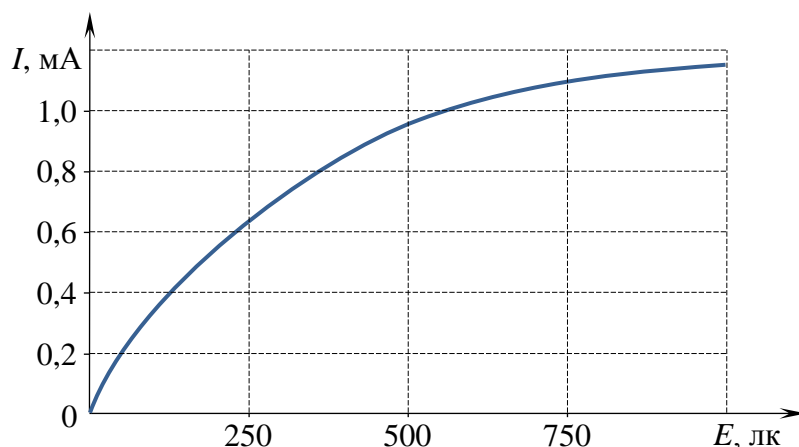


Рис.7.9. Люксамперная характеристика фоторезистора

*Вольтамперная характеристика* фоторезисторов линейна в широком интервале напряжения. Линейность нарушается только при малых значениях напряжения.

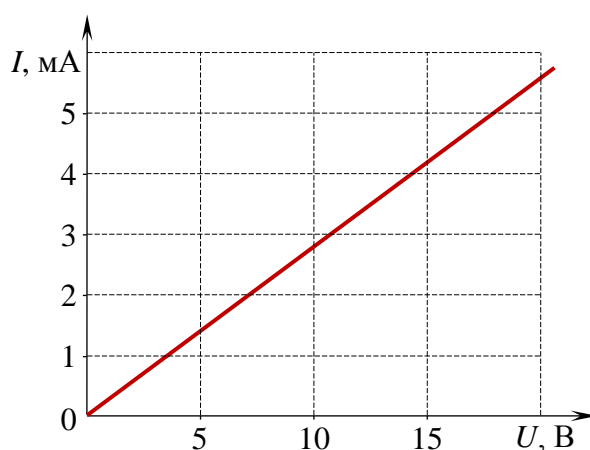


Рис.7.10. Вольтамперная характеристика фоторезистора

*Рабочее напряжение ( $U_{\phi}$ )* – напряжение которое можно приложить к фоторезистору при длительной эксплуатации без изменения его параметров свыше установленных.

*Темновой ток ( $I_T$ )* – ток, протекающий через фоторезистор при

приложенном рабочем напряжении через 30 с после снятия освещенности 200 лк.

*Световой ток ( $I_c$ )* – ток, протекающий через фоторезистор при приложенном рабочем напряжении и освещенности 200 лк от источника света с цветовой температурой 2850 К.

*Кратность изменения сопротивления ( $R_T/R_c$ )* – отношение темного сопротивления фоторезисторов к сопротивлению при освещенности 200 лк от источника света с цветовой температурой 2850 К.

Фоторезисторы позволяют создавать простые и надежные фотореле. Основной областью применения фоторезисторов является автоматика производства – сортировка и счет готовой продукции, обнаружение обрывов ленточных и листовых материалов, наличие объекта и т.д.

В измерительной технике фоторезисторы применяются для измерения высоких температур, для регулировки температуры в различных технологических процессах. Контроль уровня жидкости и сыпучих тел, защита персонала от входа в опасные зоны, контроль запыленности и задымленности различных объектов, автоматические выключатели уличного освещения и турникеты в метрополитене.