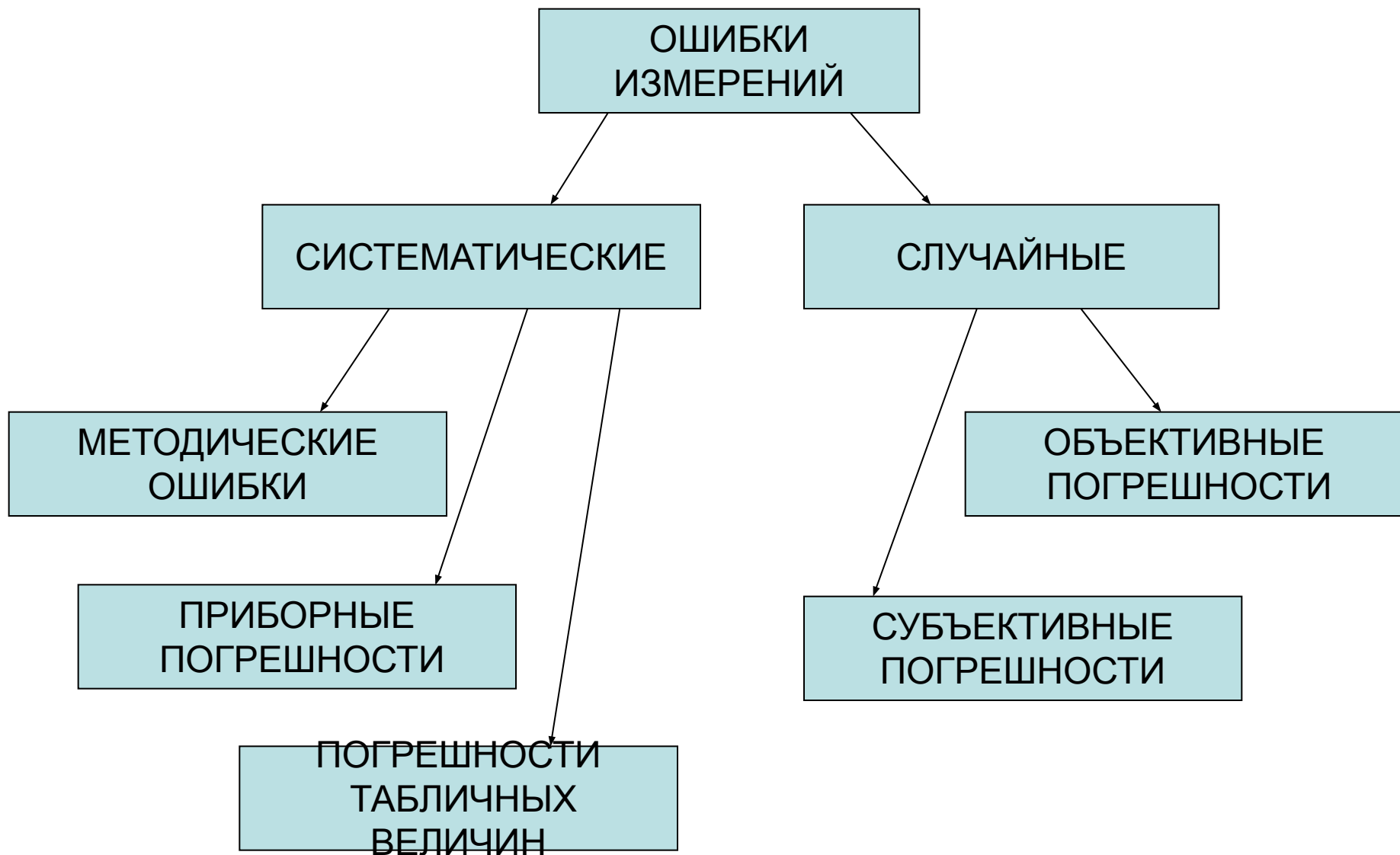


Тема лекции:

Теория ошибок

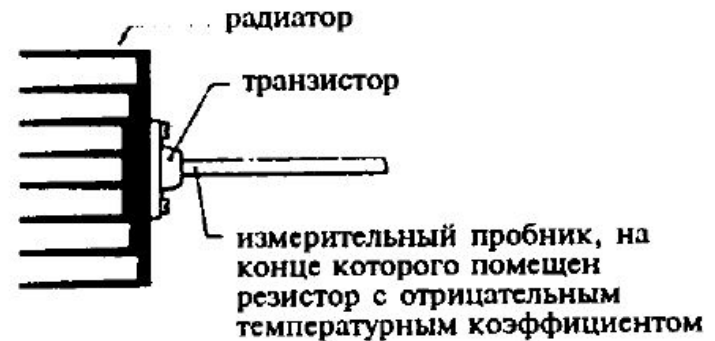
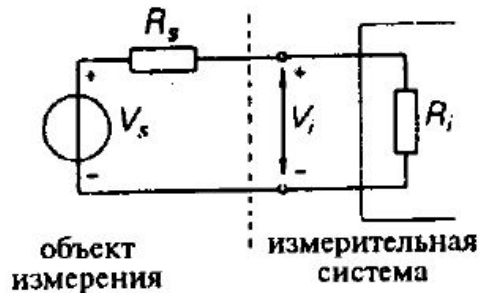
Ошибки измерений и их типы



Систематические ошибки

Систематической называется погрешность, которая при повторении измерений остается постоянной по величине и знаку.

- Методические ошибки



- Приборные погрешности
- Погрешности табличных величин

Случайные ошибки

Погрешности, величина и знак которых изменяется при повторении измерений, называются случайными погрешностями

- Объективные случайные погрешности
- Субъективные погрешности

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0 \quad \sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

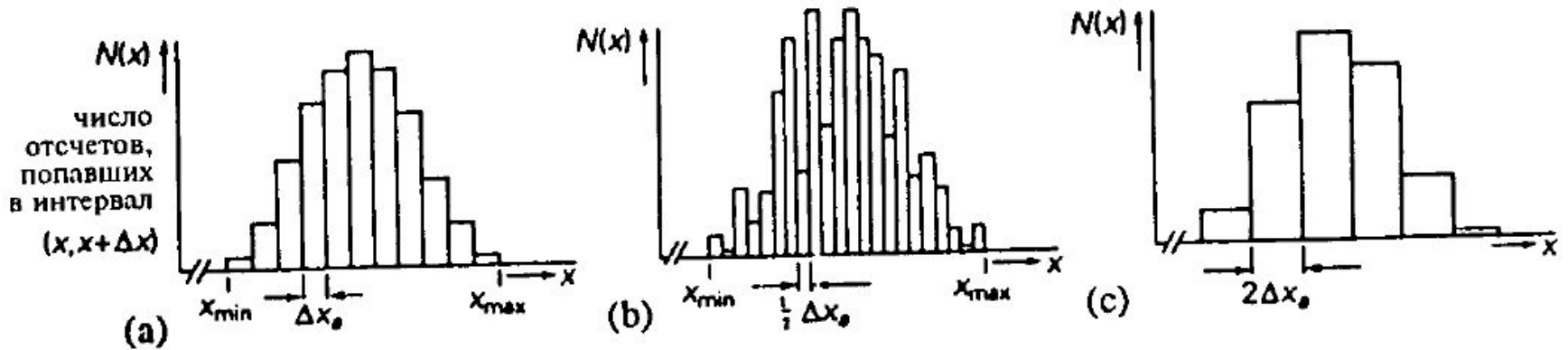
σ_x^2 - дисперсия (мера рассеивания x в окрестности \bar{x})

Гистограммирование

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\sqrt{n}}$$

для $n < 25$

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 - 3,3 \log n}$$

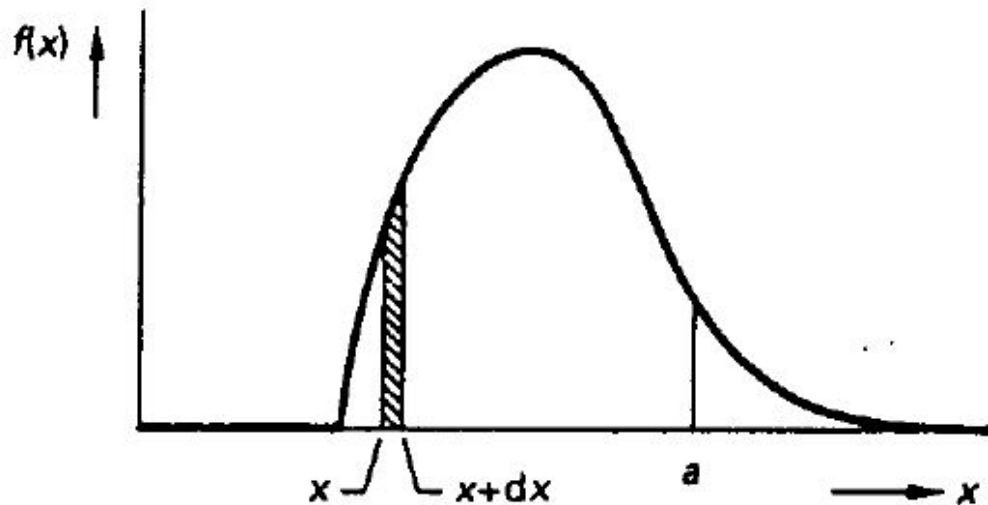


Гистограммы: (а) при правильном выборе ширины интервалов Δx , на которые разбивается весь диапазон возможных значений x ; (б) при слишком малых значениях Δx ; (в) при слишком больших значениях Δx .

Плотность распределения вероятностей

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{N(x)}{\Delta x}$$

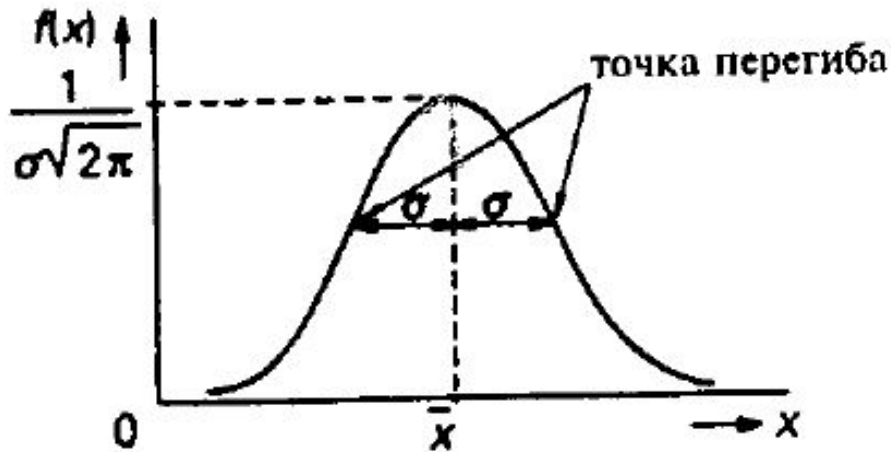
$$f(x)dx = \frac{N(x)}{n}$$



$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$$

$$P(x < a) = \int_{-\infty}^a f(x)dx$$

Нормальное (гауссовское) распределение

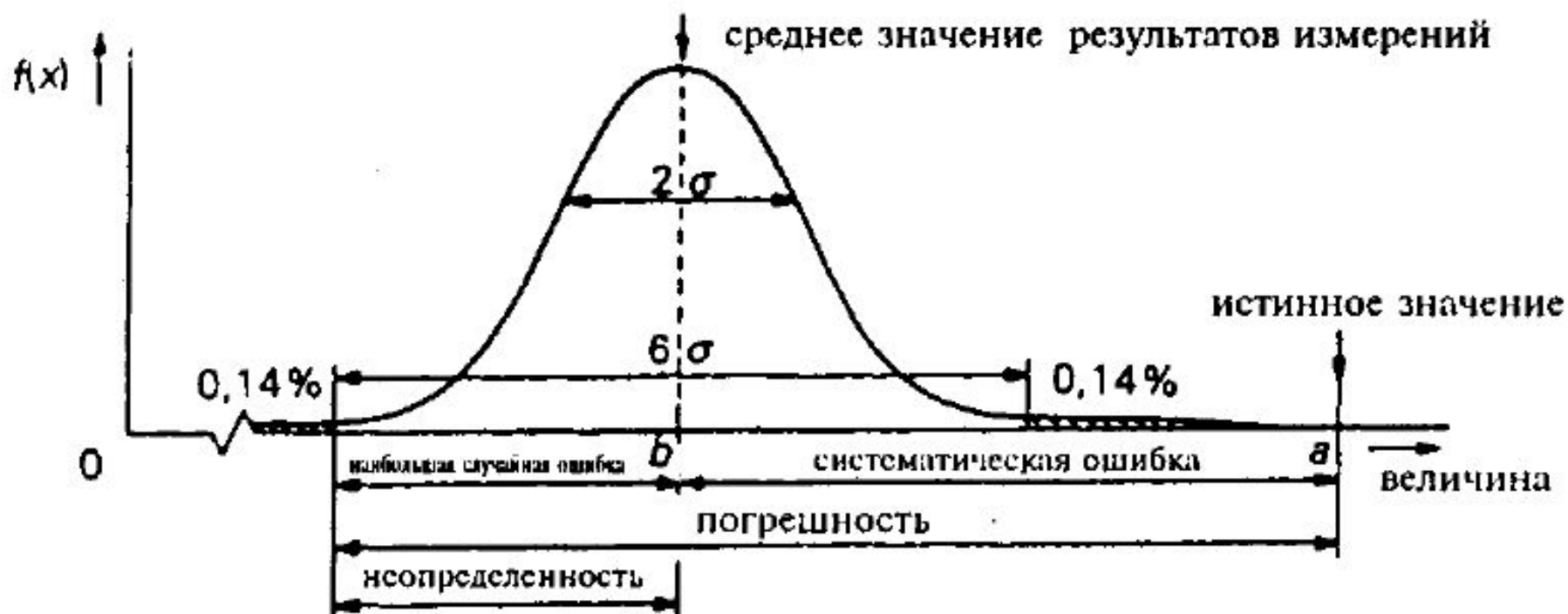


$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

x находится вне интервала	Вероятность
$(\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma)$	0,32
$(\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma)$	0,045
$(\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma)$	0,0026

Случайные и систематические ошибки



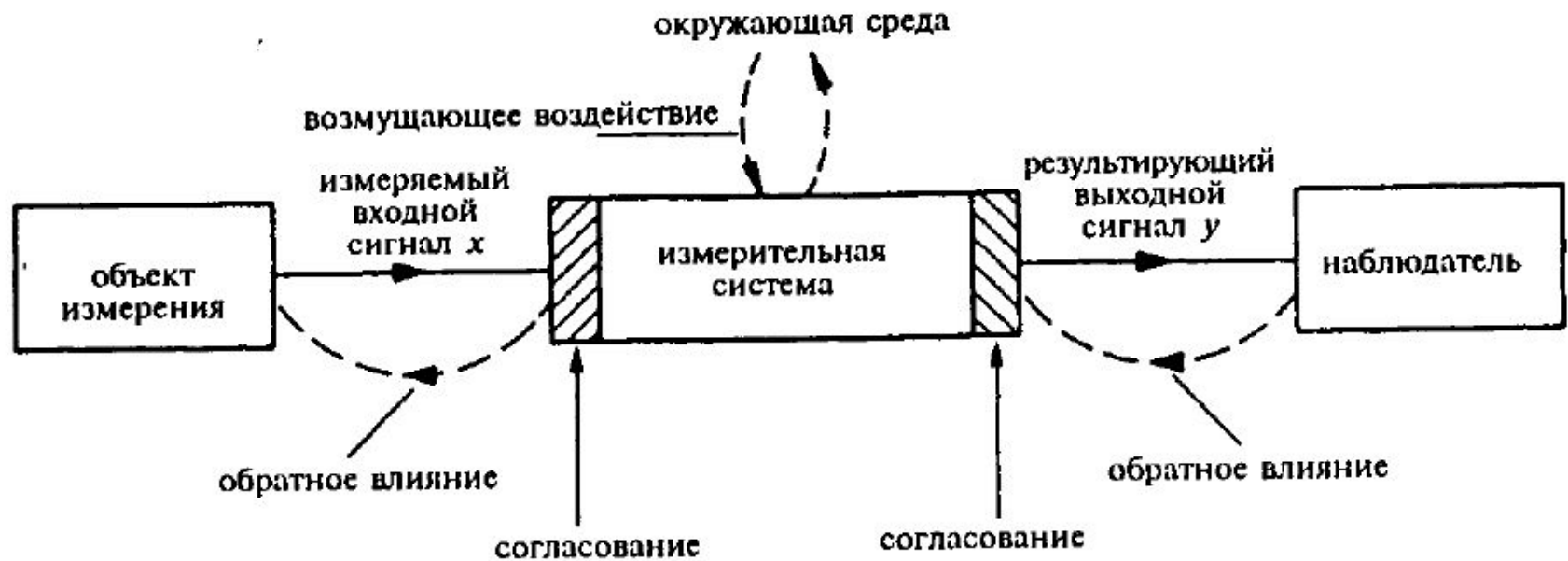
Погрешности в косвенных измерениях

$$x = f(a, b, c \dots)$$

$$\Delta x = f(a, b, c \dots) - f(a - \Delta a, b - \Delta b, c - \Delta c \dots)$$

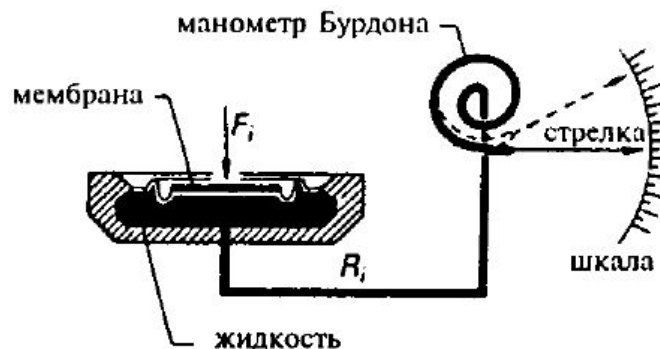
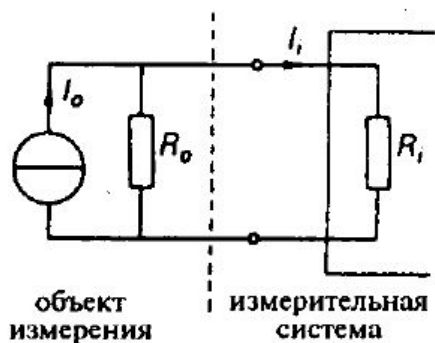
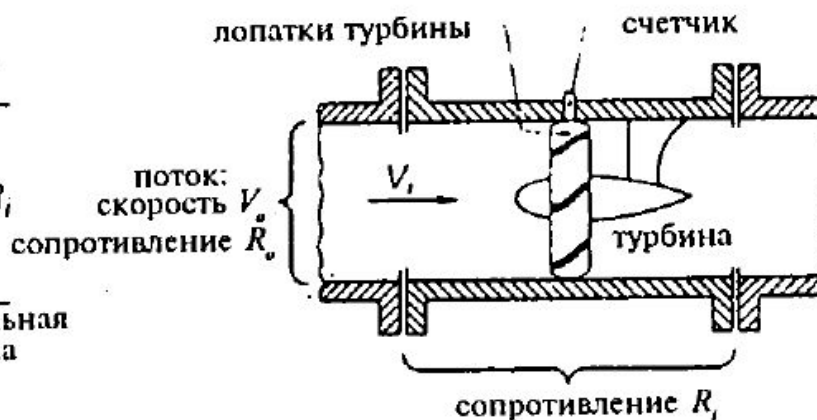
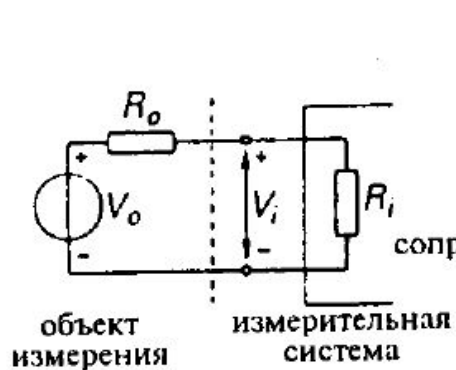
$$\Delta x = \frac{\partial f}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial f}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial f}{\partial c} \Delta c + \dots$$

Источники ошибок



Анэнергетическое согласование

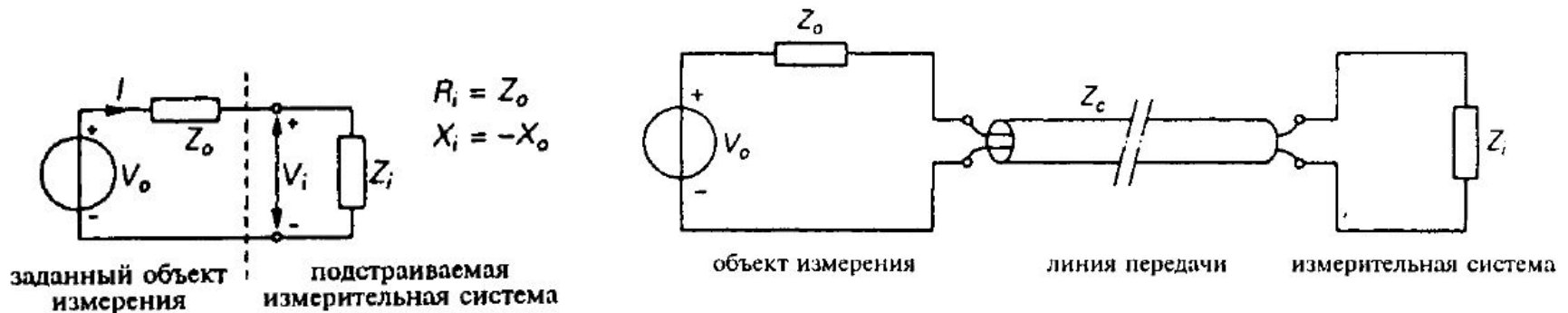
Целью анэнергетического согласования является сведение к минимуму передачу энергии и мощности между объектом измерения и измерительной системой



Энергетическое согласование

Целью энергетического согласования является извлечение максимально допустимой мощности из объекта измерения, чтобы усиление мощности измерительной системы могло быть минимальным

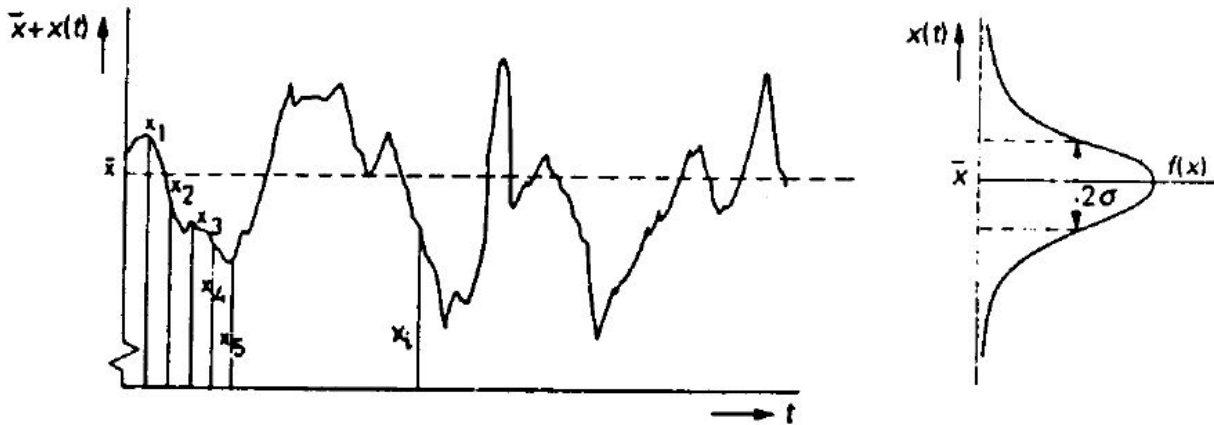
$$P_{\text{avg.max}} = \frac{V_o^2}{4R_i} = \frac{V_o^2}{4R_o}$$



Согласование по шуму

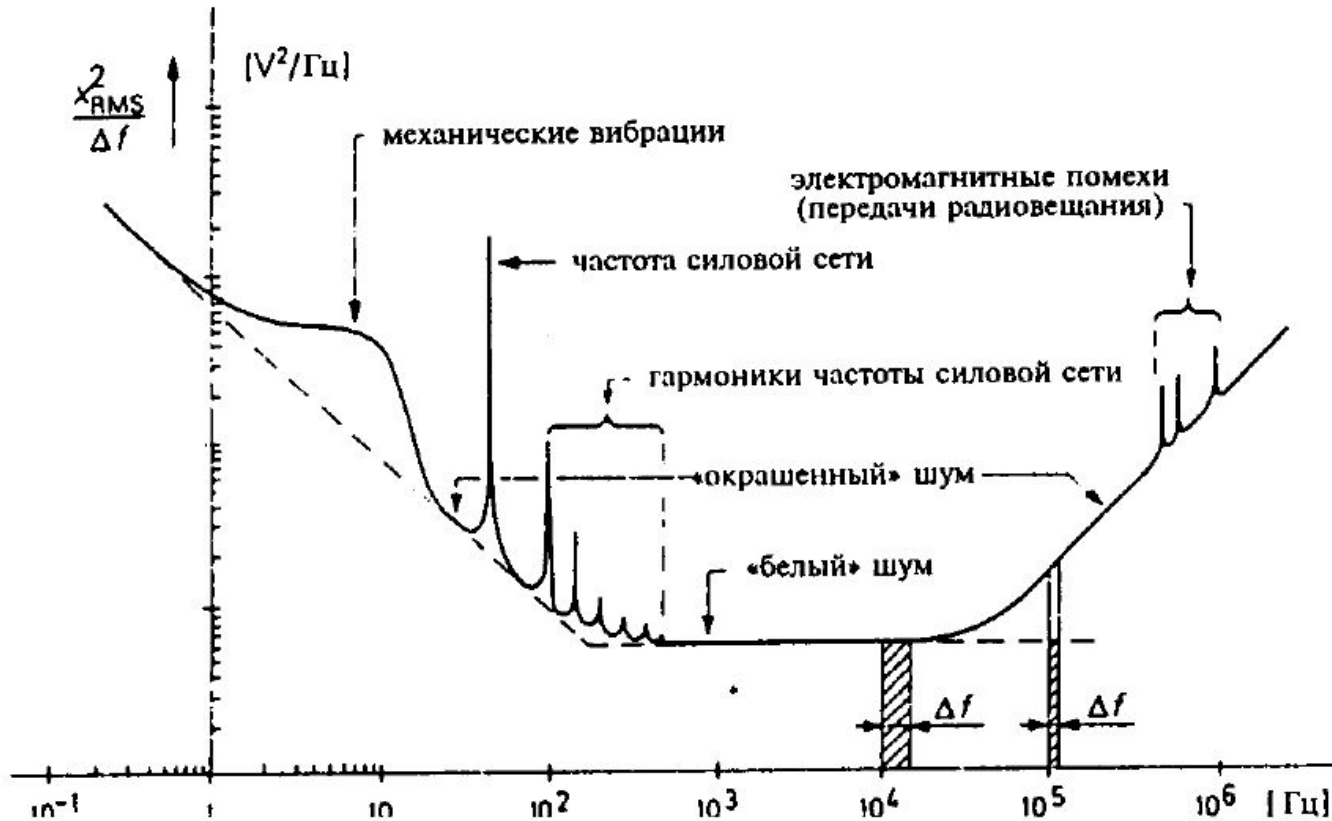
$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}$$

$$x_{RMS} = \sigma_x$$



Измерительный сигнал $x(t)$ с шумом и распределение плотности вероятностей $f(x)$ для его мгновенных значений.

Спектральная плотность шума

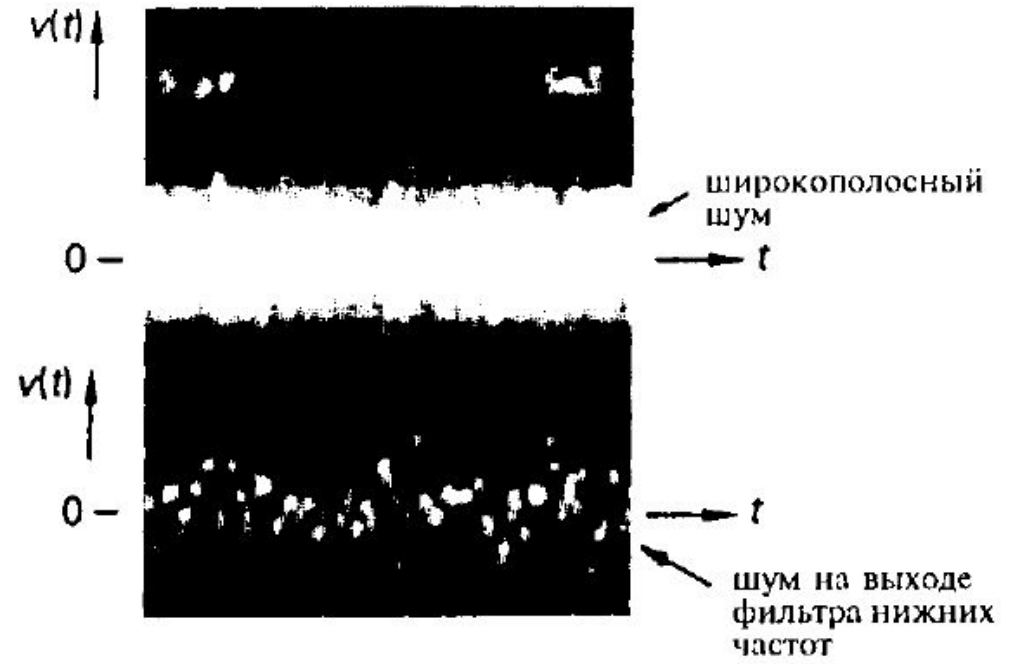
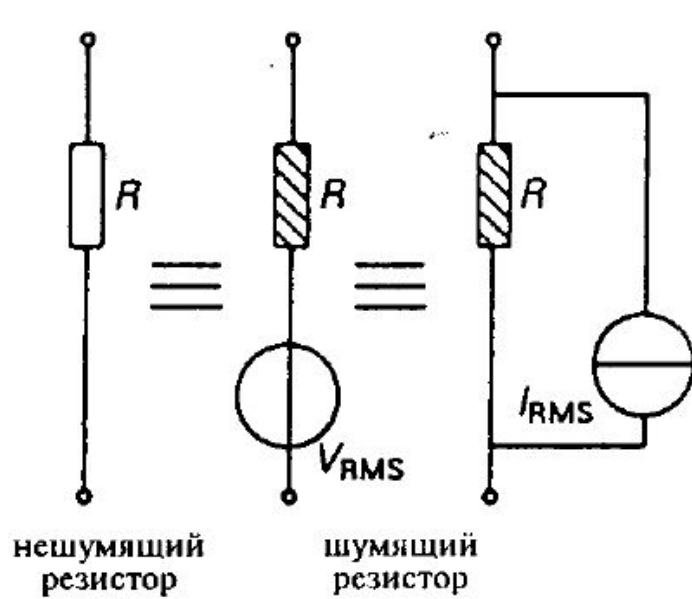


Пример спектрального распределения шума и помех в реальной измерительной системе.

Тепловой шум

$$V_{RMS} = \sqrt{4kT\Delta f \operatorname{Re}(Z)}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{4kT\Delta f \operatorname{Re}(Y)}$$



(a)

(b)

Шум резистора.

Соотношение сигнал/шум

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Мощность сигнала}}{\text{Мощность шума}}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{I_S^2}{I_N^2} = \frac{U_S^2}{U_N^2}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{V_0}{4kT} \Delta f \operatorname{Re}(Z)$$

$$a = \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

$$[a] = \text{бел}$$

$$a = 2 \log_{10} \left(\frac{I_S}{I_N} \right) = 2 \log_{10} \left(\frac{V_S}{V_N} \right)$$

$$1 \text{ бел} = 10 \text{ дБ}$$

Характеристики измерительных систем

- Чувствительность
- Порог чувствительности
- Чувствительность к форме сигнала
- Разрешающая способность
- Пределы измерений, динамический диапазон
- Нелинейность
- Отклик системы

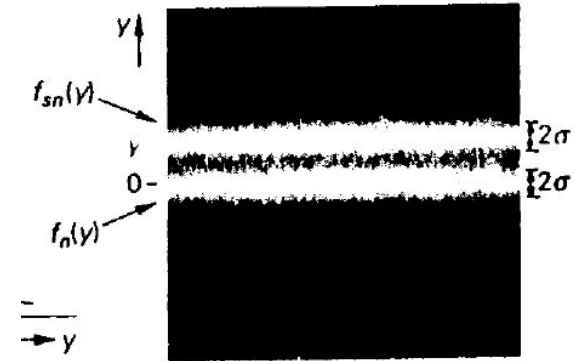
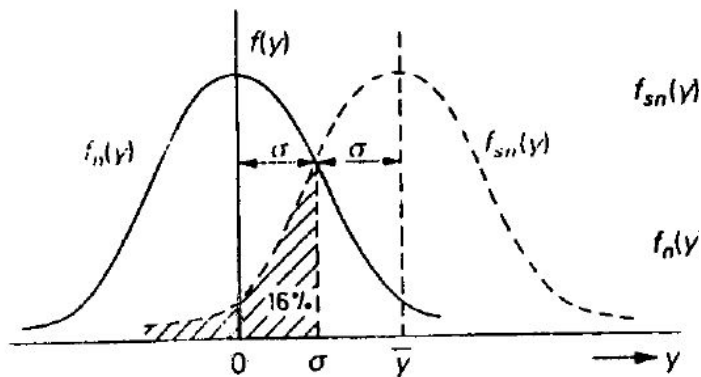
Чувствительность измерительной системы

Чувствительность измерительной системы – это отношение величины выходного сигнала y к величине входного сигнала x

$$S = \frac{y}{x} \quad S = \bar{S}(\omega) \quad S_{diff}(x_0) = \left(\frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_0}$$

$$S_x^y = \frac{\frac{dy}{y}}{\frac{dx}{x}} = \frac{df(x)}{dx} \cdot \frac{x}{y}$$

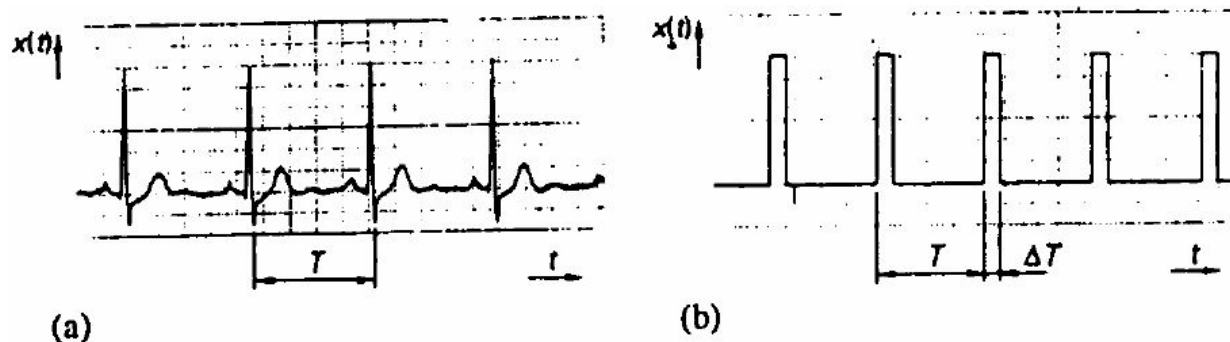
Порог чувствительности



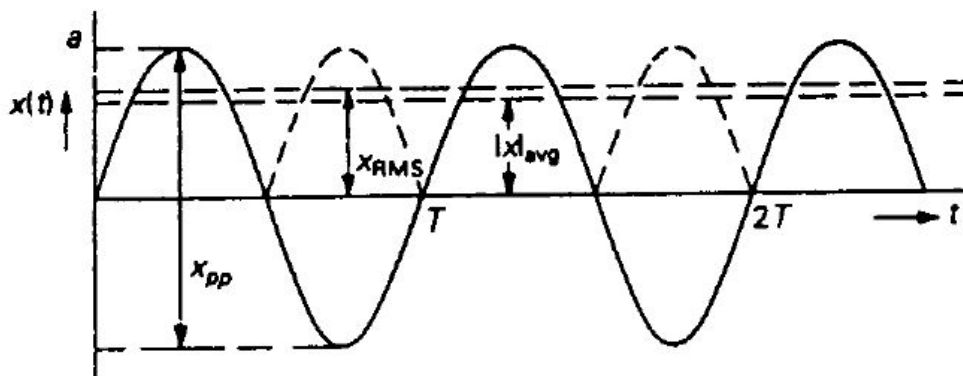
Вероятность обнаружения и отношение сигнал/шум для различных значений сигнала \bar{y} в зависимости от соотношения между стандартным отклонением σ и величиной сигнала.

Сигнал \bar{y}	Вероятность обнаружения	Отношение сигнал/шум
1σ	69,15%	1
$1,4\sigma$	76,11%	2
2σ	84,13%	4
3σ	93,32%	9
4σ	97,72%	16
5σ	99,38%	25
6σ	99,87%	36
8σ	99,9968%	64
10σ	99,999971%	100

Чувствительность к форме сигнала



Периодические сигналы. (a) Сложный периодический сигнал общего вида. (b) Импульсный сигнал с коэффициентом заполнения $\Delta T/T = 1/7$.



Полный размах x_{pp} , действующее значение x_{RMS} и среднее значение от абсолютной величины $|x|_{avg}$ сигнала синусоидальной формы.

Характерные значения сигнала

$$x_p = \max|x(t)| - \text{пиковое значение}$$

$$|x|_{avg} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |x(t)| dt - \text{среднее от абсолютной величины}$$

$$x_{pp} = \max\{x(t)\} - \min\{x(t)\} - \text{полный размах}$$

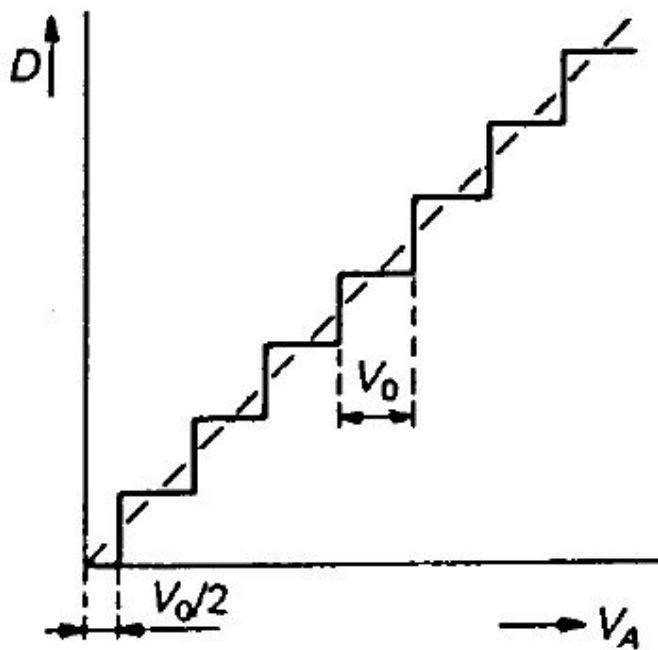
$$x_{avg} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) dt - \text{среднее по времени значение}$$

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t)^2 dt} - \text{действующее значение}$$

Разрешающая способность

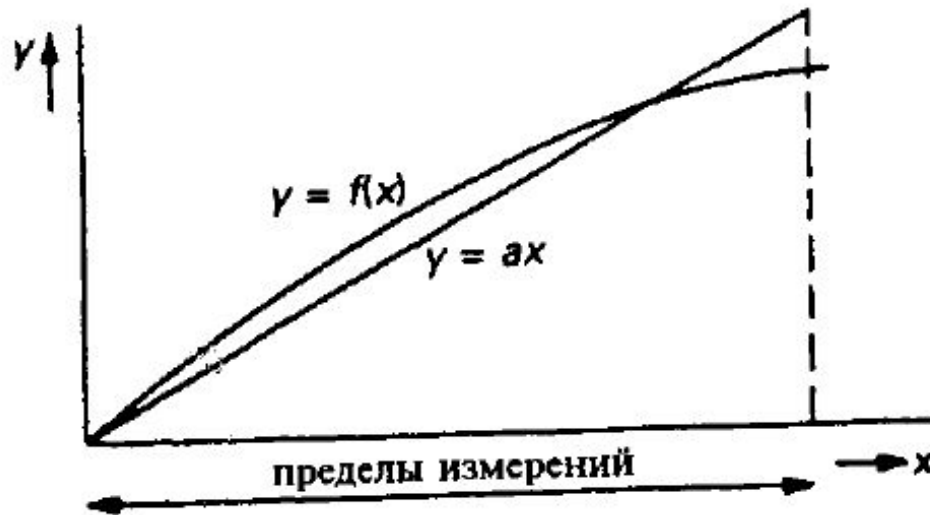
Разрешающая способность (разрешение) измерительной системы – это размер шага, с которым на индикатор выводится результат действия системы

$$R = \frac{x}{\Delta x}$$



Пределы измерений, динамический диапазон

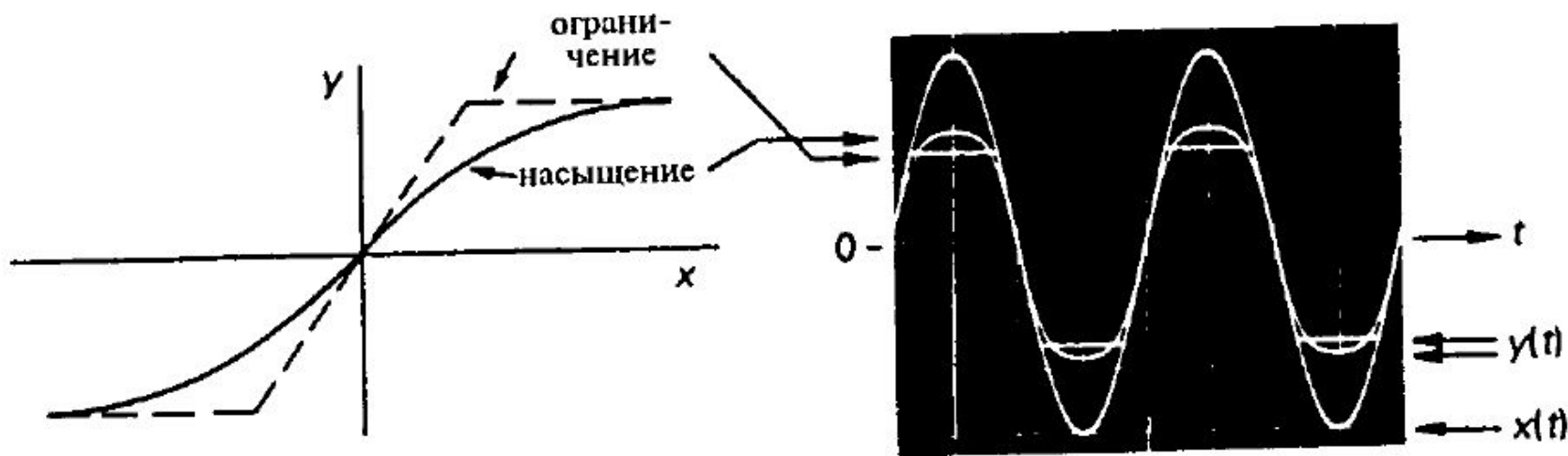
Нелинейность измерительной системы



$$\left| \frac{f(x) - ax}{ax} \right| \cdot 100\%$$

Статическая нелинейность.

Основные виды нелинейности (ограничение, насыщение)

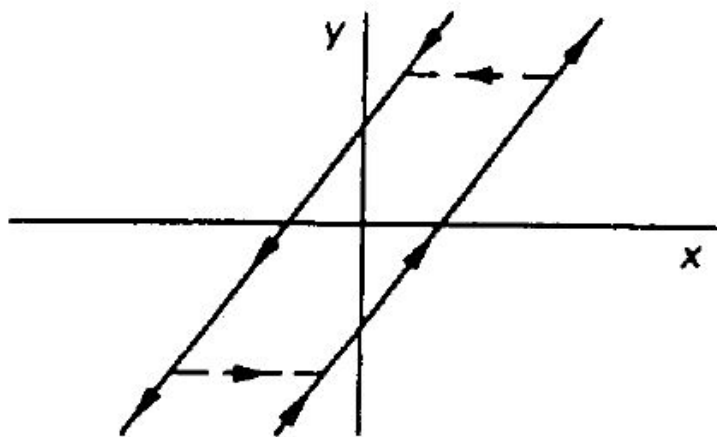


(a)

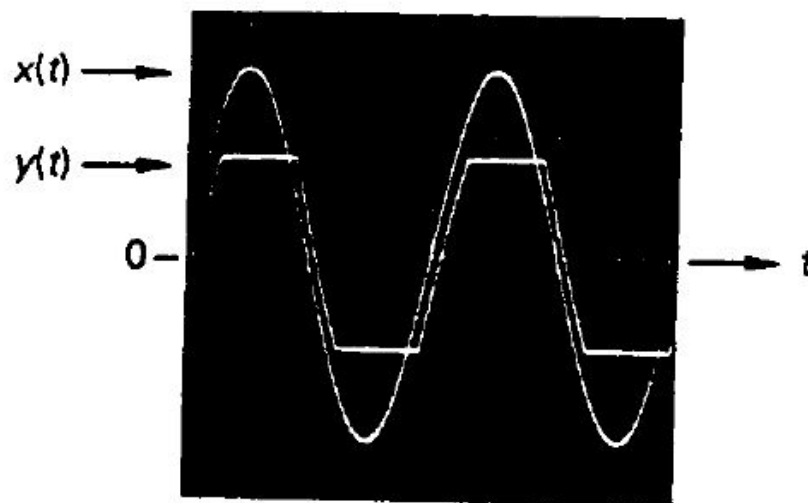
(b)

Примеры насыщения и ограничения в измерительной системе. (a) Нелинейные передаточные характеристики. (b) Сигнал $y(t)$, возникающий на выходе системы под действием синусоидального входного сигнала $x(t)$.

Основные виды нелинейности (гистерезис)



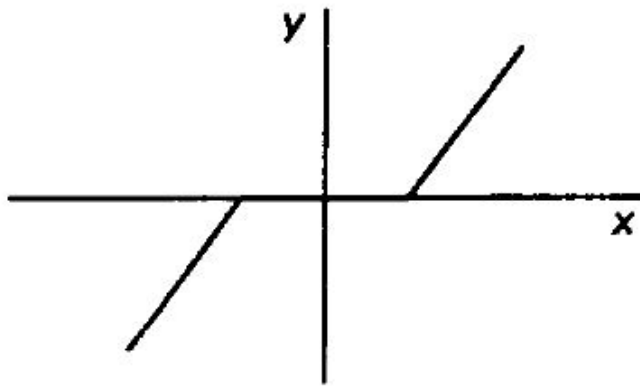
(a)



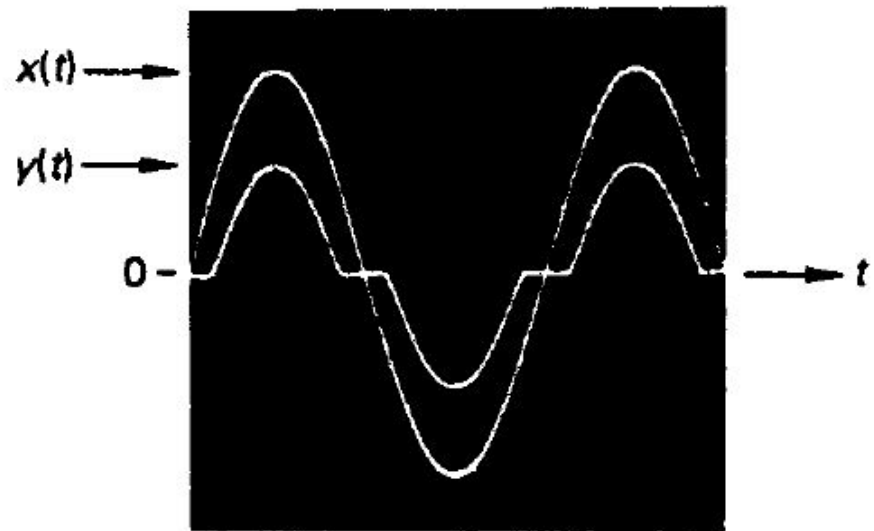
(b)

(a) Гистерезис и (b) результирующий выходной сигнал $y(t)$, являющийся откликом на синусоидальный сигнал $x(t)$ на входе.

Основные виды нелинейности (зона нечувствительности)



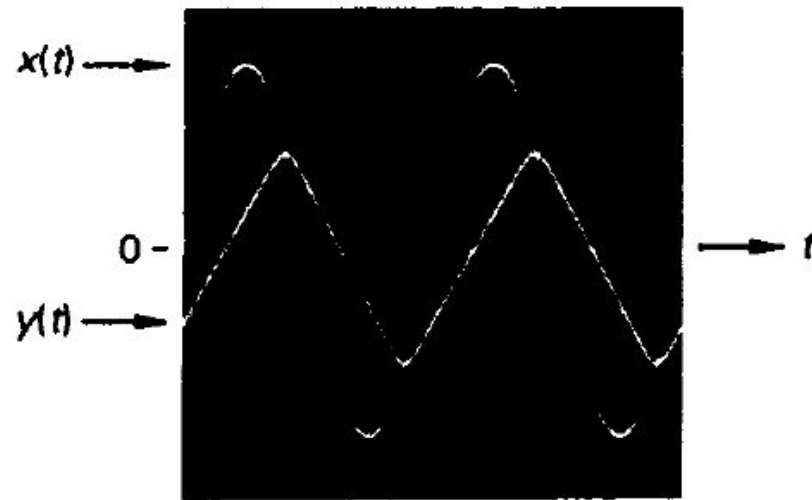
(a)



(b)

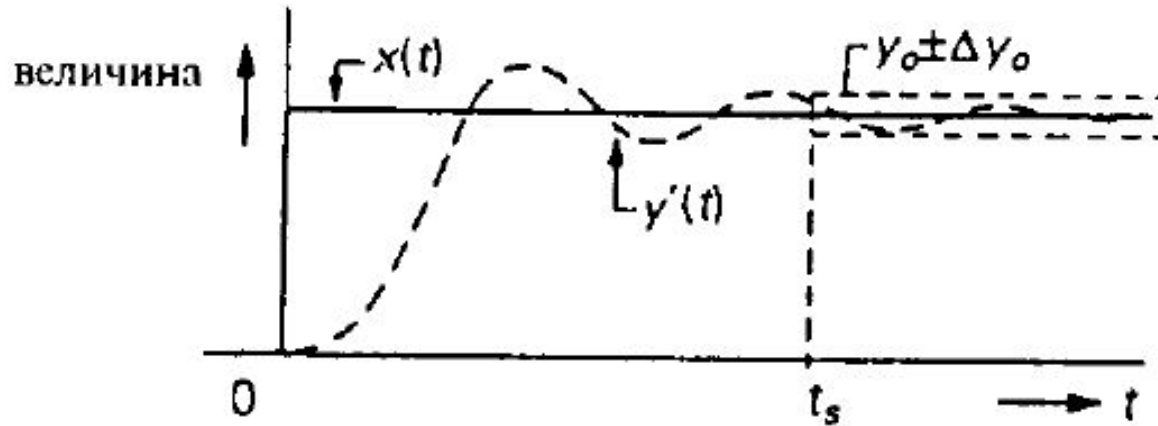
(a) Мертвая зона в передаточной характеристике системы. (b) Выходной отклик $y(t)$ на синусоидальный входной сигнал $x(t)$.

Основные виды нелинейности (ограничение скорости нарастания)



Искажения вследствие существования максимальной скорости нарастания: $x(t)$ - входной сигнал, $y(t)$ - выходной сигнал.

Отклик измерительной системы



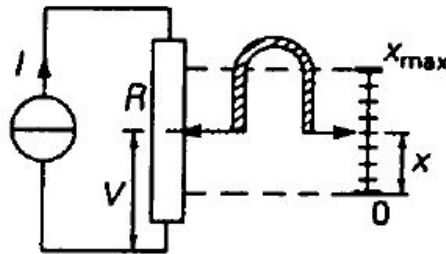
Отклик системы – это реакция измерительной системы на приложенное ко входу воздействие

- Системы нулевого порядка
- Системы первого порядка
- Системы второго порядка

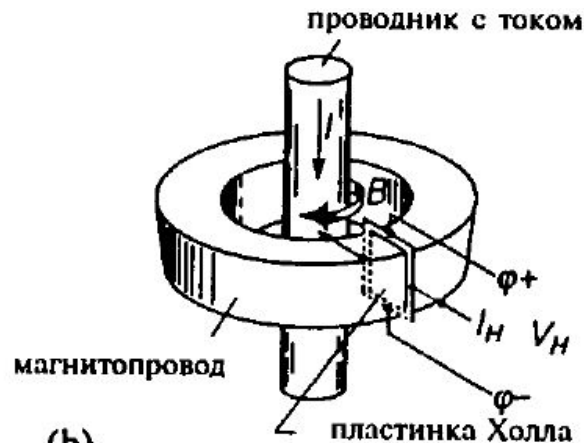
Системы нулевого порядка

Дифференциальное уравнение, описывающее систему нулевого порядка, является лишь простым алгебраическим уравнением

$$y = ax + b$$



(a)

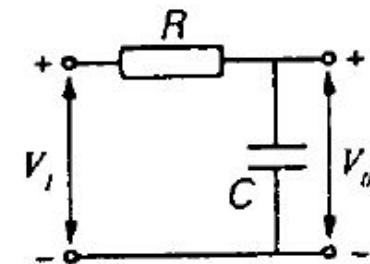
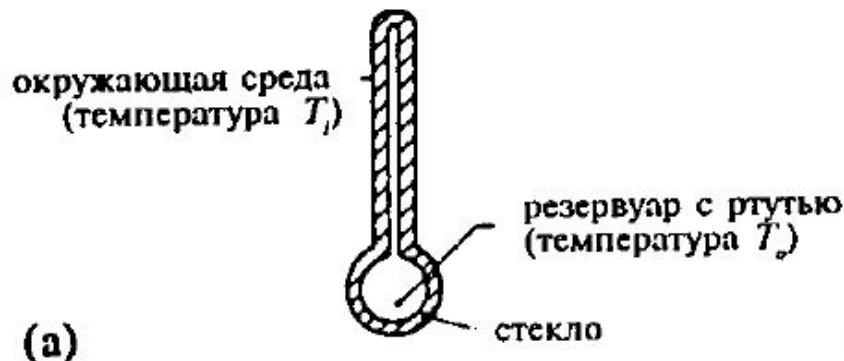


(b)

Системы нулевого порядка: (a) потенциметрический преобразователь смещения и (b) датчик тока.

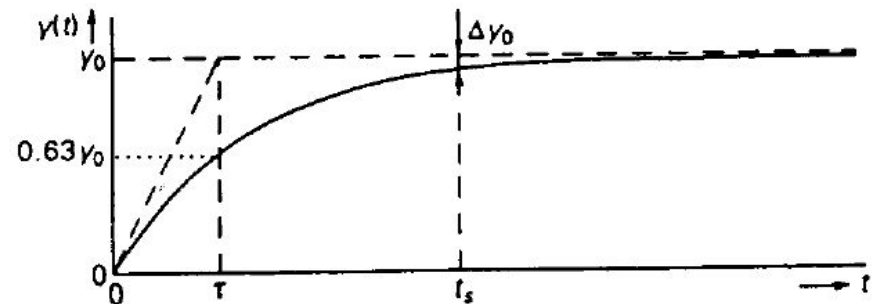
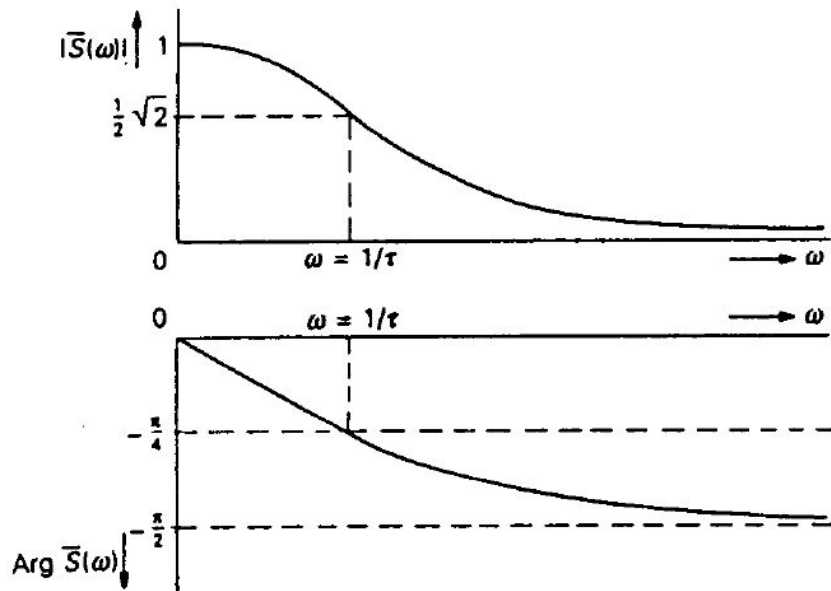
Системы первого порядка

У линейных систем первого порядка соотношение между входным сигналом $x(t)$ и выходным сигналом $y(t)$ выражается линейным дифференциальным уравнением первого порядка



Два примера систем первого порядка:
(a) ртутный термометр и (b) RC -цепь.

Переходная и частотная характеристика системы первого порядка

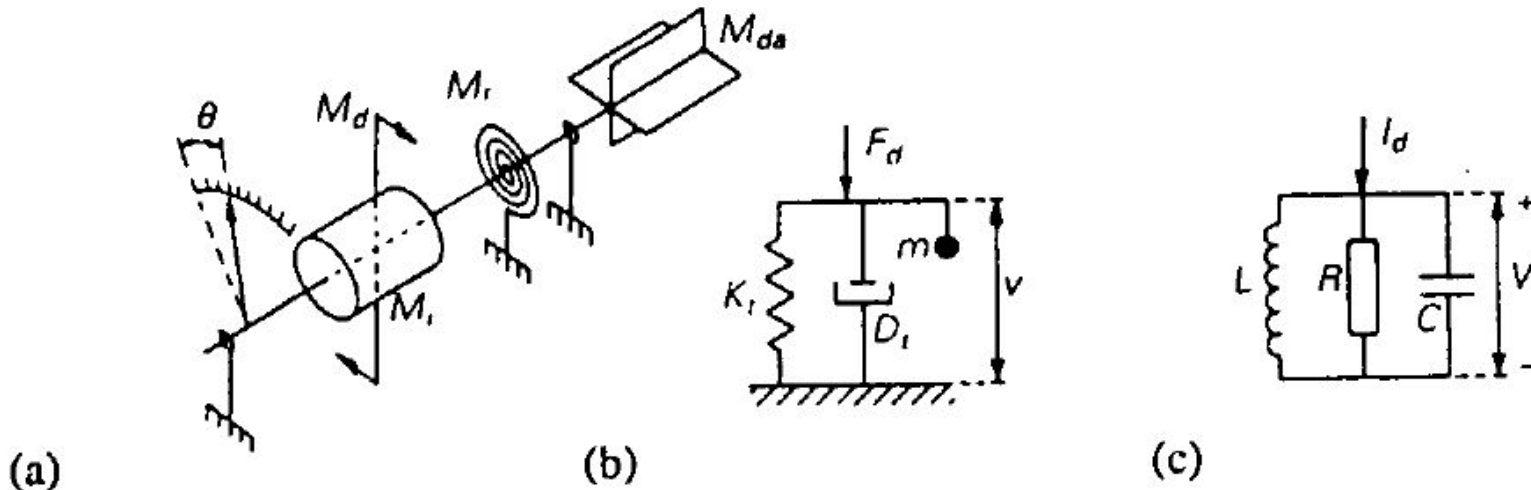


Переходная характеристика системы первого порядка

Частотная характеристика системы первого порядка

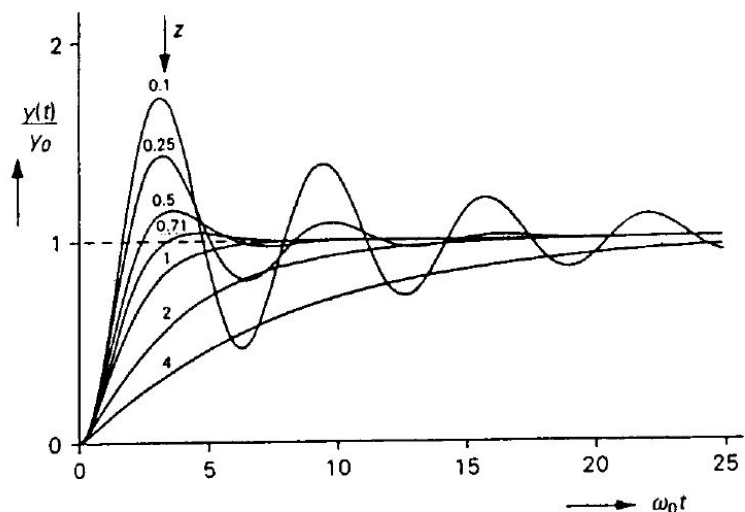
Системы второго порядка

У линейных систем второго порядка соотношение между входным сигналом $x(t)$ и выходным сигналом $y(t)$ выражается линейным дифференциальным уравнением второго порядка

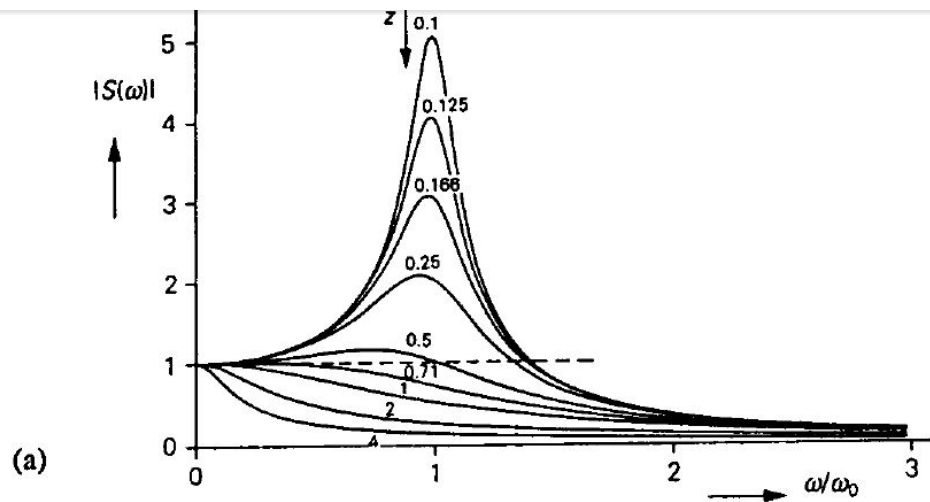


Системы второго порядка: (a) механическое вращение; (b) механическое поступательное движение; (c) параллельный электрический контур.

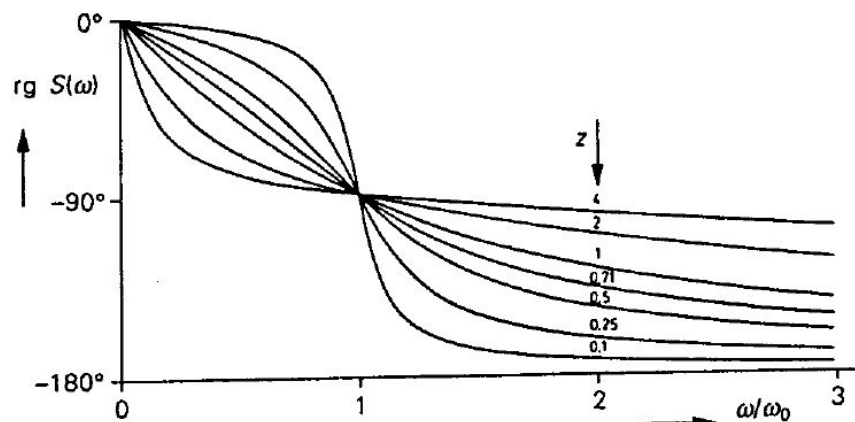
Переходная и частотная характеристика системы второго порядка



Переходные характеристики системы второго порядка при различных значениях относительного коэффициента затухания z .



(a)



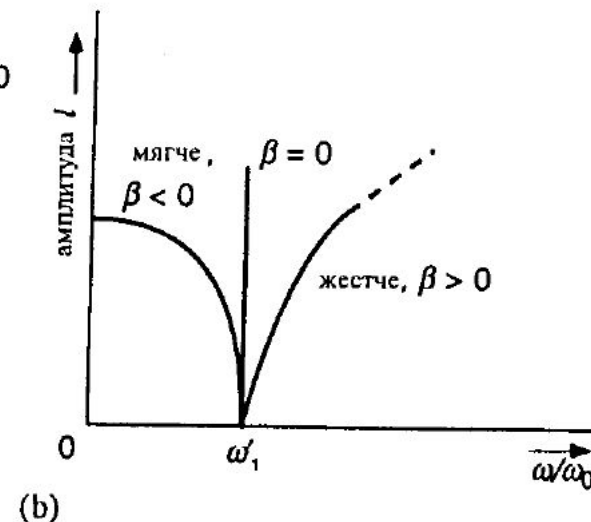
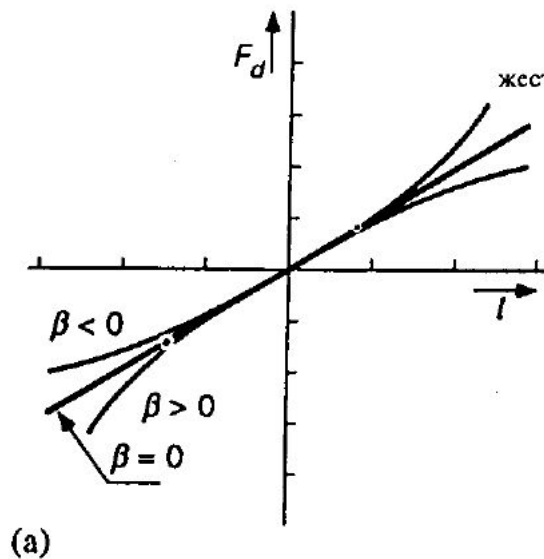
(b)

Амплитудно-частотная и (b) фазо-частотная характеристики системы второго порядка при различных значениях коэффициента затухания z .

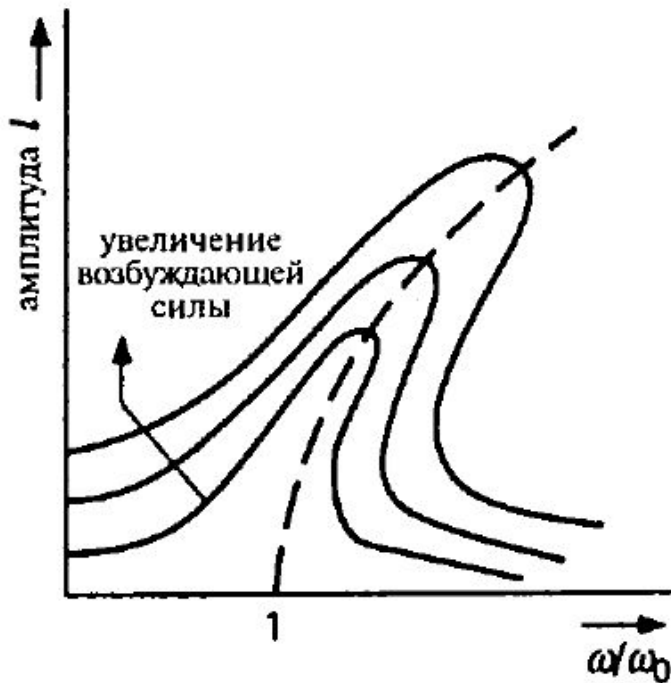
Нелинейные измерительные системы

У нелинейных систем соотношение между входным сигналом $x(t)$ и выходным сигналом $y(t)$ выражается нелинейным дифференциальным уравнением

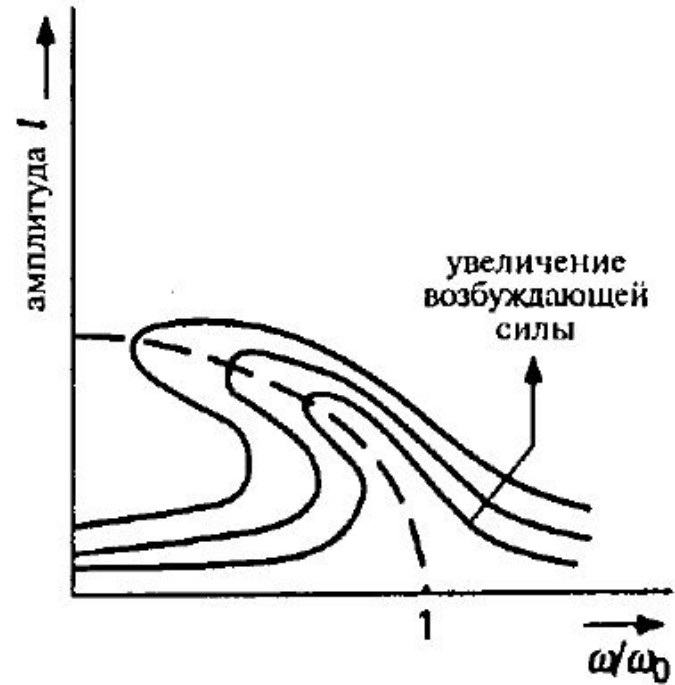
$$m \frac{d^2 l}{dt^2} + D_l \frac{dl}{dt} + K_l l + \beta l^3 = F_d(t)$$



Частотные характеристики нелинейных систем



(a)



(b)

Влияние амплитуды входного воздействия на резонансные кривые нелинейной системы «пружина с грузом» при наличии демпфирования. На рис. (a) представлен случай, когда жесткость пружины увеличивается ($b > 0$), а на рис. (b) показаны амплитудно-частотные характеристики для случая, когда пружина постепенно становится мягче ($b < 0$).

Помехи



Взаимодействие между измерительной системой, измеряемым объектом, наблюдателем и их окружением (x - входной сигнал, y - выходной сигнал, d - помехи).

- Аддитивные

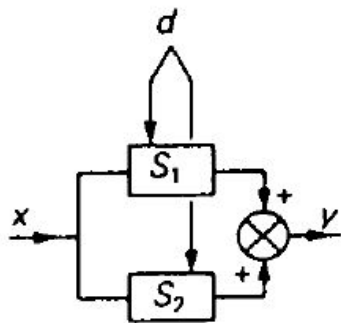
$$S_d = \lim_{\Delta d \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta d} \right)_{x=0} = \left(\frac{dy}{dd} \right)_{x=0}$$

- Мультипликативные

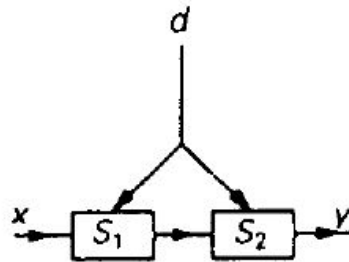
$$C_d = \lim_{\Delta d \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta S/S}{\Delta d} \right)_{x=0} = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial d}$$

Методы компенсации помех

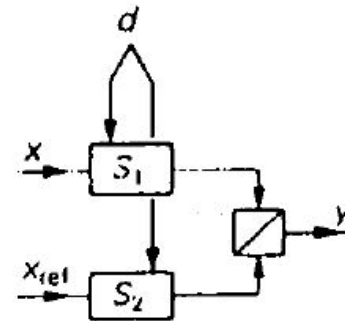
$$S_{d1} = -S_{d2} \quad C_{d1} = -C_{d2} \quad C_{d1} = C_{d2}$$



(a)



(b)

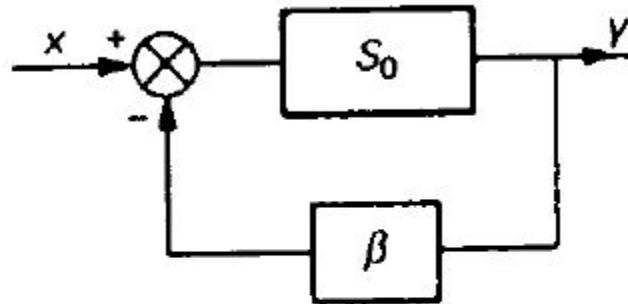


(c)

Три основных метода компенсации помех, возникающих в результате влияния окружающей среды: (a) параллельная компенсация, (b) последовательная компенсация и (c) компенсация путем вычисления отношения.

Методы компенсации помех

$$C_d = \frac{C_{d0}}{1 + \beta S_0}$$

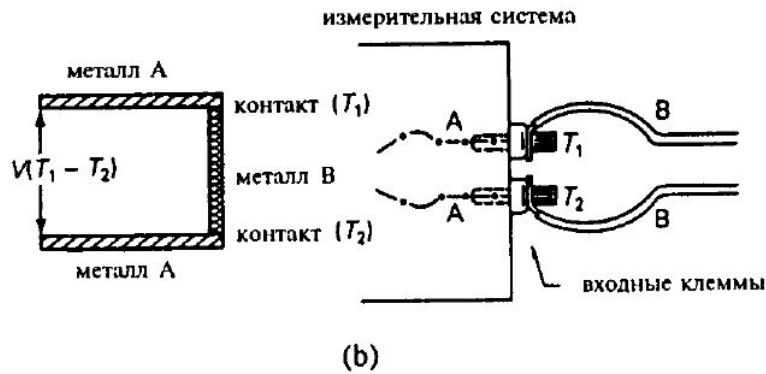


Применение обратной связи в измерительной системе с исходной чувствительностью S_0 .

Источники помех

Термо ЭДС

$$E = c\Delta T$$



Cu - Ag	}	0,3 мкВ/К
Cu - Au		
Cu - Cd/Sn		

Cu - Pb/Sn : 3 мкВ/К

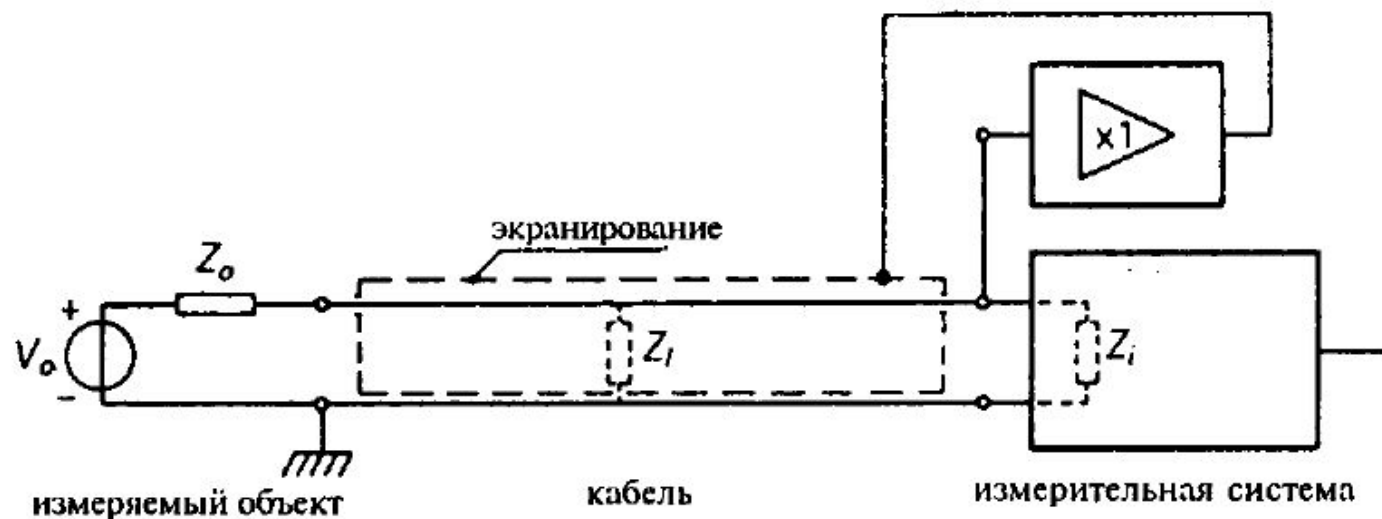
Cu - ковар : 500 мкВ/К

Cu - CuO : 1000 мкВ/К

Термоэлектричество в качестве аддитивной помехи в электрической системе. (a) Простая термопара, образованная двумя контактами разнородных металлов. (b) Входные клеммы вольтметра, как частный случай (a).

Источники помех

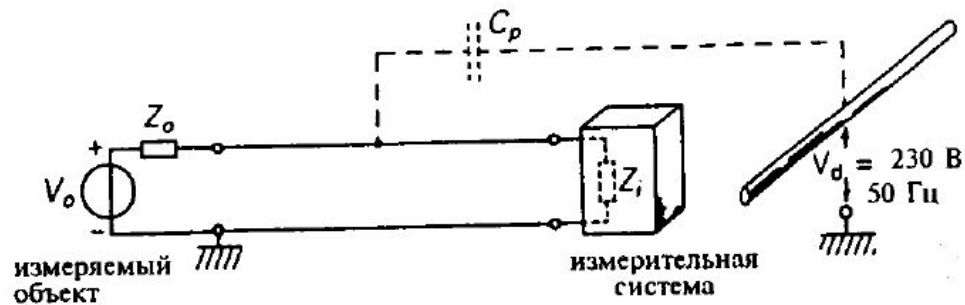
Токи утечки



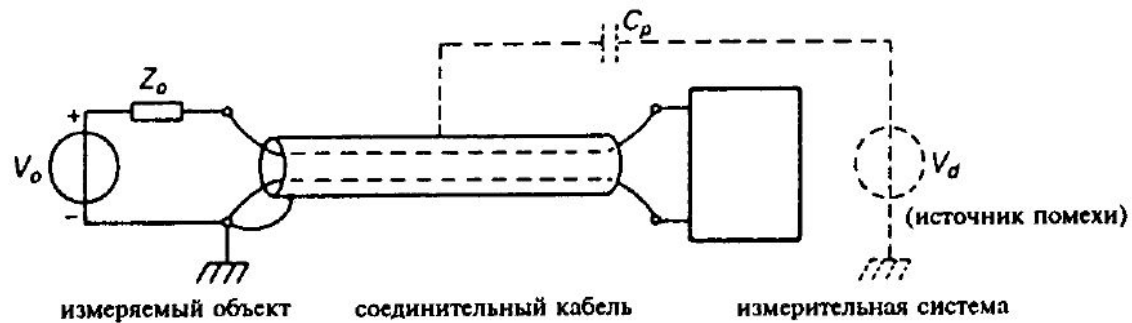
Активная защита, применяемая в кабеле для подавления тока утечки, текущего по имеющему конечное значение импедансу Z_1 между двумя проводниками, образующими соединительную линию.

Источники помех

Емкостная связь



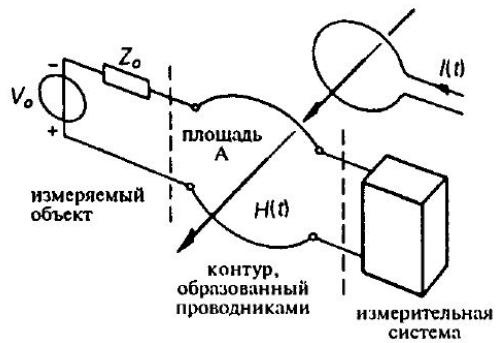
Емкостная наводка помехи во входной цепи измерительной системы.



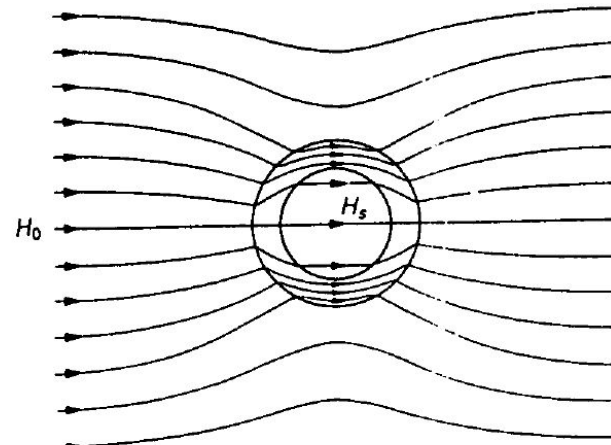
Правильное экранирование от емкостной наводки.

Источники помех

Индуктивная наводка



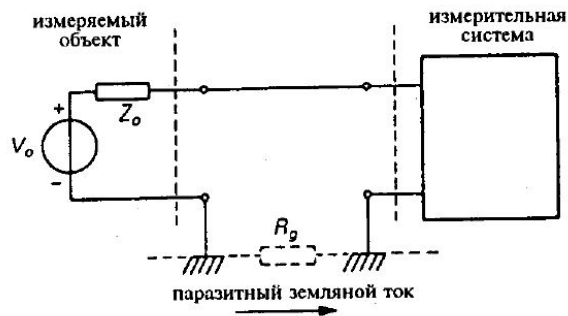
Индуктивная наводка помехи на входе измерительной системы.



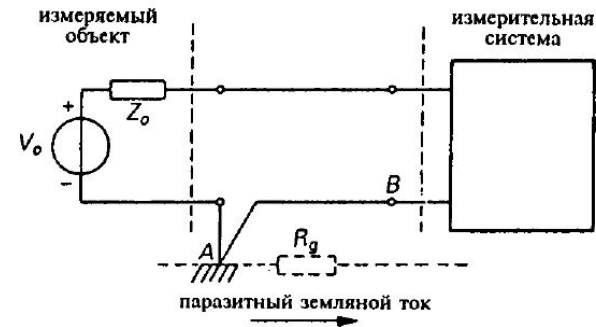
Магнитное поле в присутствии цилиндрического магнитного экрана, размещенного поперек однородного магнитного поля H_0 .

Источники помех

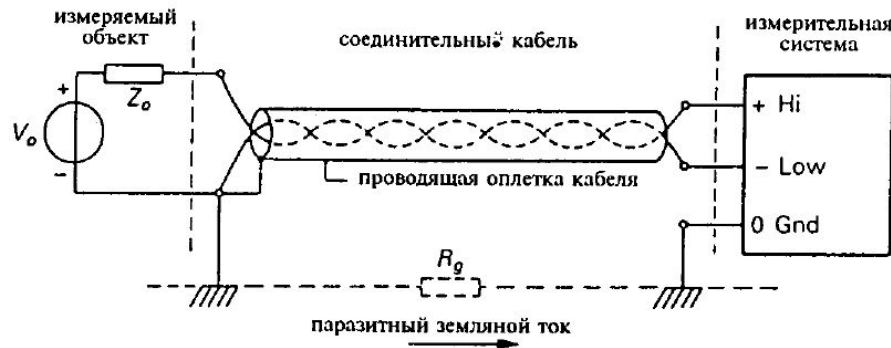
Плохое заземление



Заземление измеряемого объекта и измерительной системы в различных точках земляной шины.



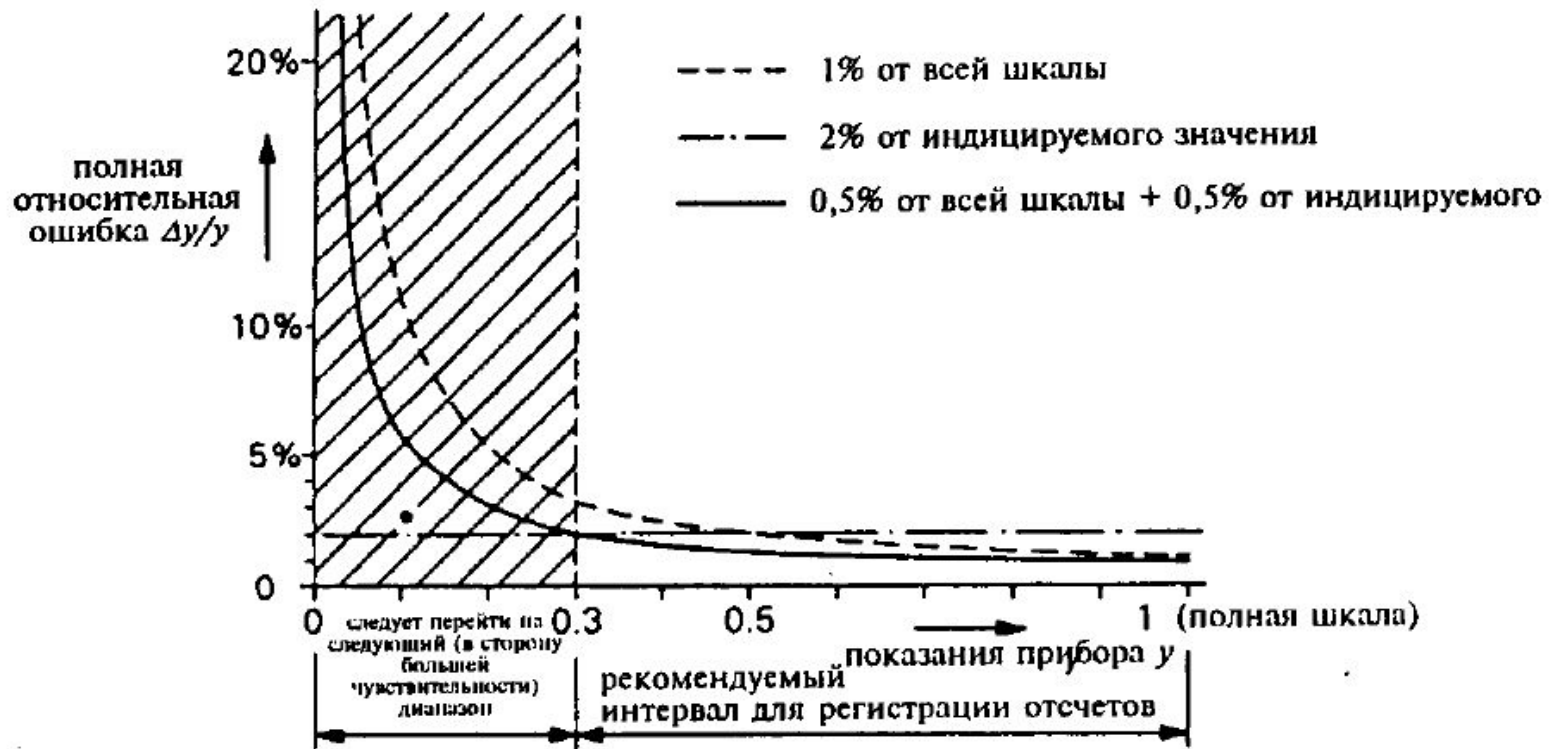
Заземление входной цепи измерительной системы в одной точке.



Измерительная система с симметричным относительно земли входом и экранированным соединительным кабелем с двумя скрученными внутренними проводниками.

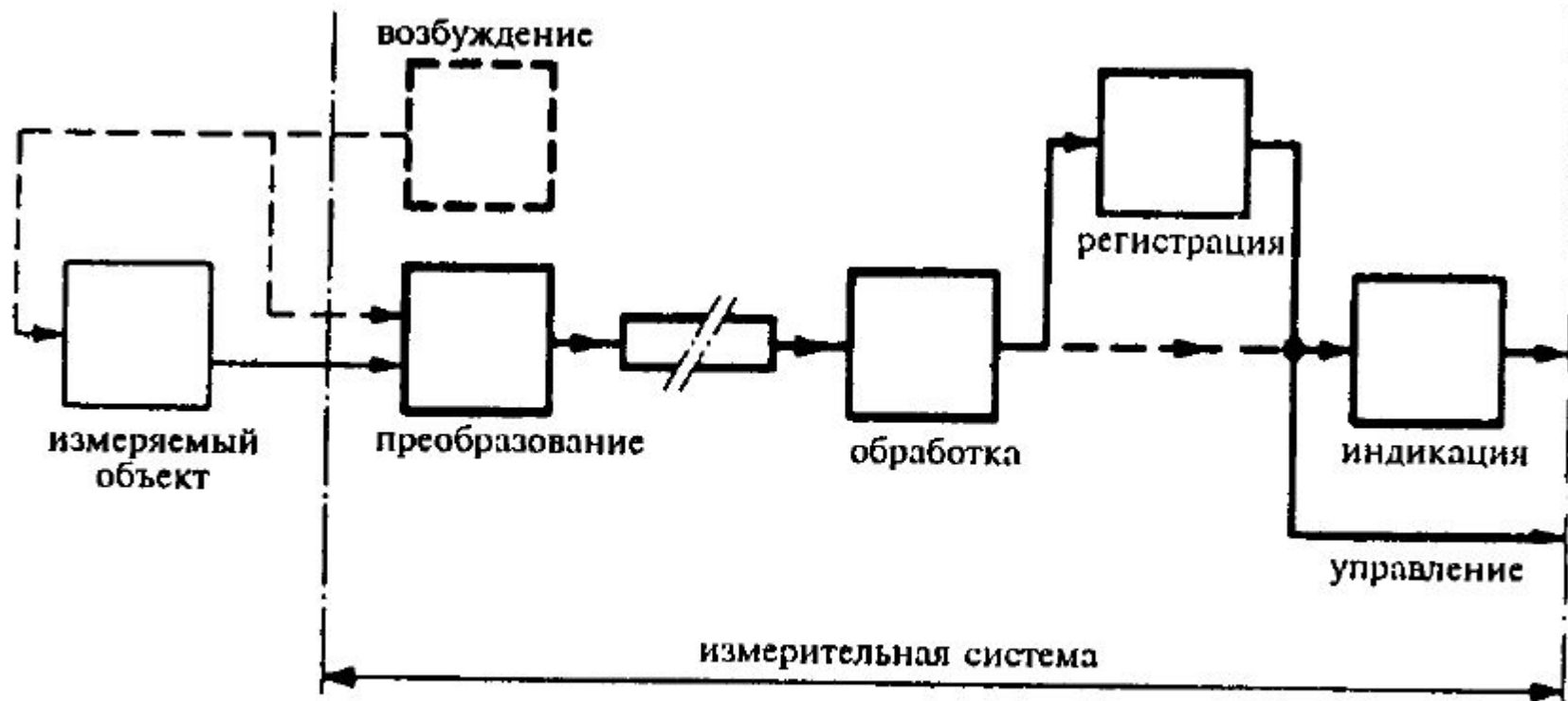
Источники помех

Влияние наблюдателя



Относительная погрешность $\Delta u/u$ показаний прибора u для трех различных вариантов определения погрешности, указываемой в технических характеристиках для аналогового устройства индикации с линейной шкалой.

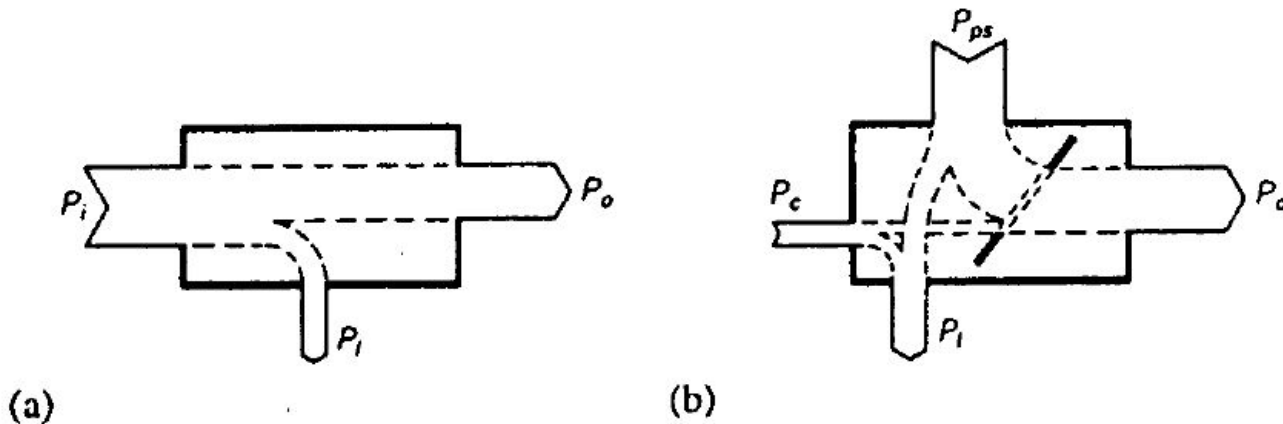
Структура измерительных систем



Обобщенная внутренняя структура измерительной системы

Датчики (сенсоры)

Датчики – это преобразователи, которые способны энергетическое физическое явление одного рода преобразовывать в явление другого рода



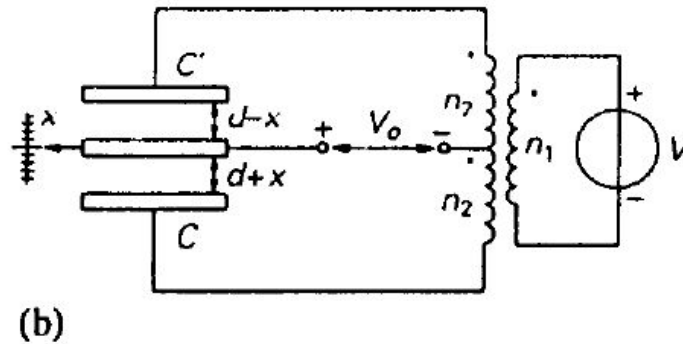
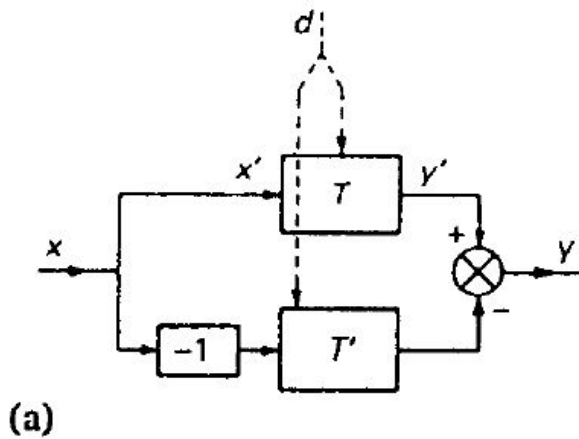
Пассивный и активный датчики. P_i — мощность на входе, P_o — мощность на выходе, P_l — мощность, которая теряется в процессе преобразования, P_c — мощность управляющего воздействия, P_{ps} — мощность вспомогательного источника. (a) Пассивный датчик. (b) Активный датчик.

Балансная конфигурация датчика

$$y = f(x) - f(-x)$$

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + \dots$$

$$y = 2a_1x + 2a_3x^3 + 2a_5x^5 + \dots$$



$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d+x} \quad C' = \frac{\epsilon_0 A}{d-x}$$

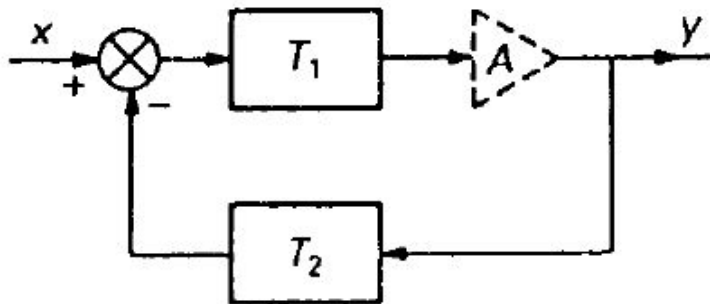
$$V_0 = V \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{(C' - C)}{(C' + C)}$$

$$V_0 = V \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{x}{d}$$

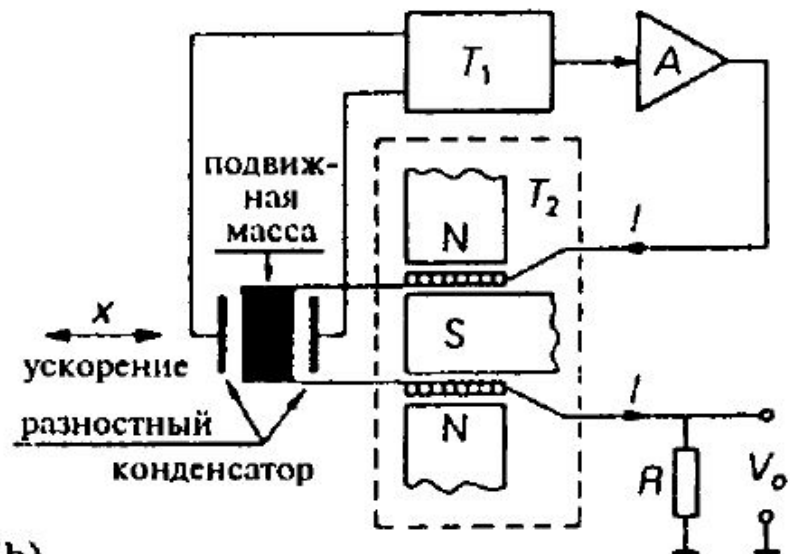
(a) Балансная схема преобразователя, T и T' — два одинаковых преобразователя. (b) Применение балансной схемы в емкостном датчике смещения.

$$V_0 = xS$$

Схема с обратной связью



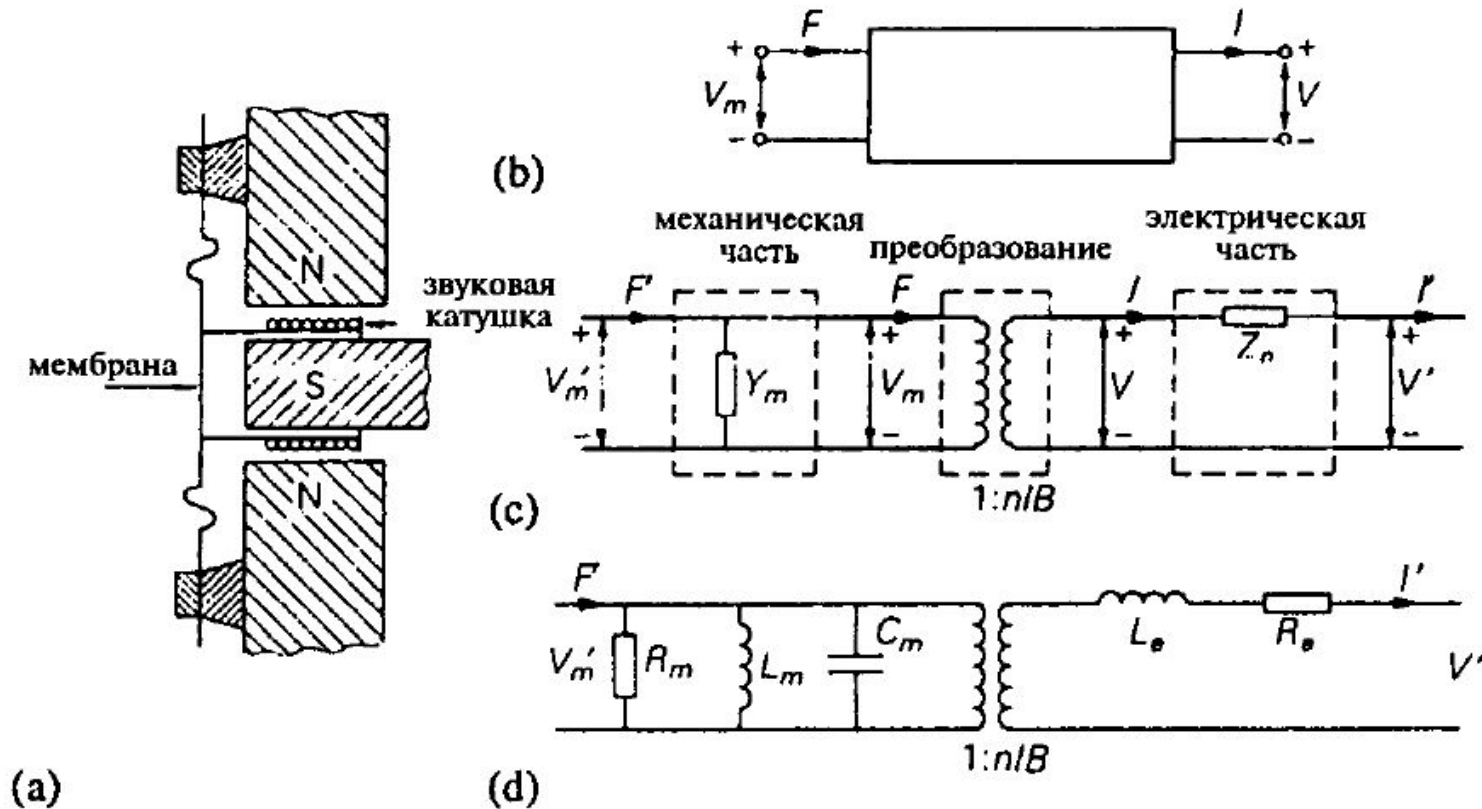
(a)



(b)

(a) Схема с отрицательной обратной связью. T_1 выполняет желаемое преобразование x в y , а T_2 осуществляет обратное преобразование. (b) Применение обратной связи в акселерометре.

Принцип электромеханической аналогии

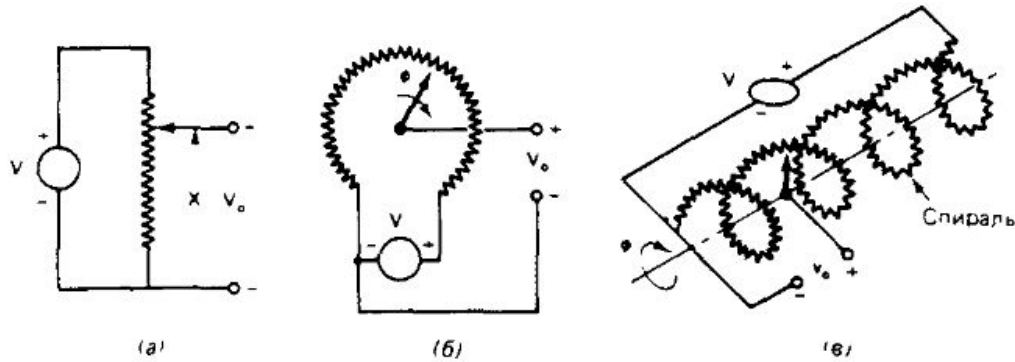


(a) Электродинамический преобразователь. (b) Линейный неоднородный четырехполюсник — аналог преобразователя (a). (c) Трехкаскадный четырехполюсник. (d) Электрический аналог преобразователя (a).

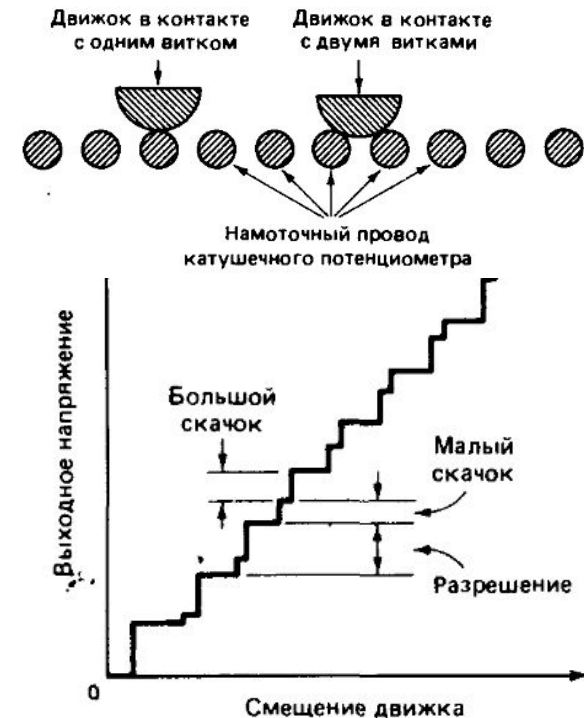
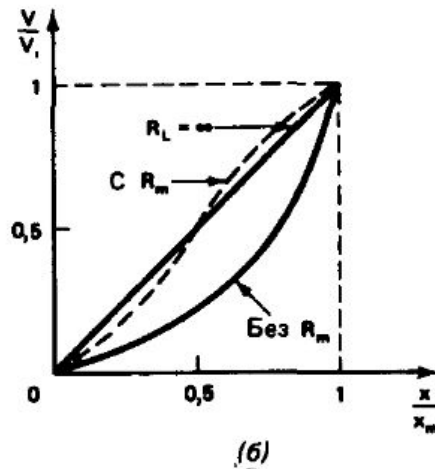
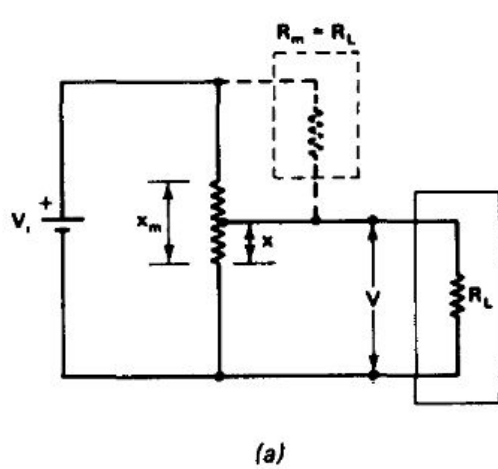
Электромеханические датчики

- Датчики смещения, тензодатчики
- Датчики скорости
- Датчики ускорения
- Датчики механических напряжений

Резистивный датчик смещения



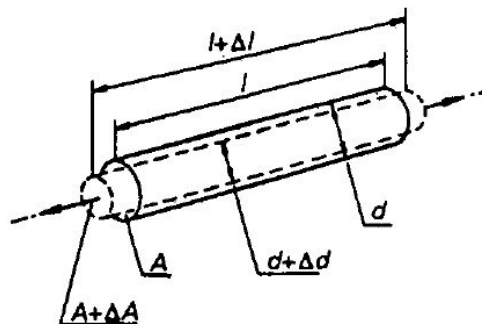
Три типа потенциметрических преобразователей для измерения перемещений: (а) линейный (трансляционный); (б) однооборотный; (в) многооборотный [6].



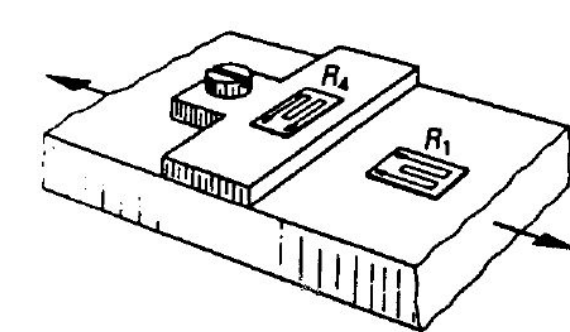
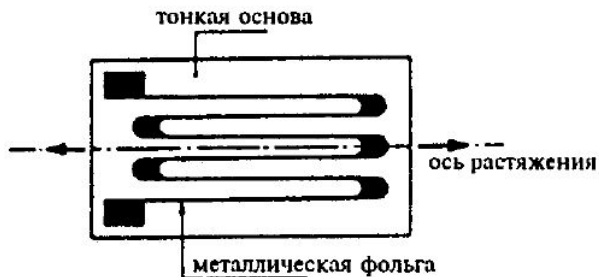
Потенциметрический резистивный преобразователь. (а) Принципиальная схема. Штриховыми линиями показан способ включения шунтирующего резистора. (б) Сравнение выходных сигналов преобразователя с шунтирующим резистором и без него

Тензодатчики

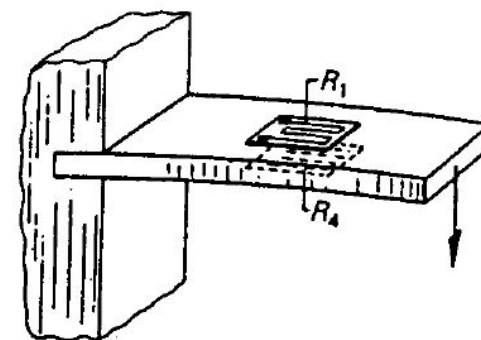
$$R = R(A, l, \rho)$$



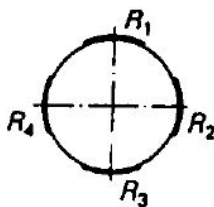
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(1 + 2\sigma) \Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$



(a)



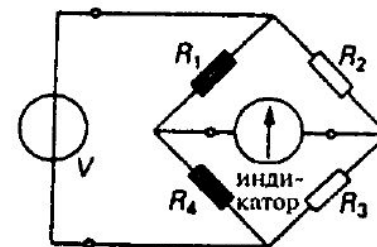
(b)



(c)

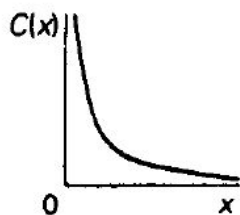
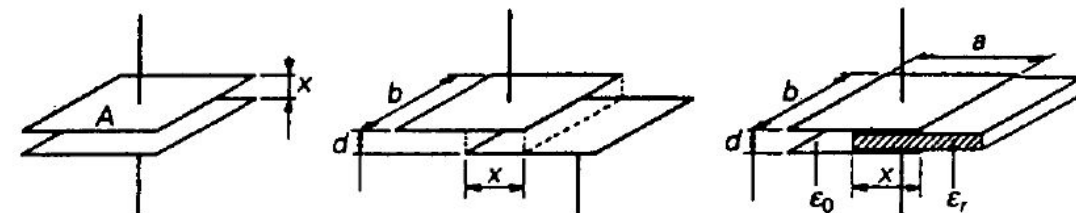


(d)

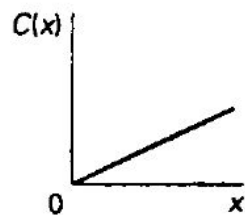


Измерение линейной деформации, изгиба и скручивания с компенсирующими тензодатчиками в мосте Уитстона. (a) Компенсация при измерении линейной деформации. (b) Компенсация при измерении изгиба. (c) Измерение крутящего момента. (d) Измерительный мост.

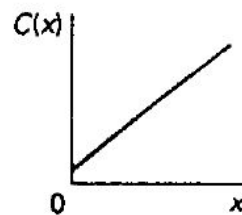
Емкостные датчики смещения



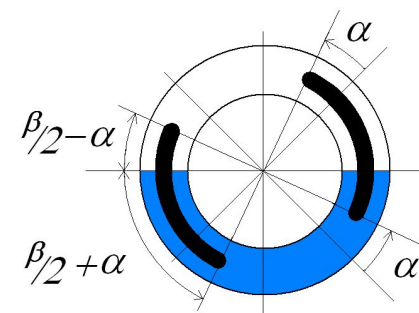
(a)



(b)

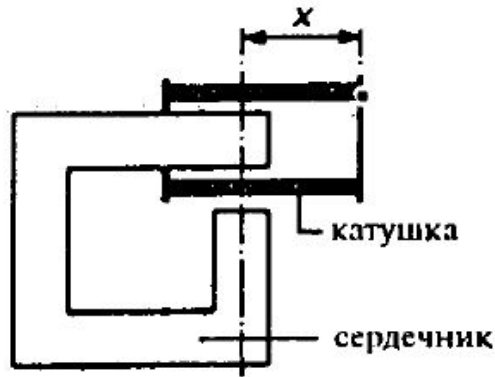


(c)

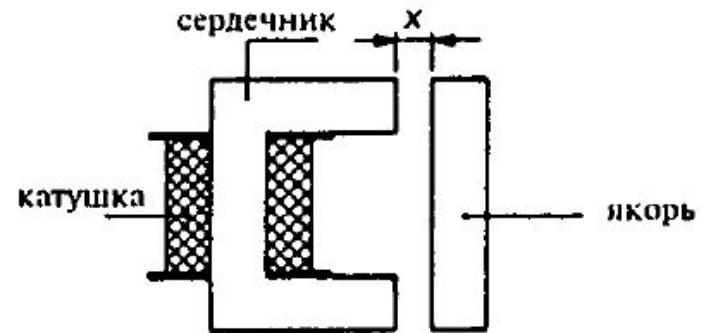


Емкостной датчик смещения: (a) с изменяемым расстоянием между электродами; (b) с изменяемой площадью электродов; (c) с изменяемым диэлектриком.

Индукционный датчик смещения



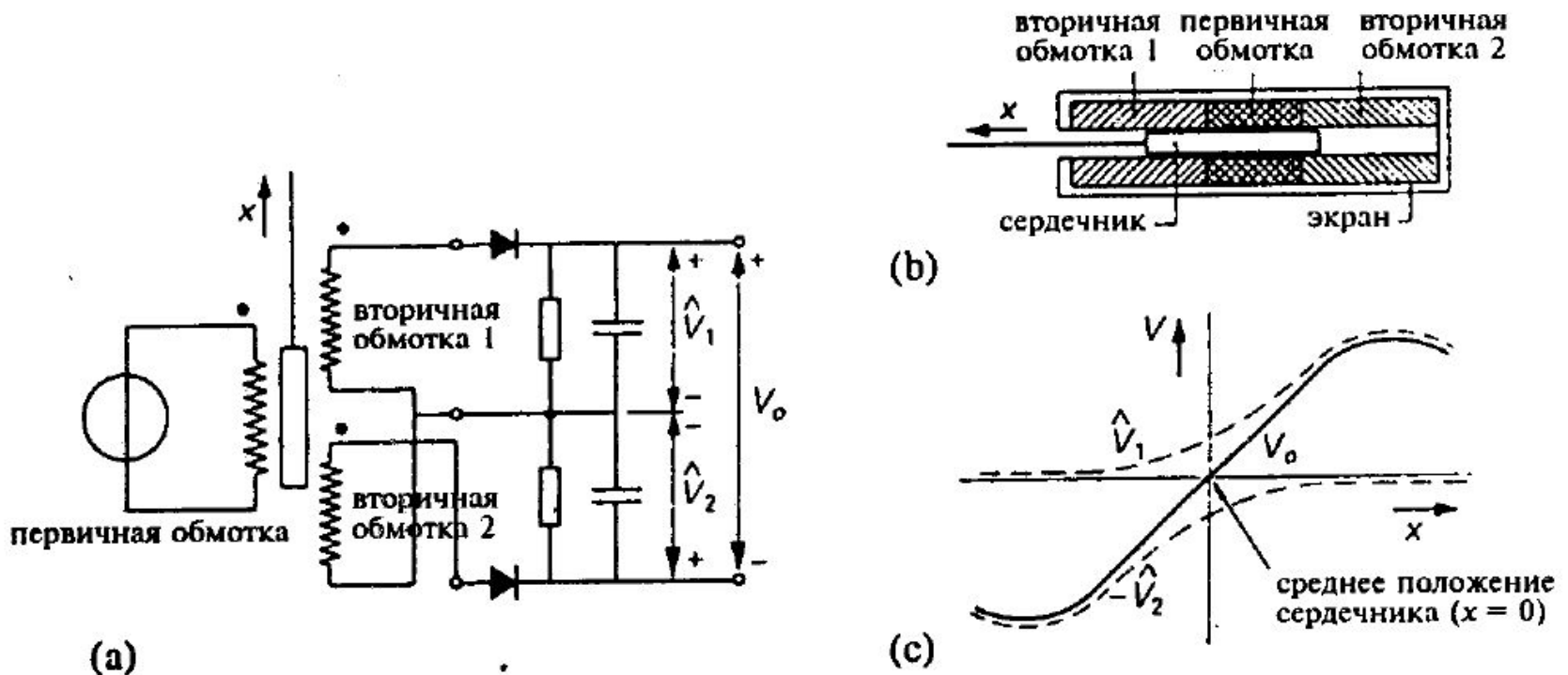
(a)



(b)

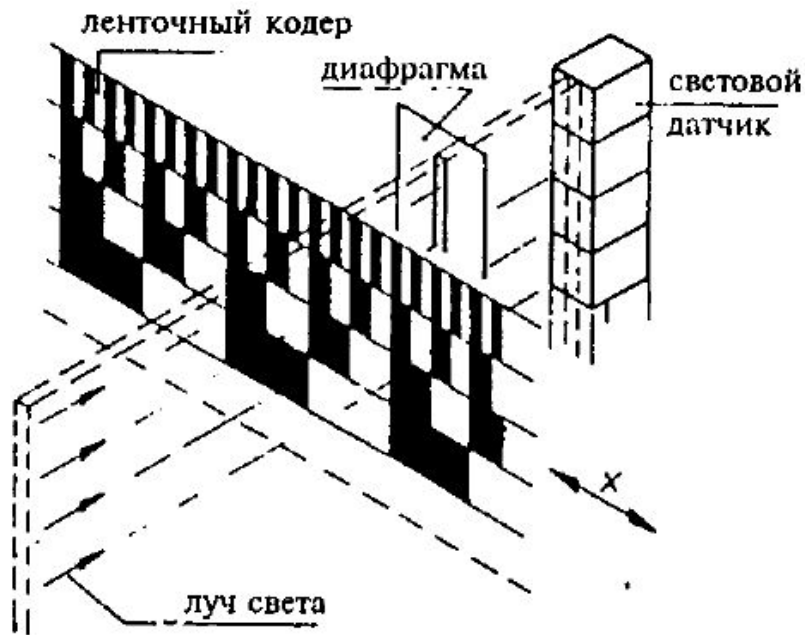
(a) Индуктивный датчик смещения, основанный на изменении действующего числа витков. (b) Индуктивный датчик с изменяемым магнитным сопротивлением.

Дифференциальный трансформатор для измерения смещения

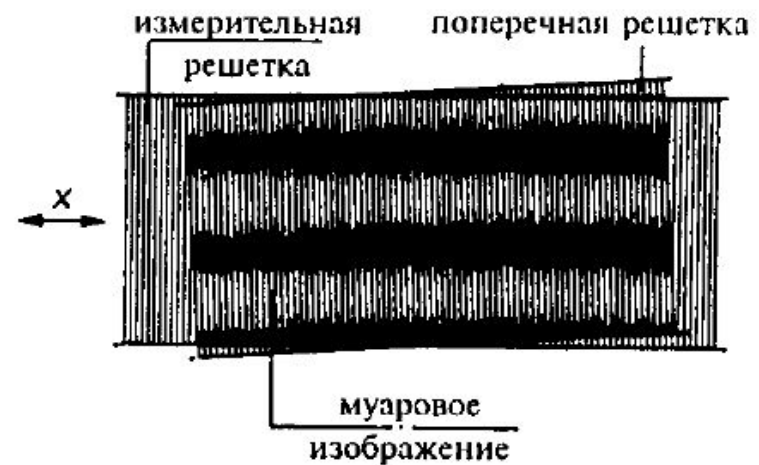


(a) Дифференциальный трансформатор для измерения смещения с двумя пиковыми детекторами. (b) Поперечный разрез дифференциального трансформатора. (c) Передаточная характеристика $V = V(x)$.

Оптические датчики смещения



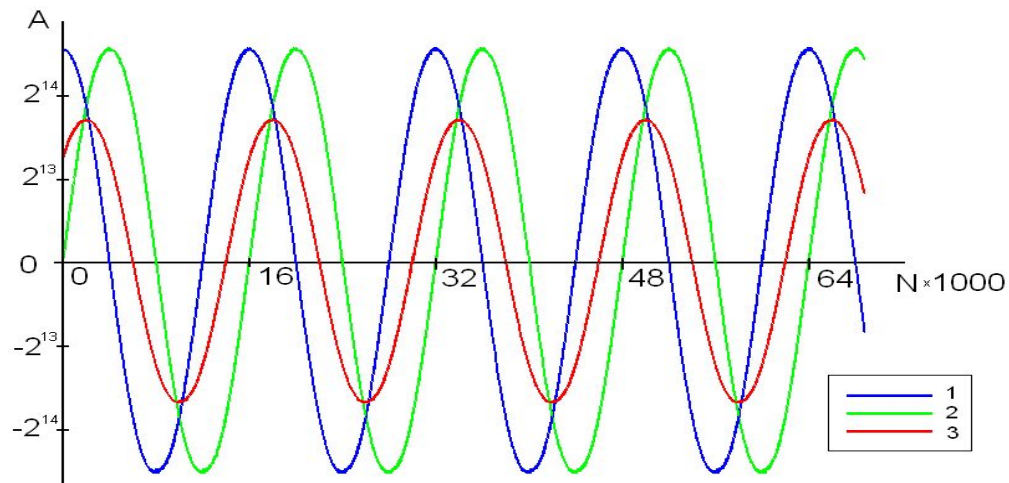
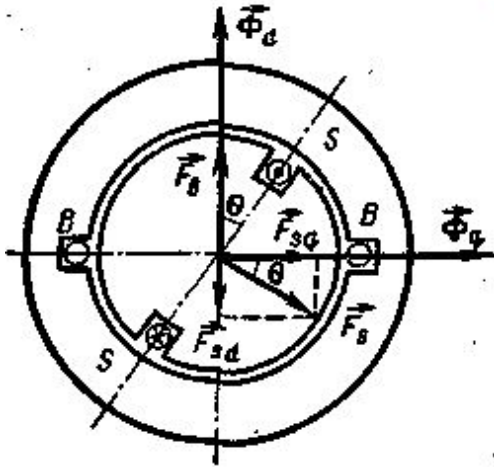
(a)



(b)

(a) Оптический датчик смещения с кодирующей лентой. (b) Увеличение расстояния между линиями решетки с использованием муарового изображения.

Вращающиеся трансформаторы



Датчики скорости

- Преобразователи скорость-частота

$$v = \Delta x n / t = \Delta x f$$

- Дифференцирование пути и интегрирование ускорения

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

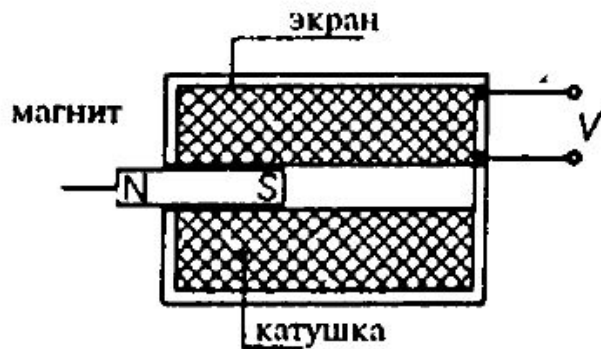
$$v(t) = \int_0^t a(t) dt + v(0)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

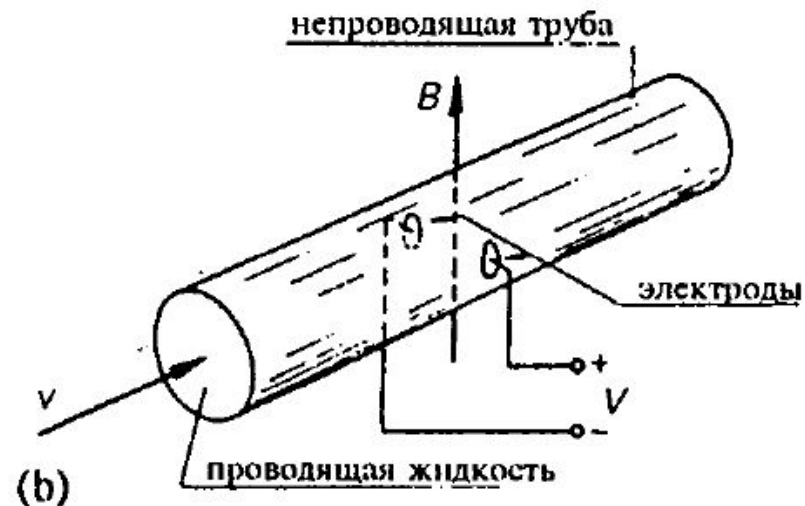
$$\omega(t) = \int_0^t \alpha(t) dt + \omega(0)$$

- Индуктивные датчики скорости
- Магнитодинамические датчики

Индуктивные и магнитодинамические датчики



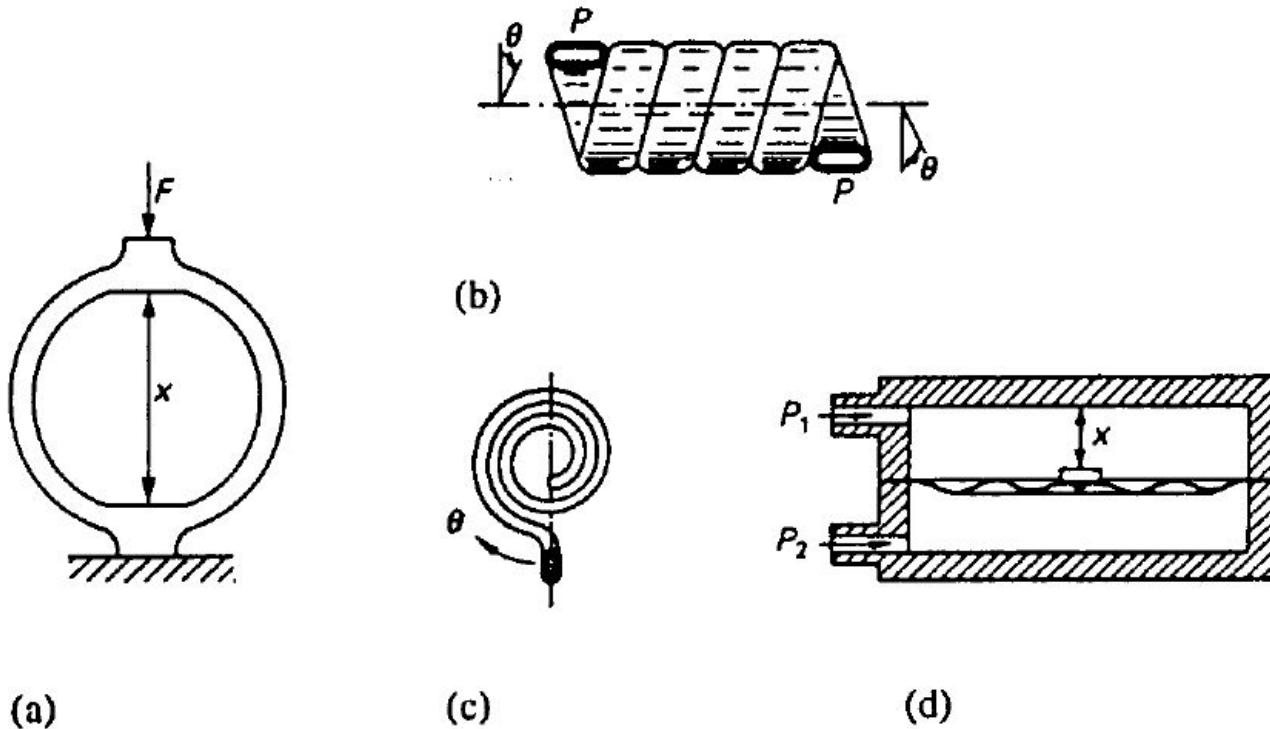
(a)



(b)

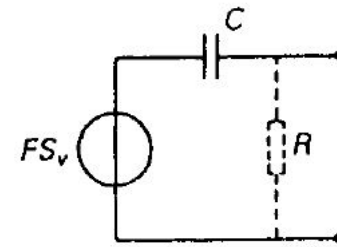
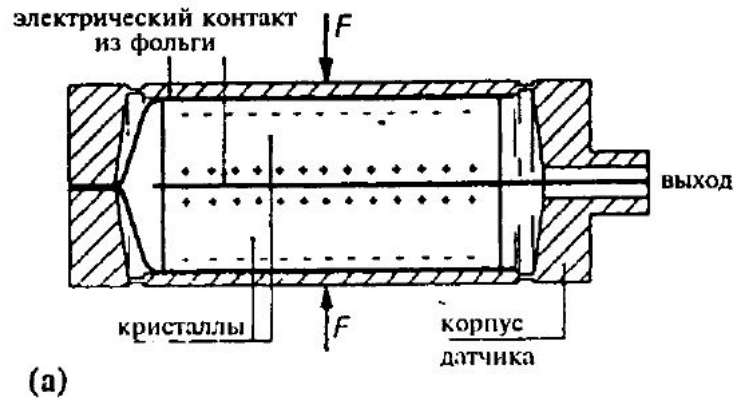
Индуктивный датчик скорости. (a) Магнитодинамический датчик скорости. (b) Индукционный датчик скорости потока.

Датчики усилий

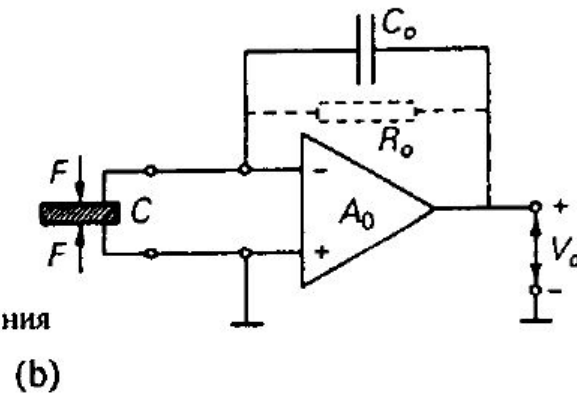
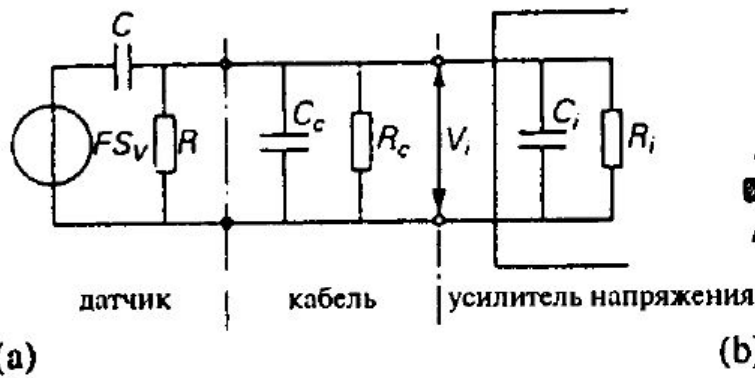


Несколько различных упругих пружинных конструкций для преобразования силы F или давления P в линейное смещение x или угол поворота φ : (a) пружина кольцевого типа; (b) винтовая пружина Бурдона; (c) спиральная пружина Бурдона; (d) мембранная пружина.

Пьезоэлектрические датчики силы



(a) Пьезоэлектрический датчик давления. (b) Эквивалентная электрическая схема.



(a) Подключение усилителя напряжения к пьезоэлектрическому датчику силы, с помощью кабеля. (b) Схема усилителя заряда.

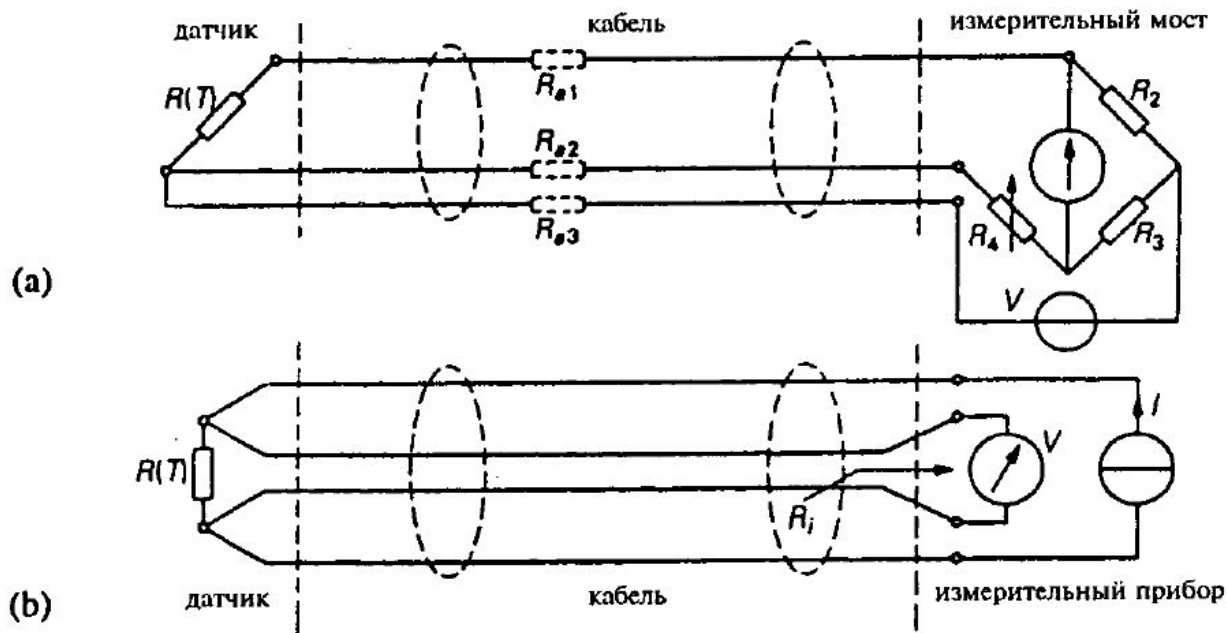
Датчики температуры

Сравнение различных методов измерения температуры.

	Резистивный датчик	Термистор	ИС - датчик	Термопара	Датчик излучения	Кварцевый датчик
Достоинства	Стабильность	Высокая эффективность	Дешевый	Пассивный датчик	Не нагружает объект	Высокая стабильность
	Точность	Быстрый	Линейный	Простой	Измеряет на расстоянии	Высокая точность
		2-проводное измерение	Большое напряжение	Прочный		Высокая линейность
				Дешевый		
				Большой температурный диапазон		
Недостатки	4-проводное измерение	Низкая стабильность	Медленный	Большая нелинейность	Неточный	Самый дорогой
	Нелинейность	Сильная нелинейность	Выделяет тепло	Малое напряжение	Нестабильный	
	Дорогой	Малый температурный диапазон	Требуется источник питания	Требуется температурный эталон	Дорогой	
	Медленный				Требуется температурный эталон	
	Выделяет тепло	Хрупкий	$T < 150^\circ$	Не высокая стабильность		

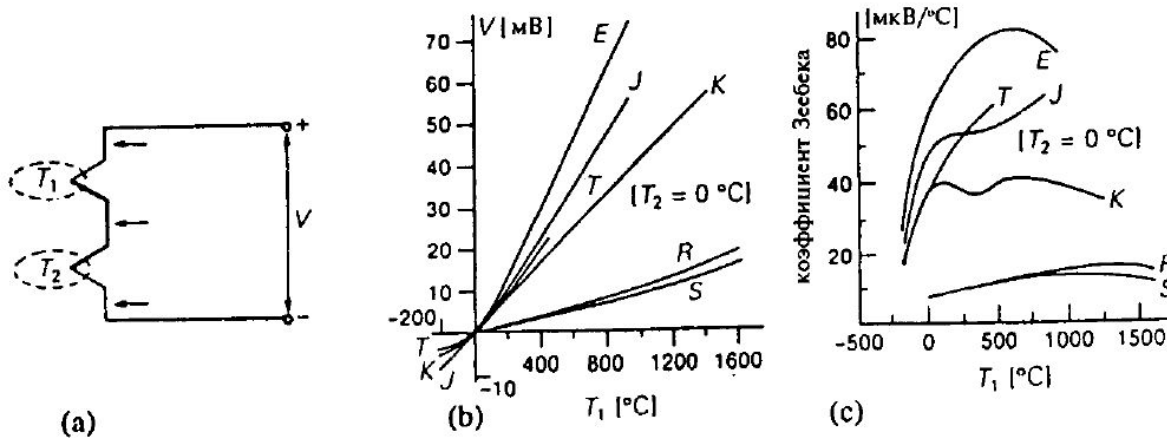
Резистивные датчики температуры

$$R(T) = R(T_0) \cdot \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 + \dots \right],$$

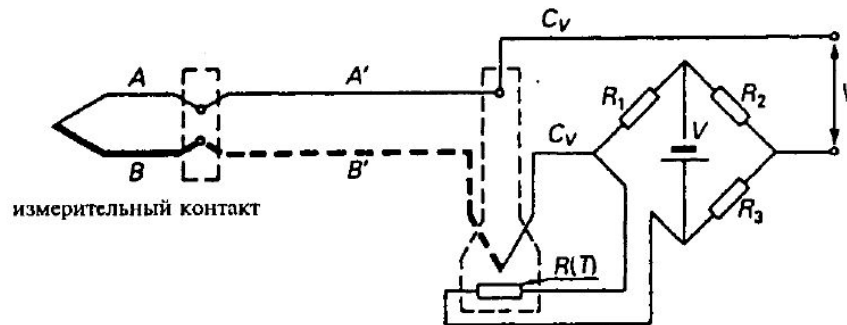


(a) Трехпроводная схема; если $R_{a1} = R_{a2}$ и $R_{a2} = R_{a3}$, то $R(T) = R_4$. (b) Четырехпроводная схема; если $R_i \gg R(T)$, то $R(T) = V/I$.

Термопары

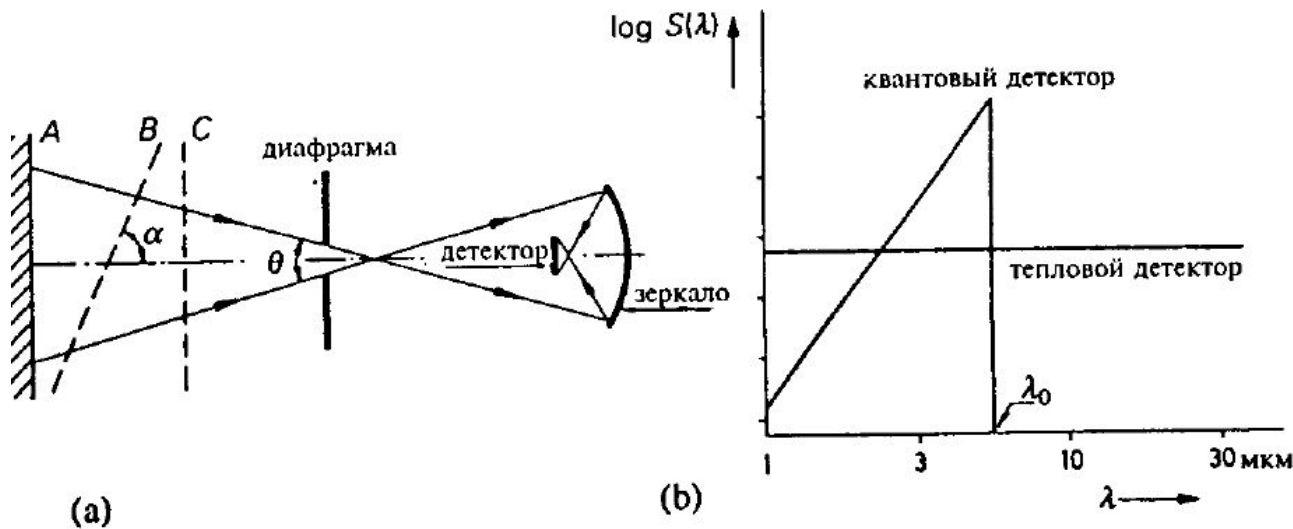


Термопара, образованная двумя контактами разнородных металлов, находящимися при различных температурах T_1 и T_2 . (b) Характеристики некоторых обычно применяемых термопар (буквами указаны различные комбинации металлов): E — хромель-константан; J — железо-константан; K — хромель-алюмель; T — медь-константан; R — (87% Pt, 13% Rh) — платина; S — (90% Pt, 10% Rh) — платина. (c) Значение коэффициента Зеебека для этих термопар как функция температуры T_1 при заданной опорной температуре $T_2 = 0^{\circ}\text{C}$.



Удлинение измерительного контакта AB посредством компенсационного кабеля $A'B'$ и компенсация температуры эталонного контакта с помощью мостовой схемы.

Термометры излучения

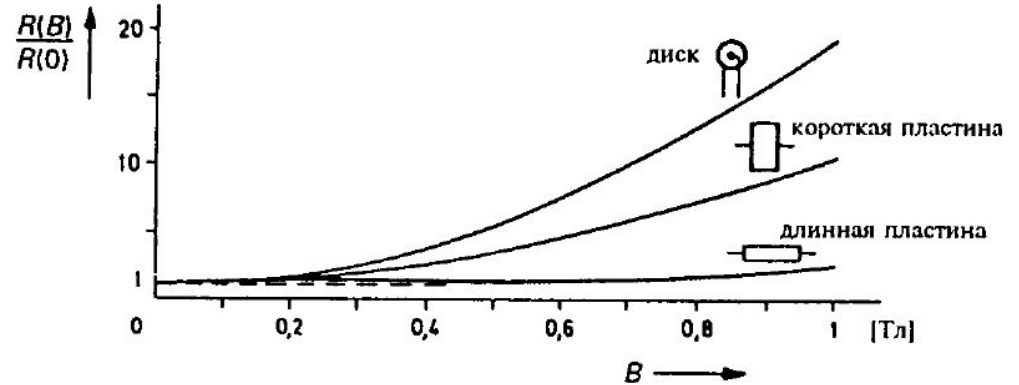
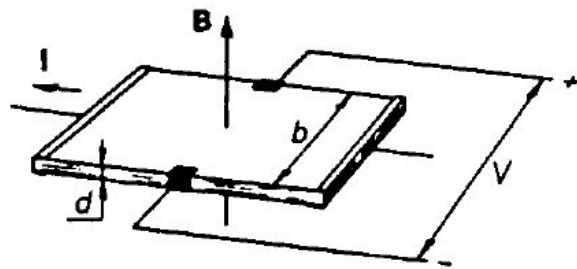


$$E_0 = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

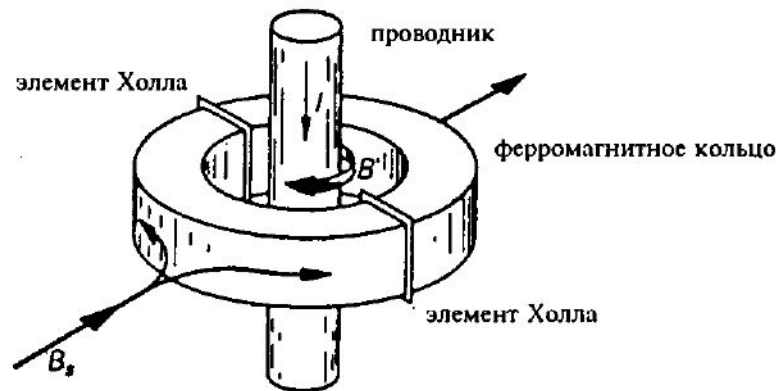
(a) Оптическая структура термометра инфракрасного излучения, согласующая тепловой детектор с объектом измерения. (b) Упрощённое представление спектральной чувствительности $S(\lambda)$ квантового и теплового детекторов.

Магнитоэлектрические датчики

$$V = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} = R_H \frac{IB}{d}$$

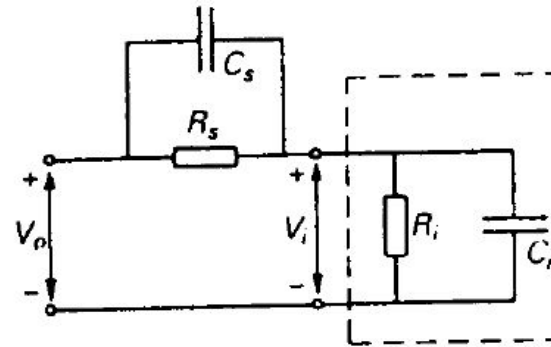
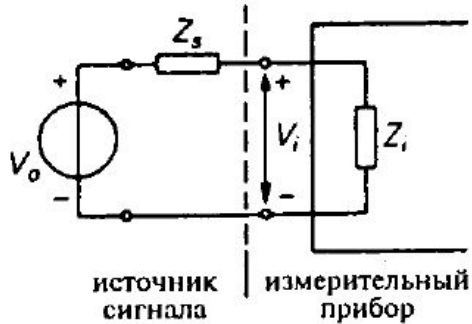


Магнитометр на основе эффекта Холла. Зависимость сопротивления $R(B)$ магниторезистивных датчиков различной формы от индукции B .



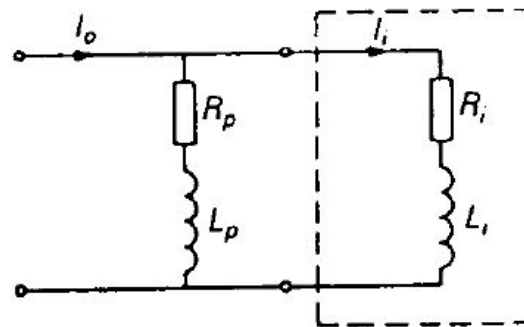
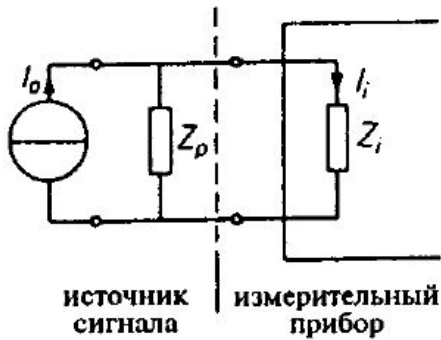
Измерение больших постоянных токов.

Аттенюаторы



$$\beta_v = \frac{V_i}{V_o} = \frac{Z_i}{Z_i + Z_s}$$

(a)

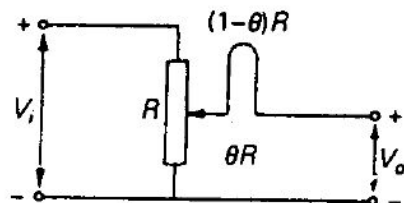


$$\beta_i = \frac{I_i}{I_o} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_i}$$

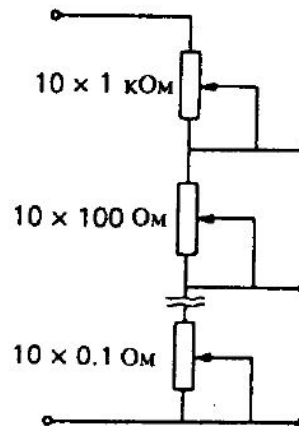
(b)

(a) Ослабление сигнала от источника напряжения с помощью последовательного импеданса Z_s . (b) Ослабление сигнала от источника тока с помощью шунтирующего импеданса Z_p .

Делители напряжения

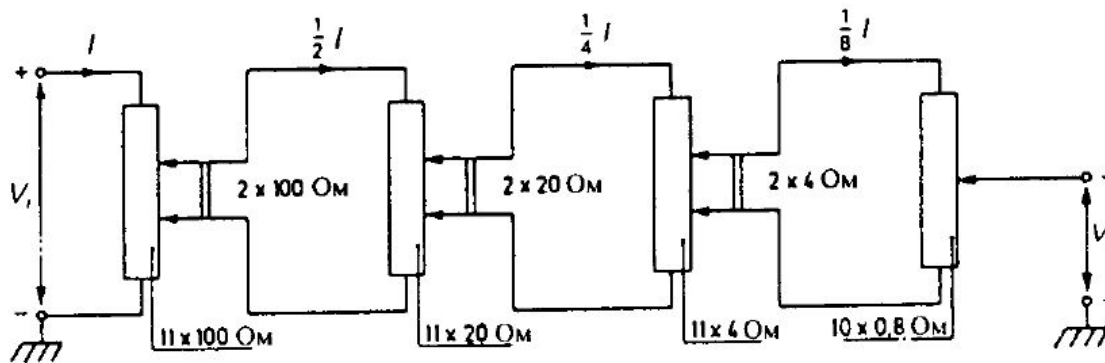


(a)



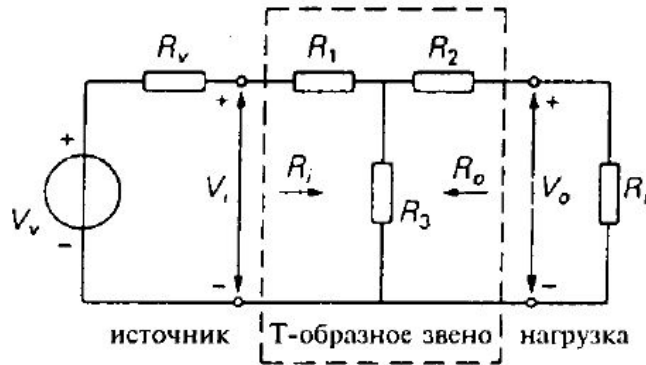
(b)

Применение потенциометра в качестве делителя напряжения. (b) Резисторная декада с пошаговым переключением в качестве делителя напряжения.

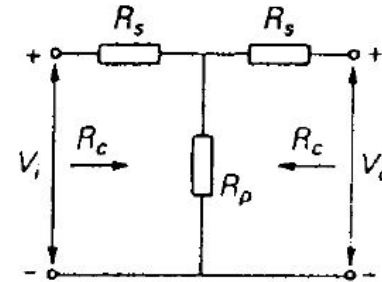


Делитель напряжения Кельвина-Варлея.

Характеристический аттенюатор

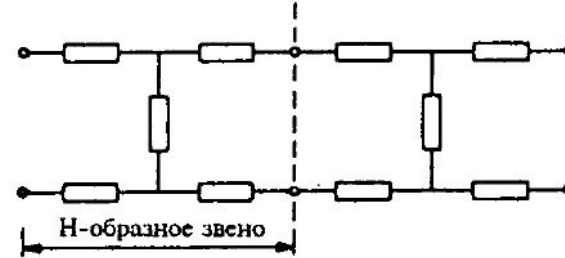
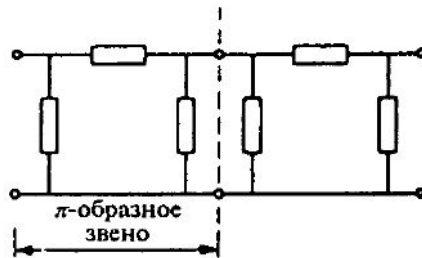


(a)



(b)

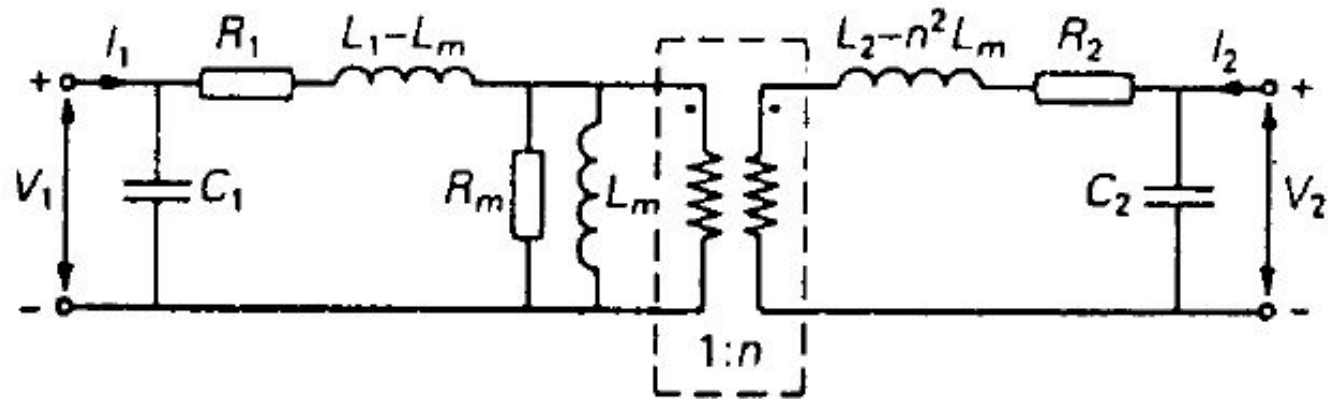
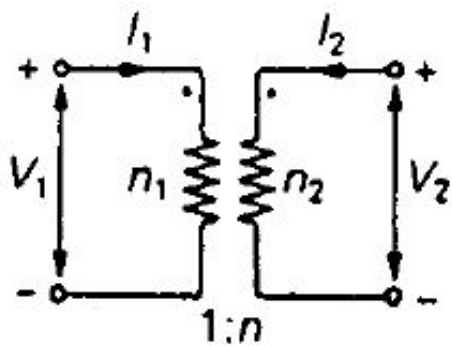
(a) Характеристический аттенюатор, состоящий из одного T-образного звена. (b) Симметричное T-образное звено. R_c - характеристическое сопротивление.



Характеристические аттенюаторы, состоящие из π - и H-образных звеньев.

Измерительные трансформаторы

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = n, \quad \frac{I_2}{I_1} = -\frac{n_1}{n_2} = -\frac{1}{n}$$



(a)

(b)

(a) Идеальный трансформатор. (b) Более реалистичный электрический эквивалент трансформатора.