МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
(МИИТ)

Кафедра электротехники, метрологии и электроэнергетики

В.В. ФЕДОТОВ

Утверждено
редакционно- издательским
советом университета

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ ПРЯМЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Методические указания к лабораторной
работе для студентов специальности
«Мосты и тоннели»

Москва—2005

УДК 389:531.71
Ф32

Федотов В.В. Определение показателей точности прямых линейных измерений: Методические указания. - М.: МИИТ, 2005. – 22с.

Приведены теоретические сведения и даны задания по изучению методов и средств линейных прямых равноточных измерений, определению систематических и случайных составляющих погрешностей.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение методов к средств линейных прямых равноточных измерений, определение систематических и случайных составляющих погрешностей и оценка их влияния на суммарную погрешность результата измерения.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Средства измерений

В строительстве для линейных измерений наиболее широко применяет меры (линейки, рулетки, землемерные ленты) и измерительные приборы (дальномеры-оптические, нивелиры, теодолиты).

Непосредственное выполнение линейных измерений при геодезических работах и разбивки инженерных сооружений, а также при контрольных измерениях на строительной площадке производят металлическими рулетками.

Согласно ГОСТ 7502-98 рулетки следует изготовлять со шкалами номинальной длины 1, 2, 3, 5,10, 20, 30, 50, 100 м. По заказу потребителя рулетки допускается изготовлять со шкалами иной длины.

Рулетки следует изготовлять с лентами из нержавеющей стали (в условном обозначении — Н) или углеродистой стали (в условном обозначении — У).

Вытяжные концы рулеток следует изготовлять:

- с кольцом (в условном обозначении — буква «**К**»);
- с грузом (в условном обозначении — буква «**Г**»).

Рулетки до 5 м включительно допускается изготовлять с вытяжным концом в виде:

- прямоугольного торца (в условном обозначении — буква «**П**»);
- с держателем для закрепления на предмете, подлежащем измерению (в условном обозначении — буква «**Д**»).

Условное обозначение рулеток должно включать: букву «**Р**» — «рулетка», номинальную длину шкалы, материал ленты, класс точности, конструктивное исполнение вытяжного конца ленты и обозначение стандарта ГОСТ 7502-98.

Примеры условных обозначений

Рулетка со шкалой номинальной длины 30 м, лентой из нержавеющей стали, 2-го класса точности, кольцом на вытяжном конце ленты: ***Р30Н2К ГОСТ 7502-98***

Рулетка со шкалой номинальной длины 5 м, лентой из углеродистой стали, 3-го класса точности, прямоугольным торцом на вытяжном конце ленты: ***Р5УЗП ГОСТ 7502-98***

2.2. Погрешности линейных измерений

Все элементарные погрешности измерений классифицируют по двум признакам: источнику происхождения (инструментальные, методические, от влияния внешних факторов, личные) и характеру их действия (систематические и случайные).

Если погрешность остается постоянной (это относится к погрешности компарирования) или изменяется по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины, то она является по своему характеру *систематической.*

Систематические погрешности могут быть исключены введением соответствующих поправок: Однако вследствие неточности погрешностей средств измерений, значения которых используются для вычисления поправок, какая-то часть систематических погрешностей остается неисключенной. Эта часть относится к случайным погрешностям.

Случайными называют погрешности изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

В отличие от систематических погрешностей случайные нельзя исключить из результатов измерения. Все случайные погрешности условно разделяют на две группы (неисключенные систематические и случайные).

Неисключенные погрешности могут быть оценены, исходя из сведений о метрологических характеристиках средств измерений. Например, в качестве границ инструментальной неисключенной систематической погрешности принимают пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, определяемых его классом точности.

Для неисключенных систематических погрешностей заданных своими границами Θ_j ,доверительные границы суммарной неисключенной систематической погрешности определяют по следующей формуле:

$$\Theta(P) = K\sqrt{\sum_{j=1}^{m}\Theta_j^2}\ , \qquad (2.1)$$

где K - поправочный коэффициент, зависящей от доверительной вероятности и числа составляющих m .

Суммирование составляющих неисключенной систематической погрешности результата измерения по выражению (2.1) возможно лишь при условии, что все эти неисключенные систематические погрешности имеют одинаковый закон распределения.

Случайные погрешности оценивают путем определения доверительных границ $\varepsilon(P)$ случайной погрешности результата измерения, следующим образом:

$$\varepsilon(P) = \pm t S_X \tag{2.2}$$

где t - коэффициент, зависящий от закона распределения и доверительной вероятности P;

S_X - среднее квадратическое отклонение случайной. погрешности результата измерения X.

Среднее квадратическое отклонение S_X случайной погрешности результата измерения X вычисляют по формуле:

$$S_X = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} S_i^2}\,, \tag{2.3}$$

где m - число составляющих случайной погрешности;

S_i - среднее квадратическое отклонение i-ой составляющей случайной погрешности.

На результат измерения длины измерительной рулеткой влияют погрешности, возникающие в результате следующих причин: компарирования рулетки, температуры, неодинакового натяжения, отсчета по шкале рулетки, а также укладки её в створе линии, провеса и прогиба рулетки.

2.2.1. Погрешность компарирования рулетки

Отклонение действительной длины рулетки от номинальной является инструментальной погрешностью. Для определения фактической длины рулетки её необходимо прокомпарировать, т.е. сравнить с образцом (поверить). Компарирование осуществляется путем сравнения поверяемой рулетки с образцовой мерой или другой рулеткой, длина которой поверена на специальном компараторе. Допускаемое отклонение действительной длины интервалов шкал рулеток от нанесенной на шкале при температуре окружающей среды 20 °С и натяжении измерительной ленты рабочим усилием должно быть не более указанного в табл. 2.1. Рабочее усилие натяжения ленты при измерениях должно быть следующим: (100±10) Н — для рулеток длиной 10 м и более; (10±1) Н — для рулеток длиной 1-5 м; для рулеток с грузом — усилие натяжения создает сам груз; для рулеток с желобчатой лентой — без натяжения.

Компарируемым рулеткам присваивают заводской номер. В свидетельстве о поверке указывают действительную длину (по эталону) от нулевого до каждого метрового штриха рулетки с округлением до десятых долей миллиметра.

Абсолютная погрешность поверки рулетки ΔL_K определяется следующим образом:

$$\Delta L_K = L_{\text{ном}} - L_{\text{ф}}, \qquad (2.4)$$

где $L_{\text{ном}}$ - номинальная длина рулетки, мм;

$L_{\text{ф}}$ - фактическая длина рулетки, определяется по образцовой мере или рулетке, мм;

ΔL_K - абсолютная погрешность компарирования, мм.

Исключение систематической погрешности после проведения измерения производится путем внесения поправки, т.е. величины численно равной абсолютной систематической погрешности, но противоположной ей по знаку:

$$\nabla L_K = -\Delta L_K, \qquad (2.5)$$

где ∇L_K - поправка на компарирование рулетки, мм;

ΔL_K - погрешность компарирования рулетки, мм.

Неисключенная часть систематической погрешности при поверке рулетки образцовой металлической рулеткой 3 класса точности в соответствии с ГОСТ 7502 - 98 (табл. 2.1) равна $\Theta_K =$ $= \pm 0{,}20$ мм (допускаемое отклонение в миллиметровом диапазоне).

Таблица 2.1

Допускаемые отклонения шкал рулеток (ГОСТ 7502-98)

Наименование интервала	Допускаемое отклонение действительной длины в мм, не более, для класса точности	
	2	3
Миллиметровый	±0,15	±0,20
Сантиметровый	±0,20	±0,30
Дециметровый	±0,30	±0,40
Отрезок шкалы 1 м и более	±[0,30+0,15(L -1)]	±[0,40+0,20(L- 1)]
Примечание — L — число полных и неполных метров в отрезке		

В том случае, если компарирование рулетки не проводилось, то неисключенную систематическую погрешность берут равной допускаемому отклонению рулетки в измеряемом диапазоне в соответствии с её классом точности (см. табл. 2.1).

2.2.2. Температурная погрешность

Погрешность из-за изменения температуры окружающей среды вызвана изменением длины рулетки и определяется следующим выражением:

$$\Delta \boldsymbol{L}_t = [\alpha_1 \cdot (t - t_{\text{норм}}) - \alpha_2 \cdot (t - t_{\text{норм}})] \cdot \boldsymbol{L}\ , \qquad (2.6)$$

где $\Delta \boldsymbol{L}_t$ - абсолютное значение систематической температурной погрешности, мм;

$\boldsymbol{L}$ - длина по шкале рулетки, измеренная при температуре t, мм ;

t - температура воздуха при измерении, °С;

$t_{\text{норм}}$ = 20°С - значение нормальной температуры средства измерения (рулетки);

α_1 - коэффициент линейного расширения материала ленты рулетки $К^{-1}$;

α_2 - коэффициент линейного расширения объекта измерения, $К^{-1}$;

Эта систематическая погрешность может быть исключена из результата измерения внесением поправки $\nabla \boldsymbol{L}_t = -\Delta \boldsymbol{L}_t$.

Ввиду того, что температура, измеряемая с помощью термометра в момент измерения, определяется с погрешностью $\pm\Delta t$ (указывается в паспорте термометра), то после внесения поправки $\nabla \boldsymbol{L}_t$ в результат измерения, остается неисключенная часть систематической погрешности:

$$\Theta_t = \pm \boldsymbol{L} \cdot \alpha_1 \cdot \Delta t \qquad (2.7)$$

2.2.3. Погрешность натяжения рулетки

Погрешность из-за колебания силы натяжения рулетки определяется в соответствии с законом:

$$\Theta_F = \pm \frac{\Delta F \cdot L}{A \cdot E}\ , \qquad (2.8)$$

где Θ_F - неисключенная систематическая погрешность от натяжения рулетки мм,

$\boldsymbol{A}$ - площадь поперечного сечения рулетки, мм ;

$\boldsymbol{E}$ - модуль упругости материала рулетки, Н/мм^2;

$\Delta\ \boldsymbol{F}$ -погрешность натяжения рулетки, Н.

Для обеспечения точных линейных измерений контроль натяжения рулетки желательно осуществлять с помощью динамометра. Однако на практике натяжение рулетки осуществляется вручную. Поэтому появляется погрешность натяжения рулетки, которую считаем - неисключенной погрешностью натяжения рулетки вручную.

2.2.4. Погрешность отсчета по шкале рулетки

Погрешность из-за снятия отсчетов на левом и правом краях измеряемой детали носит случайный характер и в основном зависит от точности совмещения нулевого штриха и начальной точки, а также точности отсчета по концу рулетки.

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения устанавливают для результатов наблюдений в зависимости от закона распределения плотности вероятностей этой погрешности. При измерении рулеткой погрешность отсчета имеет равномерное распределение.

Среднее квадратическое отклонение этого закона распределения связано с предельной погрешностью следующим соотношением $\boldsymbol{S_C} = \boldsymbol{\Delta L}_{\text{с макс}}/\sqrt{3}$. Предельная погрешность отсчета по шкале прибора равна той доле деления шкалы, до которой с уверенностью в правильности результата можно проводить отсчет. Обычно, если нет оговорок в паспорте прибора, она равна половине цены наименьшего деления шкалы (для рулеток $\boldsymbol{\Delta L}_{\text{с макс}} = \pm\, 0{,}5$ мм).

При измерении нулевой штрих рулетки прикладывают (совмещают) к начальной точке измеряемой длины, а по второму концу рулетки делают отсчет.

Следовательно при равенстве средних квадратических отклонений погрешностей отсчета по начальному $\boldsymbol{S_{C1}}$ и конечному $\boldsymbol{S_{C2}}$ концам рулетки суммарное среднеквадратическое отклонение этой погрешности $\boldsymbol{S_C}$ будет равно:

$$\boldsymbol{S_C} = \sqrt{\boldsymbol{S}_{C1}^2 + \boldsymbol{S}_{C2}^2} = \boldsymbol{S}_{C1}\sqrt{2} \qquad (2.9)$$

или в численном выражении $\boldsymbol{S_C} = \pm\left(0{,}5/\sqrt{3}\right)\cdot\sqrt{2} = 0{,}4$ мм.

2.3. Обработка результатов измерений

Задачей обработки является определение доверительных границ, за пределы которых не выйдут погрешности полученного результата измерения в соответствии с принятой доверительной вероятностью $\boldsymbol{P}$.

Форма представления результатов измерений должна соответствовать методическим указаниям МИ 1317-66.

При симметричной доверительной погрешности результат измерения представляется в следующей форме:

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{L}_{\text{пр}} \pm \boldsymbol{\Delta L}\ ;\ \boldsymbol{P},$$

где $L_{пр} = L + \Sigma \nabla L_i$ - результат измерения с учетом поправок ∇L_i на систематические погрешности;

ΔL - доверительные границы погрешности результата измерения;

P - доверительная вероятность.

Границы суммарной погрешности ΔL результата измерения L определяют при обработке результатов в зависимости от соотношения $\Theta(P)/S_L$ суммарных доверительных границ $\Theta(P)$ (2.1) неисключенной систематической погрешности и суммарного среднего квадратического отклонения $S_X = S_L$ (2.3) случайной погрешности, а также характера измерения (однократное или многократное).

2.3.1. Обработка результатов прямых однократных линейных измерений

Подавляющее число измерений является однократными. Необходимым условием проведения однократного измерения служит наличие априорной информации об измеряемой величине, характера составляющих погрешностей измерения и их границ (см. раздел 2.2)

Для рассмотренных выше (см. пункты 2.2.1.; 2.2.2.; 2.2.3.) неисключенных систематических погрешностей принимают равномерный закон распределения плотности вероятностей. Тогда, согласно ГОСТ 8.207-76, доверительные границы суммарной неисключенной систематической погрешности при наличии трех неисключенных погрешностей Θ_K , Θ_t , Θ_F и доверительной вероятности P= 0,95 вычисляют по эмпирической формуле:

$$\Theta(P) = \pm 1{,}1\sqrt{\Theta_K^2 + \Theta_t^2 + \Theta_F^2}\,. \qquad (2.10)$$

Если $\Theta(P)$ найденная по этой формуле окажется больше по модулю чем $\Theta_K + \Theta_t + \Theta_F$, то необходимо принять $\Theta(P) = \Theta_K + \Theta_t + \Theta_F$.

Случайные погрешности линейных измерений обусловлены погрешностями отсчетов на левом и правом краях измеряемого объекта (см. раздел 2.2.4), которые имеют равномерной закон распределения плотности вероятностей.

Для определения доверительных границ случайной погрешности $\varepsilon(P)$ результатов линейных измерения необходимо знать закон распределения результирующей погрешности. Композиция двух законов равномерной плотности с одинаковыми средними квадратическими отклонениями дает распределение по треугольному закону (закону Симпсона).

В этом случае доверительные границы $\varepsilon(P)$ случайной погрешности результата линейного измерения с доверительной вероятностью P= 0,95 определяют по выражению:

$$\varepsilon(P) = \pm\, t_p S_L = \pm t_p S_C = \pm 1{,}9 S_C \qquad (2.11)$$

Затем в зависимости от величины отношения $\Theta(P)/S_L$ определяют доверительные границы суммарной погрешности результата линейного измерения ΔL.

Если $\Theta(P)/ S_L > 8$, то $\Delta L = \pm\, \Theta(P)$;

Если $\Theta(P)/ S_L < 0{,}8$, то $\Delta L = \pm \varepsilon(P)$

Если $0{,}8 \le \Theta(P)/ S_L \le 8$, то $\Delta L = \pm k_p[\Theta(P) + \varepsilon(P)]$, (2.12)

где k_p коэффициент, определяемый из табл. 2.2 .

Таблица 2.2

Значения коэффициента k_p для P= 0,95 и P= 0,95

$\Theta(P)/ S_L$	0,8	1	2	3	4	5	6	7	8
$k_{p=0,95}$	0,76	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81
$k_{p=0,99}$	0,81	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Применение этих формул для вычисления доверительных границ погрешности ΔL дает погрешность не превышающую 15%. Вместе с тем допускается применение других методов суммирования случайных и неисключенных систематических составляющих погрешностей результата измерения.

2.3.2. Обработка результатов прямых многократных равноточных измерений

Многократное измерение одной и той же величины постоянного размера производится при повышенных требованиях к точности измерений. Если влияние систематических погрешностей на результат меньше, чем случайных, то нужно увеличить число дополнительных измерений и найти среднее арифметическое значение ряда повторных измерений. Среднее арифметическое значение является наиболее надежным значением измеряемой величины, так как при его вычислении одинаково вероятные положительные и отрицательные случайные погрешности взаимно компенсируются.

До проведения измерения необходимо провести анализ априорной информации также как и при однократном измерении. Вслед за этим анализом получают n независимых значений отсчета (наблюдений) и проводят обработку результатов этих наблюдений.

Измерения считает равноточными, если все факторы, влияющие на процесс измерения остаются примерно постоянными в течении всего периода производства измерений. При непостоянных влияющих факторах результаты будут неравноточными.

В основу обработки результатов многократных наблюдений положены методы математической статистики и теории вероятностей.

Для нормального закона распределения измеряемой величины установлена следующая методика обработка результатов многократных наблюдений (ГОСТ 8.207-86).

2.3.2.1. Определяется среднее арифметическое ряда наблюдений:

$$\bar{L} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} L_j ,$$

где n - число наблюдений.

2.3.2.2. Определяется оценка среднего квадратического отклонения результатов отдельных наблюдений.

$$S_L = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(L_j - \bar{L}\right)^2} \ . \qquad (2.13)$$

Среднее квадратическое отклонение (СКО) характеризует рассеивание результатов наблюдений. При этом чем меньше рассеяны результаты отдельных наблюдений, тем выше будет точность измерения, при одном и том же числе наблюдений.

При ограниченном числе наблюдений истинное значение СКО определить невозможно. Поэтому СКО при ограниченном числе наблюдений называют оценкой среднего квадратического отклонения результата отдельного наблюдения.

2.3.2.3. Определяется наличие грубых ошибок в результатах наблюдений.

Грубой погрешностью (промахом) называется погрешность существенно превышающая ожидаемую в данных условиях. Для её обнаружения пользуются специальными критериями. Наиболее простым является критерий Шовенэ, который применяется при небольшом числе наблюдений. В этом случае отбрасываются, наблюдения с отклонением, превышающим S_L в установленное число раз, которое будет различным для разного числа наблюдений. Значения критерия Шовенэ приведены в табл. 2.3.

Например, наблюдение L_j, содержащее грубую ошибку $\left(L_i - \overline{L}\right) \geq 2S_L$ при общем числе наблюдений n=10, отбрасывается как недостоверное, и заново рассчитываются значения $\overline{L}$ и S_L.

Таблица 2.3

Зависимость критерия Шовенэ от числа измерений

Число наблюдений n	3	6	8	10	15
Максимальное отклонение от среднего, превышение которого следует считать грубой погрешностью	1,6 S_L	1,7 S_L	1,9 S_L	2,0 S_L	2,1 S_L

2.3.2.4. Определяются доверительные границы случайной погрешности результата линейного измерения. При нормальном законе распределения плотности вероятностей случайной погрешности

$$\varepsilon(P) = \pm\, t \cdot S_L, \tag{2.14}$$

где t - коэффициент Стьюдента, который зависит от числа наблюдений n и доверительной вероятности P, значения которого приведены в табл 2.4.

Таблица 2.4.

Значения коэффициента Стьюдента t

n - 1	P=0,95	P=0,99	P=0,9973
5	2,57	4,03	5,50
6	2,45	3,71	4,91
8	2,31	3,36	4,28
9	2,26	3,35	4,09
10	2,23	3,17	3,96
20	2,09	2,85	3,42
30	1,96	2,58	3,00

2.3.2.5. Определяются доверительные границы суммарной погрешности результата линейного измерения.

Если $\Theta(P)/S_{\overline{L}} > 8$, то $\Delta L = \pm\,\Theta(P)$;

Если $\Theta(P)/S_{\overline{L}} < 0{,}8$, то $\Delta L = \pm\varepsilon(P)$;

Если $0{,}8 \leq \Theta(P)/S_{\overline{L}} \leq 8$, то $\Delta L = \pm k_\Sigma S_\Sigma$, где

$$k_{\Sigma} = \frac{\varepsilon(P) + \Theta(P)}{S_{\overline{L}} + \sqrt{\dfrac{\Theta_{к}^{2} + \Theta_{F}^{2} + \Theta_{t}^{2}}{3}}}, \quad S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\Theta_{к}^{2} + \Theta_{F}^{2} + \Theta_{t}^{2}}{3} + S_{\overline{L}}^{2}}$$

2.3.3. Правила округления погрешностей и результатов измерений

При вычислении погрешностей и результатов измерений в числах, характеризующих их величины, следует указывать такое количество знающих цифр, которое обеспечивает получаемую точность результатов измерений и не загружает вычисления неверными и ненужными числами.

Пределы погрешности ΔL, должны быть выражены не более чем двумя значащими цифрами. Если первая значащая цифра погрешности 1 или 2, то в погрешности всегда оставляют две значащие цифры. Если первая значащая цифра 3 или более, то погрешность может округляться до одной значащей цифры, но погрешность округления не должна быть более 5% . Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Примеры записи результатов измерений:

Однократное измерение: L = (120000,0 ± 0,4) мм; P =0,95.

Многократные измерения: L = (1,0035 ± 0,0025) м; P = 0,95; n =10.

2.4. Оценка точности измерений

Оценку точности измерений производят каждый раз при освоении методов и средств измерений, периодически при изменении условий измерений, а также в других случаях предусмотренных в нормативно-технической документации на объект измерения.

Действительная погрешность выполненных измерений не должна превышать ее предельного значения определенного по следующей формуле.

$$\Delta X \le k \cdot \Delta X_{доп} \quad \text{или} \quad \Delta X / k \le \Delta X_{доп}, \qquad (2.16)$$

где ΔX, - доверительные границы погрешности измерения;

$\Delta X_{доп}$ - допуск измеряемого параметра, установленный в нормативной технической документации на объект измерения;

k - коэффициент, зависящий от цели измерений и характера объекта измерения.

Для измерений, выполняемых в процессе и при контроле точности изготовления и установки строительных конструкции k =0,2.

Для измерений, выполняемых в процессе производства разбивочных работ, k=0,4.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Компарирование измерительной рулетки

Поверку измерительной рулетки необходимо проводить в соответствии с МИ 1780.

Отклонение длины интервалов рулетки определить сличением с образцовой мерой на горизонтальном столе соответствующей длины, на котором вытяжные концы лент рулеток закреплены, а их ленты натянуты посредством грузов на другом конце.

Сравнить общую длину измерительной рулетки с соответствующими делениями образцовой рулетки при помощи лупы с увеличением 10^x. Погрешность отсчета не должна превышать ±0,1 мм. Действительную длину проверяемой рулетки $L_ф$, величину погрешности компарирования $\Delta L_к$, поправки $\nabla L_к$ (см.формулы (2.4) и (2.5)) а также допускаемое отклонение $\Delta L_{доп}$ (см.табл.2.1) для поверяемой рулетки занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты поверки рулетки ....

(тип рулетки, номер)

$L_{ном}$, мм	$L_ф$, мм	$\Delta L_{к\ ном} = L_{ном} - L_ф$, мм	$\nabla L_{к\ ном} = -\Delta L_{к\ ном}$, мм	$\Delta L_{доп}$, мм

Примечания: 1.Поверка рулетки с вогнутой (желобчатой) лентой производится без натяжения. (ГОСТ 7502-98) .

2.Начальный штрих поверяемой рулетки совместить с первой дециметровой отметкой образцовой рулетки.

3.2. Прямое однократное измерение длины измерительной рулеткой

Оценить погрешность прямого однократного равноточного измерения линейного размера объекта с помощью измерительной рулетки при полной и неполной априорной информации и заданном значении доверительной вероятности P= 0,95 .

3.2.1. Провести прямое однократное измерение измерительной рулеткой длины объекта измерения, указанного преподавателем.

Предельную погрешность отсчета при измерении рекомендуется принять равной половине цены наименьшего деления шкалы, т.е $\Delta L_{с\ макс} = \pm 0{,}5$ мм.

Результат измерения L занести в табл.3.2 - 3.4.

3.2.2. Обработать результаты прямого однократного линейного измерения.

3.2.2.1. Определить температурные погрешности от влияния температуры окружающего воздуха.

Для нахождения систематической температурной погрешности ΔL_t и поправки ∇L_t определить по термометру температуру окружающей среды и вычислить величину погрешности и поправки, используя формулу (2.6).

Для определения неисключенной систематической погрешности необходимо знать абсолютную погрешность Δt термометра (см. паспорт термометра) и вычислить величину неисключенной систематической погрешности Θ_t по формуле (2.7). Данные занести в табл. 3.2.

Значение температурного коэффициента линейного расширения стали $\alpha_1 = 12{,}5 \cdot 10^{-6}\ К^{-1}$.

Таблица 3.2

Данные расчета температурных погрешностей

L, мм	t, °С	Δt, °С	α_1, $К^{-1}$	α_2, $К^{-1}$	ΔL_t, мм	∇L_t, мм	Θ_t, мм

3.2.2.2. Определить погрешность из-за колебания силы натяжения рулетки вручную.

Измерить с помощью штангенциркуля ширину b и толщину h поверяемой рулетки и определить площадь её сечения A. По выражению (2.8) определить неисключенную систематическую погрешность от натяжения рулетки вручную Θ_F. Для стальной рулетки E=$0{,}21 \cdot 10^6$ Н/мм^2, а $\Delta F = \pm 9{,}8$ Н. Данные занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Данные расчета погрешности натяжения рулетки

L, мм	b, мм	h, мм	A, мм^2	E, Н/мм^2	ΔF, Н	Θ_F, мм

3.2.2.3. Уточнить значение измеряемой величины, исключив систематические погрешности путем учета соответствующих поправок

$$L_{пр} = L + \nabla L_к + \nabla L_{ок} + \nabla L_t, \quad (3.1)$$

где L - результат отсчета по шкале рулетки, мм;

$\nabla L_к = -(\Delta L_{к\ ном} \cdot L)/L_{ном}$ - поправка на компарирование результата измерения L рулеткой, мм;

$\nabla L_{ок} = -(\Delta L_{ок\ ном} \cdot L)/L_{о\ ном}$ - поправка на компарирование образцовой рулетки, которая была получена на специальном компараторе и которую можно найти в свидетельстве о поверке этой образцовой рулетки $\Delta L_{ок\ ном} = L_{о\ ном} - L_{о\ ф}$, мм.

Результаты измерений и вычислений занести в табл.3.4.

Таблица 3.4

Результаты уточнения значения измеряемой величины

L, мм	$\nabla L_к$, мм	$\nabla L_{ок}$, мм	∇L_t, мм	$L_{пр}$, мм

3.2.2.4. Определить доверительные границы неисключенной систематической погрешности $\Theta_п(P)$ с доверительной вероятностью P=0,95, используя эмпирическую формулу (2.10) подраздела 2.3.1.

$$\Theta_п(P) = \pm 1,1\sqrt{\Theta_K^2 + \Theta_t^2 + \Theta_F^2}\ .$$

3.2.2.5. Определить среднее квадратическое отклонение случайной погрешности результата измерения.

Случайная погрешность результата однократного измерения определяется погрешностями отсчета по начальному и конечному концам рулетки. Среднее квадратическое отклонение этой погрешности (см. раздел 2.2.4.); принято равным $S_C = \pm$ 0,4 мм при $\Delta L_{с\ макс} = \pm$ 0,5 мм. Других составляющих погрешностей, имеющих случайный характер нет, поэтому $S_L = S_C$.

3.2.2.6. Определить доверительные границы суммарной погрешности результата измерения с учетом полной априорной информации об объекте и средстве измерения.

Вычислить отношение $\Theta_п(P)/S_L$ и в зависимости от величины этого отношения в соответствии с подразделом 2.3.1. определить доверительные границы погрешности $\Delta L_п$, результата измерения с учетом полной априорной информации.

Данные занести в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Данные расчета доверительных границ погрешности однократного измерения с учетом полной априорной информации

$\Theta_п(P)$, мм	S_L, мм	$\Theta_п(P)/S_L$	$\Delta L_п$, мм

3.2.2.7. В табл. 3.7 занести результат измерения в форме, соответствующей рекомендациям МИ 1317-86 (см.раздел 2.3).

3.2.2.8. Определить доверительные границы суммарной погрешности проведенного в пункте 3.2.2.1. однократного измерения с учетом неполной априорной информации.

Если априорная информация о погрешностях, которая изложена в пунктах 2.2.1. - 2.2.3., отсутствует, то можно воспользоваться информацией только о классе точности средства намерения и о погрешности отсчета по шкале рулетки. Такую информация можно получить, зная класс точности средства измерения, который определяет пределы допустимых основных и дополнительных погрешностей. Поэтому основная предельная погрешность средства измерения является неисключенной систематической погрешностью и для рулетки 3 класса точности она равна (см. табл. 2.1):

$$\Delta L_{осн} = \pm[0{,}40+0{,}20(L-1)].$$

Если условия измерения не отличаются от нормальных (см. подраздел 2.1.), то дополнительные погрешности отсутствуют и основная предельная погрешность будет единственной неисключенной систематической погрешностью. В этом случае неисключенную систематическую погрешность выражают этими предельными границами $\Theta_{нп}(P) = \Delta L_{осн}$ и далее определяют доверительные границы погрешности результата измерения в соответствии с отношением $\Theta_{нп}(P)/S_L$, аналогично пункту 3.2.2.6. (см. подраздел 2.3.1).

Данные занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Данные расчета доверительных границ погрешности однократного измерения с неполной априорной информацией

$\Theta_{нп}(P)$, мм	S_L, мм	$\Theta_{нп}(P)/S_L$	$\Delta L_{Нп}$, мм

Результаты однократного измерения с полной и неполной априорной информацией свести в табл.3.7.

Таблица 3.7

Результаты однократного измерения измерительной рулеткой (................. тип рулетки) длины (............. название детали)

Метод определения доверительных границ погрешности	Результат измерения по форме $L = (L \pm \Delta L)$; $P=$
С учетом полной априорной информации	
С учетом неполной априорной информации	

3.2.2.9. Сделать следующие заключения по результатам выполненного раздела 3.2.2.:

- соответствует или не соответствует измерительная рулетка своему классу точности;

- какие составляющие (систематическая или случайная) погрешности прямых однократных линейных измерений в большей степени влияют на суммарную погрешность результата измерения.

3.3. Прямые многократные равноточные линейные измерения

Оценить погрешность прямых многократных равноточных измерений линейного размера объекта с помощью измерительной рулетки при заданном числе измерений $n = 10$ и заданном значении доверительной вероятности $P = 0{,}95$.

3.3.1. Определить погрешность компарирования, температурную погрешность и погрешность натяжения рулетки (см. подразделы 2.2.1; 2.2.2.; 2.2.3.)

При том же объекте измерения, при использовании той же измерительной рулетки и при условиях измерения мало отличающихся от условий предыдущей работы можно воспользоваться величинами погрешностей, вычисленными в этой работе в подразделе 3.1-3.2.

3.3.2. Выполнить многократные измерение длины одного изделия при числе наблюдений (отдельное измерение) $n = 10$. Для уменьшения влияния систематических погрешностей первые пять наблюдений выполнить в одном направлении каждый раз со сдвигом шкалы рулетки на 50 мм, а вторые пять наблюдений в другом направлении с тем же сдвигом шкалы. Результаты наблюдений L_{i1} и L_{i2} - отсчеты по начальному и конечному концам рулетки занести в табл. 3.8.

3.3.3. Вычислить среднее арифметическое результатов наблюдений $\overline{L}^*$, определить оценку среднего квадратичного отклонения отдельного наблюдения S_L и исключить из наблюдений результаты с грубой погрешностью, используя критерий Шовенэ (см. пункт 2.3.2.3.).

Таблица 3.8

Обработка полученных данных многократного измерения с целью выявления "грубого" наблюдения

n	L_{j1}, мм	L_{j2}, мм	L_j мм	$\overline{L}^*$, мм	$L_j - \overline{L}^*$, мм	$(L_j - \overline{L}^*)^2$, мм^2	S_L, мм	$2S_L$, мм	"Грубое" Наблюдение по Шовенэ**
прямо					прямо				прямо
1	0,0								
2	50,0								
3	100,0								
4	150,0								
5	200,0								
обратно					обратно				обратно
6	0,0								
7	50,0								
8	100,0								
9	150,0								
10	200,0								

где $\overline{L}^* = L_{j1} - L_{j2}$, $\quad \overline{L}^* = \dfrac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} L_j$, $\quad S_L = \sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(L_j - \overline{L}^*\right)^2}$

** в этом столбце отметить грубый результат наблюдения по критерию Шовенэ словом ***«грубый»***, если он есть. Для 10 наблюдений наблюдение, для которого $(L_j - \overline{L}^*) \geq 2S_L$, считается с грубой погрешностью. Такой результат наблюдения исключается из общего числа наблюдений n. Дальнейшие вычисления проводятся без этого наблюдения.

Операцию по исключению грубой погрешности проводят один раз, затем снова вычисляют среднее арифметическое с уменьшенным количеством наблюдений (табл. 3.9). При отсутствии грубого наблюдения пять первых столбцов в табл. 3.9 остаются точно такими же как и в табл. 3.8.

3.3.4. По данным табл. 3.9. определить среднее квадратическое отклонение результата измерения $S_{\bar{L}}$ и доверительные границы случайной погрешности измерения $\varepsilon(P) = tS$, так как это изложено в пункте 2.3.2.4. раздела 2.

Таблица 3.9

Обработка данных многократного измерения без наблюдения с грубой погрешностью

n	L_j, мм	$\bar{L}^*$, мм	$L_j-\bar{L}^*$, мм	$(L_j - L^*)^2$, мм^2	S_L, мм	$\varepsilon(P)$, мм	$\bar{L}$, мм
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Где $S_{\bar{L}} = \sqrt{\dfrac{1}{n(n-1)}\sum_{j=1}^{n}\left(L_j - \bar{L}^*\right)^2}$, $\quad \bar{L} = \bar{L}^* + \nabla L_{К} + \nabla L_{ОК} + \nabla L_t$,

$\nabla L_{К}$, $\nabla L_{ОК}$, ∇L_t - систематические погрешности из табл. 3.4.

3.3.5. Определить доверительные границы суммарной погрешности результата многократного измерения при полной априорной информации с доверительной вероятностью P=0,95.

Вычислить отношение $\Theta_{мн}(P)/S_{\bar{L}}$ и в зависимости от величины этого отношения в соответствии с пунктом 2.3.2.5. определить доверительные границы погрешности $\Delta L_{мн}$ результата измерения. $\Theta_{мн}(P) = \Theta_{п}(P)$ берется такой же как и при однократном измерении с учетом полной априорной информации (см. табл. 3.5). Θ_t - из табл. 3.2; Θ_F - из табл. 3.3; $\Theta_K = \pm 0{,}20$ мм. Данные занести в табл. 3.10.

Т а б л и ц а 3.10

Данные расчета доверительных границ погрешности многократного измерения

$\Theta_{мн}(P)$, мм	$S_{\bar{L}}$, мм	$\Theta_{мн}(P)/S_{\bar{L}}$	$\Delta L_{мн}$, мм

3.3.6. Записать окончательный результат многократного измерения в форме, соответствующей МИ 1317-66 (см. подраздел 2.3.) в табл 3.11.

Т а б л и ц а 3.11

Результат многократного измерения рулеткой (.................- тип рулетки) длины (............. название детали)

Результат измерения по форме $L=(\bar{L} \pm \Delta L)$; P=0,95; n =

4 . ВЫВОДЫ

4.1. Оценить как, насколько и за счет устранения каких отдельных составляющих погрешностей изменяются доверительные границы суммарной погрешности результата линейного измерения при однократном и многократных измерениях одного и того же объекта измерения.

4.2. Сделать заключение о возможных значениях допусков при однократном и многократных измерениях параметра детали, проведенных в разделах 3.2 и 3.3, в случае использования этих методов измерения при контроле точности изготовления этой детали с коэффициентом К=0,2 (см. подраздел 2.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкин И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством. -М: Изд-во стандартов, 1990.-342с.

2. Котлов А.Ф. Допуски и технические измерения при монтаже металлических и железобетонных конструкций.-М.: Стройиздат, 1986.-304с.

3. Борисенков Б.Г., Андреева С.В. Метрологическое обеспечение строительного производства,- М.: Стройиздат, 1990.- 160с. (Справочник строителя).

4. Артемьев Б.Г., Голубев С.И. Справочное пособие для работников метрологических служб: В 2-х кн. -М.: Изд-во стандартов, 1990.-960с.

Учебно - методическое издание

Федотов Виктор Васильевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ ПРЯМЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Методические указания к лабораторным работам

Подписано к печати: 15.04.05.
усл.-печ.л. - 1,5.
Заказ: 255.

Формат: 60x84/16
Тираж 100 экз.
Изд. № 131-05.

127994, Москва, ул.Образцова , 15
Типография МИИТа