

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.5

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА ТУРБОАГРЕГАТА

© Авторы, 2016

Морозов А. Н. — д.ф.-м.н., проф., зав каф. «Физика», Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, ген. директор, «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э.Баумана, зам. директора по научной работе, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва. E-mail: amor59@mail.ru

Назолин А. Л. — д.т.н., проф. РАН, с.н.с., Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, нач. научно-тех. отдела, «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э.Баумана», ген. директор Научно-технический центр «Ресурс», Москва. E-mail: nazolin72@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности построения оптико-электронных систем измерительного контроля крутильных колебаний валопровода турбоагрегата и требования, предъявляемые к их разработке. Решена задача оптимизации прецизионной регистрации момента прихода информационного видеоимпульса. Разработана методика сравнительной оценки точности измерительных систем по вариациям текущего периода вращения валопровода. Представлены результаты и дан сравнительный анализ точности существующих оптико-электронных измерительных систем.

Ключевые слова: оптический датчик, видеоимпульс, шум, валопровод турбоагрегата, крутильные колебания, флуктуации периода, погрешности измерений

Abstract

Features of creation of optical-electronic systems of measuring control of torsional vibrations of shaft turbine unit and requirements imposed to their development are considered. The problem of optimization of high-precision filing of the moment of arrival of informational video impulse is solved. Developed methodology for comparative estimate of the accuracy of the measuring systems according to the fluctuation of the current period of rotation of shaft turbine unit. Results the comparative analysis of accuracy of the existing optical-electronic measuring systems are presented.

Key words: optical sensor, video impulse, noise, shaft turbine unit, torsional vibrations, fluctuations of the period, error of measurement

Введение

Измерение параметров крутильных колебаний валопровода мощного турбоагрегата в режиме мониторинга представляет собой сложную техническую задачу. Сложность заключается в том, что уровень крутильных колебаний в стационарных режимах работы турбоагрегата чрезвычайно мал и для их регистрации требуются прецизионные средства измерения. Регистрация этих колебаний только в переходных режимах работы турбоагрегата существенно ограничивает возможности их использования в диагностических целях, главная из которых обнаружение на ранней стадии дефекта усталостной трещины валопровода по изменению параметров собственных частот крутильных колебаний.

В нашей стране работы по созданию систем измерительного контроля крутильных колебаний валопроводов мощных турбоагрегатов ведутся с начала 90-х годов прошлого века. В настоящее время известны четыре такие системы [1–4]. Их возможности определяются точностью измерений, которая во многом зависит от типа используемого датчика (оптический, токовихревой, индуктивный, датчик Холла и др.) и метода измерений. В силу малой инерционности и высокой чувствительности наилучшую точность имеют оптические датчики. Возможности оптических методик подтверждаются результатами, достигнутыми при их использовании в локации химических соединений в открытой атмосфере [5, 6], а также обнаружении дефектов машин и механизмов циклического действия [7, 8].

Обычно, измерение крутильных колебаний валов проводится по двум датчикам в разных сечениях вала. Регистрация относительного изменения углов поворота сечений вала позволяет получить оценку крутильных колебаний и угол скручивания вала между сечениями. По одному датчику также можно оценить крутильные колебания, но только в сечении вала, где установлен датчик. В этом случае информация содержится в вариациях временных интервалов прохождения валом фиксированных угловых положений. Вариации текущего периода содержат информацию о собственных частотах крутильных колебаний [9].

Настоящая статья посвящена описанию физических основ построения оптико-электронных систем измерительного контроля крутильных колебаний валопровода по измерениям текущего периода и методики сравнительной оценки точности измерительных систем по вариациям текущего периода вращения вала.

1. Описание оптико-электронных измерительных систем

Современный уровень развития вычислительной техники predetermined создание измерительных приборов на базе промышленных компьютеров, обладающих большим быстродействием и функциональными возможностями по многоканальной регистрации, визуализации, хранению и цифровой обработке сигналов.

Впервые регистрацию крутильных колебаний валопровода мощного турбоагрегата во всех режимах его работы удалось осуществить в середине 90-х годов 20-го века на турбоагрегате мощность 300 МВт с турбиной К-250–240 ЛМЗ и генератором ТВВ-320–2 «Электросила» с помощью оптико-электронной системы измерительного контроля периода вращения вала, разработанной в Центре прикладной физики МГТУ им. Н.Э.Баумана [1]. Структурная схема измерительной системы представлена на рис. 1. Система состояла из измерительного диска с 12 пазами, установленного на соединительный фланец ротора турбогенератора и ротора возбuditеля, оптико-электронного датчика с первичным преобразователем, многоканальной интерфейсной платы измерения временных интервалов в составе промышленного компьютера, осуществляющей регистрацию моментов прихода импульсных сигналов с первичных преобразователей при прохождении валом фиксированных угловых положений в реальном масштабе времени. Измерение периодов по каждому пазу измерительного диска обеспечивало оценку вариации периода до 300 Гц. Спектр вариаций периода содержал три гармоники собственных частот крутильных колебаний до 50 Гц.



Рис. 1. Структурная схема измерительной системы.

1 — вал, 2 — измерительный диск с пазами, 3 — оптико-электронная пара.

Благодаря разработанным первичному преобразователю и цифровой схеме измерения временных интервалов, реализующей методом прямого счета, система [1], до настоящего времени, имела наилучшую точность измерения параметров собственных частот крутильных колебаний в сечении валопровода. Однако, из-за ограниченного числа мест установки оптического датчика и низкой надежности его работы, требовавшей периодического ежемесячного обслуживания, он не нашел широкого применения в других системах.

В 2013 г. в «Центре прикладной физики МГТУ им. Н.Э.Баумана» совместно с НТЦ «Ресурс» проведена полная модернизация системы [1], более полное описание которой дано в [9], с учетом современного уровня развития техники. В 2015 г. эта система успешно прошла натурные испытания в режиме мониторинга и введена в эксплуатацию на турбоагрегате мощность 350 МВт с турбиной К-300–240 ЛМЗ и генератором ТВВ-350–2 «Электросила». Удалось обеспечить надежную работу оптического датчика с периодом обслуживания более 1 года и почти

на порядок уменьшить погрешность измерения параметров собственных частот крутильных колебаний в сечении валопровода. Методика и результаты сравнительного анализа точности этих систем будут представлены ниже.

Рассмотрим процесс формирования и обработки измерительного сигнала в этих системах. Прохождение пазов измерительного диска через световой поток оптико-электронной пары приводит к пространственно-временной модуляции интенсивности оптического излучения. В первичном преобразователе происходит восстановление огибающей видеоимпульса и формирование импульсного сигнала при едином взаимном расположении паза и луча оптического источника, в условиях действия шумов фотоприемника. Импульсные сигналы с первичных преобразователей передаются цифровой схеме измерения временных интервалов, реализующей метод прямого счета. Этот метод характеризуется наибольшим быстродействием, что важно при создании измерительных систем реального времени [10]. По фронту импульсного сигнала текущие значения счетчика высокостабильного кварцевого генератора (20 МГц в системе [1] и 80 МГц в модернизированной системе) записываются в реальном времени в память и на диск компьютера в форме периодов и временных интервалов между пазами. Их вариации служат индикатором действующих крутильных колебаний.

При разработке оптико-электронных измерительных систем крутильных колебаний, основными требованиями, предъявляемыми к первичному преобразователю, являются: обеспечение необходимого усиления сигнала, максимизация отношения сигнал/шум и прецизионная регистрация момента прихода информационного видеоимпульса. В свою очередь прецизионная регистрация предполагает решение задачи оптимизации параметров первичного преобразователя.

2. Оптимизация прецизионной регистрации момента прихода информационного видеоимпульса

Интенсивность оптического излучения, поступающая на вход фотодиода, чаще всего имеет форму, близкую к трапецеидальной, а в случае точечных (малоразмерных) объектов — близкую к гауссовскому распределению [11]. Рассмотрим стохастическое дифференциальное уравнение, описывающее процесс восстановления огибающей гауссовского видеоимпульса $s(t)$ на фотодиоде

$$\dot{U}(t) + \omega_a U(t) = (s(t) + \xi(t)) \omega_a. \quad (1)$$

Здесь

$$s(t) = A \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2a^2}\right), \quad (2)$$

$$\omega_a = 1/\tau, \quad (3)$$

где $U(t)$ — напряжение на выходе фотодиода; ω_a и τ — верхняя граничная частота и постоянная времени первичного преобразователя соответственно; $\xi(t)$ — шум фотодиода; A — амплитуда сигнала; t_0 — сдвиг сигнала по времени; a — длительность видеоимпульса на уровне A/\sqrt{e} .

Уравнение (1) описывает процесс восстановления огибающей видеоимпульса в предположении, что шум фотодиода $\xi(t)$ некоррелирован с входным сигналом $s(t)$. Решение (1) ищем при нулевых начальных условиях $U(t)|_{t=0} = 0$ численным методом, так как интегрирование связано с вычислением интеграла вероятностей.

Фотодиод является источником внутренних шумов различной природы, а именно: теплового, дробового шума, темнового тока, квантового дробового шума, фликкер-шума и т.д. [12]. Наибольший вклад вносит тепловой шум, который, согласно формуле Найквиста хорошо аппроксимируется белым шумом $\xi(t)$ с гауссовским распределением плотности вероятности и дисперсией

$$\sigma_\xi^2 = 4KT_m R \Delta f, \quad (4)$$

где

$$\Delta f = \pi f_a / 2, \quad (5)$$

где $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T_m — эффективная температура, К; R — входное сопротивление, Ом; Δf — эффективная полоса пропускания первичного преобразователя, описываемого дифференциальным уравнением (1), Гц; $f_a = \omega_a / 2\pi$ — верхняя граничная частота первичного преобразователя, Гц.

На рис. 2 представлен результат численного интегрирования дифференциального уравнения (1) методом Эйлера с шагом 10^{-9} с для следующих параметров сигнала: $A = 5 \cdot 10^{-3}$ В, $a = 10^{-5}$ с, $t_0 = 10^{-4}$ с, $T_{tm} = 300$ К, $R = 1$ МОм, $f_n = 80$ кГц.

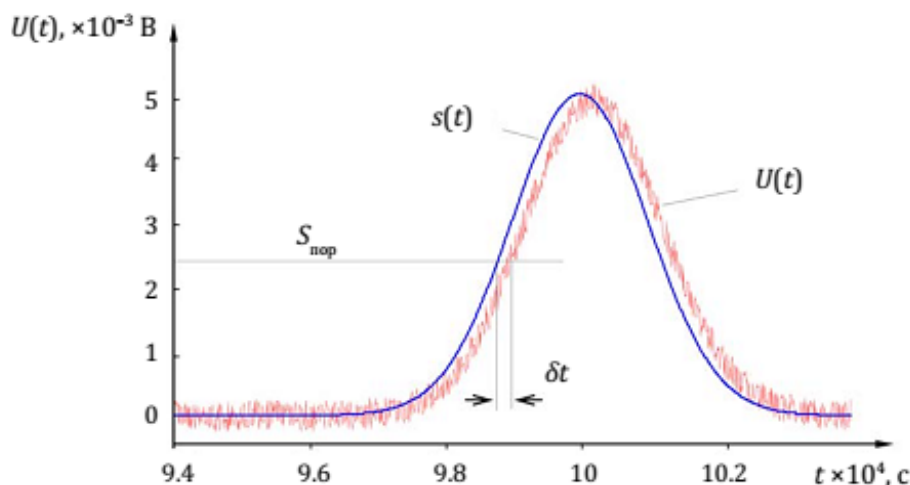


Рис. 2. Огибающая видеопульса на входе $s(t)$ и выходе $U(t)$ фотодиода.

Шум $\xi(t)$ аддитивно входит в правую часть дифференциального уравнения (1), поэтому дисперсию времени срабатывания по порогу $s_{нор}$ определим при $t_0 = 0$ по формуле

$$\sigma_{\xi}^2(s_{нор}) = \frac{\sigma_{\xi}^2}{\dot{s}(t)^2} \Big|_{s=s_{нор}} \cong \frac{\sigma_{\xi}^2 a^2}{2s_{нор}^2 \ln(A/s_{нор})}, \quad (6)$$

где $\dot{s}(t)$ — угол наклона касательной к кривой $s(t)$ в момент достижения сигналом порогового уровня $s_{нор}$. Максимальную производную и минимальную дисперсию момента срабатывания (6) имеем в точке перегиба гауссовского видеопульса на уровне $s_{нор} = A/\sqrt{e}$.

Численное решение стохастического дифференциального уравнения (1) методом Эйлера с расчетом моментов регистрации видеопульсов по порогу $s_{нор}$ показало следующее:

1. Запаздывание детерминированной составляющей выходного сигнала $U(t)$ относительно входного $s(t)$ не зависит от выбора порогового уровня и равно τ .
2. Закон распределения моментов регистрации видеопульсов по порогу имеет гауссовский вид с дисперсией, определяемой уравнением (6), а спектр флуктуаций моментов представляет собой белый шум.

Следовательно, собственный шум измерительной системы — это дельта-коррелированный гауссовский случайный процесс, анализ которого может быть выполнен стандартными методами. Поэтому погрешность регистрации момента прихода информационного видеопульса по порогу $s_{нор}$ с вероятностью 0,68 представим в виде

$$\delta t = \frac{1}{2\pi f_n} \pm \frac{a}{s_{нор}} \sqrt{\frac{\pi K T_{tm} R f_n}{\ln(A/s_{нор})}}. \quad (7)$$

Анализ зависимости (7) показывает, что увеличение полосы пропускания первичного преобразователя f_n с одной стороны уменьшает погрешность восстановления огибающей видеопульса, а с другой стороны, увеличивает дисперсию шума фотодиода. Взяв частную производную от функции (7) по f_n и приравняв ее нулю, находим формулу расчета оптимальной верхней граничной частоты первичного преобразователя для любого порогового уровня $s_{нор}$

$$(f_n)_{опт} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{s_{нор}}{a} \sqrt{\frac{\ln(A/s_{нор})}{K T_{tm} R}} \right)^2. \quad (8)$$

Погрешность δt , определяемая формулой (7), имеет глобальный минимум при $s_{\text{пор}} = A/\sqrt{e}$, для которого

$$(f_a)_{\text{опт}} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{A}{a\sqrt{2eKT_{\text{tm}}R}} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (9)$$

Для указанных выше параметров видеоимпульса оптимальная верхняя граничная частота первичного преобразователя равна $(f_a)_{\text{опт}} = 7.1 \cdot 10^5$ Гц ($\tau_{\text{опт}} = 2.2 \cdot 10^{-7}$ с). Ей соответствует минимальная случайная погрешность регистрации момента прихода информационного видеоимпульса, связанная с шумом фотодиода, равная $\sigma_{\delta t} = 4.4 \cdot 10^{-7}$ с.

3. Методика сравнительной оценки точности измерительных систем

Методика сравнительной оценки точности измерительных систем крутильных колебаний вала с любым типом датчика основана на возможности представления результатов работы измерительных каналов систем [1–4] в виде флуктуаций текущего периода вращения вала

$$\delta T(t) = T(t) - T_0, \quad (10)$$

где $T(t)$ текущий период, определяемый по каждому из N_0 пазов измерительного диска, $T_0 = 1/f_0$ — средний период. Необходимость представления данных в таком виде объясняется тем, что высокочастотные флуктуации периода определяются исключительно собственным шумом измерительной системы, по которому можно оценить погрешности измерительной системы. Дадим этому объяснение.

Источниками шума в системе являются ошибки формирования импульсного сигнала в первичном преобразователе (7) и погрешности, обусловленные дискретностью счета импульсов опорной частоты кварцевого генератора. Спектр шума аналоговой и цифровой схем белый. Его спектральная плотность мощности в стационарном режиме работы турбоагрегата постоянна во всем диапазоне частот и не зависит от флуктуаций периода вращения. Поэтому одностороннюю спектральную плотность мощности флуктуаций текущего периода от электронного шума измерительной системы можно представить в виде [13]

$$G_{\delta T_\xi}(\omega) = A_\xi \sin^2 \left(\frac{\omega T_0}{2} \right) = \frac{T_0 \sigma_{\delta t}^2}{N_0} \sin^2 \left(\frac{\omega T_0}{2} \right), \quad (11)$$

где A_ξ — максимальный уровень спектральной плотности мощности шума измерительной системы, $\sigma_{\delta t}^2$ — дисперсия времени срабатывания по порогу. Здесь учтено, что дисперсия шума цифровых схем, как правило, на два и более порядка меньше дисперсии шума аналоговой схемы и, поэтому, ее влиянием на погрешность измерения временных интервалов можно пренебречь.

Типичные расчетные зависимости спектральной плотности мощности флуктуаций текущего периода вращения вала, как абсолютно твердого тела, $G_{\delta T}(\omega)$ и собственного шума измерительной системы $G_{\delta T_\xi}(\omega)$ от частоты представлены на рис. 3. Видно, что с ростом частоты спектральная плотность мощности шума измерительной системы становится больше спектральной плотности мощности флуктуаций текущего периода и электронный шум измерительной системы обнаруживает себя по равномерному уровню «холмов». Вид спектра обусловлен особенностями преобразования флуктуаций угла поворота во флуктуации текущего периода [9, 13]. Представленные на рис. 4 экспериментальные спектры это подтверждают.

Рассмотрим процедуру оценки точности измерительных систем по максимальному уровню высокочастотного шума A_0 в амплитудном спектре флуктуаций периода со среднеквадратическими значениями амплитуд.

С учетом разрешения в спектре по частоте df определяем значение A_ξ и, подставляя его в выражение (11), находим оценку дисперсию времени срабатывания по порогу

$$\sigma_{\delta t}^2 = \frac{A_\xi N_0}{T_0} = \frac{2A_0^2 N_0}{T_0 df}. \quad (12)$$

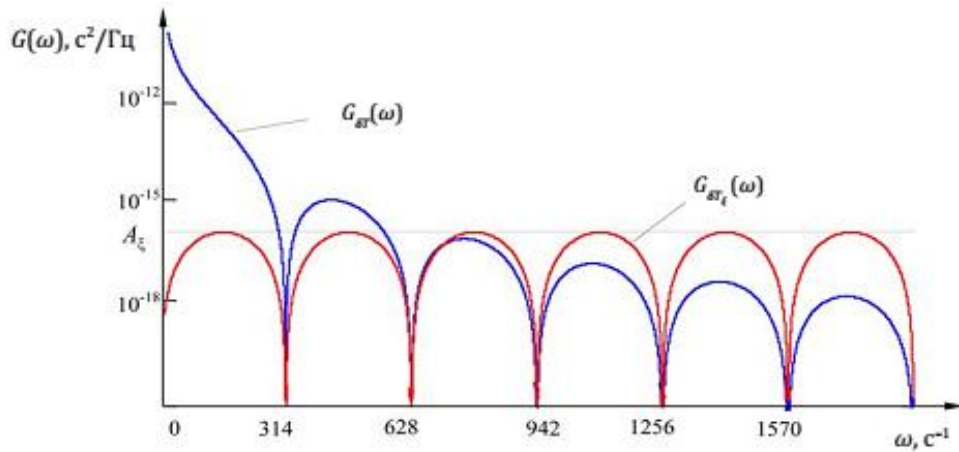


Рис. 3. Составляющие спектральной плотности мощности флуктуаций текущего периода ($N_0 = 12$).

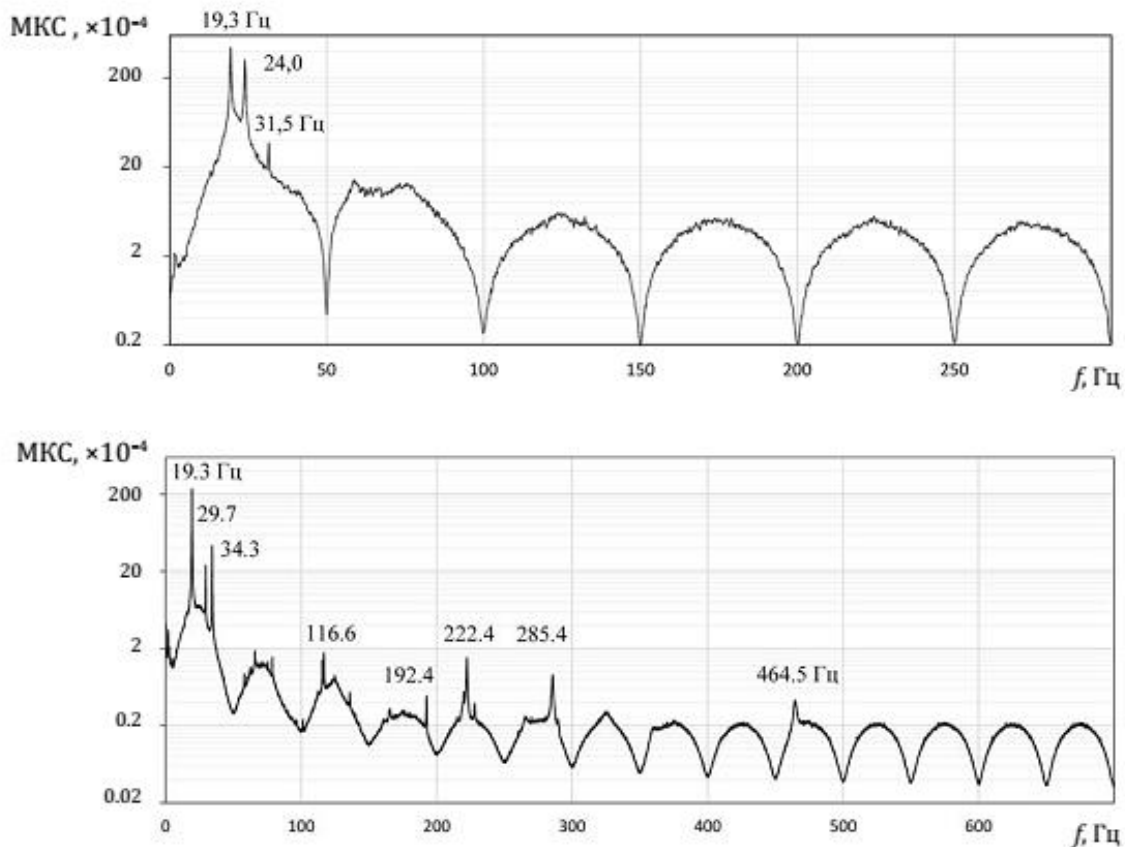


Рис. 4. Амплитудные спектры флуктуаций текущего периода $T(t)$ вращения валопровода турбоагрегата: а) 300 МВт, $df = 0.01831$ Гц, $N_0 = 12$; б) 350 МВт, фрагмент спектра, $df = 0.006008$ Гц, $N_0 = 126$.

В измерениях текущего периода $T(t)$ методом прямого счета участвуют два значения счетчика временных интервалов, каждое из которых определяется с погрешностью $\sigma_{\delta t}$, поэтому средне-квадратическая погрешность измерения широкополосных вариаций текущего периода

$$\sigma_{\delta T} = \sqrt{2}\sigma_{\delta t}, \quad (13)$$

вариаций углового положения вала

$$\sigma_{\delta \varphi} = 2\pi f_0 \sigma_{\delta T} \quad (14)$$

и вариаций линейного смещения

$$\sigma_{\delta l} = 2\pi f_0 R_n \sigma_{\delta T}, \quad (15)$$

где R_n — радиус расположения пазов измерительного диска.

Относительная среднеквадратическая погрешность измерения широкополосных вариаций периода в процентах

$$\delta T = \frac{\sigma_{\delta T}}{T_0} \cdot 100. \quad (16)$$

Возможности измерительных системы по обнаружению узкополосных вариаций углового положения вала — гармоник крутильных колебаний в спектре флуктуаций текущего периода характеризуют следующие параметры:

1. Максимальная среднеквадратическая погрешность измерения амплитуды узкополосных вариаций текущего периода из-за шума измерительной системы в полосе сигнала Δf

$$\sigma_{\delta T}(\Delta f) = \sqrt{2A_0^2 \Delta f / df}. \quad (17)$$

2. Относительная среднеквадратическая погрешность измерения амплитуды узкополосных вариаций периода в процентах

$$\delta T(\Delta f) = \frac{\sigma_{\delta T}(\Delta f)}{T_0} \cdot 100. \quad (18)$$

3. Максимальная среднеквадратическая погрешность измерения амплитуды узкополосных вариаций углового положения вала на частоте f

$$A_{\delta \varphi}(\Delta f, f) = \frac{\sigma_{\delta T}(\Delta f)}{\sqrt{G_{\delta T}(f)}}, \text{ кроме частот } f = k \cdot f_0, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (19)$$

где

$$G_{\delta T}(f) = \frac{1}{\pi^2 f_0^2} \sin^2 \left(\pi \frac{f}{f_0} \right) \quad (20)$$

— спектральное окна процедуры измерения текущего периода [9, 13], связывающее вариации угла поворота с вариациями текущего периода.

Параметры измерительных систем и частоты вращения валов могут отличаться, поэтому для обеспечения идентичных условий сравнения необходимы формулы пересчета погрешностей (13)—(19) на другие параметры системы. Полагая зависимость $\sigma_{\delta T}(R_n, f_0)$ линейной формулы пересчета погрешностей системы с параметрами N_0, R_n, f_0 в погрешности системы с новыми параметрами $N_{0,n}, R_{n,n}, f_{0,n}, df_n$ имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta T,n} &= \frac{R_n}{R_{n,n}} \cdot \frac{f_0}{f_{0,n}} \sigma_{\delta T}, \quad \sigma_{\delta \varphi,n} = 2\pi f_{0,n} \sigma_{\delta T,n}, \quad \sigma_{\delta l,n} = R_n \sigma_{\delta \varphi,n}, \\ A_{0,n} &= \sigma_{\delta T,n} \sqrt{\frac{df_n}{4N_{0,n} f_{0,n}}}, \quad \delta T_n = \frac{\sigma_{\delta T,n}}{T_{0,n}} \cdot 100, \quad \sigma_{\delta T,n}(\Delta f) = \sigma_{\delta T,n} \sqrt{\frac{\Delta f}{N_{0,n} df_n}}, \\ \delta T_n(\Delta f) &= \frac{\sigma_{\delta T,n}(\Delta f)}{T_{0,n}} \cdot 100, \quad A_{\delta \varphi,n}(\Delta f, f) = \frac{\sigma_{\delta T,n}(\Delta f)}{\sqrt{G_{\delta T,n}(f)}}. \end{aligned} \quad (21)$$

4. Сравнительная оценка точности оптико-электронных измерительных систем

Сравним погрешности измерительной системы [1], установленной на турбоагрегат (ТА) 300 МВт, и модернизированной системы, установленной на ТА 350 МВт. Параметры N_0, R_n систем различны, поэтому возникает необходимость использования формул (21). Для проверки их адекватности дополнительно проведены испытания модернизированной системы на экспериментальном стенде с двигателем постоянного тока. Исходные значения параметров трех систем с результатами расчетов по формулам (13)—(19) даны в таблице.

В столбце таблицы «Стенд расчет» представлены результаты пересчета погрешностей системы на стенде в погрешности системы с параметрами, как на ТА 350 МВт, по формулам (21). В столбце «ТА 350 МВт расчет» — результаты пересчета погрешностей системы на ТА 350 МВт в погрешности системы с параметрами, как на ТА 300 МВт. Жирным шрифтом выделены расчетные оценки погрешностей.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные оценки погрешностей измерений

Параметр	Измерительная система				
	Стенд	Стенд расчет	ТА 350 МВт	ТА 350 МВт расчет	ТА 300 МВт
R_n , м	0.032	0.355	0.355	0.2	0.2
N_0 , шт.	20	126	126	12	12
f_0 , Гц	69	50	50	50	50
df , Гц	0.02092	0.006008	0.006008	0.01831	0.01831
A_0 , нс	0.4	0.012	0.02	0.17	0.5
$\sigma_{\text{ЭТ}}$, нс	205	25	41	91	180
$\sigma_{\delta\varphi}$, угл. сек.	18	1.6	2.6	5.9	12
$\sigma_{\delta t}$, мкм	2.8	2.8	4.5	5.7	11
δT , %	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
$\sigma_{\text{ЭТ}}(\Delta f)$, нс	2.1	0.17	0.19	2.0	2.8
$\delta T(\Delta f)$, %	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$
$A_{\delta\varphi}(\Delta f, f)$, угл. сек.	0.126	0.006	0.007	0.071	0.1

Примечание: здесь $\Delta f = 0.3$ Гц, $f = 19$ Гц.

Сравнительный анализ расчетных в столбце «Стенд расчет» и экспериментальных в столбце «ТА 350 МВт» оценок погрешностей показывает, что использование формул (21) дает заниженные оценки, отличающиеся не более чем в два раза по погрешностям измерения широкополосных вариаций и не более чем на 20 % по погрешностям измерения узкополосных вариаций углового положения вала. Исходя из этих оценок, погрешности оптического датчика модернизированной системы меньше погрешностей оптического датчика системы [1].

Сравнительный анализ данных в столбце «ТА 350 МВт» и «ТА 300 МВт», а также спектров на рис. 4, показывает, что у модернизированной системы погрешность измерения широкополосных вариаций углового положения вала в 4.6 раза, а амплитуд крутильных колебаний в 14 раз меньше, чем у наиболее точной до настоящего времени системы [1]. Это позволяет надежно обнаруживать до 8-ми гармоник собственных частот крутильных колебаний валопровода в диапазоне от 19 Гц до 470 кГц во всех режимах работы турбоагрегата.

Заключение

Сформулируем наиболее важные результаты, которые получены в работе.

1. Описан процесс формирования и обработки сигнала в оптико-электронных системах измерительного контроля крутильных колебаний валопровода.

2. Решена задача оптимизации параметров первичного преобразователя оптического датчика для прецизионной регистрации момента прихода гауссовского видеоимпульса и дана оценка дисперсии времени формирования импульсного сигнала по фронту видеоимпульса.

3. Разработана методика оценки точности измерительных систем, позволяющая по результатам измерения флуктуаций периода вращения вала оценивать погрешности измерения временных, угловых и линейных величин, вести сравнительный анализа систем по точности измерений, проводить обоснованный выбор параметров системы, типа датчика и метода измерения временных интервалов.

4. Проведена проверка адекватности разработанной методики и сравнительный анализ точности оптико-электронных измерительных систем крутильных колебаний валопровода турбоагрегата. Показано, что модернизированная система, установленная на ТА 350 мВт, обладает повышенной точностью по сравнению с другими системами и обеспечивает надежную регистрацию в режиме мониторинга до 8-и собственных частот крутильных колебаний валопровода от 19 до 470 Гц во всех режимах работы турбоагрегата.

Список литературы

1. Киселев М.И., Морозов А.Н., Назолин А.Л. и др. Измерение периода вращения валопровода турбоагрегата фотоэлектрическим методом // Измерительная техника. 1996. № 12. С. 28–29.
2. Боришанский К.Н., Григорьев Б.Е., Григорьев С.Ю., Наумов А.В. Особенности вибрационного состояния лопаток и валопровода мощных паровых турбин при переходных режимах работы турбоагрегата. // Электрические станции. 2011. № 2. С. 32–37.
3. Бялт М.А., Кисточев А.В., Урьев Е.В. и др. Актуальность и проблемы реализации мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов на электростанциях // Электрические станции. № 8. 2013. С. 50–57.
4. Зиле А.З., Тарадай Д.В., Томашевский Т.В. и др. Исследования крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов // Электрические станции. № 10. 2013. С. 40–48.
5. Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. Применение фурье-спектрометров для пассивной локации химических соединений в открытой атмосфере // Физические основы приборостроения. 2011. № 1. С. 112–121.
6. Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. // Локация химических соединений в атмосфере с помощью фурье-спектрометра // Физические основы приборостроения. 2014. Т.3. № 4. С. 5–18.
7. Назолин А.Л. Измерительный контроль периода колебаний баланса часового механизма с несвободным ходом // Измерительная техника. 1999. № 2. С. 29–31.
8. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Павлов Д.А. Временные измерения кинематических и динамических параметров редукторов // Измерительная техника. 1999. № 4. С. 58–60.
9. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Динамические системы с флуктуирующим временем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 197 с.
10. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х т. / Пер. с англ. М: Мир, 1993. Т. 3. 367 с.
11. Мироненко А.В. Фотоэлектрические измерительные системы. М.: Энергия, 1967. 130 с.
12. Букенгем М. Шумы в электронных приборах и системах / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 359 с.
13. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Статистическое описание процесса хронометрии динамики механизмов циклического действия // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Естественные науки. 1999. № 1. С. 92–104.

Поступила 9 февраля 2016 г.

PHYSICAL BASES OF CREATION OF OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS OF MEASURING CONTROL OF TORTIONAL VIBRATIONS OF SHAFT TURBINE UNIT

A. N. MOROZOV, A. L. NAZOLIN

Article is devoted to the description of physical bases of creation of optical-electronic systems of measuring control of torsional vibrations of shaft turbine unit on measurements of the current period and a technique of a comparative assessment of accuracy of measuring systems on variations of the current period of rotation of a shaft.

Is shown relevance of use of optical-electronic systems of measuring control in the diagnostic purposes, main of which detection at an early stage of defect of an endurance crack of a shaft turbine unit on change of parameters of natural frequencies of torsional vibrations.

The block diagram is provided and the description of work of optical-electronic systems of measuring control given. Merits and demerits of use of the optical sensor are shown. Requirements to primary converter are formulated and the problem of optimization of high-precision filing of the moment of arrival of informational video pulse is solved.

The technique of a comparative assessment of accuracy of measuring systems with any type of the sensor based on possibility of representation of observed data on each measuring channel in the form of fluctuations of the current period of rotation of a shaft is developed. Accuracy of measuring systems is estimated on a maximum level of high-frequency noise in a spectrum of fluctuations of the current period which depends only on analog and digital noise of a measuring system. Formulas of calculation of biases of broadband and narrow-band variations of angular provision of a shaft for the experimental data are presented. Within the linear model formulas of recalculation of errors of system with one parameters in an error of system with other parameters are received. An inspection of adequacy of model is carried out.

Results of a comparative error analysis of measurement of the most precise so far and the modernized optical-electronic system of measuring control of torsional vibrations of a shaft are presented. It is shown that the modernized system possesses the increased accuracy in comparison with other systems and provides reliable registration in the monitoring mode to 8 natural frequencies of torsional vibrations of shaft turbine unit 300 MW from 19 to 470 Hz in all modes of its work.

Уважаемые читатели!

Подписка на журнал оформляется через подписное агентство «Книга-Сервис» и объединенный каталог «Пресса России» (подписной индекс **29196**)

Журнал включен:

- В *Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)*.
- В базу данных *Russian Science Citation Index (RSCI)* на платформе *Web of Science*.
- В *Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*.