Метрологическое обеспечение фазохронометрических систем (Часть 1)

12, декабрь 2012

DOI: 10.7463/1212.0514343

Пронякин В. И.

УДК 006.91; 55.01.81

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vip-u@yandex.ru

Введение

В условиях работы сложных технических объектов, таких как турбоагрегаты, гидроагрегаты, различные технологические линии и др., во время эксплуатации доступ к первичным преобразователям информационно-измерительных систем закрыт, и возможность метрологических работ появляется только при ремонте объекта. Межремонтный срок может быть от 2 до 5 лет и выполнить сроки межповерочных интервалов не представляется возможным. В связи с этим возникает проблема метрологического обеспечения измерительных каналов информационно-измерительных систем функционирующих в условиях эксплуатации объекта.

Для сложных технических систем важно обеспечить непрерывное информационно-метрологическое сопровождение в условиях эксплуатации для обеспечения аварийной защиты, диагностики и управления.

Встроенные фазохронометрические системы [1, 2, 3] функционируют в условиях

- необходимости обеспечения относительной погрешности измерения не более $5 \cdot 10^{-4} \%$ от номинальной длительности рабочего цикла функционирующего механизма (контролируемый параметр – интервалы времени),

- влияния неконтролируемых воздействий на объект в процессе эксплуатации (различные поля и механические воздействия),

- неконтролируемых воздействий влияющих величин на точность измерения,
 - отсутствия возможности демонтажа встроенных блоков измерительной системы при многолетней непрерывной эксплуатации объекта в целях поверки и ремонта (например, турбоагрегаты, гидроагрегаты и др.),
 - отсутствия возможности замены первичных преобразователей длительное время в условиях эксплуатации,
 - необходимости исключения потери метрологической информации в каналах аварийной защиты в процессе эксплуатации
- и др.

Оценка метрологических характеристик измерительного канала

При нормировании погрешностей и определении межповерочных интервалов для измерительных каналов необходимо учитывать влияние условий эксплуатации и внешних воздействий, что представляет большую сложность. В зависимости от условий эксплуатации погрешности средства измерения могут резко возрастать [4, 5, 6]. В связи с этим возникает необходимость анализа воздействий влияющих факторов и назначения индивидуального межповерочного интервала для каждого измерительного канала [9].

Так как для измерения параметров машин и механизмов информационно-измерительные системы (или часть их блоков) функционируют в условиях эксплуатации объекта, для учёта влияющих величин (ВВ) и реальных условиях эксплуатации средств измерений (СИ) нормативно введены унифицированные, расширенные и смещённые нормальные условия [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

На метрологические характеристики СИ влияют: деградация в условиях эксплуатации, внешние воздействия на компоненты СИ, быстропротекающие процессы в компонентах измерительного канала.

Для поддержания работоспособности СИ в настоящее время используются метрологический надзор (поверка и калибровка), связанный с периодическим демонтажом СИ, поверка и калибровка в отсутствие учёта влияющих величин, прерывание процесса эксплуатации объекта для поверки и калибровки СИ.

Основным способом эффективного применения СИ сегодня является увеличение межповерочного интервала и повышение надёжности аппаратных средств, что достигается за счёт применения более надёжных электронных компонентов, введения поправок с учётом срока эксплуатации СИ, резервирования, мажорирования, введения обратных связей и т.д. для электронных блоков и др.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом в нормативных документах предъявлены требования к методам и средствам метрологического обеспечения технологических процессов, гибких производственных систем и заводов автоматов [6, 8, 9, 10, 11, 12], которые

- учитывают работу СИ в жёстких условиях эксплуатации при воздействии неконтролируемых влияющих величин,
- позволяют проводить между поверками промежуточный контроль метрологической исправности СИ,
- распространяют метрологическое обеспечение на все СИ, применяемые при контроле и диагностировании,
- разрешают для оценки метрологических характеристик использовать сопоставление близких по точности нескольких параметров,
- узаконивают метрологический диагностический контроль (МКД), но как ограниченную метрологическую операцию, не дающую гарантию обеспечения единства измерений,
- указывают о необходимости разработки встраиваемых систем контроля метрологических характеристик СИ для автоматизированной поверки и калибровки.

Также представлена возможность сопоставления метрологически равноправных по точности параметров для подтверждения основных метрологических характеристик СИ без использования эталонных средств, но в этом случае возможен отрицательный результат, связанный с погрешностями сопоставляемых величин. Используется избыточность измерительной информации, основанной на связях функционально взаимосвязанных параметров, измеряемых различными измерительными каналами. Это особенно актуально для систем, выполняющих большой объём измерений в условиях эксплуатации объекта и требующих постоянного подтверждения установленных метрологических характеристик.

Для фазохронометрических систем (ФХС), построенных по единой методологии для различных циклических машин и механизмов, необходим единый минимально-затратный подход в их метрологическом обеспечении.

При применении ФХС без процедур автоматизированной самодиагностики и самопроверки обойтись невозможно. При реализации алгоритмов самодиагностики проверяется условие о нахождении погрешностей измерительного канала в рамках допустимых границ. При этом необходим общий алгоритм, позволяющий реализовать эту процедуру применительно к ФХС.

Для ФХС, встраиваемых в сложные и дорогостоящие технические системы (турбоагрегаты, гидроагрегаты, ГТД, дизель-генераторы, мощные компрессоры и др.) одним из путей решения этой проблемы является выполнением непрерывной метрологической проверки метрологических характеристик измерительного канала, когда поверочный интервал определяется временем измерений и быстродействием ЭВМ. Данный подход обеспечивает оценку метрологических характеристик практически в реальном времени и при её применении нет необходимости учитывать изменение влияющих величин и выполнять в связи с этим периодически перерасчёт поверочного интервала. То есть оценка годности измерительного канала выполняется по текущим фактическим показателям метрологических характеристик. Реализация этой процедуры осуществляется введением дополнительного измерительного канала. Тогда рабочие каналы выполняют измерения и поочерёдно (или в дублированном варианте) для каждого выполняется расчет метрологических характеристик.

Данная методика реализуется при использовании процедуры многократных измерений, методов планирования измерений при оценке качества измерительной процедуры относительно систематической погрешности и дисперсии с использованием тестового сигнала [14, 15, 16].

Алгоритмы оценки метрологических характеристик измерительного канала рассматриваются в допущении, что результат однократного измерения является случайной величиной и имеет Гауссовский закон распределения.

Результат измерения можно представить в виде

$$Y(t) = t + E(t), \quad (1)$$

где t – измеряемая величина – интервал времени, а $E(t)$ – случайная погрешность результата измерения. Случайная величина $E(t)$ должна находиться в поле допуска $0 \pm \frac{1}{2}Te$ с заданной вероятностью.

$$P\left(|E(t)| \leq \frac{1}{2}Te\right) \geq 1 - \varepsilon, \quad (2)$$

где Te – допуск поля допуска, ε – малая величина, $0 \leq \varepsilon \ll 1$.

Величина $E(t)$ может быть записана также в следующем виде

$$E(t) = m_e(t) + \overset{0}{E}, \quad (3)$$

где $m_e(t)$ – математическое ожидание случайной погрешности, $\overset{0}{E}$ – центрированная случайная составляющая с дисперсией D_e .

Условие единства измерений (2) можно записать в виде двух эквивалентных условий [15, 16]

$$1. D_e \leq D_e^* \quad (4)$$

$$2. m_e(t) \leq \frac{1}{2}T_{m_e}^*, \quad (5)$$

где $D_e^* = (\sigma_e^*)^2$, $\sigma_e^* = d_e Te$, $d_e = 0,5 t_{0,5(1-\lambda\varepsilon)}^{-1}$,

$\lambda \in [0,1;0,4]$ – параметр, влияющий на значения ограничений σ_e^* ; $T_{m_e}^*$,

$$Tm_e = \gamma_e \cdot T_{m_e}^*, \quad \gamma_e = 1 - \eta_e \frac{t_{0,5-\varepsilon}}{t_{0,5(1-\lambda\varepsilon)}}, \quad \eta_e = \frac{\sigma_e}{\sigma_e^*} \leq 1,$$

где: $t_{0,5-\varepsilon}$, $t_{0,5(1-\lambda\varepsilon)}$ – квантили функции Лапласа, соответствующие значениям $0,5 - \varepsilon$ и $0,5(1 - \lambda\varepsilon)$

Выполнение условий (4) и (5) гарантирует выполнение условия (2).

Таким образом, рассматривая задачу оценки метрологического качества работы измерительного канала, следует решить две задачи:

1) Оценить экспериментально условие по дисперсии (4) по результатам измерения величины тестового сигнала t (интервал времени).

2) Оценить экспериментально условие по систематической погрешности (5) по результатам измерения величины тестового сигнала t (интервал времени).

При решении данных задач использовались теоретические положения, рассмотренные в работах [16, 17].

Достоинством предлагаемого подхода является то, что метрологическая оценка работы измерительного канала осуществляется только с помощью проверки выполнения условий (4) и (5) без необходимости проведения подробного анализа составляющих погрешностей измерительных каналов, условий эксплуатации, внешних воздействий и др.

Применением предложенной методики достигается универсальность и гибкость за счет:

- отсутствия необходимости, при выполнении процедуры метрологической проверки работы ФХС на функционирующих циклических машинах и механизмах, экспериментально оценивать постоянно изменяющиеся параметры условий эксплуатации (рис. 1),

- отсутствия необходимости учитывать конкретную реализацию конструкции измерительного канала, его расчётные характеристики. В данном случае измерительный блок рассматривается как «чёрный ящик». Наличие конструктивного несовершенства измерительной системы выявится при проверке выполнения условий (4, 5).

Рис. 1

В случае неудовлетворительного результата проверки выполняется замена измерительного блока, а также анализ влияющих факторов и конструкции.

При выполнении многократных измерений рассматривается схема, когда многократные измерения выполняются измерительным каналом путём подачи тестового сигнала с известным действительным значением t_0 через фиксированные интервалы времени. Значения интервалов выбираются такими, чтобы обеспечивалось некоррелированность многократных измерений, что выполнимо.

При равнооточных некоррелированных измерениях оценка измеряемой величины (периода следования тестового сигнала) $t_{\bar{a}}$ имеет вид

$$Z(t) = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} Y_j(t), \quad (6)$$

где

$$\begin{cases} t = t_{\delta} \\ \mu - \text{объем измерений} \end{cases}$$

Числовые характеристики этой оценки имеют вид

$$\begin{cases} M[Z(t)] = m_z(t) = t + m_e(t) = m_y(t) - \text{математическое ожидание} \\ M[Z^2(t)] = D_z = \frac{D_e}{\mu} - \text{дисперсия}, \end{cases} \quad (7)$$

где D_e - дисперсия результата однократного измерения.

Исходными данными для реализации плана измерений являются следующие характеристики фазохронометрической системы: абсолютная погрешность однократного измерения интервалов времени ФХС

$$Te = \pm 1 \cdot 10^{-7} \text{ с.};$$

абсолютная погрешность тестового сигнала $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ с, что позволяет принять $t \approx t_{\delta}$. При этом входной тестовый сигнал принимается постоянной величиной, так как измерительный канал не чувствителен к вариациям его периода.

При построении алгоритмов введем следующие условия их применимости: однократное измерение есть гауссовская случайная величина с систематической погрешностью, удовлетворяющей заданным ограничениям.

Структура результата однократного измерения

$$Y_j(t_{\delta}) = t + \left\{ m_e(t) + \overset{\circ}{E}_j \right\}, \quad j = \overline{1, \mu} \quad (8)$$

где $\overset{\circ}{E}$ - центрированная случайная составляющая с дисперсией

$$D_{ej} = D_e = \text{const}, \quad j = \overline{1, \mu},$$

$\left\{ m_e(t) + \overset{\circ}{E} \right\}$ - погрешность, вносимая средством измерения.

Формирование плана измерения при оценке условия по дисперсии

$$D_e \leq D_e^* \quad (\sigma_e \leq \sigma_e^*)$$

Измерительная задача, связанная с проверкой условия $D_e \leq D_e^*$, сводится к схеме альтернативных гипотез

$$\left. \begin{array}{l} H_0 : D_e \leq D_e^* \text{ - гипотеза } H_0, \\ H_1 : D_e \geq D_e^* \text{ - гипотеза } H_1, \end{array} \right\} \quad (9)$$

Апостериорное решение о том, какая из указанных гипотез имеет место, принимается на основе решающей функции следующего вида

$$r(u) = \begin{cases} 0, & \text{если } u \leq u_0 \text{ - принимается гипотеза } H_0 \\ 1, & \text{если } u > u_0 \text{ - принимается гипотеза } H_1 \end{cases} \quad (10)$$

где u_0 – const и параметр решающей функции.

Параметрами плана, которые нужно определить до реализации эксперимента являются: μ – объём многократных измерений, u_0 – параметр решающей функции.

В обеспечении плана эксперимента помимо указанных параметров указывается ещё и измеряемая величина тестового сигнала t .

Таким образом, структура плана эксперимента имеет следующий вид (t, μ, u_0) , где (t, μ, u_0) – план измерения для многократных измерений с использованием тестового сигнала.

При использовании решающей функции (10) важным моментом является выбор аргумента u , очевидно, что в качестве аргумента U при проверке гипотез (1) следует выбрать экспериментальную оценку дисперсии, которую можно получить только на основе многократных измерений

$$Y(t_a) = t_a + m_e(t) + E_j; \quad j = \overline{1, \mu}; \quad D_{ej} = D_e - \text{const}$$

Оценка дисперсии как случайная величина при указанных выше допущениях имеет следующий вид

$$S_e^2 = \frac{1}{\mu - 1} \sum_{j=1}^{\mu} [Y_j(t) - Z(t)]^2 = \frac{D_e}{\mu - 1} Q_e, \quad (11)$$

где

$$Z(t) = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} Y_j(t). \quad (12)$$

$Q_e = D_e^{-1} \sum_{j=1}^{\mu} [Y_j(t) - Z(t)]^2$ - случайная величина, имеющая центральное χ^2 -распределение с $\nu = \mu - 1$ степени свободы.

После подстановки в правой части равенства получим случайное событие состоящее в том, что принимается гипотеза H_0 . Вероятность случайного

события определяется выражением, зависящим от аргумента D_e оперативной характеристикой решающей функции, которая является оперативной характеристикой решающей функции.

$$\frac{D_e}{\mu - 1} Q_e \leq u_0 \quad (13)$$

$$P[Q_e \leq (\mu - 1) D_e^{-1} u_0] = \int_0^{(\mu-1)D_e^{-1}u_0} f(q_e; \nu) dq_e = F[(\mu - 1) D_e^{-1} u_0; \nu] = L\left(\frac{D_e}{t}, \mu, u_0\right), \quad (14)$$

Значения оперативной характеристики определяют вероятность принятия гипотезы H_0 . На интервале гипотезы H_0 : $D_e \leq D_e^*$ это вероятность правильной оценки гипотезы H_0 , а дополнение вероятности до единицы определяет вероятность ошибочно оценить эту гипотезу как гипотезу H_1 .

Это вероятность ошибки 1-го рода

$$\alpha\left(\frac{D_e}{H_0}\right) = 1 - L\left(\frac{D_e}{t}, \mu, u_0\right) \Big|_{D_e \leq D_e^*}. \quad (15)$$

На интервале гипотезы H_1 функция $L\left(\frac{D_e}{t}, \mu, u_0\right)$ определяет вероятность ошибочно оценить гипотезу H_1 , как гипотезу H_0 . Это вероятность появления ошибки 2-го рода

$$\beta\left(\frac{D_e}{H_1}\right) = L\left(\frac{D_e}{t}, \mu, u_0\right) \Big|_{D_e > D_e^*}. \quad (16)$$

При $D_e = D_e^*$ имеет место следующее равенство

$$\alpha\left(\frac{D_e}{H_0}\right) + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \beta\left(\frac{D_e + \varepsilon}{H_1}\right) = 1. \quad (17)$$

Данная зависимость свидетельствует о том, что при $D_e = D_e^*$ и малой окрестности точки D_e^* невозможно обеспечить малые значения вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода. Вследствие этого используют интервальную оценку.

Определим границы этой малой окрестности

$$\begin{aligned} D_{e0} &= D_e^*(1 - \xi_0), \quad < 1, \\ D_{e1} &= D_e^*(1 - \xi_1), \quad \xi_1 > 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Для гипотез $H_0^* : D_e \leq D_{e0}$ и $H_1^* : D_e \geq D_{e1}$ введём следующие ограничения на вероятность ошибок 1-го и 2-го рода

$$\left. \begin{aligned} \alpha\left(\frac{D_e}{H_0}\right) &= 1 - L\left(\frac{D_e}{t, \mu, u_0}\right) \Big|_{D_e \leq D_{e0}^*} \leq \alpha_0 \ll 1 \\ \beta\left(\frac{D_e}{H_1}\right) &= L\left(\frac{D_e}{t, \mu, u_0}\right) \Big|_{D_e \geq D_{e1}^*} \leq \beta_0 \ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \alpha\left(\frac{D_e}{H_0}\right) &= 1 - L\left(\frac{D_e}{t, \mu, u_0}\right) \Big|_{D_e \leq D_{e0}^*} \leq \alpha_0 \ll 1 \\ \beta\left(\frac{D_e}{H_1}\right) &= L\left(\frac{D_e}{t, \mu, u_0}\right) \Big|_{D_e \geq D_{e1}^*} \leq \beta_0 \ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где $H_0^* : D_e \leq D_{e0}$ - наиболее предпочтительная часть гипотезы H_0 ,

$H_1^* : D_e \geq D_{e1}$ - наименее предпочтительная часть гипотезы H_1 .

Для определения параметров μ и U_0 в отношениях (20) оставим только знаки равенства и получим систему уравнений с двумя неизвестными μ и u_0

$$\begin{aligned} F[(\mu - 1)D_{e0}^{-1}u_0] &= 1 - \alpha_0, \\ F[(\mu - 1)D_{e1}^{-1}u_0] &= \beta_0 \end{aligned} \quad (21)$$

Или переходим к уравнениям для квантилей

$$\left. \begin{aligned} (\mu - 1)D_{e0}^{-1}u_0 &= q_{e, \mu-1, 1-\alpha_0} \\ (\mu - 1)D_{e1}^{-1}u_0 &= q_{e, \mu-1, \beta_0} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где $q_{e, \mu-1, 1-\alpha_0}$ и $q_{e, \mu-1, \beta_0}$ - квантили функции центрального χ^2 -распределения с $\nu = \mu - 1$ степени свободы.

Решения системы уравнений имеют следующий вид

$$\hat{\mu} = \min\{\mu : \lambda(\mu; \alpha_0, \beta_0) \geq b_0, \mu = 1, 2, \dots\}, \quad (23)$$

где $\lambda(\mu; \alpha_0, \beta_0) = \frac{q_{e, \mu-1, \beta_0}}{q_{e, \mu-1, 1-\alpha_0}}$ - монотонно возрастающая функция, удовлетворяющая условию $\lim_{\mu \rightarrow \infty} \lambda(\mu; \alpha_0, \beta_0) = 1$.

$$b_0 = \frac{1 - \xi_0}{1 + \xi_1} < 1 \quad (24)$$

$$\hat{u}_0 = \frac{q_{e, \hat{\mu}-1, 1-\alpha_0}}{\hat{\mu}-1} D_{e0} = \frac{q_{e, \hat{\mu}-1, \beta_0}}{\hat{\mu}-1} D_{e1} \quad (25)$$

План эксперимента $(t, \hat{\mu}, \hat{u}_0)$ является оптимальным, так как обеспечивает выполнение заданных ограничений на вероятность ошибок 1-го и 2-го рода (19) при минимальном объеме многократных измерений.

Оперативная характеристика является монотонно убывающей функцией аргумента D_e . Следствием этого является функция $\alpha\left(\frac{D_e}{H_0}\right)$, которая монотонно возрастает, а $\beta\left(\frac{D_e}{H_1}\right)$ - монотонно убывает. Следовательно, в граничных точках D_{e0} и D_{e1} вероятности ошибок достигают максимального значения ограниченного пределами $\alpha_0, \beta_0 < 1$ и поэтому на интервалах гипотез H_0^* и H_1^* условия (9) всегда выполняются.

Заключение

Рассмотренный подход позволяет реализовать

- план эксперимента $(t, \hat{\mu}, \hat{u}_0)$ оценки метрологических характеристик измерительного канала, функционирующего в условиях эксплуатации объекта,
- план эксперимента при оценке систематической погрешности измерительного канала по условию

$$m_e(t) \leq \frac{1}{2} T_{m_e}^*$$

- план $(t, \hat{\mu}, \hat{u}_0)$ при оценке ограничения на случайную погрешность.

Список литературы

1. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 9-13.
2. Киселёв М.И., Зройчиков Н.А., Пронякин В.И., Чивилев Я.В. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 10-13.
3. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 15-18.
4. Колтик Е.Д., Тайманов Р.Е., Кочугуров В.В., Сапожникова К.В., Дружинин И.И. Методы определения метрологических параметров электрофизических преобразователей, встроенных в агрегаты // Измерительная техника. 1987. № 10. С. 6-8.
5. Цейтлин Я.М. Нормальные условия измерений в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 224 с.
6. МИ 1888-88. Методические указания. ГСИ. Нормальные условия измерений в гибких производственных системах. М.: Изд-во стандартов, 1989. 14 с.
7. Тарбеев Ю.В., Иванов В.Н., Новицкий П.В. Научно-технические перспективы обеспечения метрологической надёжности средств измерений // Измерительная техника. 1982. № 5. С. 17-19.
8. МИ 2440-97. ГСИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов. М.: ВНИИМС, 1997. 13 с.
9. МИ 2267-2000. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическим процессом. Метрологическая экспертиза технической документации. М.: ВНИИМС, 2000. 26 с.
10. МИ 2232-2000. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности

измерений при ограниченной исходной информации. М.: ВНИИМС, 2000. 10 с.

11. МИ 2233-2000. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения. М.: ВНИИМС, 2000. 15 с.

12. ГОСТ Р 8.565-96. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций. Основные положения. М.: Госстандарт России, 1996. 11 с.

13. Проблемы машиностроения: точность, трение и износ, надёжность, перспективные технологии / под ред. В.П. Булатова. СПб.: Наука, 2005. 740 с.

14. Шеффе Г. Дисперсионный анализ : пер. с англ. М.: Физматгиз, 1963. 370 с.

15. Назаров Н.Г. Измерения: планирование и обработка результатов. М.: Издательство стандартов, 2000. 304 с.

16. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных : сокр. пер. с англ. В. А. Коптяева. Л.: Судостроение, 1980. 383 с.

17. Климачев Д.В. Методика определения оптимальных ограничений на вероятности ошибок 1-го и 2-го рода при контроле партии однородных изделий: дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 123 с.

Metrological support of phase-chronometric systems (part 1)

12, December 2012

DOI: 10.7463/1212.0514343

Pronyakin V.I.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

vip-u@yandex.ru

This article presents an approach to metrological support of data measuring systems operating under field conditions of technical objects where there is a restriction on the access to their primary transducers due to repair intervals. Calibration intervals of measuring devices often don't correspond to repair intervals. Under the circumstances, it is necessary to evaluate metrological characteristics of measuring channels while machines and mechanisms operate. In this case controlled parameters of the measuring channel must be independent of the features of the device operation and external actions. The proposed method is implemented with the use of multi measurement and measurement planning processes. The quality of the measuring process relative to the systematic error and dispersion using a test signal is also evaluated.

Publications with keywords: [measurement](#), [time intervals](#), [a phase chronometry method](#), [diagnostics](#), [phase-chronometrical system](#), [measuring channel](#)

Publications with words: [measurement](#), [time intervals](#), [a phase chronometry method](#), [diagnostics](#), [phase-chronometrical system](#), [measuring channel](#)

References

1. Proniakin V.I. Problemy diagnostiki tsiklicheskih mashin i mekhanizmov [Problems in diagnosing cyclic machines and mechanisms]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement techniques], 2008, no. 10, pp. 9-13.
2. Kiselev M.I., Zroichikov N.A., Proniakin V.I., Chivilev Ia.V. Pretsizionnoe issledovanie raboty turboagregata optiko-elektronnymi sredstvami [A precision investigation of turbine unit operation using opticelectronic instruments]. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 2006, no. 11, pp. 10-13.
3. Kiselev M.I., Proniakin V.I. Fazovyi metod issledovaniia tsiklicheskih mashin i mekhanizmov na osnove khronometricheskogo podkhoda [The phase method of research of cyclic machines and mechanisms on the basis of chronometric approach]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement techniques], 2001, no. 9, pp. 15-18.

4. Koltik E.D., Taimanov R.E., Kochugurov V.V., Sapozhnikova K.V., Druzhinin I.I. Metody opredeleniia metrologicheskikh parametrov elektrofizicheskikh preobrazovatelei, vstroennykh v agregaty [Methods of definition of metrological parameters of electrophysical converters, built-in units]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement techniques], 1987, no. 10, pp. 6-8.
5. Tseitlin Ia.M. *Normal'nye usloviia izmerenii v mashinostroenii* [Normal conditions of measurements in engineering]. Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 224 p.
6. *MI 1888-88. Metodicheskie ukazaniia. GSI. Normal'nye usloviia izmerenii v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh* [Measurement procedure 1888-88. Guidance. State system for ensuring the uniformity of measurements. Normal measurement conditions in flexible manufacturing systems]. Moscow, Standards Publishing House, 1989. 14 p.
7. Tarbeev Iu.V., Ivanov V.N., Novitskii P.V. Nauchno-tekhnicheskie perspektivy obespecheniia metrologicheskoi nadezhnosti sredstv izmerenii [Scientific and technical prospects for metrological reliability of measurement means]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement techniques], 1982, no. 5, pp. 17-19.
8. *MI 2440-97. GSI. Metody eksperimental'nogo opredeleniia i kontroliia kharakteristik pogreshnosti izmeritel'nykh kanalov izmeritel'nykh sistem i izmeritel'nykh kompleksov* [Measurement procedure 2440-97. State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of experimental determination and control characteristics of the error of measuring channels of measuring systems and measuring complexes]. Moscow, VNIIMS Publ., 1997. 13 p.
9. *MI 2267-2000. GSI. Obespechenie effektivnosti izmerenii pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Metrologicheskaiia ekspertiza tekhnicheskoi dokumentatsii* [Measurement procedure 2267-2000. State system for ensuring the uniformity of measurements. Ensuring the effectiveness of measurements in the management of technological process. Metrological examination of the technical documentation]. Moscow, VNIIMS Publ., 2000, 26 p.
10. *MI 2232-2000. GSI. Obespechenie effektivnosti izmerenii pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Otsenivanie pogreshnosti izmerenii pri ogranichennoi iskhodnoi informatsii* [Measurement procedure 2232-2000. State system for ensuring the uniformity of measurements. Ensuring the effectiveness of measurements in the management of technological process. Estimation of measurement error with limited primary information]. Moscow, VNIIMS Publ., 2000. 10 p.
11. *MI 2233-2000. GSI. Obespechenie effektivnosti izmerenii pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Osnovnye polozeniia* [Measurement procedure 2233-2000. State system for ensuring the uniformity of measurements. Ensuring the effectiveness of measurements in the management of technological process. Fundamentals]. Moscow, VNIIMS Publ., 2000. 15 p.
12. *GOST R 8.565-96. Gosudarstvennaia sistema obespecheniia edinstva izmerenii. Metrologicheskoe obespechenie ekspluatatsii atomnykh stantsii. Osnovnye polozeniia* [State Standard of RF 8.565-96. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological ensuring of atomic power stations exploitation. General principles]. Moscow, Gosstandart Publ., 1996. 11 p.

13. Bulatov V.P., ed. *Problemy mashinostroeniia: tochnost', trenie i iznos, nadezhnost', perspektivnye tekhnologii* [Problems of mechanical engineering: accuracy, friction and wear, reliability, advanced technologies]. St. Petersburg, Nauka, 2005. 740 p.
14. Scheffe H. *The Analysis of Variance*. New York, John Wiley & Sons, 1959. (Russ. ed.: Sheffe G. *Dispersionnyi analiz*. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 370 p.).
15. Nazarov N.G. *Izmereniia: planirovanie i obrabotka rezul'tatov* [Measurements: planning and processing of results]. Moscow, Standards Publishing House, 2000. 304 p.
16. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 1st ed. John Wiley & Sons, New York, 1976. (Russ. ed.: Montgomeri D.K. *Planirovanie eksperimenta i analiz dannykh*. Leningrad, Sudostroenie, 1980. 383 p.).
17. Klimachev D.V. *Metodika opredeleniia optimal'nykh ogranicenii na veroiatnosti oshibok 1-go i 2-go roda pri kontrole partii odnorodnykh izdelii. Kand. diss.* [The methodology of determining the optimal restrictions on the probability of errors of the 1-st and 2nd kind at the control of the lot of the homogeneous production. Cand. diss.]. Moscow, 2003. 123 p.