

УДК 681.518:681.11.031

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ И КОНТРОЛЕ ОСНОВНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ХРОНОМЕТРИИ

В.Н. Яшин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vlyashin@yandex.ru.

Рассмотрены методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии. Показано различие между подходами при измерении и контроле одной из основных метрологических характеристик технических средств хронометрии – мгновенного суточного хода. Предложены алгоритмы, позволяющие произвести метрологическую оценку измерения мгновенного суточного хода и определить абсолютную достоверность контроля мгновенного суточного хода. Полученные результаты позволяют методически более правильно подойти к анализу процессов измерения и контроля не только в области хронометрии, но и в целом в практике измерения и контроля физических величин.

Ключевые слова: контроль, измерение, информационный процесс, метрологические характеристики, технические средства хронометрии, достоверность.

Измерение и контроль представляют собой информационные процессы, которые содержат как общие, так и различающиеся процедуры. Поэтому в общем случае не вызывает сомнения тот факт, что в основе любого процесса контроля лежат и процедуры, свойственные измерительному процессу. Справедливым будет и обратное утверждение – в измерительном процессе присутствуют процедуры, свойственные контролю. Однако такая сложная взаимосвязь этих процессов не дает оснований подменять процессы контроля измерением и называть измерительные системы системами контроля, что в последнее время достаточно часто наблюдается в отечественной научно-технической литературе. Рассмотрим методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии, позволяющие выявить сходства и различия между измерением и контролем. Технические средства хронометрии (ТСХ) – технические средства получения, отображения, переработки или передачи на расстояние хронометрической информации. Понятие «хронометрическая информация» означает измерительную информацию, получаемую в результате измерения интервалов времени.

Таким образом, основной задачей при написании данной статьи являлось формирование методологических подходов, позволяющих выявить сходства и различия между измерением и контролем основных метрологических характеристик ТСХ, а также получение метрологической оценки и абсолютной достоверности при измерении и контроле одной из основных метрологических характеристик ТСХ – мгновенного суточного хода.

Владимир Николаевич Яшин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

Установим сходства и различия между измерением и контролем, которые могут быть рассмотрены как на уровне определений этих понятий, так и на уровне видов, методов, средств и получаемых результатов, т. е. на методологическом уровне.

Дадим определения понятиям измерения и контроля в соответствии с нормативно-технической документацией.

Измерением согласно РМГ 29-99 (Рекомендации по межгосударственной стандартизации, взамен ГОСТ 16263-70) называется совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей измерения и получение значения этой величины.

Контролем называется (ГОСТ 16504-81) проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. С одной стороны, эти определения подчеркивают различия между этими процессами, с другой – сходства.

Различия между ними лежат в плоскости получаемых результатов: результатом измерения является нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины, т. е. получение количественной характеристики. Результатом же контроля является проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям, т. е. получение качественной характеристики. Кроме того, среди получаемых при измерении количественных характеристик одной из основных является погрешность измерения, а при контроле – его достоверность.

Для ТСХ такими количественными характеристиками измерения являются: мгновенный ход, среднее значение мгновенного хода, мгновенный суточный ход и т. д. Перечисленные характеристики определяют погрешность измерения интервалов времени с помощью ТСХ. Качественной же характеристикой контроля ТСХ может быть выбрана характеристика годности или негодности ТСХ по любой из перечисленных выше характеристик с заданной достоверностью контроля.

При детальном анализе приведенных выше определений могут быть выявлены и сходства между процессами измерения и контроля. Так, проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям означает проведение операций, свойственных процессу измерения: фильтрации, сравнения с мерой или величиной допуска на измеряемую характеристику, измерительного преобразования и т. д.

Различия и сходства между измерением и контролем проявляются также на уровне видов измерения и контроля. Измерения по виду делятся на измерения геометрических величин, механических величин, объема веществ, давления, интервалов времени и т. д., а контроль – на сплошной, выборочный, периодический и т. д. В нашем случае для ТСХ видом измерения является измерение интервалов времени, а для контроля ТСХ характерно использование большинства из перечисленных видов контроля.

Различия и сходства между измерением и контролем лежат и в плоскости методов измерения и контроля. Под методом измерения понимается прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений, а под методом контроля – правила применения определенных принципов и средств контроля, т. е. различия уже заложены в самих определениях.

Для ТСХ применяется большинство из существующих методов измерения (метод непосредственной оценки, метод сравнения с мерой, метод измерений

замещением, метод измерений дополнением, тестовый метод измерений и т. д.). К методам контроля относят, как правило, методы разрушающего контроля и методы неразрушающего контроля. Для ТСХ используются в основном методы неразрушающего контроля.

Однако наряду с различиями в методах измерения и контроля имеются и сходства. Это, в первую очередь, относится к физическим процессам, лежащим в основе измерения и контроля: магнитным, электрическим, оптическим, акустическим и т. д., которые применяют как при измерении, так и контроле ТСХ.

На уровне применяемых технических средств при проведении измерения и контроля также можно выделить сходства и различия между ними.

Таким образом, на методологическом уровне существуют сходства и различия между процессами измерения и контроля, которые необходимо учитывать при описании этих процессов.

Исходя из вышесказанного рассмотрим процессы измерения и контроля ТСХ на примере измерения и контроля мгновенного суточного хода, который занимает существенное место среди метрологических характеристик ТСХ. В ТСХ под ходом понимают разность поправок, взятых в начале и конце интервала измерения времени. Мгновенный суточный ход является производной характеристикой от мгновенного хода, который представляет собой приращение погрешности измерения времени Δt за некоторое достаточное малое время dt , т. е.

$$\Omega_0(t) = \Delta t(t + dt) - \Delta t(t). \quad (1)$$

Однако при измерении и контроле ТСХ наибольшее применение находит мгновенный суточный $\Omega_{oc}(t)$, который определяется в соответствии с формулой

$$\Omega_{oc}(t) = 86400 \left(\frac{T_{cp} - T_n}{T_n} \right) = 86400 \frac{\Delta T_{cp}}{T_n}, \quad (2)$$

где T_{cp} – среднее значение периода колебаний осциллятора ТСХ;

ΔT_{cp} – среднее значение отклонения текущего периода колебания осциллятора от своего номинального значения;

T_n – номинальное значение периода колебаний осциллятора ТСХ, задаваемое конструктивно;

86400 – число секунд в сутках.

Для измерения мгновенного суточного хода применяют различные методы, однако в настоящее время широко используется цифровой метод, основанный на квантовании заданного промежутка времени импульсами кварцевого генератора. Оценка мгновенного суточного хода $\hat{\Omega}_{oc}$ производится по следующей зависимости [1]:

$$\hat{\Omega}_{oc} = fLT - 86400,$$

где f – частота импульсов кварцевого генератора;

LT – интервал измерения.

Частоту кварцевого генератора определяют исходя из номинального периода колебаний осциллятора ТСХ по формуле

$$f = \frac{86400}{LT_n} = \frac{86400}{\theta_n}.$$

Результатом измерения мгновенного суточного хода будет его метрологиче-

ская оценка, которая может быть записана в виде $\hat{\Omega}_{oc} = \Omega_{oc} \pm \Delta$, где Δ – абсолютная погрешность измерения суточного хода. Погрешность измерения мгновенного суточного хода по существующей классификации в области погрешностей измерений может быть отнесена: по способу математического выражения – к абсолютной, относительной или приведенной погрешности; по зависимости от изменений во времени – к статической или динамической погрешности; по характеру проявления – к систематической или случайной погрешности, и т. д. Таким образом, для определения погрешности, в том числе и погрешности мгновенного значения суточного хода, необходимо проанализировать и учесть все составляющие общей погрешности. Полученные экспериментальные данные измерения мгновенного суточного хода цифровым методом ТСХ (механический хронометр) показали, что наибольший вклад в погрешность измерения мгновенного суточного хода по месту возникновения вносит методическая погрешность, а по характеру проявления – случайная погрешность. Остальными погрешностями можно в данном случае пренебречь. При измерении мгновенного суточного хода методическая погрешность обусловлена в основном погрешностью квантования. Если принять, например, интервал измерения равным $\theta = LT_n = 0,4$ с (в практике измерений мгновенного суточного хода интервал измерений варьируется от 0,4 до 30 с), то частота кварцевого генератора будет равна 216000 Гц и абсолютная погрешность квантования при измерении мгновенного значения суточного хода составит $\Delta = \pm 1/f = 0,463 \cdot 10^{-5}$ с. С увеличением интервала измерения $\theta = LT_n$ частота кварцевого генератора должна быть уменьшена и погрешность квантования возрастет, так при $\theta = LT_n = 30$ с $\Delta = \pm 0,347 \cdot 10^{-3}$. При выбранных интервалах измерения методическая погрешность остается незначительной и ею можно пренебречь.

Для оценки случайной составляющей погрешности измерения мгновенного суточного хода определим ряд статистических характеристик на основе данных, приведенных в таблице. Данные получены экспериментально при измерении мгновенного суточного хода ТСХ (механического хронометра) цифровым методом. В таблице: $T_{отс.}$ – временные отсчеты в часах, соответствующие моментам времени измерения мгновенного суточного хода цифровым методом, временной интервал между отсчетами составлял 1 час; $\Omega_{oc}(c)$ – мгновенные значения суточных ходов в секундах, измеренные через временной интервал, равный 1 часу.

$T_{отс.}$ (ч)	Ω_{oc} (с)						
1	1,81	7	8,81	13	7,08	19	4,62
2	-2,72	8	3,02	14	8,34	20	6,85
3	0,11	9	3,89	15	4,64	21	3,15
4	1,88	10	4,10	16	8,83	22	-0,02
5	-0,28	11	-0,43	17	6,59	23	1,08
6	2,42	12	1,81	18	-1,23	24	0,00

На основе данных, приведенных в таблице, найдем оценку математического ожидания $\hat{M}_{\Omega_{oc}}$ мгновенных суточных ходов по формуле

$$\hat{M}_{\Omega_{oc}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Omega_{oc}}{n} = 3,32 \text{ с.}$$

Определим стандартное отклонение среднего по формуле

$$\sigma_{\hat{M}} = \sqrt{\frac{(\Omega_{oc} - \hat{M}_{\Omega})^2}{n(n-1)}} = 0,7 \text{ с.}$$

Таким образом, результат измерения мгновенного значения суточного хода можно записать в виде

$$\hat{\Omega}_{oc} = \Omega_{oc} \pm \Delta = 3,32 \pm 0,70 \text{ с.}$$

В теории и практике измерений существует ряд проблем, связанных с низким уровнем автоматизации при получении метрологической оценки. Выход из этого положения, на взгляд автора статьи, состоит в его повышении за счет широкого применения информационных технологий [2].

В отличие от измерения, одной из основных характеристик качества контроля является его достоверность. Количественной оценкой достоверности контроля является абсолютная достоверность (априорная или апостериорная), представляющая собой вероятность принятия правильного решения при контроле. Данная оценка определяется на основе соотношения

$$D = 1 - P_{ош},$$

где $P_{ош}$ – вероятность ошибочных решений при контроле.

Вероятность принятия ошибочных решений при контроле определяется ошибками контроля, являющимися случайными событиями. Ошибки контроля зависят от многих факторов, среди которых существенное место занимают погрешности средств измерения, применяемых при контроле, и величина допусков (норм), устанавливаемых на контролируемые параметры. Наличие погрешностей измерений средств контроля приводит к необходимости учета ошибок первого α и второго β рода, которые и определяют вероятность принятия ошибочных решений при контроле, т. е. $P_{ош} = \alpha + \beta$. Выражение для оценки апостериорной абсолютной достоверности при этом может быть представлено в виде

$$D = 1 - (\alpha + \beta)$$

Ошибки первого рода (риск изготовителя) определяют вероятность отнесения годных объектов контроля к негодным. Ошибки второго рода (риск заказчика) – вероятность отнесения негодных объектов к годным.

Для определения указанных ошибок контроля рассмотрим процедуру цифрового контроля мгновенного суточного хода Ω_{oc} , который представим в виде случайной величины с плотностью распределения $W(\Omega_{oc})$. На параметр Ω_{oc} заданы значения допусков в виде нижнего Ω_H и верхнего Ω_B пределов. В устройстве цифрового контроля результат измерения может быть представлен в виде

$$\hat{\Omega}_{oc} = \Omega_{oc} \pm \Delta_k,$$

где Δ_k – абсолютная погрешность измерения средства контроля.

На результат измерения заданы значения допусков в виде нижнего Ω_{HK} и верхнего Ω_{BK} пределов.

В общем случае при контроле возможно появление одного из четырех несовместимых случайных событий, среди которых выделим два события:

– истинное значение параметра в пределах допуска, измеренное значение за пределами контролируемого допуска, принимается неправильное решение «параметр вне допуска»;

– истинное значение параметра за пределами допуска, измеренное значение в пределах контролируемого допуска, принимается неправильное решение «параметр в допуске».

Из перечисленных выше событий первое событие будет относиться к ошибке первого рода, второе – к ошибке второго рода, при этом для определения ошибок α и β необходимо найти совместные плотности вероятности по формулам:

$$\alpha = \int_{\Omega_H}^{\Omega_B} \int_{-\infty}^{\Omega_{HK}} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc} + \int_{\Omega_H}^{\Omega_B} \int_{\Omega_{BK}}^{\infty} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc};$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{\Omega_H} \int_{\Omega_{BK}}^{\Omega_{HK}} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc} + \int_{\Omega_B}^{\infty} \int_{\Omega_{HK}}^{\Omega_{BK}} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc},$$

где $W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc})$ – двумерная совместная плотность распределения вероятностей системы случайных величин Ω_{oc} и $\hat{\Omega}_{oc}$.

Если принять допущения о независимости мгновенного значения суточного хода и погрешности его измерения, то совместную плотность распределения вероятностей $W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc})$ можно представить в виде

$$W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) = W(\Omega_{oc})W(\Omega_{oc} / \hat{\Omega}_{oc}),$$

где $W(\Omega_{oc} / \hat{\Omega}_{oc})$ – относительная плотность распределения вероятностей.

Для определения ошибок α и β кроме допусков на значение мгновенного суточного хода должны быть известны законы распределения вероятностей мгновенного суточного хода и погрешности средств измерения.

Экспериментальные данные и результаты их обработки подтверждают нормальность законов распределения вероятностей параметра Ω_{oc} и погрешности измерения данного параметра Δ_k , которые имеют математические ожидания $M(\Omega_{oc})$, $M(\Delta_k) = 0$ и среднеквадратические отклонения $\sigma(\Omega_{oc})$, $\sigma(\Delta_k)$. С учетом оговоренных выше условий, а также считая допуск на мгновенный суточный ход симметричным, т. е. $\Omega_B - \Omega_H = 2C$, определяются выражения для ошибок первого и второго рода.

Определение ошибок первого и второго рода по приведенным выше формулам вызывает ряд затруднений, связанных в первую очередь с вычислением определенных интегралов и сходящихся несобственных интегралов с бесконечными пределами интегрирования, поэтому на практике для их нахождения применяют приближенные оценки, основанные на численных методах интегрирования. Согласно этим методам определенный интеграл можно представить в виде приближенного значения:

$$I(f) = \int_a^b f(x)dx \approx S(f) = \frac{b-a}{2} \sum_j^N D_j f(x_j),$$

где D_j – квадратурные коэффициенты.

Таким образом, если нахождение первообразной $F(x)$ от заданной функции $f(x)$ сложно или невозможно, то функцию $f(x)$ интерполируют на отрезке $[a, b]$ подходящим полиномом, для которого определенный интеграл вычисляется по методам (формулам) численного интегрирования. Отрезок интегрирования $[a, b]$ разбивается на N частей, к каждой из которых применяется соответствующий квадратурный метод (формула). В данном случае был выбран метод Гаусса, машинный алгоритм реализации которого известен и хорошо апробирован [3]. Несобственные интегралы, входящие в формулы для нахождения α и β численным методом Гаусса, заменялись соответствующими выражениями:

$$I(f) = \int_a^{\infty} f(x)dx = \int_a^{a+\delta} f(x)dx + \int_{a+\delta}^{\infty} f(x)dx;$$

$$I(f) = \int_{-\infty}^b f(x)dx = \int_{-\infty}^{b-\delta} f(x)dx + \int_{b-\delta}^b f(x)dx.$$

Промежуточный предел интегрирования $a + \delta$ и $b - \delta$ выбирался из условий

$$\int_{a+\delta}^{\infty} f(x)dx < \varepsilon \text{ и } \int_{-\infty}^{b-\delta} f(x)dx < \varepsilon,$$

где ε – заданная погрешность интегрирования.

Если ранее результаты численного интегрирования, как правило, представлялись в виде номограмм [4-5] и по ним уже определялись ошибки первого и второго рода, то в настоящее время в связи с высоким уровнем развития информационных технологий и средств компьютерной техники появилась возможность автоматизировать процесс получения оценок ошибок первого и второго рода. Так, для расчета ошибок α и β использовалась инструментальная система Microsoft Visual Studio 2008 и язык программирования Visual Basic. Результаты численного интегрирования по методу Гаусса в виде значений α и β отображались в соответствующем окне интерфейса компьютерной программы.

Результаты полученных вычислений α и β при различных значениях нормированных величин y и z представлены на рис. 1 и 2 соответственно. При этом нормированные величины y и z были выбраны следующими:

$$y = \frac{C}{\sigma(\Omega_{oc})}; \quad z = \frac{\sigma(\Delta_k)}{\sigma(\Omega_{oc})}.$$

Графики, представленные на этих рисунках, показывают, что значения ошибок первого и второго рода зависят от нормированных величин z и y . Так, при возрастании y ошибки α и β убывают, и изменения эти носят характер экспоненциального закона, а при возрастании z ошибки возрастают.

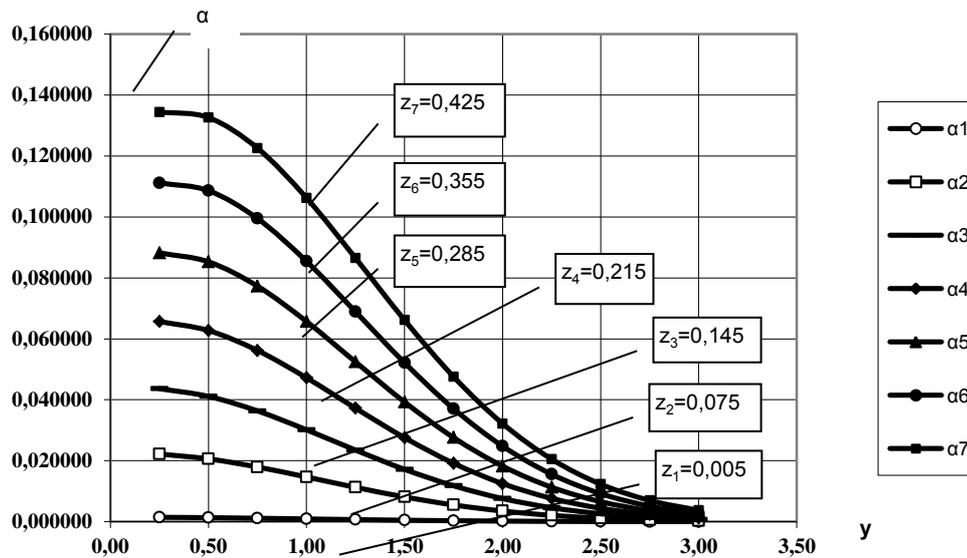


Рис. 1. Графики зависимости α от y при различных значениях z .

Графики, представленные на рис. 3, показывают, что значение достоверности контроля также зависит от нормированных величин z и y . Так, при возрастании y значение достоверности контроля D возрастает, а при возрастании z — убывает.

Таким образом, абсолютная достоверность контроля и соответственно принятие правильного решения при контроле во многом зависят от погрешности средств измерений Δ_k . Абсолютная достоверность контроля возрастает при уменьшении погрешности Δ_k и убывает при увеличении Δ_k .

Полученные результаты позволяют методически более правильно подойти к анализу процессов измерения и контроля не только в области хронометрии, но и в целом в практике измерения и контроля физических величин.

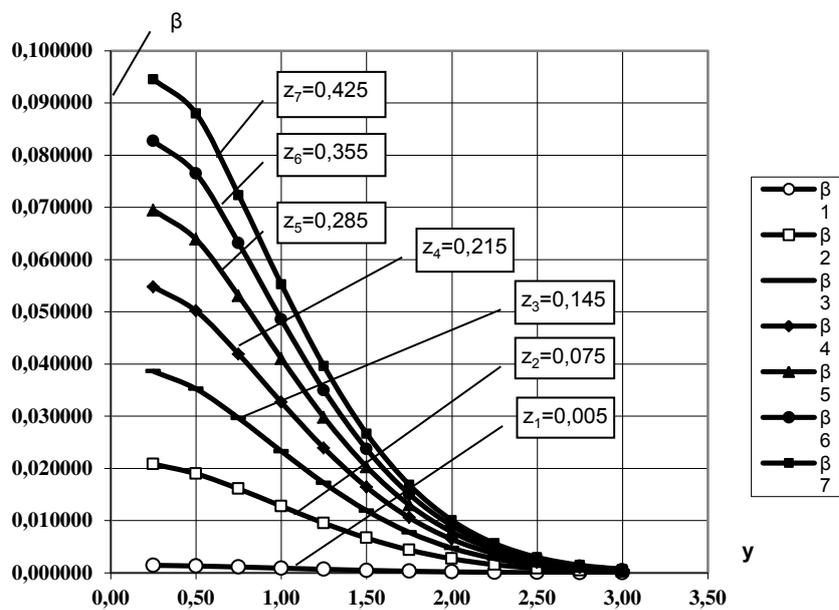


Рис. 2. Графики зависимости β от y при различных значениях z

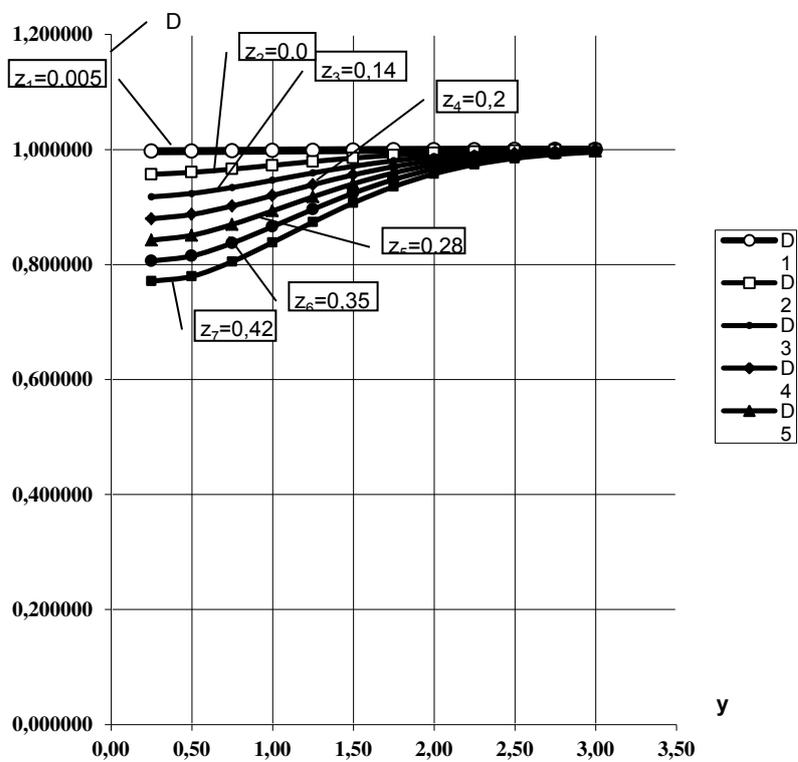


Рис. 3. Графики зависимости D от y при различных значениях z

В заключение необходимо отметить, что условиях современного производства ТСХ процессы измерения и контроля связаны между собой, образуя единую систему оценки их качества. Как и в любой системе, в системе оценки качества ТСХ могут возникать внутренние противоречия, которые выходят за рамки чисто технических проблем. Повышение точности измерений средства контроля ТСХ приводит к повышению и достоверности контроля, а это означает, что при низком качестве ТСХ к значительной их отбраковке. В ряде случаев это невыгодно предприятиям, занимающимся производством ТСХ, а значит, невыгодно и использовать современные средства измерений и контроля, которые в этом случае подтверждают низкое качество выпускаемой продукции. Таким образом, возникающий при этом вопрос, существует ли предел уменьшения погрешности измерения средства контроля, не является чисто техническим, а зависит и от рыночных отношений, складывающихся в конкретном секторе экономики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пацин Н.И., Чернягин Б.М.* Технические средства испытаний и оперативная оценка качества наручных часов при ускоренном выборочном контроле // Труды НИИЧаспрома. – 1970. – Вып. 2(5). – С. 17-26.
2. *Яшин В.Н.* Применение информационных технологий для анализа математических моделей процессов эволюции погрешностей технических средств хронометрии // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IX Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 2. Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. Информационные технологии в математическом моделировании. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 152-160.
3. *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 240 с.
4. *Орнатский П.П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1983. – 455 с.
5. *Цапенко М.П.* Измерительные информационные системы: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 429 с.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

METHODOLOGICAL APPROACHES FOR MEASURING AND MONITORING THE BASIC METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF TECHNICAL TIMEKEEPING MEANS

V.N. Yashin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Methodological approaches for measuring and monitoring basic metrological characteristics of chronometer technical means are discussed in this paper. Difference between different approaches in measurement and control of the basic metrological characteristics of timekeeping hardware - instantaneous diurnal variation is shown. Algorithms suitable for performing a metrological evaluation of instantaneous diurnal variation measuring and determining the absolute accuracy of the diurnal variation of the instantaneous control are proposed. The obtained results allow to make a correct methodological approach for analyzing the measurement and control processes in the field of chronometry, as well as in practice of measurement and control of physical quantities.

Keywords: *monitoring, measurement, information process, the metrological characteristics, technical means of timekeeping, reliability.*

Vladimir N. Yashin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.