МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

ВОЕННЫЙ УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

ВУС 814-244
«Измерения электрических и магнитных величин»

Военно-специальная подготовка

Тема № 2. Общие сведения об измерениях, средствах измерений и их метрологических характеристиках

Лекция № 10. *Систематические и случайные погрешности измерений*

Вопросы:

1. *Систематические погрешности измерений*

2. *Случайные погрешности измерений*

По <u>закономерностям проявления</u> погрешности измерений делятся на ***систематические*** *и* ***случайные*** *погрешности.*

По <u>форме представления</u> погрешности средств измерений делятся на ***абсолютные, относительные*** *и* ***приведённые*** *погрешности.*

По <u>условиям проведения</u> измерений погрешности СИ делятся на ***основные*** *и* ***дополнительные*** *погрешности.*

В зависимости от <u>причин и места возникновения</u> погрешности они делятся на ***инструментальные, методические*** *и* ***субъективные*** *погрешности.*

Систематическая погрешность *– это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.*

Причинами появления систематической погрешности могут являться неисправности СИ, несовершенство метода измерений, неправильная установка измерительных приборов, отступление от нормальных условий их работы, особенности самого оператора.

Систематические погрешности в принципе могут быть выявлены и устранены. Для этого требуется проведение тщательного анализа возможных источников погрешностей в каждом конкретном случае.

Т.е. систематическая погр. сводится (подстраивается, юстируется) к нулю за счёт того, что измерения проводят многократно в одинаковых условиях, одним оператором, на одном и том же СИ.

Случайная погрешность *– это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.*

Наличие случайных погрешностей выявляется при проведении ряда измерений постоянной физической величины, когда оказывается, что результаты измерений не совпадают друг с другом. Часто случайные погрешности возникают из-за одновременного действия многих независимых причин, каждая из которых в отдельности слабо влияет на результат измерения.

1. Систематические погрешности измерений

Систематические погрешности можно классифицировать:

1) по характеру проявления: *постоянные* ***и*** *переменные****.***

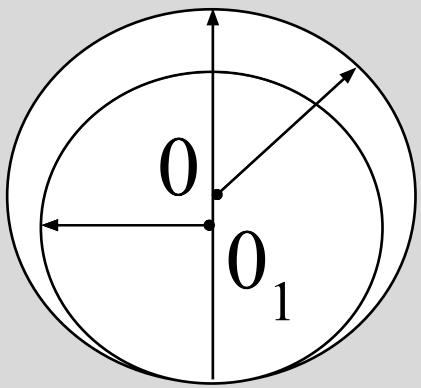
Переменные делят на: *прогрессирующие, периодические* **и** *изменяющиеся по сложному закону****.***

2) **по причинам, обуславливающим их появление*:***

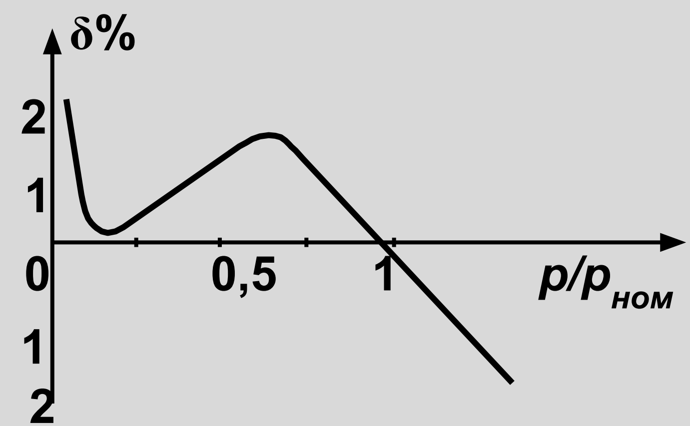
- *инструментальные погрешности,*
- *погрешности метода,*
- *погрешности обусловленные внешними влияющими величинами* **и**
- *субъективные погрешности.*

Прогрессирующие погрешности монотонно изменяются с течением времени *(например, разряд батареи, износ трущихся частей).*

Периодическая погрешность изменяется периодически при изменении измеряемой величины *(например, погрешность отсчета времени в механических часах при наличии эксцентриситета оси вращения стрелки)*



Погрешности, изменяющейся по сложному закону *(например, погрешность в зависимости от мощности потребляемой нагрузкой)*



***Инструментальная погрешность* зависит от систематических погрешностей применяемых СИ**

- люфт в подвижных частях СИ, неравномерное трение в опорах вращающихся частей их эксцентричное расположение;
- неточность градуировки СИ;
- старение (износ) деталей СИ, а также нарушение их регулировки, например, износ подшипников и увеличение люфта у приборов с механическими элементами в системе настройки;
- изменение параметров ламп, полупроводниковых приборов;
- изменение величин резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, входящих в систему прибора и др.

Среди инструментальных погрешностей можно выделить ***погрешность установки****.*

Погрешность установки *– составляющая систематической погрешности, зависящая:*

- от неправильной механической установки (некоторые стрелочные приборы необходимо устанавливать строго вертикально или горизонтально по уровню);
- от неудачного взаимного расположения приборов, когда они оказывают сильное влияние друг на друга из-за электромагнитного излучения или паразитных связей;
- от неточной установки нуля, параллакса при отсчете по шкале прибора, несогласованности входных параметров электрических цепей приборов и ряда других причин

Инструментальная погрешность в основном определяет **основную** погрешность СИ.

Случайную составляющую погрешности указывают в случае, когда она больше 10% от систематической.

Погрешность метода измерений – составляющая систематической погрешности измерения, происходящая от несовершенства самого метода измерений.

Эта погрешность является следствием:

- тех или иных допущений или упрощений;
- применения эмпирических формул и функциональных зависимостей вместо точных;
- неполного знания всех свойств наблюдаемых явлений, а также влияния паразитных связей и т.п.

Субъективные погрешности являются следствием индивидуальных свойств наблюдателя (*Например, погрешность от параллакса*).

*Во многих случаях систематическую погрешность в целом можно представить как сумму двух составляющих **аддитивной** и **мультипликативной**.*

Способы обнаружения систематических погрешностей

- ***Проведение многократных наблюдений***
- ***Измерение другими средствами измерений***
- ***Измерение различными операторами***
- ***Изменение условий измерения***
  - *Изменение климатических условий*
  - *Перемещение в пространстве*
  - *Отключение источников помех*
  - *Замена соединительных проводников*
  - *Изменение параметров питающей сети*

Уменьшение систематических погрешностей

- **До начала измерений**
  - *Поверка средств измерений*
  - *Использование штатных проводников*
  - *Прогрев, уст. нулей и калибровка*
  - *Правильное размещ., экранирование*
- **В процессе измерений**
  - *Использование метода замещения*
- **После измерений**
  - *Введение поправок*
  - *Введение поправочного множителя*

Систематические погрешности косвенных измерений

Если измеряемая величина Y определяется выражением:

$$Y = \phi\,(A_1, A_2, \ldots, A_m)$$

то измеряемая величина Y получит приращение Δ_{sy}, т.е:

$$Y + \Delta_{sy} = \varphi\left(A_1 + \Delta_{sA_1}, A_2 + \Delta_{sA_2}, \ldots, A_m + \Delta_{sA_m}\right)$$

Разложив правую часть данного выражения в ряд Тейлора и удержав производные первого порядка, получим :

$$Y + \Delta_{sy} = \varphi(A_1, A_2, \ldots, A_m) + (\partial\varphi / \partial A_1)\Delta_{sA_1} + (\partial\varphi / \partial A_2)\Delta_{sA_2} + (\partial\varphi / \partial A_m)\Delta_{sA_m}$$

Тогда получим погрешность:

$$\Delta_{sy} = \sum_{k=1}^{m} (\partial\varphi / \partial A_k)\Delta_{sA_k}$$

2. Случайные погрешности измерений

Причины, вызывающие случайные погрешности

- *трение или люфт в узлах измерительного механизма,*
- *попадание частичек пыли или влаги в механизм,*
- *пульсации напряжения источников питания,*
- *изменение сопротивления электрических контактов,*
- *вибрации,*
- *внешние поля,*
- *колебания температуры или влажности окружающей среды,*
- *незначительные изменения самой измеряемой величины и т.д.*

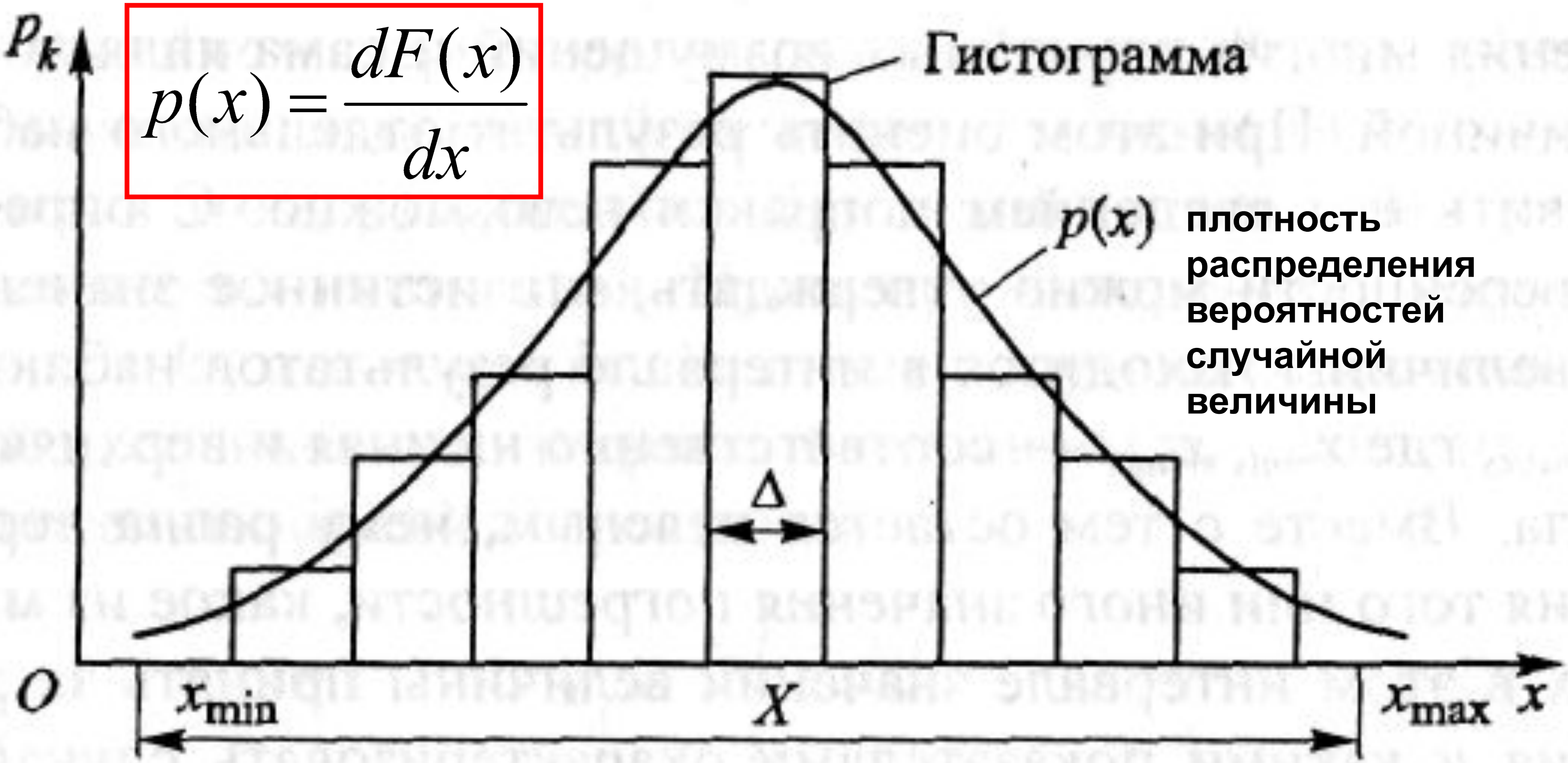
Для оценки погрешности применяют следующие *показатели точности* *(ГОСТ 8.011-72):*

- *пределы* ***допускаемых значений погрешности***: **± Δ** ;
- ***функция распределения P(x) (плотность распределения p(x)) вероятности*** *неисключаемой систематической и случайной составляющей погрешности измерения****;***
- ***числовые характеристики*** **(***точечные оценки* **)** *случайной составляющей погрешности измерения* **(**m_x, D_x, σ_x**);**
- ***доверительный интервал -*** *интервал, в котором погрешность измерения находиться с заданной вероятностью Р:* **± t σ** *(t зависит от Р)*

Законы распределения случайных величин, применяемые в метрологии

1) Дифференциальный закон распределения плотности вероятностей случайной величины X (либо Δ)

$$p(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$



$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1.$$

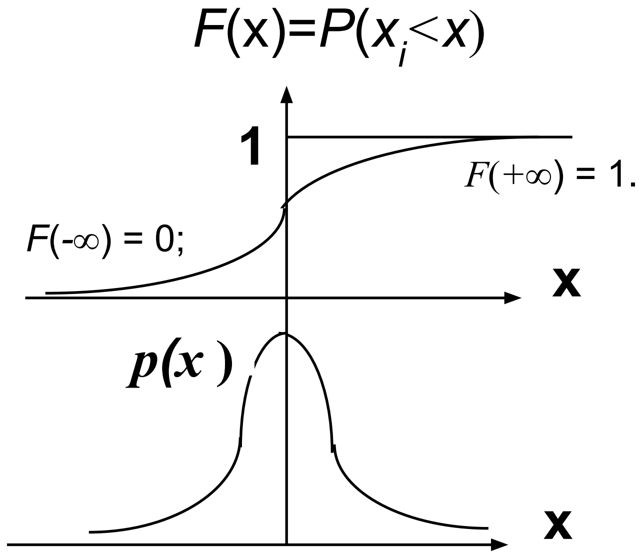
$$F\{x_1 \leq x \geq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x)dx$$

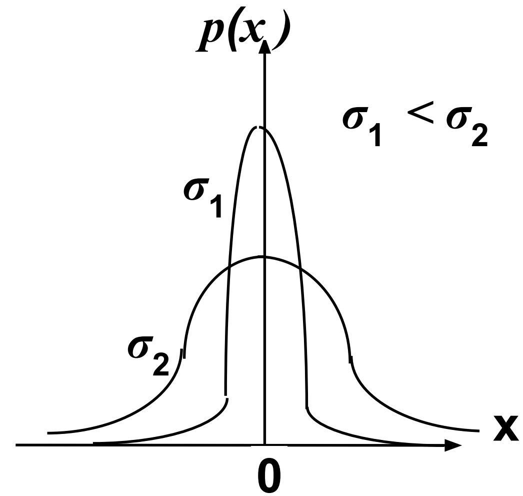
$$p(\Delta) = \frac{dF(\Delta)}{d\Delta},$$

***dF*(Δ) –** вероятность нахождения значений погрешности *Δ* в интервале ***dΔ*.**

2) Интегральный закон распределения случайной величины X (либо Δ)

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} p(x)dx$$





$$F(x) = P(x_1 < x)$$

Вероятность P, что случайная величина в i-ом отсчёте x_i примет значения меньше текущего значения x_1 описывается функцией $F(x)$ при $x = x_1$.

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = F(x_1) - F(x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x)dx$$

Вероятность того, что случайная величина x примет значение, лежащее в интервале (x_1, x_2).

Инт. закон распределения случайной погрешности Δ :

$$F(\Delta_x) = P\{-\infty < \Delta_x < \Delta_\Gamma\} = \int_{-\infty}^{\Delta_\Gamma} p(\Delta_x)d\Delta$$

Между законами имеется связь:

$$P(-\Delta_\Gamma \leq \Delta_x \leq +\Delta_\Gamma) = \int_{-\Delta_\Gamma}^{+\Delta_\Gamma} p(\Delta)d\Delta$$

Построение функции распределения вероятности *F(x)* и плотности распределения вероятностей *p(x)* случайной величины *x*

x	m,	$p(x)$	$F(x)$	x	m,	$p(x)$	$F(x)$
90,10	1	$\frac{1}{100} = 0.01$	0,01	**90,16**	19	$\frac{19}{100} = 0.19$	0,62+0,19 = 0,81
90,11	2	$\frac{2}{100} = 0.02$	0,01 +0,02 = 0,03	**90,17**	11	$\frac{11}{100} = 0.11$	0,81 + 0,11 = 0,92
90,12	5	$\frac{5}{100} = 0.05$	0,03 + 0,05 = 0,08	**90,18**	5	$\frac{5}{100} = 0.05$	0,92 + 0,05 = 0,97
90,13	10	$\frac{10}{100} = 0.1$	0,08 + 0,1 = 0,18	**90,19**	2	$\frac{2}{100} = 0.02$	0,97 + 0,02 = 0,99
90,14	20	$\frac{20}{100} = 0.2$	0,18+0,2 = 0,38	**90,20**	1	$\frac{1}{100} = 0.01$	0,99 + 0,01 = 1,00
90,15	24	$\frac{24}{100} = 0.24$	0,38 + 0,24 = 0,62				

Каждое x_i-е число появилось m_i раз

Графическое представления распределения (плотности) вероятностей p(x) и функции распределения вероятности F (x)

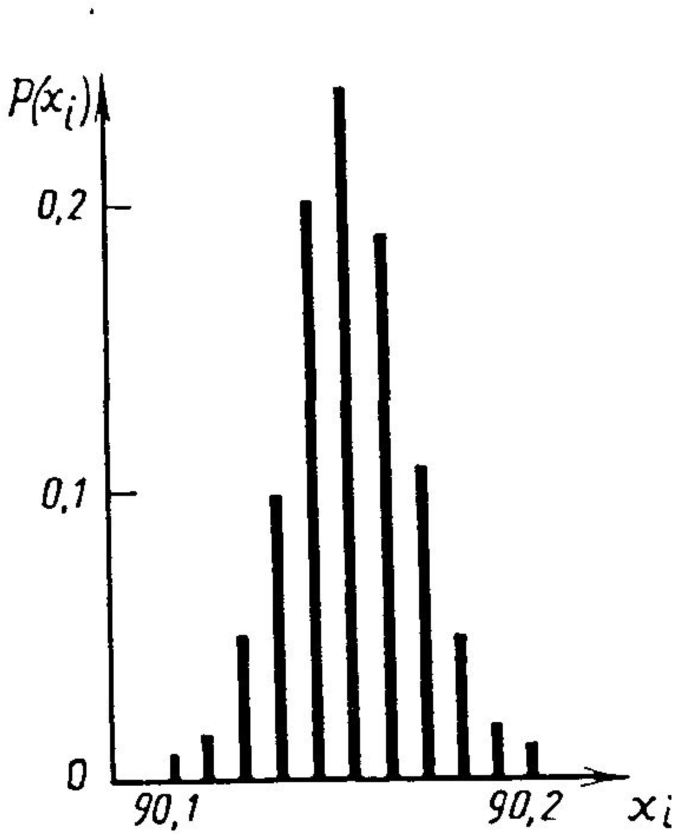


Рис. 4. Распределение вероятности отсчета цифрового измерительного прибора

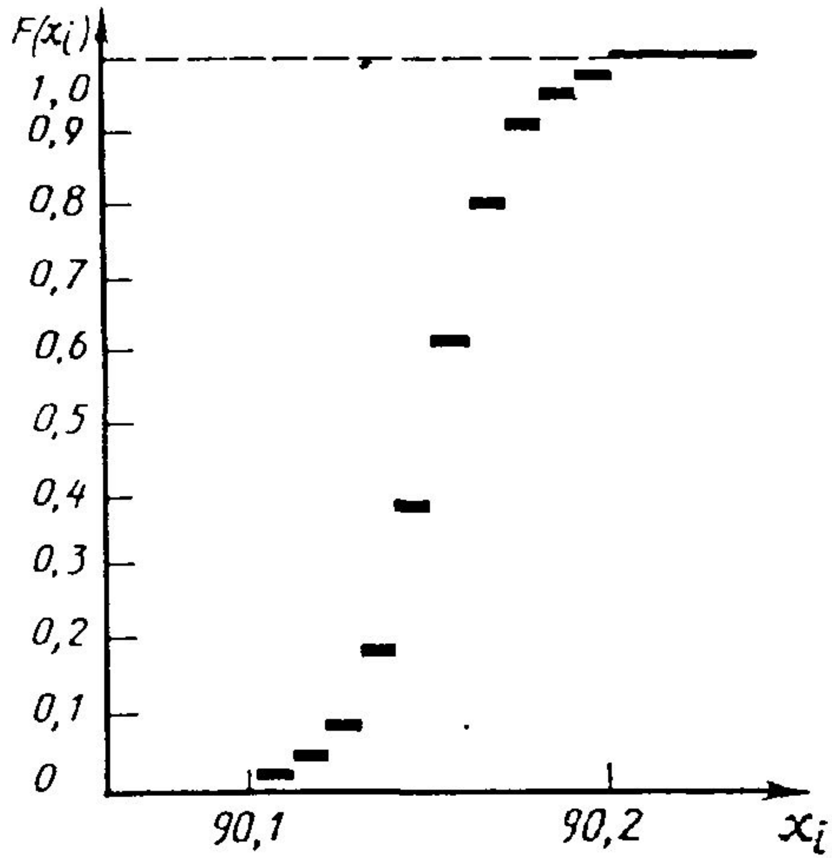


Рис. 5. Функция распределения вероятности отсчета цифрового измерительного прибора

Числовые характеристики распределений

Нахождение диф. (инт.) закона требует проведения многочисленных измерений, поэтому на практике для описания свойств случайной величины используют различные числовые характеристики распределений:

Начальный момент k-го порядка:

$$m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k p(x)dx$$

Начальный момент 1-го порядка - математическое ожидание случайной величины:

$$m_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx$$

Центральный момент k-го порядка:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^k p(x)dx$$

Центральный момент 2-го порядка дисперсия:

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^2 p(x)dx$$

На практике чаще используется среднее квадратическое отклонение σ случайной величины:

$$\sigma = \sqrt{D}$$

Способы нахождения значений случайной величины зависят от вида функции её распределения (закона распределения).

Основные законы распределения случ. величины:

1) Нормальный закон распределения (Гауса).

2) Равномерное распределение.

3) Треугольный закон распределения (закон Симпсона).

Другие законы распределения случ. величины:

1) Биномиальный закон.

2) Геометрическое распределение.

3) Гипергеометрическое распределение.

3) Закон распределения Пуассона.

4) Показательный закон распределения.

5) Логарифмически-нормальное распределение.

6) Распределение Стьюдента.

7) Распределение Фишера-Снедекора.

1) Нормальный закон распределения плотности вероятностей случайной величины X (либо Δ) с математическим ожиданием m_1 и ско σ :

Плотность распределения величины *X* и её погрешности *Δ*:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$p(\Delta_x) = \frac{1}{\Delta_{\Sigma x}\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\Delta_{Xi}^2}{2\Delta_{\Sigma x}^2}}$$

где m_x – матожидание величины X; σ_x - ско (теоретическое);
$\Delta_{\Sigma x} = \sqrt{\Delta_{X1}^2 + \ldots + \Delta_{Xn}^2}$ - среднеквадратичное значение суммарной абсолютной погрешности.

Функция распределения величины *X* и её погрешности *Δ* :

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x)dx = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{\frac{-(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx$$

$$P(\Delta_x) = \frac{1}{\Delta_{\Sigma x}\sqrt{2\pi}} \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} e^{\frac{-\Delta_{Xi}^2}{2\Delta_{\Sigma x}^2}} d\Delta$$

После замены: $t = (x - m_x)/\sigma_x$, $dt = dx/\sigma_x$

$t = \Delta_{xi}/\Delta_{\Sigma x}$, $dt = dt/\Delta_{\Sigma x}$, $\Delta_{\Sigma x}/\sigma = t_p$ получим:

$$p(\Delta_x) = \frac{1}{\Delta_{\Sigma x}\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-t^2}{2}}$$

$$P(\Delta_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{\frac{-t}{2}} dt = 2 \cdot \Phi(t_p)$$

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-t^2}{2}}$$

$$P(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{x_1 - m_x}{\sigma_x}}^{\frac{x_2 - m_x}{\sigma_x}} e^{\frac{-t^2}{2}} dt = 2 \cdot \Phi(t_p)$$

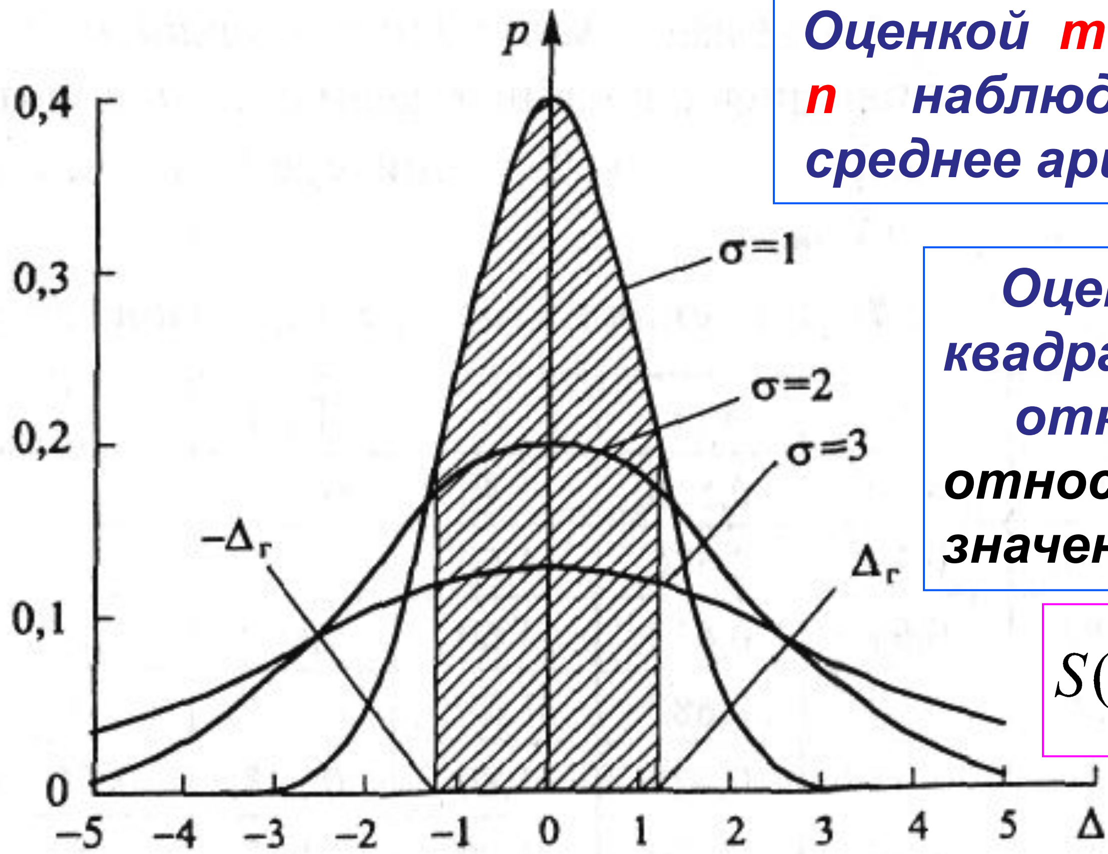
Функция $\Phi(t_p)$ называется интегралом вероятностей (интегралом Лапласа). На основании уравнения получена зависимость:

P_t	2/3	1	0,95	0,997
t_p	0,5	0,68	2	3

Нормальное распределение характеризуется двумя параметрами:

- математическим ожиданием - m и

- средним квадратическим отклонением - σ.



Оценкой m_1 для группы из n наблюдений является среднее арифметическое:

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

Оценка S среднего квадратического отклонения (рассеяние x_i относительно среднего значения x_{cp}):

$$S(x)^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{cp})^2$$

Среднеарифметическая оценка S среднего квадратического отклонения x_{cp}:

$$S(x_{cp}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{cp})^2}{n(n-1)}}$$

Нормальное распределение погрешностей имеет следующие свойства:

-*симметричность, т.е. погрешности, одинаковые по величине, но противоположные по знаку, встречаются одинаково часто;*

-*математическое ожидание случайной погрешности равно нулю;*

-*малые погрешности более вероятны, чем большие;*

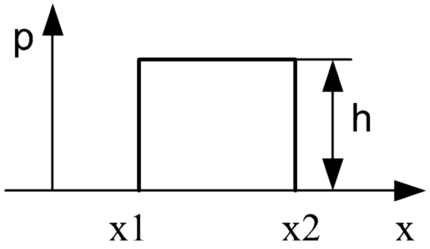
- *чем меньше σ, тем меньше рассеяние результатов наблюдений и больше вероятность малых погрешностей.*

2) Равномерное распределение:

Плотность распределения **x**:

$p(x) = h$ при $x_1 \le x \le x_2$,

$p(x) = 0$ при $x_2 < x < x_1$.

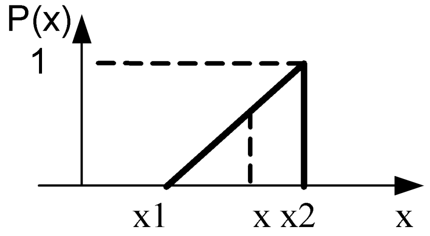


Тогда:

$h(x_2 - x_1) = 1$;

$p(x) = h = 1/(x_2 - x_1)$

Вероятность: $P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x} p(x)dx = \dfrac{x - x_1}{x_2 - x_1}$



Математическое ожидание:

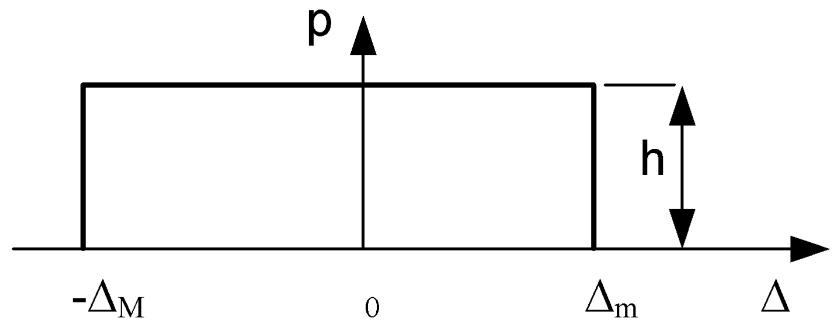
$$m_x = \int_{x_1}^{x_2} xp(x)dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{x}{x_2 - x_1} = \frac{x_2^2 - x_1^2}{2(x_2 - x_1)} = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

Дисперсия и СКО:

$$D = \int_{x_1}^{x_2} (x - m_x)^2 p(x)dx = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right)^2 dx = \frac{(x_2 - x_1)^2}{12}$$

$$\sigma = \sqrt{D} = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{3}}$$

Плотность распределения Δ_x*:*



$p(\Delta) = h$ при $-\Delta_m \leq \Delta \leq +\Delta_m$

$p(\Delta) = 0$ при $-\Delta_m < \Delta < +\Delta_m$

Тогда:

$h(2\Delta_m) = 1;$

$p(\Delta) = h = 1/(2\Delta_m)$

Математическое ожидание*:*

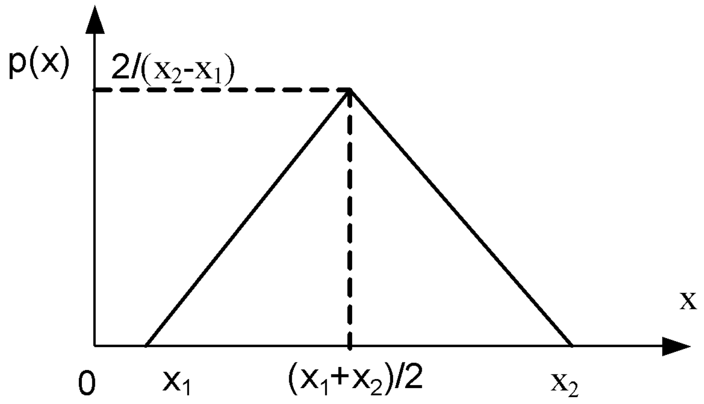
$$m_x(\Delta_x) = \int_{-\Delta_m}^{\Delta_m} \Delta_x p(\Delta_x) d\Delta = \int_{-\Delta_m}^{\Delta_m} \frac{\Delta}{2\Delta_m} = \frac{\Delta_m^2 - \Delta_m^2}{4\Delta_m} = 0$$

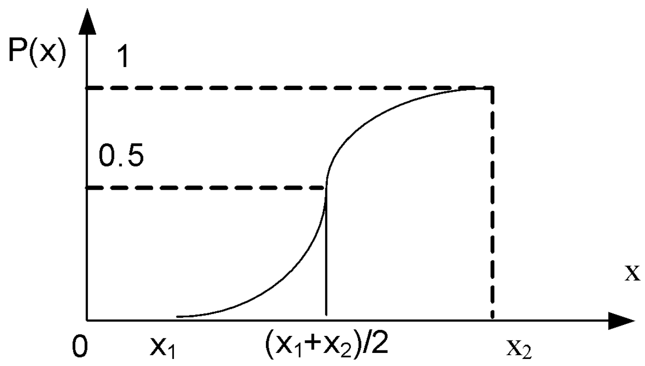
Дисперсия и СКО*:*

$$D_{\Delta_x} = \int_{x_1}^{x_2} (\Delta_x)^2 p(\Delta_x) d\Delta = \frac{\Delta_x^2}{3}$$

$$\sigma = \sqrt{D} = \frac{\Delta_x}{\sqrt{3}}$$

3) Треугольный закон распределения (закон Симпсона):





Математическое ожидание:

$$m_x = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

Дисперсия :

$$D = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{6}}$$

Доверительные интервалы

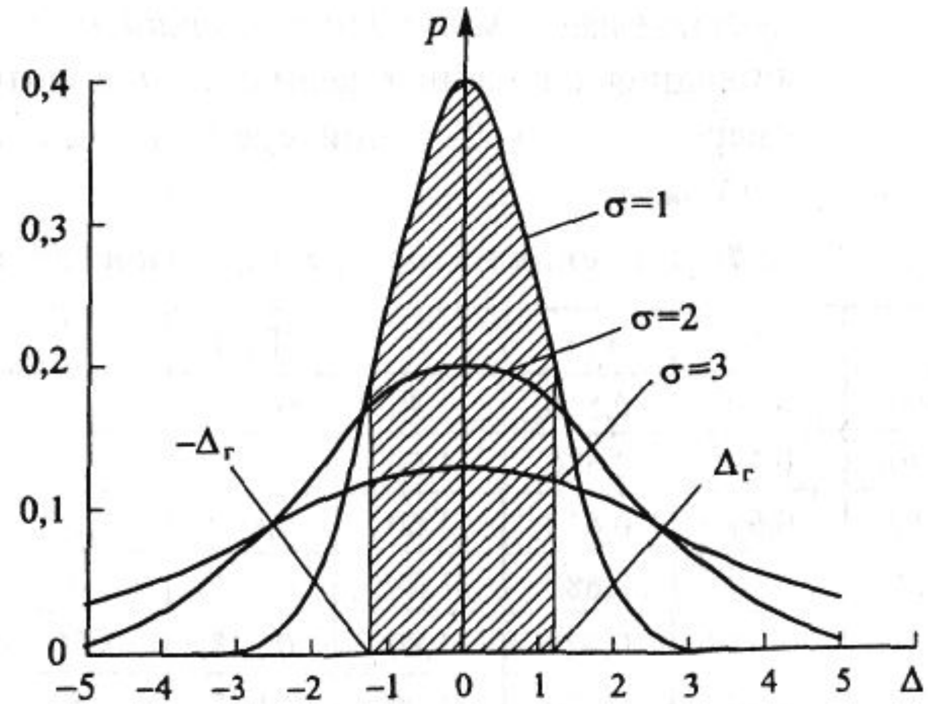
Знание точечной оценки m_x, D_x, σ_x является не всегда достаточным и зависит от количества измерений n и закона распределения.

Наиболее корректной и наглядной оценкой случайной погрешности измерений является оценка с помощью **доверительных интервалов** ε.

Симметричный интервал с границами $\pm\Delta_г(P)$ называется **доверительным интервалом** 2ε случайной погрешности Δ с **доверительной вероятностью** P_t, если площадь кривой распределения между абсциссами $-\Delta_г$ и $+\Delta_г$ составляет P-ю часть всей площади под кривой плотности распределения вероятностей.

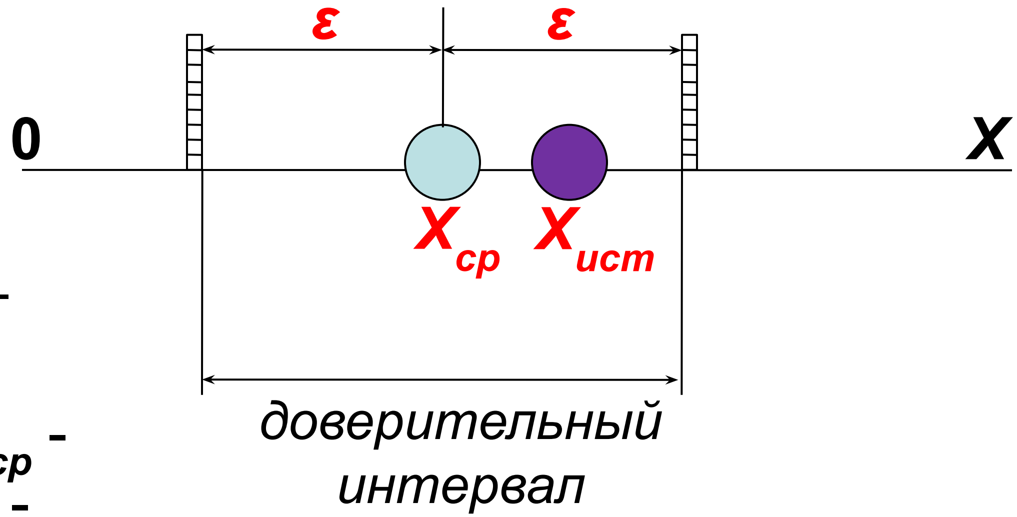
При нормировке всей площади на единицу **доверительная вероятность** P_t представляет собой часть этой площади в долях единицы (или в процентах).

Другими словами, в интервале от $-\Delta_г(P)$ до $+\Delta_г(P)$ с заданной вероятностью P_t встречаются все возможные значения случайной погрешности Δ.



Т.о., **доверительная вероятность** P_t – это мера доверия насколько истинное значение $X_{ист}$ соответствует среднему арифметическому $X_{ср}$ (или m_x).

P_t – это вероятность того, что **доверительный интервал** 2ε «накроет» $X_{ист}$.



Истинное значение $X_{ист}$ – неслучайная величина, а доверительный интервал ($X_{ср}$ - ε; $X_{ср}$ + ε) **–** случаен, т.к., $X_{ср}$ - случайная величина.

Тогда доверительная вероятность P_t :

$$\boxed{P_t = P\left[X_{ср} - \varepsilon < X_{ист} < X_{ср} + \varepsilon\right]}$$

Взаимосвязь *граничных значений* **$\Delta_г$**, с *доверительной вероятностью* **P_t** определяется соотношением:

$$P_t = P\left[-\Delta_г < \varepsilon < +\Delta_г\right] = \int_{-\Delta_г}^{+\Delta_г} p(\varepsilon)d\varepsilon$$

Половина длины доверительного интервала ***ε*** **для нормального распределения** случайной погрешности находится по формуле:

$$\Delta_x(P) = \varepsilon = t\sigma_{x.cp} = t\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

t – квантиль закона распределения

При проведении многократных измерений величины ***Х***, подчиняющейся **нормальному распределению**, доверительный интервал может быть построен для любой доверительной вероятности:

$$\Delta_x(P) = t \cdot S(X_{cp})$$

$S(X_{cp})$ – оценка СКО среднего арифметического

Для **нормального распределения:**

P_t	**0,8**	**0,9**	**0,95**
t	1,282	1,645	1,96
P_t	**0,99**	**0,999**	
t	2,576	3,29	

Для других законов распределения:

Закон	P_t			
	$P =$ 0,9	$P =$ 0,95	$P =$ 0,99	$P =$ 0,999
Равномерный	1,55	1,64	1,71	1,73
Треугольный	1,67	1,9	2,2	2,37

При малом числе наблюдений $n \le 20$, коэффициент t_q подчиняется распределению Стьюдента

n	t_q		
	$P = 0{,}9$	$P = 0{,}95$	$P = 0{,}99$
3	2,5	3,18	5,84
5	2,02	2,57	4,03
10	1,81	2,23	3,17
15	1,75	2,13	2,95
20	1,72	2,09	2,84
25	1,64	1,96	2,58

Истинное значение измеряемой величины находится с доверительной вероятностью P_t внутри интервала:

$$\boxed{\left(X_{cp} - t \cdot S(X_{cp}); \quad X_{cp} + t \cdot S(X_{cp})\right)}$$

Недостатком доверительных интервалов при оценке случайных погрешностей является то, что при произвольно выбираемых доверительных вероятностях нельзя суммировать несколько погрешностей, т.к. доверительный интервал суммы не равен сумме доверительных интервалов.

Суммируются дисперсии независимых случайных величин: $D_{\sum} = \sum D_i$

Суммирование погрешностей

Перед суммированием все погрешности делятся на следующие группы:

- *систематические* и *случайные*;
- *аддитивные* и *мультипликативные*;
- *основные* и *дополнительные*.

Такое деление необходимо потому, что систематические и случайные погрешности суммируются по-разному, а аддитивные погрешности нельзя складывать с мультипликативными.

Если некоторые погрешности указаны в виде доверительных интервалов, то перед суммированием их нужно представить в виде среднеквадратических отклонений.

Дополнительные погрешности могут складываться с основными либо перед суммированием погрешностей, либо на заключительном этапе.

При последовательном соединении нескольких СИ погрешности, проходя через измерительный канал с передаточной функцией $f(x)$ усиливаться или ослабляться. Для учета этого эффекта используют коэффициенты влияния *К*. Все погрешности перед суммированием приводят к выходу (или входу) измерительного канала путем умножения (деления) на коэффициент влияния.

При суммировании погрешностей применяются три основных способа: арифметический (алгебраический), геометрический, моментов

1) При арифметическом суммировании (завышает значение погрешности)

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{m} |\sigma_k|,$$ *k* - номер погрешности, *m* - их количество

2) При геометрическом суммировании

(занижает значение погрешности)

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^{m} \sigma_k^2}$$

МИ 2232-2000 предусматривает промежуточный вариант между формулами геометрического и алгебраического суммирования:

$$\sigma_{\Sigma} = k\sqrt{\sum_{k=1}^{m} \sigma_k^2}$$

3) Способ моментов - вычисляется по одной из формул для оценки погрешности косвенного измерения

Суммирование систематической и случайной составляющих погрешности производится при определении границ погрешности результата измерения.

Установлено три способа определения границ погрешности результата измерения:

1. *Если отношение суммарной неисключенной систематической погрешности к оценке среднего квадратического отклонения результата измерения меньше* ***0,8****, то есть:*

$$\frac{\Delta_{S\Sigma}}{\sigma_{\underline{cp}}} < 0{,}8 \quad , \qquad \text{тогда:} \quad \Delta_{\Sigma} = t_S\, \sigma_x \ ,$$

где t_s - коэффициент Стьюдента

2. *Если отношение суммарной не исключенной систематической погрешности к оценке среднего квадратического отклонения результата измерения больше* ***8****, то есть:*

$$\frac{\Delta_{S\Sigma}}{\sigma_{cp}} > 8, \qquad \text{*тогда:*} \qquad \Delta_{\Sigma} = \Delta_{S\Sigma}.$$

3. *Если отношение попадает в интервал :*

$$0{,}8 < \frac{\Delta_{S\Sigma}}{\sigma_{cp}} < 8, \qquad \text{*тогда:*} \ \Delta_{\Sigma} = K_{\Sigma}\sigma_{\Sigma},$$

где K_{Σ} *– коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей;*

δ_{Σ} *– оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения*

Коэффициент K_Σ вычисляют по эмпирической формуле:

$$K_\Sigma = \frac{\Delta_{Xcp\_cл} + \Delta_{S\Sigma}}{\sigma_{cp} + \sqrt{\sum_{k=1}^{m} \frac{\Delta_{sk}^2}{3}}}.$$

Оценку суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения вычисляют по формуле:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{cp}^2 + \sum_{k=1}^{m} \frac{\Delta_{Sk}^2}{3}}.$$

END