

11. Механизм вторично-эмиссионных процессов при электронно-лучевой сварке с модуляцией электронного пучка / В. М. Язовских, Д. Н. Трушников, В. Я. Беленький и др. // Свароч. пр-во. – 2004. – № 4. – С. 21–27.
12. Формирование вторично-эмиссионного сигнала при ЭЛС со сквозным проплавлением / Д. Н. Трушников, В. М. Язовских, Л. Н. Кротов и др. // Свароч. пр-во. – 2006. – № 5. – С. 22–24.
13. Беленький В. Я., Трушников Д. Н., Шварев А. В. Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением // Сварка и диагностика. – 2010. – № 1. – С. 41–43.

D. N. Trushnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm State National Research University

V. Ya. Belenkiy, DSc in Engineering, Professor, Perm State National Research University

V. E. Shechavlev, Post-graduate, Perm State National Research University

A. L. Piskunov, Post-graduate, Perm State National Research University

A. N. Lyalin, Post-graduate, Perm State National Research University

Application of secondary-emission signal parameters for penetration control in electron-beam welding

The paper describes investigations of possibilities to apply parameters of non-self-discharge current in plasma as a signal for through-penetration monitoring in electron-beam welding. Experiments involved oscillation of the electron beam, and components of secondary-emission signal with various frequencies have been measured. Possibility of creating an automation control system in electron-beam welding with through-penetration is shown. The model of such a system is described.

Keywords: electron beam welding, secondary-emission signals, weld penetration control and monitoring

Получено: 10.05.12

УДК 62-754.4

К. В. Шишаков, кандидат физико-математических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА ТВГ И МЕТОДОВ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

Рассматривается твердотельный волновой гироскоп с измерительным устройством из восьми емкостных датчиков. Для него проведен анализ основных погрешностей информационного сигнала: систематического дрейфа, непостоянства масштабного коэффициента, шумов. Изучаются методы их компенсации.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, измерительное устройство, алгоритмы обработки сигналов

Введение

Повышение точностных характеристик твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) и, как следствие, расширение областей его использования связаны с умень-

шением шумов и погрешностей выходного информационного сигнала [1]. Как объект исследования, ТВГ является сложным прецизионным измерительным устройством с многоконтурной системой управления процессами его функционирования [2]. Поэтому на точность его измерительного сигнала в общем случае влияют различные эксплуатационные подсистемы и устройства, включая измерительное устройство, контур управления рабочей стоячей волной и паразитной квадратурной волной, системы контроля и управления температурным режимом и другие [3].

Целью настоящей статьи является системный анализ потенциальных причин погрешностей информационного сигнала и методов их компенсации.

Общая характеристика волновых процессов в ТВГ

Рабочие волновые процессы в резонаторе ТВГ формируются суперпозицией двух независимых резонансных колебаний – модальных колебаний вдоль двух осей жесткости полусферического кварцевого резонатора [1, 2]. Различие их амплитуд определяет угол результирующей стоячей волны. Различие их фаз определяет собственное медленное движение волновой картины. Все эксплуатационные факторы, влияющие на разнофазность и на временное изменение амплитуд, являются потенциальными источниками систематического дрейфа стоячей волны. Функция дрейфа в ТВГ является гармонической по углу и принимает нулевые значения в осях модальных колебаний резонатора. Вне резонансных осей на функцию дрейфа может влиять множество факторов.

Первым из них считается разночастотность модальных колебаний, неизбежно вызывающая набег фаз при их высокочастотном возбуждении на своих резонансных частотах. Если же возбуждение резонатора производится кольцевым электродом на одной частоте, то эффект разночастотности преобразуется в эксплуатационную разнодобротность модальных колебаний – из-за разных отстроек от резонансных частот модальных колебаний.

Так, при повороте корпуса ТВГ происходит относительное перемещение волновой картины – перераспределяются амплитуды модальных колебаний. Контур настройки частоты возбуждения резонатора ТВГ на максимальный отклик рабочей стоячей волны часто реализуют в виде контура ФАПЧ по взвешенной фазовой расстройке ($a_C \varphi_C + a_D \varphi_D$), где a_C, a_D – амплитуды, а φ_C, φ_D – фазы соответственно косинусного и синусного измерительных сигналов [2]. В результате его работы частота возбуждения стремится подстроиться под частоту моды с большей амплитудой. Перераспределение отстроек от резонансов модальных колебаний будет влиять на соотношение возбуждаемых амплитуд колебаний. В свою очередь, их временное изменение перераспределит роли эксплуатационных добротностей по резонансным осям (отстроек от резонансов). В итоге контур ФАПЧ будет стремиться развернуть стоячую волну в ближайшую ось модальных колебаний, что проявится в виде ее малого систематического дрейфа.

Следующими источниками малого систематического дрейфа могут быть контуры системы управления ТВГ, влияющие либо на разнофазность, либо на разнодобротность [4]. Их анализ и коррекция связаны со структурой и параметрами соответствующих каналов управления.

Все перечисленные причины влияют в разной мере на результирующую функцию дрейфа. Поэтому ее компенсация связана с выделением роли каждого исходного фактора (на основании второстепенных признаков волновых процессов) [2–4]. Это разночастотность, разнодобротность, малые расстройки контуров управления,

неравномерность рабочих емкостных зазоров, нарушение осесимметричности резонатора и другие.

Механизм систематического дрейфа рабочей стоячей волны реализуется с помощью малой паразитной квадратурной стоячей волны. По своим свойствам она ортогональна в пространстве и во времени рабочей стоячей волне. Ее подавление обеспечивает компенсацию дрейфа [2, 4].

В общем случае в рамках стратегического направления совершенствования ТВГ можно выделить 7 последовательных направлений повышения его точностных характеристик (включая уменьшение дрейфа): 1) повышение качества *изготовления* элементов ТВГ; 2) повышение качества *доводки* элементов ТВГ (механическая балансировка); 3) повышение качества ТВГ после сборки (электронная коррекция осей жесткости и электронная балансировка *без обратной связи*); 4) повышение качества ТВГ *с помощью квазистатической обратной связи* (коррекция осей жесткости, электронная балансировка и др.); 5) повышение качества ТВГ с помощью контуров управления и режимов (*динамическая обратная связь*, новые принципы и т. п.); 6) повышение качества *обработки выходных сигналов* (фильтрация, прогноз и т. п.); 7) повышение качества ТВГ за счет дополнительных измерительных средств (*системный подход* к измерительным комплексам, переустановка нулей и др.).

Систематизация потенциальных причин погрешностей информационного сигнала ТВГ

Погрешности информационного сигнала ТВГ могут быть разделены на систематические и случайные (рис. 1). Основными систематическими погрешностями являются рассмотренный ранее дрейф и неравномерность по углу масштабного коэффициента K (переводит физические измерения угла стоячей волны в угловую скорость корпуса ТВГ).

Случайные погрешности измерительного устройства ТВГ проявляются в виде шумов полезного измерительного сигнала. Они зависят главным образом от технических характеристик используемых радиоэлементов в аналоговой и цифровой частях измерительного устройства, а также от схемотехнических решений, поддерживающих соответствующие алгоритмы измерений. Выбор путей их уменьшения начинается с составления бюджета ошибок измерительного устройства ТВГ.

Процедурно бюджет ошибок сначала составляется укрупненно – по основным частям тракта получения информационного сигнала: [емкостные датчики] \Rightarrow [аналоговая часть тракта] \Rightarrow [цифровая часть тракта]. Далее его декомпозиция проводится вглубь, до выявления «узких мест» – критических элементов и процессов. Составление списка последних, их ранжирование и обсуждение определяют пути уменьшения шума.

В общем случае здесь могут быть использованы три традиционных направления уменьшения шумов информационного сигнала: 1) переход на менее шумящую элементную базу; 2) использование процедур фильтрации выходного сигнала; 3) выбор малозумящего алгоритма обработки сигналов.

Алгоритмические способы уменьшения шумов полезного сигнала измерительного устройства ТВГ связаны: 1) с исключением внутренних алгоритмических операций с малыми величинами (сравнимыми с шумовыми сигналами или подменяемыми ими); 2) с выбором алгоритма, реализуемого на менее шумящих элементах сигнального тракта [5].



Рис. 1. Составные части погрешностей полезного измерительного устройства ТВГ и влияющие на них факторы

Особенности фильтрации выходного полезного сигнала в ТВГ

Повышение эффективности фильтрации выходного сигнала предполагает удлинение интервала его скользящего взвешенного усреднения. Однако при этом неизбежно увеличиваются фазовые задержки – время отклика выходного измерительного сигнала по отношению к изменению измеряемой угловой скорости. Для низкоскоростных объектов это неважно, и поэтому здесь роль фильтрации сигнала очень высока. В случае же высокоскоростных объектов задержка сигнала может ухудшать устойчивость и точность контуров обратной связи. Поэтому для них отдельная фильтрация выходного сигнала часто неприменима (в системах управления по сигналу ТВГ фильтрацию осуществляет сам инерционный объект управления). Для среднескоростных объектов фильтрация проводится частично, с учетом заданных ограничений на фазовые задержки выходного сигнала. Так как ТВГ измеряет угловую скорость объектов, то с учетом предистории ее изменения может быть организована настройка порядка и параметров фильтра на свойства объекта. В простейшем варианте это могут быть традиционные физически реализуемые фильтры Баттерворта, Чебышева и др.

Для повышения эффективности фильтрации в случае среднескоростных объектов могут быть использованы как свойства инерционности волновых процессов

в ТВГ, так и свойства инерционности наблюдаемых объектов. Простейший вариант фильтрации с использованием свойств ТВГ предполагает применение взвешенного скользящего усреднения выходного сигнала на времени инерционности отклика волновых процессов ТВГ (с учетом инерционности замкнутых контуров управления). Наиболее развитый вариант фильтрации с использованием свойств ТВГ требует построения корректной математической модели его волновых процессов [6]. Далее на ее основе могут быть построены оптимальные фильтры типа Калмана и др.

Текущее измерение угловой скорости дополнительно позволяет настроить фильтр на динамические свойства объекта. При этом движение объекта удобно разложить на медленный угловой тренд $T(t)$ и быстрые гармонические колебания (высокочастотные вибрации его механической конструкции и др.). В общем случае тренд и гармоники описываются двумя взаимодополняющими моделями: низкочастотной и высокочастотной. Они могут по-разному настраиваться на динамические свойства наблюдаемых объектов. Выходным сигналом низкочастотной модели является функция тренда, на основании которой осуществляется прогноз $T(t + \Delta t)$. Высокочастотная модель призвана описывать малоамплитудные высокочастотные вибрации, приходящие на посадочные места ТВГ (несбалансированность резонатора ТВГ также может генерировать дополнительные микровибрации). Она строится на основе спектрального анализа.

Варианты уменьшения систематического дрейфа ТВГ

Основными путями уменьшения систематического дрейфа считаются: 1) повышение качества технологических процессов; 2) активное подавление квадратурной волны (квазистатическое или динамическое); 3) обработка результатов измерений с помощью функций антидрейфа (заранее измеряемых сглаженных аппроксимаций функций дрейфа [3]).

Основным недостатком последнего метода является привязка функций антидрейфа к осям модальных колебаний резонатора ТВГ (в них функции дрейфа имеют нулевые значения). При повышении качества технологических процессов изготовления ТВГ мера вырожденности модальных осей возрастает. Поэтому их угловое положение может измениться даже при незначительном возмущении температурного режима. С другой стороны, мера устойчивости функции антидрейфа к эксплуатационным условиям может указывать на несовершенство технологических процессов изготовления ТВГ.

На практике функции антидрейфа широко используются [3]. При этом желательно учитывать их зависимость от температурного режима. Заметим, что с учетом старения конструкции ТВГ при длительной его эксплуатации потребуется периодический контроль работоспособности функций антидрейфа и их перезапись при необходимости.

Основным путем уменьшения дрейфа является использование методов активного подавления квадратурной волны. Здесь различают квазистатическое и динамическое пространственно распределенное воздействие на резонатор ТВГ системой дискретных электродов.

Общее рассмотрение динамики ТВГ показывает, что квадратурная волна должна исчезать в следующих случаях [4]: 1) при восстановлении фазового синхронизма колебаний резонансных мод; 2) на угловых направлениях первой или второй (отстоит на 45 угл. град. от первой) резонансных мод.

Зависимость дрейфа D от различных факторов имеет вид [4]:

$$\dot{\psi} = -\Omega K + D, \quad D \equiv (\tilde{a}_B / a_A) [\Delta\omega_{qp} \cos 2\psi + \nu \delta\phi_{FA}] - 0,5 \sin 2\psi [\Delta\nu_{qp} + \Delta\omega_{qp} \delta\phi_{FB}], \quad (1)$$

где $\tilde{a}_B = \pm a_B$; $\Psi \equiv 2(\theta_A - \theta_0)$; θ_A, θ_0 – углы ориентации рабочей стоячей волны и одной из резонансных мод; Ω – угловая скорость корпуса ТВГ; K – масштабный коэффициент; a_A, a_B – амплитуды рабочей и квадратурной волн; $\Delta\nu_{qp} \equiv \nu_q - \nu_p$ – разность добротности; $\Delta\omega_{qp} = \Delta\omega_q - \Delta\omega_p = (\omega_q - \omega_p) (\omega_q + \omega_p) / 2\omega$ – разность частотности; ω – частота возбуждения резонансных колебаний; ω_q, ω_p – близкие резонансные частоты модальных колебаний с коэффициентами конструкционного демпфирования ν_p, ν_q ; $\delta\phi_{FA}, \delta\phi_{FB}$ – фазовые рассогласования в контурах управления рабочей и квадратурной волнами.

Отсюда можно предложить следующие варианты уменьшения систематического дрейфа: 1) в идеальном варианте требуется одновременно выполнить условия: $\Delta\omega = 0, \Delta\nu = 0, a_B = 0$ (дрейф будет отсутствовать даже при $\delta\phi_{FA} \neq 0, \delta\phi_{FB} \neq 0$); 2) уменьшение влияния разность частотности и разность добротности на дрейф достигается с помощью стремления к выполнению условия: $\sin 2\Psi = 0$ (требует квазистатическую активную подстройку модальной оси к оси рабочей стоячей волны); 3) при неуправляемом угле Ψ уменьшение влияния разность частотности и разность добротности на систематический дрейф может быть достигнуто с помощью подбора фазовой отстройки в канале управления квадратурной волной из условия: $\Delta\nu_{qp} + \Delta\omega_{qp} \delta\phi_{FB} = 0$ (на практике такая фазовая отстройка может выбираться по критерию минимизации дрейфа); 4) влияния разность частотности на вклад квадратурной волны в систематический дрейф можно уменьшить через выполнение условия: $\cos 2\Psi = 0$ (требует активной квазистатической установки модальной оси с угловой отстройкой в $\pi/8$ от направления рабочей стоячей волны); 5) уменьшение влияния квадратурной волны на систематический дрейф ТВГ может быть достигнуто с помощью подбора фазовой отстройки в канале управления рабочей стоячей волной из условия: $\Delta\omega_{qp} \cos 2\psi + \nu \delta\phi_{FA} = 0$ (на практике такая фазовая отстройка может выбираться по критерию минимизации дрейфа). Возможны и другие, комбинированные варианты уменьшения и компенсации систематического дрейфа ТВГ.

Заметим, что в приведенном анализе не учитывались множество тонких технологических и эксплуатационных погрешностей ТВГ. Их влияние стремятся уменьшить в процессе изготовления и юстировки.

Реализация систем подавления дрейфа зависит от способа поддержания стоячей волны в резонаторе. В традиционных конструкциях для этого применяется один кольцевой электрод. Подобие пространственных распределений стоячей волны упругой деформации кромки резонатора и стоячей волны управляющего усилия получается автоматически в силу прямой зависимости создаваемых усилий от величин зазоров между электродом и резонатором. Однако при нарушении равномерности зазора, а также при разность частотности может проявиться разная чувствительность стоячей волны к управляющему напряжению в отличающихся угловых направлениях.

В более поздних конструкциях стали применяться системы управления с пространственно разделенным динамическим управлением. В них поддержание рабочей стоячей волны производится системой дискретных электродов, расположенных по кольцу вокруг кромки резонатора ТВГ. Это позволяет выравнивать амплитуды

возбуждения по разным осям (независимо от разнозакорности и отстроек от резонансов), а также легче разделять контуры управления рабочей и квадратурной волнами.

Все отмеченные контуры активного подавления систематического дрейфа имеют свою инерционность. Среди них наибольшую временную постоянную имеют контуры квазистатического управления. Чтобы переходные процессы в таких контурах не конфликтовали с волновыми процессами, в ТВГ следует предусмотреть следующие три основных режима его работы: 1) высокоточная компенсация дрейфа для малых угловых скоростей объектов; 2) компенсация дрейфа только низкочастотного тренда для медленных перемещений объектов в условиях высокочастотных вибраций; 3) отключение контура компенсации дрейфа для высоких угловых скоростей вращения объекта. С учетом гармонической зависимости функции дрейфа (1) от угла, его компенсацию можно отключать, если произведение характерной скорости дрейфа на время прохождения точек его нулей меньше допустимой угловой погрешности. В общем случае выбор и смену режимов следует осуществлять автоматически по данным выходного сигнала об угловой скорости.

Контроль погрешностей волновых процессов в ТВГ

Для типового измерительного устройства ТВГ из восьми емкостных датчиков (рис. 2) форму деформации кромки резонатора $W(\theta, t)$ раскладывают в ряд Фурье [5]:

$$W(\theta, t) = C_0(t) + \sum_{i=1}^N [C_i(t)\cos i\theta + D_i(t)\sin i\theta]; \quad (2)$$

$$C_i(t) = (1/\pi) \int_0^{2\pi} [W(\theta, t)\cos i\theta]d\theta, D_i(t) = (1/\pi) \int_0^{2\pi} [W(\theta, t)\sin i\theta]d\theta.$$

При этом наибольший интерес представляют вторые угловые гармоники ($i = 2$), на которых создается рабочая стоячая волна [2]. В приближении локальных измерений: $W_i = W(\theta_i, t)$, $\theta_i = (i - 1)\pi/4$, $i = 1, \dots, 8$ здесь имеем:

$$\begin{aligned} W_1 &= C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4; W_2 = C_0 + D_2 - C_4 + (\sqrt{2}/2)\{C_1 + D_1 - C_3 + D_3\}; \\ W_3 &= C_0 + D_1 - C_2 - D_3 + C_4; W_4 = C_0 - D_2 - C_4 + (\sqrt{2}/2)\{D_1 - C_1 + C_3 + D_3\}; \\ W_5 &= C_0 - C_1 + C_2 - C_3 + C_4; W_6 = C_0 + D_2 - C_4 - (\sqrt{2}/2)\{C_1 + D_1 - C_3 + D_3\}; \\ W_7 &= C_0 - D_1 - C_2 + D_3 + C_4; W_8 = C_0 - D_2 - C_4 - (\sqrt{2}/2)\{D_1 - C_1 + C_3 + D_3\}. \end{aligned}$$

Отсюда для рабочих вторых угловых гармоник:

$$4C_2 = (W_1 + W_5) - (W_3 + W_7), 4D_2 = (W_2 + W_6) - (W_4 + W_8), \quad (3)$$

и для побочных угловых гармоник:

$$\begin{aligned} 8C_0 &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_8; \\ 4C_1 &= (W_1 - W_5) + (\sqrt{2}/2)\{W_2 - W_4 - W_6 + W_8\}; \\ 4D_1 &= (W_3 - W_7) + (\sqrt{2}/2)\{W_2 + W_4 - W_6 - W_8\}; \\ 4C_3 &= (W_1 - W_5) - (\sqrt{2}/2)\{W_2 - W_4 - W_6 + W_8\}; \end{aligned} \quad (4)$$

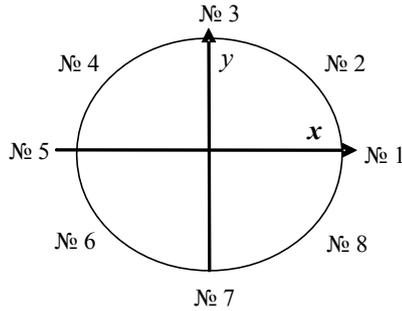


Рис. 2. Типовое измерительное устройство ТВГ

$$4D_3 = -(W_3 - W_7) + (\sqrt{2}/2)\{W_2 + W_4 - W_6 - W_8\};$$

$$8C_4 = (W_1 - W_2) + (W_3 - W_4) + (W_5 - W_6) + (W_7 - W_8).$$

Оценка C_0 указывает на среднюю величину зазора между датчиками и резонатором. Коэффициенты C_1 и D_1 отражают дисбаланс – меру влияния стоячей рабочей волны на корпус ТВГ через упругую ножку (от этого зависит отток колебательной энергии резонатора и ухудшение его добротности). Коэффициенты C_3 , D_3 , C_4 указывают на неидеальность формы рабочей стоячей волны, что может влиять на ее дрейф [4, 6].

Анализ влияния разъюстировок измерительного устройства ТВГ на угловую неравномерность масштабного коэффициента $K(\theta_A)$

В соответствии с (1): $2\dot{\theta}_A = -\Omega K(\theta_A) + D(\theta_A)$. Поэтому наиболее просто функцию дрейфа измерять при нулевой угловой скорости: $\Omega = 0 \Rightarrow 2\dot{\theta}_A = D(\theta_A)$. Измерение же зависимости $K(\theta_A)$ можно проводить при относительно высоких угловых скоростях (когда дрейф не успевает проявиться): $\Omega K_0 \geq 10 \cdot D_{\max} \Rightarrow K(\theta_A) = [-2\dot{\theta}_A + D(\theta_A)] / \Omega \approx -2\dot{\theta}_A / \Omega \approx -2\Delta\theta_A / \Delta\nu$. Для случаев малых угловых скоростей зависимость $K(\theta_A)$ можно восстанавливать непосредственно по формуле $K(\theta_A) = [-2\dot{\theta}_A + D(\theta_A)] / \Omega$, в которой функция дрейфа $D(\theta_A)$ уже известна с предыдущего шага.

Из приведенных соотношений видно, что неравномерность масштабного коэффициента $K(\theta_A)$ пропорциональна погрешностям определения угла стоячей волны θ_A . Поэтому в дальнейшем будем говорить только о ней.

В случае идеальной настройки структуры измерительного устройства, выходные сигналы косинусного и синусного каналов в соответствии с (3) [5]:

$$4C_2^{(0)} = W_1 + W_3 - W_5 - W_7, 4D_2^{(0)} = W_2 + W_6 - W_4 - W_8;$$

$$C_2^{(0)} = A \cos 2\theta_A, D_2^{(0)} = A \sin 2\theta_A; \operatorname{tg} 2\theta_A = D_2^{(0)} / C_2^{(0)}, \quad (5)$$

где A – функция колебаний рабочей стоячей волны.

При различии коэффициентов усиления сигналов от различных датчиков, а также при фазовых рассогласованиях в аналоговых операциях сложения и вычитания сигналов вместо (5) будем иметь:

$$4C_2^{(1)} = (1 + \varepsilon_1) W_1 + (1 + \varepsilon_5) W_5 - (1 + \varepsilon_3) W_3 - (1 + \varepsilon_7) W_7, \quad (6)$$

$$4D_2^{(1)} = (1 + \varepsilon_2) W_2 + (1 + \varepsilon_6) W_6 - (1 + \varepsilon_4) W_4 - (1 + \varepsilon_8) W_8,$$

где ε – малые расстройки; на практике они могут зависеть от температуры.

При нарушении топологии расположения датчиков (точности их установки на посадочные места) дополнительно к (6) получим:

$$C_2^{(2)} = C_2^{(0)} + \sum_{i=1}^8 \varepsilon_{Ci} W_i, D_2^{(2)} = D_2^{(0)} + \sum_{i=1}^8 \varepsilon_{Di} W_i. \quad (7)$$

Частным случаем (7) является нарушение угловой ортогональности (независимости) результирующих синусного и косинусного сигналов с соответствующих четверок датчиков. Вследствие этого могут проявиться взаимные наводки одного сигнала на другой при малом значении одного из них:

$$C_2^{(2)} = C_2^{(0)} + \varepsilon_C D_2^{(0)}, D_2^{(2)} = D_2^{(0)} + \varepsilon_D C_2^{(0)}. \quad (8)$$

$$(\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = D_2^{(2)} / C_2^{(2)} = (D_2^{(0)} + \varepsilon_D C_2^{(0)}) / (C_2^{(0)} + \varepsilon_C D_2^{(0)}) =$$

$$= (\sin 2\theta_A + \varepsilon_D \cos 2\theta_A) / (\cos 2\theta_A + \varepsilon_C \sin 2\theta_A) \neq \operatorname{tg} 2\theta_A.$$

Ошибка $\varepsilon_K(\theta_A) = (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} - \operatorname{tg} 2\theta_A$ будет проявляться в возмущении $K(\theta_A)$ через гармонические функции второго порядка. Ее можно алгоритмически уменьшить, улучшая ортогональность двух четверок датчиков:

$$[C_2^{(2)}]_{\text{кор}} = C_2^{(2)} - \varepsilon_C D_2^{(2)} = C_2^{(0)} (1 - \varepsilon_C \varepsilon_D); [D_2^{(2)}]_{\text{кор}} = D_2^{(2)} - \varepsilon_D C_2^{(2)} = D_2^{(0)} (1 - \varepsilon_C \varepsilon_D); (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = [D_2^{(2)}]_{\text{кор}} / [C_2^{(2)}]_{\text{кор}} = D_2^{(0)} / C_2^{(0)} = \operatorname{tg} 2\theta_A.$$

На практике наиболее выраженная зависимость $K(\theta_A)$ часто проявляется на четвертой угловой гармонике. В соответствии с (1) дрейф $D(\theta_A)$ также в наибольшей мере описывается четвертой угловой гармоникой. Некорректность определения θ_A одновременно влияет на $K(\theta_A)$ и $D(\theta_A)$.

Для анализа четвертой угловой гармоники ограничимся разложением:

$$W(\theta, t) = C_2(t) \cos 2\theta + D_2(t) \sin 2\theta + C_4(t) \cos 4\theta + D_4(t) \sin 4\theta = \quad (9)$$

$$= A_2(t) [\cos 2(\theta - \theta_A) + \varepsilon_A(\theta, t)] + B_2(t) [\sin 2(\theta - \theta_A) + \varepsilon_B(\theta, t)],$$

где $W_{\max}(\theta_A, t) = A_2(t) + A_4(t)$; $C_2^2 + D_2^2 = A_2^2 + B_2^2$; $C_4^2 + D_4^2 = A_4^2 + B_4^2$;
 $\varepsilon_A(\theta, t) = [A_4(t)/A_2(t)] \cos 4(\theta - \theta_A)$; $\varepsilon_B(\theta, t) = [B_4(t)/B_2(t)] \sin 4(\theta - \theta_A)$;
 $C_2(t) = A_2(t) \cos 2\theta_A - B_2(t) \sin 2\theta_A$, $D_2(t) = A_2(t) \sin 2\theta_A + B_2(t) \cos 2\theta_A$;
 $C_4(t) = A_4(t) \cos 4\theta_A - B_4(t) \sin 4\theta_A$, $D_4(t) = A_4(t) \sin 4\theta_A + B_4(t) \cos 4\theta_A$.

С учетом малости в (9) квадратурной волны ($B_2 \ll A_2$, $B_4 \ll A_4$):

$$C_2(t) \approx A_2(t) \cos 2\theta_A, D_2(t) \approx A_2(t) \sin 2\theta_A, \operatorname{tg} 2\theta_A \approx D_2/C_2; \quad (10)$$

$$C_4(t) \approx A_4(t) \cos 4\theta_A, D_4(t) \approx A_4(t) \sin 4\theta_A, \operatorname{tg} 4\theta_A \approx D_4/C_4,$$

где получилась связь отношений (D_2/C_2) и (D_4/C_4) через угол θ_A .

Рассмотрим расстройку коэффициентов усиления в (6):

$$4C_2^{(1)} = 4C_2 + \{\varepsilon_1 W_1 + \varepsilon_5 W_5 - \varepsilon_3 W_3 - \varepsilon_7 W_7\} = 4C_2 + \varepsilon_{CC} C_4 + \varepsilon_{CD} D_4, \quad (11)$$

$$4D_2^{(1)} = 4D_2 + \{\varepsilon_2 W_2 + \varepsilon_6 W_6 - \varepsilon_4 W_4 - \varepsilon_8 W_8\} = 4D_2 + \varepsilon_{DC} C_4 + \varepsilon_{DD} D_4.$$

Тогда $(\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = D_2^{(1)}/C_2^{(1)} = \operatorname{tg} 2\theta_A + f(2\theta_A, 4\theta_A)$;

$$f(2\theta_A, 4\theta_A) \approx (\varepsilon_{DC} C_4 + \varepsilon_{DD} D_4) / 4C_2 - (\varepsilon_{CC} C_4 + \varepsilon_{CD} D_4) / 4D_2.$$

В частности, при прохождении стоячей волной углов расположения датчиков, с учетом (10), будем иметь: $\theta_A = 0 \Rightarrow (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = (\varepsilon_{DC} A_4) / (4A_2 + \varepsilon_{CC} A_4)$; $\theta_A = \pi/4 \Rightarrow (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = (\varepsilon_{DC} A_4 - 4A_2) / (\varepsilon_{CC} A_4)$; $\theta_A = \pi/2 \Rightarrow (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = (\varepsilon_{DC} A_4) / (-4A_2 + \varepsilon_{CC} A_4)$ и т. д. Такие зависимости можно использовать при идентификации погрешностей ε_{CC} , ε_{CD} , ε_{DC} , ε_{DD} в (11).

В настоящее время выявленную зависимость $K(\theta_A)$ обычно сглаживают с помощью специальных компенсирующих функций, полученных в результате предварительного исследования конкретного образца ТВГ [3]. Однако возможна и алгоритмическая компенсация непостоянства $K(\theta_A)$. В случае работы измерительного устройства на постоянном токе это потребует оцифровывать сигналы от датчиков, а потом использовать их амплитудно-фазовую коррекцию по критерию уменьшения неравномерности $K(\theta_A)$.

При работе измерительного устройства на переменном токе необходимо выполнить переход в (3) к разностным сигналам (в них настройкой предварительно удаляется высокая частота переменного тока):

$$8C_2 = (W_1 - W_3) + (W_1 - W_7) + (W_5 - W_3) + (W_5 - W_7),$$

$$8D_2 = (W_2 - W_4) + (W_2 - W_8) + (W_6 - W_4) + (W_6 - W_8).$$

При этом система контроля (4) несовершенства волновых процессов также должна быть построена через суммирование разностных сигналов.

В заключение рассмотрим более общий случай несовершенства мод колебаний резонатора ТВГ, когда в (2) присутствуют все угловые гармоники. Вводя модаль-

ные колебания резонатора с амплитудами $p(t)$ и $q(t)$ относительно углового направления θ_0 , здесь будем иметь [6]:

$$\begin{aligned} W(\theta, t) &= p(t)f_p(\theta - \theta_0) + q(t)f_q(\theta - \theta_0) = \\ &= p(t) \Sigma \{C_{pi} \cos i\theta + D_{pi} \sin i\theta\} + q(t) \Sigma \{C_{qi} \cos i\theta + D_{qi} \sin i\theta\} = \\ &= \Sigma [C_i(t) \cos i\theta + D_i(t) \sin i\theta] = \Sigma [A_i(t) \cos i(\theta - \theta_A) + B_i(t) \sin i(\theta - \theta_A)] = A_2(t) \\ &\quad \{\cos 2(\theta - \theta_A) + \varepsilon_A(\theta, t)\} + B_2(t) \{\sin 2(\theta - \theta_A) + \varepsilon_B(\theta, t)\} = \\ &= A_2(t)f_A(t, \theta - \theta_A) + B_2(t)f_B(t, \theta - \theta_A), \end{aligned}$$

где $C_i(t) = p(t)C_{pi} + q(t)C_{qi}$, $D_i(t) = p(t)D_{pi} + q(t)D_{qi}$;

$$C_i(t) = A_i(t) \cos i\theta_A - B_i(t) \sin i\theta_A, \quad D_i(t) = A_i(t) \sin i\theta_A + B_i(t) \cos i\theta_A;$$

$$\varepsilon_A(\theta, t) = \Sigma \{[A_i(t) / A_2(t)] \cos i(\theta - \theta_A) - \cos 2(\theta - \theta_A)\};$$

$$\varepsilon_B(\theta, t) = \Sigma \{[B_i(t) / B_2(t)] \sin i(\theta - \theta_A) - \sin 2(\theta - \theta_A)\}.$$

Углом θ_A рабочей стоячей волны считаем тот, при котором получается наибольшее значение амплитуды стоячей волны: $W_{\max}(\theta_A, t) = \Sigma A_i(t)$. При этом в расчетном угле $(\text{tg } 2\theta_A)_{\text{выч}} = D_2^{(1)} / C_2^{(1)}$ с учетом (6) или (7) могут проявиться все угловые гармоники ($i\theta_A$).

Заключение. Таким образом, в настоящей статье с системных позиций проанализирован широкий спектр потенциальных причин погрешностей информационного сигнала ТВГ, а также методов их компенсации. Показано, что для повышения точности информационного сигнала следует в систему управления ТВГ включать элементы интеллектуального выбора режима работы его внутренних контуров и режима дополнительной фильтрации выходных сигналов. В этом случае могут быть использованы алгоритмы нечеткой логики с обратной связью по измеряемым угловым скоростям наблюдаемых объектов. Также отмечено, что существующие в настоящее время способы высокоточной настройки ТВГ [3] могут давать обратный эффект при длительной эксплуатации ТВГ с учетом старения его механических и электронных компонентов. Поэтому здесь не исключена потребность в разработке технологических процедур периодического контроля и перенастройки ТВГ. Приведенные в статье зависимости могут быть использованы при разработке системы алгоритмической перенастройки структур обратных связей.

Библиографические ссылки

1. Журавлев В. Ф., Климов Д. В. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. – 125 с.
2. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 168 с.
3. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе твердотельного волнового гироскопа / Г. И. Джанджгава, К. А. Бахонин, Г. М. Виноградов и др. // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 1. – С. 22–32.
4. Шишаков К. В. Анализ систематического дрейфа стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 144–147.
5. Шишаков К. В. Повышение помехоустойчивости алгоритма обработки измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 76–79.
6. Шишаков К. В. Модели объекта управления для системы поддержания стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 3. – С. 144–147.

* * *

K. V. Shishakov, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

System analysis of information signal errors of solid wave gyro and methods of their compensation

The paper describes a solid wave gyro with a measuring device, consisting of eight capacitor sensors. System analysis of main errors for information signal (systematic drift, scale factor inconstancy, noises) is carried out. Methods of their compensation are investigated.

Keywords: solid wave gyro, measuring device, algorithms of signals processing

Получено: 26.01.2012