

УДК 531.383

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-35-46

Автоматизированный контроль физических и точностных параметров чувствительных элементов твердотельных волновых гироскопов

Ф. И. Спиридонов, аспирант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. В. Шишаков, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Описана первая комплексная версия созданного программно-аппаратного стенда автоматизации сквозного производственного контроля физических параметров чувствительных элементов твердотельных волновых гироскопов для повышения точностных характеристик их выходных сигналов.

Приведена общая характеристика системы контроля физических и точностных параметров чувствительных элементов на производстве. Для этого обобщенно представлен процесс изготовления чувствительного элемента и дана характеристика процедур определения его физических и точностных параметров.

Основное внимание уделено созданию программного обеспечения «hrgCheck» для системы автоматизированного контроля физических и точностных параметров. Для этого приведены диаграмма состояния системы; алгоритмы работы программы, сбора данных, вычисления физических параметров, вычисления точностных параметров; структурные схемы программного обеспечения и блока управления измерениями, а также интерфейс пользователя программы.

В качестве демонстрационного примера работоспособности созданного программного обеспечения проведена пробная проверка эффективности использования при контроле физических и точностных параметров чувствительных элементов твердотельных волновых гироскопов. Для одного из датчиков были выполнены замеры 37 выбегов стоячей волны, для чего потребовалось 2 часа 15 минут. Показана зависимость результатов идентификации от начальных условий измерений, что требует выполнения избыточной серии экспериментов.

Полученные данные о физических и точностных параметрах чувствительных элементов показывают целесообразность внедрения разработанного программного обеспечения в производственный цикл сквозного контроля выпускаемых гироскопов. Это позволит достичь снижения трудоемкости и затрат при производстве, повышения точности изделий и снижения возможности образования брака. Заложенные возможности совершенствования, развития и расширения позволяют рассматривать его в общем тренде обновления технологий производственных процессов по выпуску высокоточных твердотельных волновых гироскопов.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, программное обеспечение, автоматизация производства, технологические процессы.

Введение

Неотъемлемой частью современных высокотехнологических производств навигационных приборов являются активно внедряемые системы и комплексы автоматизации производственных процессов. В том числе и при производстве высокоточных волновых твердотельных гироскопов (ВТГ [1, 2]; на производстве также используют сокращение ТВГ [3]) актуальна разработка информационного, алгоритмического и машинного обеспечения для создания автоматизированных технологических процессов и производств [4, 5], а также систем управления ими. С их последовательной увязкой по иерархическим уровням и интеграцией в единую систему сбора и обработки данных (с выходом на оперативное управление) связывают повышение точности гироскопов и снижение себестоимости их производства – за счет организации и автоматизации сквозного контроля производствен-

ных операций [6–8] и их настройки. Так как волновой твердотельный гироскоп является высокотехнологичным изделием, для построения эффективной системы контроля требуется использование наукоемкой методологической основы [9–11], опирающейся на современные исследования в этой области как в нашей стране, так и за рубежом [12–16 и др.].

Целью статьи является описание разработанного программно-аппаратного стенда автоматизации сквозного производственного контроля физических и точностных параметров чувствительных элементов ТВГ для повышения точностных характеристик их выходных сигналов.

Она является продолжением и развитием статьи авторов «Разработка информационно-сетевого комплекса для сопровождения производственных операций контроля, диагностики и настройки точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов», опубликован-

ной в первом номере этого журнала в текущем году. Ниже более детально раскрывается его построение для автоматизации производственного контроля физических параметров чувствительных элементов (ЧЭ) – кварцевых резонаторов, которые в первую очередь влияют на точностные характеристики выходных сигналов гироскопов.

Общая характеристика системы контроля физических и точностных параметров ЧЭ (датчиков) на производстве

При построении эффективной системы контроля принято выделять следующие основные погрешности, оказывающие влияние на уход стоячей волны в резонаторе гироскопа: систематические погрешности масштабного коэффициента, разночастотность и разнодобротность полусферического резонатора, погрешности систем управления и измерения резонансных процессов, а также несистематические погрешности выходного сигнала. Причем такой кон-

троль должен эффективно проводиться на каждом технологическом этапе изготовления чувствительных элементов гироскопов.

Обобщенно процесс изготовления чувствительных элементов (датчиков) представлен структурной схемой на рис. 1. В ней выделены этапы изготовления деталей (A0), сборки и доработки датчика (A1), настройки (A2).

На этапе A0 производятся: изготовление корпуса датчика, резонатора, основания и элементов, входящих в датчик. А также полусферический резонатор проходит технологические операции шлифовки, полировки, травления, напыления и балансировки, каждая из этих операций оказывает влияние на геометрические и на физические параметры резонатора. Кроме того, на этом этапе производится изготовление основания датчика электродов. Качество их напыления и формирования напрямую оказывает влияние на контуры измерения и управления датчика.

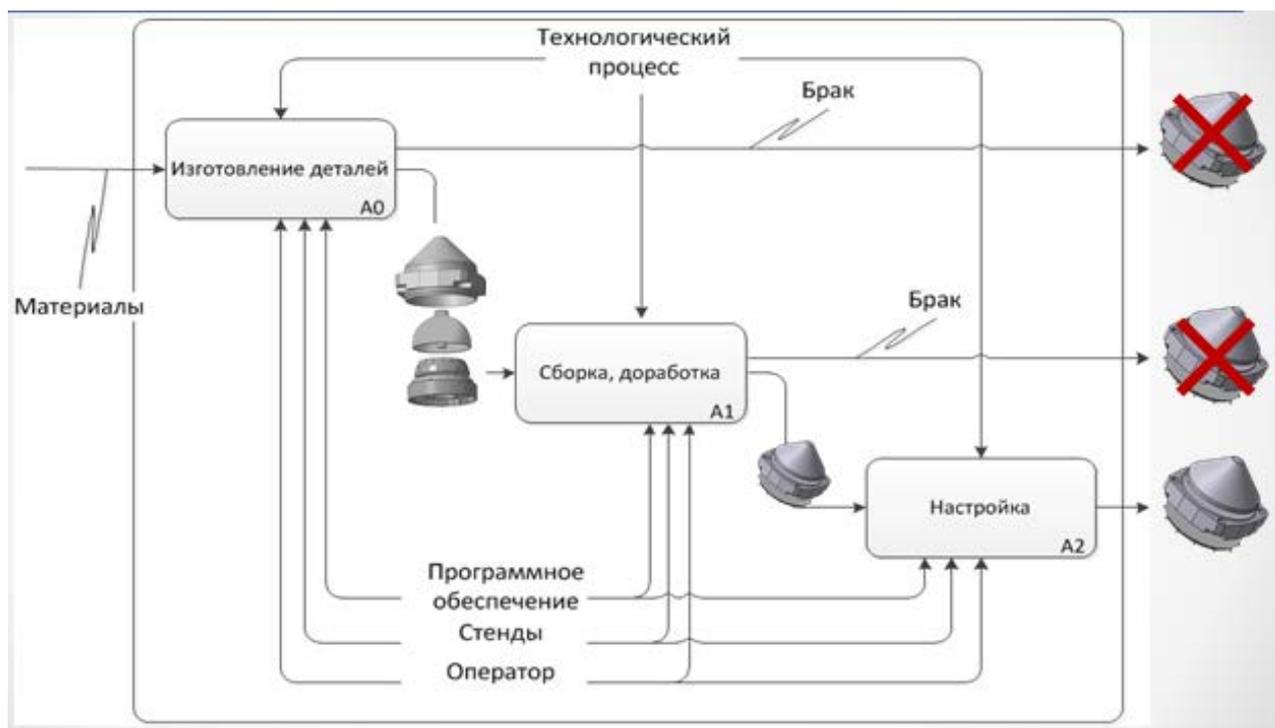


Рис. 1. Схема изготовления чувствительного элемента ТВГ

Fig. 1. Scheme of manufacturing a sensitive element of TVG

На этапе A1 производится вклейка резонатора в основание. От корректности выполнения операции вклейки и от выбранной марки клея зависит параметр добротности, влияющий на дрейф выходного измерительного сигнала.

На этапе A2 выполняется настройка систем измерения и управления. Качество выполнения

этих операций также вносят вклад в точностные параметры изделия.

На основе многолетнего практического опыта выявлено, что очень важно контролировать физические и точностные параметры чувствительных элементов на всем процессе изготовления гироскопов.

Характеристика процедур определения физических и точностных параметров ЧЭ ТВГ

Для определения физических параметров ЧЭ наиболее эффективно использовать режим свободных колебаний (так называемый режим свободного выбега гироскопа), при котором отсутствуют внешние воздействия на резонатор.

В этом режиме: 1) производится возбуждение резонатора до рабочей амплитуды колебаний; 2) выключается подача внешней энергии (начинается этап выбега); 3) сразу после выключения производится измерение колебаний резонатора гироскопа; 4) вычисляются медленно меняющиеся переменные согласно выбранной математической модели (варианты расчетных методик приведены, например, в статье авторов в третьем номере этого журнала за прошлый год); 5) производятся вычисления физических параметров резонатора согласно выбранной математической модели.

На практике было замечено, что обусловленность методик вычисления физических параметров зависит от углового положения измерений. Так, если положение рабочей стоячей волны совпало с одной из осей жесткости, то требуется отдельная коррекция методики вычисления физических параметров. Поэтому при проведении измерений желательнее увеличить количество измеряемых угловых положений. Для этого появятся еще два пункта в процедуре – поворот волны в разные угловые положения измерений и усреднение результатов по этим всем угловым положениям.

При определении точностных параметров гироскопического датчика (дрейф и шум сигнала) используется режим с активной коррекцией разночастотности резонатора. В нем измеряется оставшаяся разнородность резонатора.

В этом режиме: 1) производится поворот стоячей волны в заданное угловое положение; 2) измеряется получившаяся угловая ориентация волны; 3) выполняются измерения ухода волны (систематический дрейф) от начального положения и производятся расчеты шумовой составляющей сигнала.

Обобщая эти два режима, получаем шаги следующего общего алгоритма измерения физических и точностных параметров: 1) поворот в угловое положение измерения; 2) измерение положения угловой ориентации волны; 3) вычисление точностных параметров гироскопического датчика; 4) измерение колебаний резонатора в режиме свободного выбега (при отключении внешних источников энергии); 5) вычисление

медленно меняющихся переменных снимаемых сигналов; 6) вычисление физических параметров датчика; 7) если прошли не все угловые положения измерений, то переход к пункту 1; 8) вывод результатов измерений.

Для их выполнения нужно создание специального программно-аппаратного комплекса. От его аппаратной части требуется: изменение угловой ориентации волны за счет системы управления или за счет внешней подачи углового перемещения (поворотный стол); изменение режимов работы датчика ТВГ (рабочий режим, режим выбега); выдача данных управляющих (контуров управления) и измеряемых сигналов, а также отправка информации о текущем режиме работы датчика ТВГ. А от его программной части: прием данных со стенда, вычисления физических и точностных параметров по измеренным данным, а также оценка точности измерения.

В итоге аппаратную часть будет представлять специализированный стенд, а программную часть – программное обеспечение (ПО) «hrgCheck». Ниже подробно опишем только программную часть автоматизированной системы контроля параметров гироскопического датчика.

ПО «hrgCheck» для системы автоматизированного контроля физических и точностных параметров ЧЭ ТВГ

Для решения задачи оценки точностных и физических параметров по измеренным данным со стенда программный продукт должен обладать следующими функциями:

1) выполнять в процессе измерений непрерывный прием данных со стенда по интерфейсам взаимодействия (например, COM, USB, Ethernet, LPT);

2) при необходимости принимать данные с устройств аналого-цифрового преобразования (Lcard, ZET и т. д.);

3) выполнять оценку следующих физических параметров датчика ТВГ: частота, добротность, разнородность, разночастотность, оси добротности, оси жесткости;

4) производить оценку доверительных интервалов для вычисленных значений физических параметров;

5) вычислять скорость дрейфа по значениям физических параметров;

6) оценивать значение скорости дрейфа и шума (СКО);

7) вычислять средние значения управляющих сигналов;

8) интерпретировать вычисленные значения физических и точностных параметров на графиках;

9) также к одной из задач программного продукта будет относиться отслеживание работы станда.

Требования к программному продукту связаны с основными решаемыми задачами: непрерывный прием данных; вычисление физических и точностных параметров; интерпретация принятых и вычисленных данных на графиках; управление процессом измерения с использованием графического интерфейса; вывод отчетов о результатах проверки датчика ТВГ.

Для решения таких задач программное обеспечение строится на многопоточной архитектуре по следующим причинам: 1) прием данных

должен производиться непрерывно; 2) расчетные алгоритмы могут иметь высокую вычислительную сложность, вследствие чего время вычислений может быть продолжительным, и в результате интерфейс программы будет находиться в «зависшем» состоянии; 3) каждый класс решаемых задач имеет реализацию в отдельном программном модуле. Несмотря на то, что создание многопоточного приложения осложнено необходимостью синхронизации потоков, все это оправдывается повышающейся эффективностью программного обеспечения. Диаграмма состояний программной системы представлена на рис. 2.

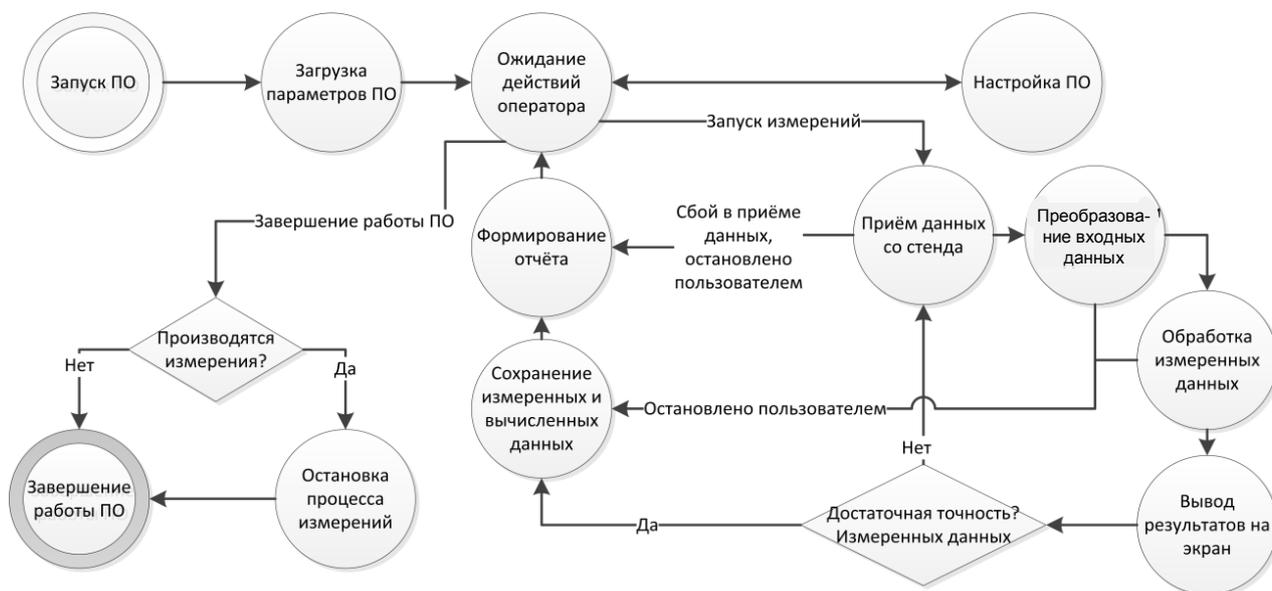


Рис. 2. Диаграмма состояния системы

Fig. 2. System state diagram

Для выполнения всех поставленных требований в программном продукте используются свои алгоритмы для организации хранения информации и вычисления физических и точностных параметров датчиков ТВГ. Охарактеризуем основные из них.

Алгоритм работы программы. Алгоритм процесса вычисления физических и точностных параметров можно разделить на основные этапы: 1) сбор данных и разделение информации; 2) вычисление значений переменных для измеренных выбегов; 3) вычисление физических параметров по вычисленным значениям медленно меняющихся переменных; 4) вычисление доверительных интервалов по вычисленным значениям физических параметров; 5) вычисление точностных параметров по вычисленным физическим параметрам; 6) вычисление точностных параметров по измеряемым данным в рабочем режиме станда.

Общий алгоритм процесса определения физических и точностных характеристик представлен в виде блок-схемы, изображенной на рис. 3.

Алгоритм сбора данных. Для решения поставленных задач станд должен обладать возможностью работать с датчиком ТВГ на различных режимах. Так, для вычисления физических параметров нужны данные, которые получены в режиме свободного выбега. Для вычисления точностных параметров требуется режим с активной компенсацией разночастотности (рабочий режим ТВГ). Соответственно, при приеме данных возникает потребность разграничения получаемой информации, что можно выполнить с помощью организации хранения данных с использованием метаданных. При этом данные будут записываться и храниться в общем массиве, а метаданные будут разграничивать хранимую информацию.

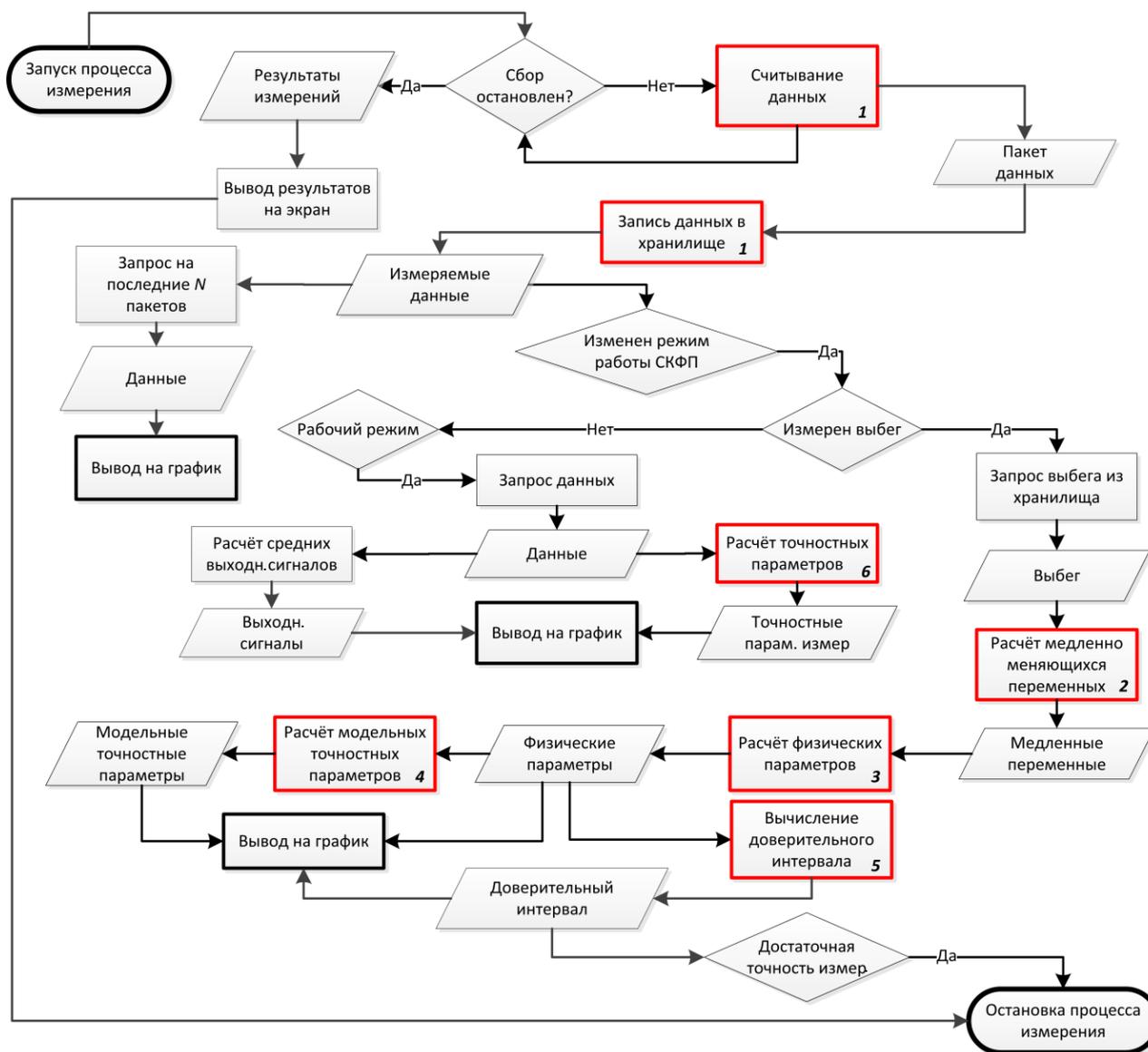


Рис. 3. Схема процесса измерения физических и точностных параметров
 Fig. 3. Diagram of the process of measuring physical and precision parameters

При непрерывном приеме данных возникает вопрос о динамическом использовании оперативной памяти вычислительного устройства. Данная задача решается путем разделения общего объема данных на маленькие блоки. Данные записываются в блок до тех пор, пока он не заполнится. После его заполнения производится выделение памяти под новый блок данных. В этом случае метаданные хранят информацию о том, какие данные и в каких блоках хранятся. Данный способ хранения информации широко используется в файловых системах. Схему организации хранения данных можно увидеть в правой части рис. 4.

Программное обеспечение взаимодействует со стендом с помощью API-операционной систе-

мы (ОС), предоставляющей доступ к интерфейсам (COM, USB, Ethernet, LPT) промышленного (персонального) компьютера. Взаимодействие с API-функциями ОС возложено на отдельный программный модуль «Источник данных» (“SourceData”). Данные со стенда передаются в виде набора байт. Для обработки этих данных изначально требуется произвести конвертацию данных согласно протоколу обмена данными. В результате конвертирования получаем пакет полезных данных, пригодных для дальнейшей обработки. После формирования пакета данных они отправляются в систему хранения и распределения информации (“FrameData”). Получившаяся схема сбора, хранения и распределения данных показана на рис. 4.

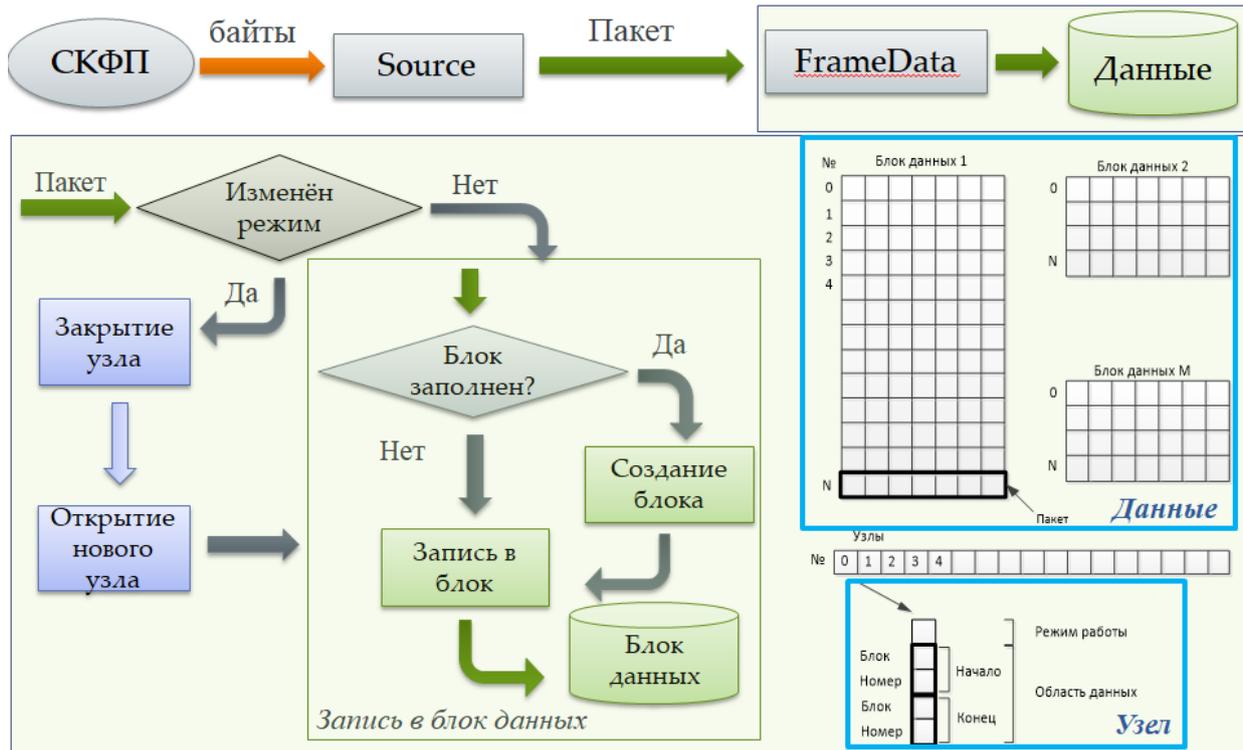


Рис. 4. Последовательность измерения физических и точностных параметров
 Fig. 4. Sequence of measurement of physical and accuracy parameters

Алгоритм вычисления физических параметров. В настоящее время идентификацию физических параметров ЧЭ (частота, разночастотность, разнолобортность, добротность, оси жесткости, оси вязкости и др.) принято выполнять в три этапа: 1) выбор корректной математической модели; 2) вычисление медленно меняющихся переменных; 3) решение задачи идентификации, сводящейся к системе уравнений, построенных на основе выбранной математической модели.

В соответствии с общей схемой определения физических параметров принят следующий процедурный алгоритм: 1) система сбора и распределения и информации определяет, был ли измерен выбег; 2) в случае измерения выбега, запрашиваются данные выбега; 3) для выбега вычисляются медленно меняющиеся переменные; 4) после этого производится вычисление физических параметров; 5) после вычислений физических параметров вычисляются доверительные интервалы для вычисленных значений физических параметров. Общая схема вычисления физических параметров представлена на рис. 5.

Его пояснение проведем на примере наиболее часто используемой математической модели эквивалентного осциллятора [17]:

$$\begin{aligned} \dot{a} &= -\tau \cdot a - 2 \cdot \Delta\tau \cdot a \cdot \cos 2(\theta - \varphi_\tau) - \\ &\quad - \Delta f \cdot b \cdot \sin 2(\theta - \varphi_{\Delta f}), \\ \dot{b} &= -\tau \cdot b + 2 \cdot \Delta\tau \cdot b \cdot \cos 2(\theta - \varphi_\tau) + \\ &\quad + \Delta f \cdot a \cdot \sin 2(\theta - \varphi_{\Delta f}), \end{aligned} \quad (1)$$

где a , b , θ – элементы эквивалентного двумерного осциллятора, τ – затухание, $\Delta\tau$ – неравномерность затухания, φ_τ – характеризует ось вязкости, Δf – разночастотность, $\varphi_{\Delta f}$ характеризует ось жесткости.

Для нее алгоритм вычисления физических параметров будет следующим. После измерения выбега вычисляются элементы двумерного осциллятора a , b , θ . Далее полученные результаты отправляются на этап определения физических параметров. На этом этапе изначально для текущего выбега строится разностная схема уравнения (1), которая сводится к избыточной системе уравнений вида $h = A \cdot r$. Последняя решается с использованием метода наименьших квадратов, в результате чего получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$h = A \cdot r \Rightarrow r = (A^T \cdot A)^{-1} A^T h \Rightarrow r = M^{-1} \cdot H. \quad (2)$$

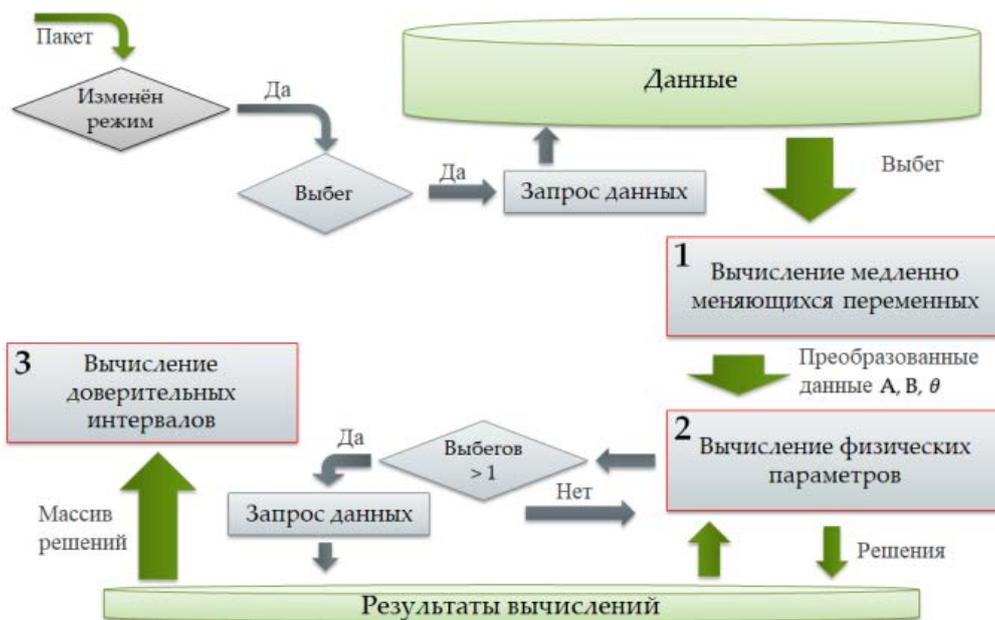


Рис. 5. Последовательность вычисления физических параметров
 Fig. 5. Sequence of calculation of physical parameters

Производится проверка на наличие уже вычисленных физических параметров. Если они еще не рассчитаны, то производится вычисление физических параметров путем решения выписанной системы линейных алгебраических уравнений. Далее полученные значения вектора решений r , матрицы M и вектора H записываются в систему хранения данных. Если же измеренных выбегов больше одного, то вычисление физических параметров сводится к решению своей системы уравнения. При этом заметим, что для каждого выбега требуется сохранение матрицы M и вектора H .

После определения физических параметров производится оценка доверительных интервалов их значений. Для этого вычисляются среднеквадратичные отклонения S , от среднего и доверительный интервал по нормальному закону распределения $P = K \cdot S_r$, где $K = 1,96$ для нормального закона распределения (95 %).

Алгоритм вычисления точностных параметров. По вычисленным значениям физических параметров можно произвести оценку скорости ухода стоячей волны. Если в приборе работает контур управления разночастотностью, то при оценке скорости ухода волны можно учитывать только компоненту, связанную с диссипативными силами. В этом случае скорость ухода стоячей волны можно грубо оценить, например, с использованием следующей упрощенной формулы:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\sin 4(\theta - \varphi_\tau)}{4} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right), \quad (3)$$

где φ_τ характеризует ось вязкости, τ_1 – максимальное значение затухания, τ_2 – минимальное значение затухания.

Вычисления дрейфа и шума гироскопического датчика по изменению ухода стоячей волны показаны на рис. 6.

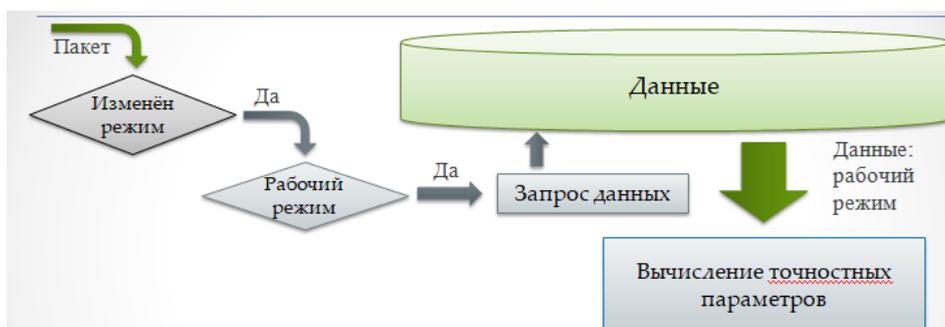


Рис. 6. Последовательность вычисления точностных параметров
 Fig. 6. The sequence of calculating the accuracy parameters

Сначала производится проверка режима работы станда. После того как режим работы станда сменился с рабочего на режим выбега, производится запрос данных рабочего режима. Далее выполняется вычисление ухода стоячей волны с помощью линейной аппроксимации. На конечном этапе выполняется расчет шума.

Структурная схема программного обеспечения. Программное обеспечение взаимодействует с тремя основными объектами: оператор, станд

и файловая система операционной системы. Взаимодействие программного продукта с объектами производится с помощью основных программных систем. К системам ПО относятся: блок пользовательского интерфейса, блок интерпретации результатов измерений, а также блок управления процессом измерений. Структурная диаграмма программного обеспечения приведена на рис. 7.

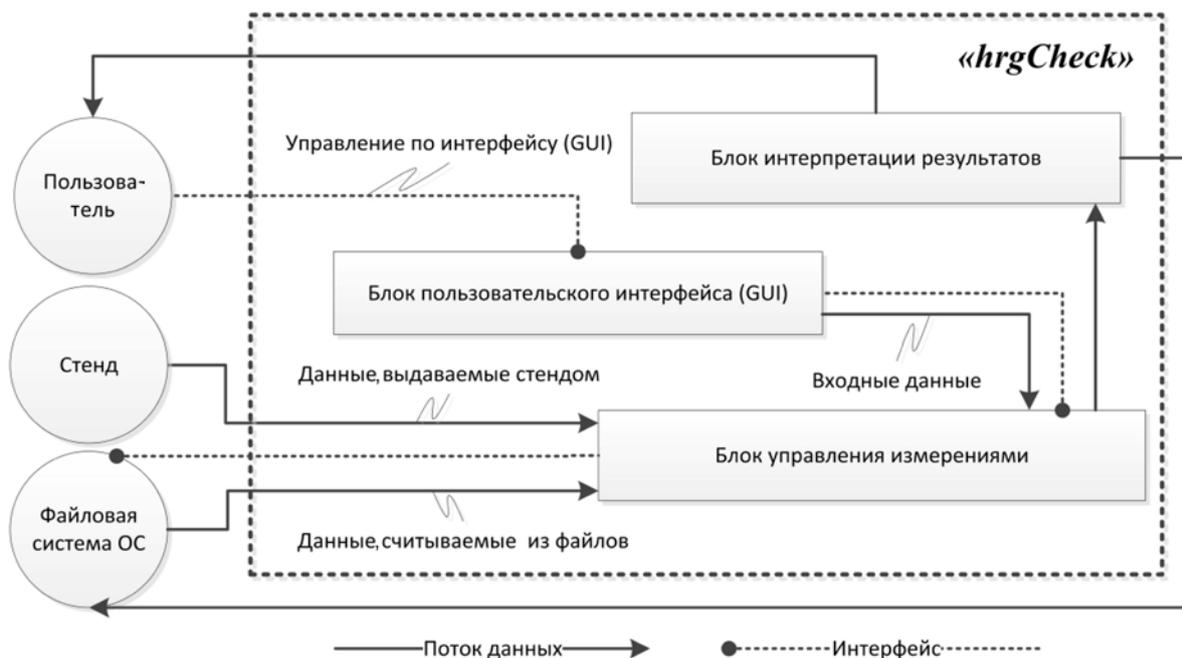


Рис. 7. Структура программного обеспечения «hrgCheck»

Fig. 7. Structure of the hrgCheck software

Рассмотрим более подробно систему управления процессом измерения. Под этой системой будем понимать комплекс программных модулей, предназначенных для решения трех основных задач: 1) сбор и хранение данных; 2) вычисление физических параметров; 3) вычисление точностных параметров датчиков ТВГ.

Решение каждой задачи желательно реализовать в отдельном программном модуле. Тогда система управления процессом измерения будет состоять из соответствующих трех основных компонентов. Структура системы управления процессом измерения приведена в виде диаграммы IDEF0 на рис. 8. Помимо компонентов системы управления на диаграмме изображены также объекты взаимодействия и классы.

Интерфейс программы. Пользовательский интерфейс программного продукта состоит из следующих основных вкладок (рис. 9): настрой-

ка; отображаемые со станда данные; физические параметры; точностные параметры; выходные сигналы.

Пример: использование системы при контроле физических и точностных параметров ЧЭ ТВГ

В качестве примера для одного из датчиков (с условным номером 1) была выполнена проверка работоспособности созданного ПО для вычисления физических и точностных параметров ЧЭ. При этом были промерены 37 выбегов, для чего потребовалось 2 часа 15 минут.

Получившиеся графики с результатами вычислений физических параметров приведены на рис. 10. По оси абсцисс отображены номера выбегов, по оси ординат – вычисленные значения физических параметров.

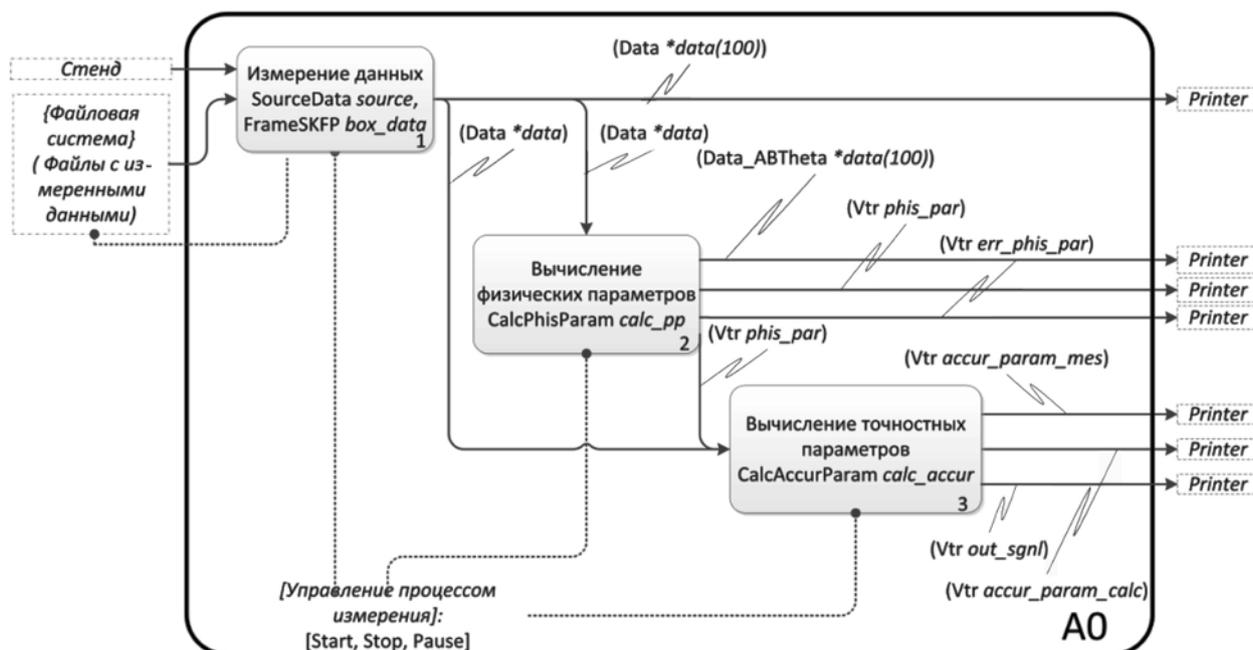


Рис. 8. Структура блока управления измерениями
 Fig. 8. Structure of the measurement control unit

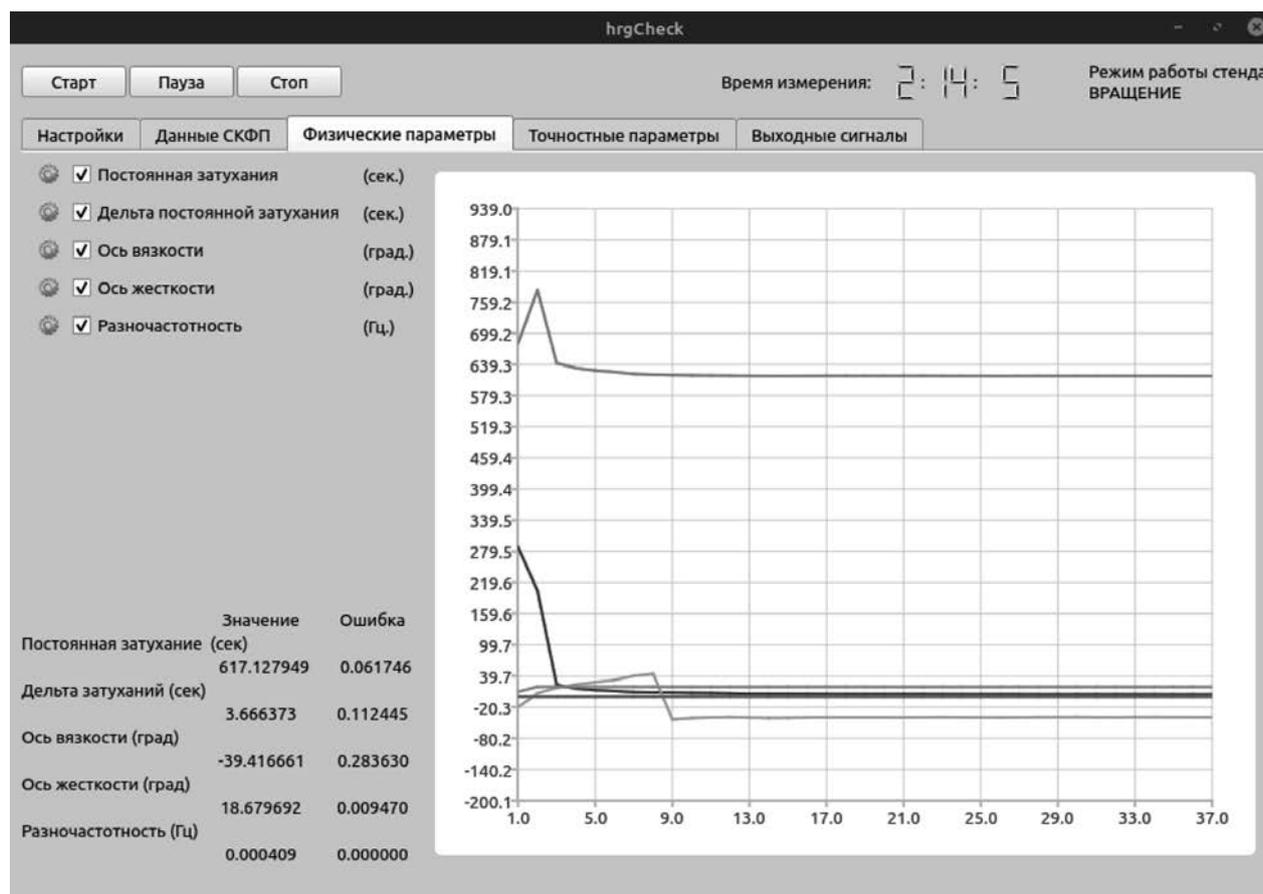


Рис. 9. Интерфейс пользователя «hrgCheck»
 Fig. 9. User interface "hrgCheck"

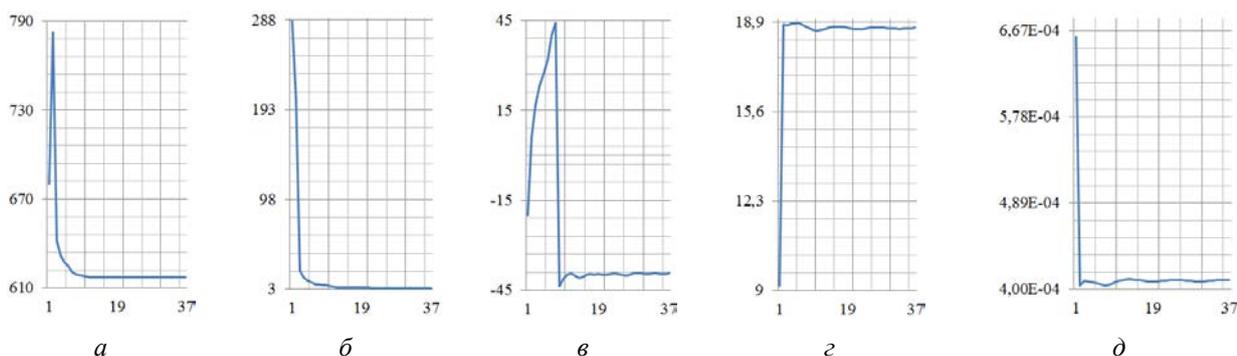


Рис. 10. Зависимости результатов вычислений физических параметров от выставленных углов измерений стоячей волны: *a* – затухания, *б* – дельты затухания, *в* – оси вязкости, *г* – оси жесткости, *д* – разностотности (все единицы измерений расшифрованы в таблице)

Fig. 10. Dependences of the results of calculating the physical parameters on the set angles of measurements of the standing wave: *a* - damping, *б* - damping deltas, *в* - viscosity axes, *г* - stiffness axes, *д* - different frequencies (all units of measurement are deciphered in the table)

Из них видно, что первые измерения были выполнены в углах, близких к осям жесткости, когда приведенная выше расчетная схема имеет плохую вычислительную обусловленность. Для

других выставяемых углов измерений результаты получились близкими.

Дополнительно более подробно результаты вычислений для некоторых «измерительных запусков» показаны в таблице.

Вычисленные значения физических параметров для некоторых номеров измерений выбега стоячей волны

Calculated values of physical parameters for some numbers of standing wave stick out measurements

Вычисляемые параметры / № выбега		1	2	3	10	20	37
Физические параметры	Затухание (с)	680,31	782,53	641,69	618,17	617,35	617,12
	Дельта затухания (с)	287,16	203,56	22,56	6,9	4,5	3,66
	Ось вязкости (гр.)	-19,89	6,13	16,85	-40,97	-39,77	-39,41
	Ось жесткости (гр.)	9,16	18,80	18,78	18,59	18,65	18,67
	Разностотность(Гц)	$6,61 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-4}$	$4,08 \cdot 10^{-4}$	$4,07 \cdot 10^{-4}$	$4,08 \cdot 10^{-4}$	$4,09 \cdot 10^{-4}$
Ошибка вычислений	Затухание (сек.)	–	235,81	19,18	0,54	0,19	0,06
	Дельта затухания (с)	–	77,41	20,18	0,85	0,3	0,11
	Ось вязкости (гр.)	–	16,65	3,51	1,44	0,75	0,28
	Ось жесткости (гр.)	–	0,47	0,018	0,036	0,018	0,009
	Разностотность(Гц)	–	29,397	$5,98 \cdot 10^{-7}$	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$5,05 \cdot 10^{-7}$	$2,69 \cdot 10^{-7}$

Заключение

Таким образом, в статье описана первая комплексная версия созданного программно-аппаратного стенда автоматизации сквозного производственного контроля физических параметров чувствительных элементов ТВГ для повышения точностных характеристик их выходных сигналов. Процесс изготовления чувствительного элемента и характеристика процедур определения его физических и точностных параметров легли в основу такого контроля.

Созданное программное обеспечения «hrgCheck» включает алгоритмы работы программы, сбора данных, вычисления физических параметров, вычисления точностных параметров; структурные схемы программного обеспечения и блока управления измерения-

ми; а также интерфейс пользователя программы.

Полученные с его помощью данные о физических и точностных параметрах чувствительных элементов показывают целесообразность внедрения этой системы в производственный цикл сквозного контроля выпускаемых гироскопов. Это позволит достичь снижения трудоемкости и затрат при производстве, повышения точности изделий и снижения возможности образования брака.

В ходе пробной проверки эффективности использования программного обеспечения «hrgCheck» были выполнены для одного из датчиков замеры 37 выбегов стоячей волны, для чего потребовалось 2 часа 15 минут. Показана зависимость результатов идентификации от на-

чальных условий измерений, что требует выполнения избыточной серии экспериментов.

Заложенные в программно-аппаратном стенде автоматизации сквозного производственного контроля возможности совершенствования, развития и расширения позволяют рассматривать его в общем тренде обновления технологий производственных процессов по выпуску высокоточных твердотельных волновых гироскопов.

Библиографические ссылки

1. Климов Д. М., Журавлев В. Ф., Жбанов Ю. К. Кварцевый полусферический резонатор (Волновой твердотельный гироскоп). М. : ФГБУН ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2017. 193 с.

2. Меркурьев И. В., Подалков В. В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопа. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2009. 228 с.

3. Трутнев Г. А., Назаров С. Б., Перевозчиков К. К., Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2020. № 1 (130). С. 20–63.

4. Журавлев В. Ф. ВТГ: современное состояние, некоторые аспекты // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2011. № 2 (33). С. 118–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26104278>.

5. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография. М. : Радиотехника, 2014. 176 с.

6. Гавриленко А. Б., Меркурьев И. В., Подалков В. В. Экспериментальные методы определения параметров вязкоупругой анизотропии резонатора волнового твердотельного гироскопа // Вестник МЭИ. 2010. № 5. С. 13–19.

7. Определение параметров резонатора твердотельного волнового гироскопа и моделирование по экспериментальным данным / А. В. Кривов, Р. В. Мельников, Ф. И. Спиридонов, Г. А. Трутнев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. № 2, вып. 1. С. 22.

8. Балансировка полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов методом химического травления / М. А. Басараб и др. // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 88, № 1. С. 61–70.

9. Маслов А. А., Маслов Д. А., Меркурьев И. В. Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа с учетом нелинейности колебаний резонатора // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 5.

10. Маслов Д. А. Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа при медленно меняющейся частоте вынужденных колебаний // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Т. 70, № 10.

11. Маслов Д. А. Идентификация и компенсация погрешностей волнового твердотельного гироскопа с электростатическими датчиками управления // Машиностроение и инженерное образование. 2018. № 1. С. 20–26.

12. Численное исследование резонаторов ВТГ различной формы при наличии дефектов различного типа / Д. С. Вахлярский и др. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 10. С. 1–22.

13. Anchor loss in Hemispherical Shell Resonator / A. Darvishian et al. // Journal of Microelectromechanical Systems. 2017. Vol. 26. No. 1. P. 51-66.

14. Ning Liu, Zhong Su. Research on Eigenvalue Analysis Method in MultiSurface Metal Shell Vibratory Gyro // IEEE Access. VOLUME 7. 2019. Doi:10.1109/ACCESS.2019.2943513.

15. Zhennan Wei, Guoxing Yi, Yan Huo, Ziyang Qi, Zeyuan Xu. The Synthesis Model of Flat-Electrode Hemispherical Resonator Gyro // Sensors 2019. 19. 1690. doi:10.3390/s19071690 www.mdpi.com/journal/sensors.

16. Yan Huo, Shunqing Ren, Guoxing Yi, Changhong Wang. Establishment of equations of motion of 4 hemispherical resonator and analysis of frequency 5 split caused by slight mass non-uniformity // Chinese Journal of Aeronautics, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.04.011>.

17. Журавлев В. Ф. Двумерный осциллятор Ван дер Поля с внешним управлением // Нелинейная динамика. 2016. Т. 12, № 2. С. 211–222. DOI: 10.20537/nd1602004.

References

1. Klimov D.M., Juravlev V.F., Jbanov Y.K. *Kvartsevyi polusfericheskiy resonator (Volnovoi tverdotel'nyy giroskop)* [Quartz hemispherical resonator (Hemispherical resonator gyroscope)]. Moscow: FGBUN IPMehim. A. Y. Ishlinskogo, 2017 (in Russ.).

2. Merkur'ev I.V., Podalkov V.V. *Dinamika mikro-mekhanicheskogo i volnovogo tverdotel'nogo giroskopa* [Dynamics of micromechanical and hemispherical resonator gyro]. Moscow: FIZMATLIT, 2009 (in Russ.).

3. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Carriers K.K. [The Removable System and ways to measure the vibrations of the resonator of solid wave gyroscopes] *Vestnik MGTU. Ser. Priborostroyeniye* [Vestnik of Moscow State University by N.E. Bauman. Ser. Instrumentation]. 2020. No. 1. Pp. 20-63 (in Russ.).

4. Juravlev V.F. [VTG: current state, some aspects]. *Aktual'nye problemy aviatsionnykh i aerokosmicheskikh sistem: protsessy, modeli, eksperiment* [Proc. Current problems of aviation and aerospace systems: processes, models, experiment]. 2011. No. 2. Pp. 118-123 (in Russ.).

5. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoy tverdotel'nyy giroskop. Teoriya i tehnologii* [Hemispherical resonator gyro. Theory and technology]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2014 (in Russ.).

6. Gavrilenko A.B., Mercuriev I.V., Dopakov V.V. [Experimental methods of determining the parameters of viscous anisotropy of the resonator of the wave solid gyroscope]. *Vestnik MEI*. 2010, no. 5. Pp. 13-19 (in Russ.).
7. Krivov A.V., Melnikov R.V., Spiridonov F.I., Trutnev G.A. [Determining the parameters of the resonator of solid wave gyroscope and modeling on experimental data]. *Vestnik of Kazan State Technical University A.N. Tupolev*. 2019, no. 2, issue 1, p. 22 (in Russ.).
8. Basarab M.A. et al. [Balancing hemispheric resonators of wave solid state gyroscopes by chemical etching]. *Gyroscopy and navigation*. 2015, vol. 88, no. 1. Pp. 61-70 (in Russ.).
9. Maslov A.A., Maslov D.A., Mercuriev I.V. [Identification of wave solid gyroscope parameters taking into account nonlinear vibrations of the resonator]. *Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2014. No. 5 (in Russ.).
10. Maslov D.A. [Identification of wave solid gyroscope parameters at a slowly changing frequency of forced vibrations]. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2017. Vol. 70, no. 10 (in Russ.).
11. Maslov D.A. [Identification and compensation of errors of wave solid gyroscope with electrostatic control sensors]. *Mechanical engineering and engineering formation*. 2018. No. 1. Pp. 20-26 (in Russ.).
12. Vahlarsky D.S. et al. [Numerical study of resonators of HTH of different shapes in the presence of defects of different types]. *Science and education: the scientific edition of the Moscow State University by N.E. Bauman*. 2016. No. 10. Pp. 1-22 (in Russ.).
13. Darvishian A. et al. Anchor loss in Hemispherical Shell Resonator. In *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2017. Vol. 26: no. 1. P. 51-66.
14. Ning Liu, Zhong Su. Research on Eigenvalue Analysis Method in MultiSurface Metal Shell Vibratory Gyro. In *IEEE Access*. VOLUME 7. 2019. Doi:10.1109/ACCESS.2019.2943513.
15. Zhennan Wei, Guoxing Yi, Yan Huo, Ziyang Qi, Zeyuan Xu. The Synthesis Model of Flat-Electrode Hemispherical Resonator Gyro. In *Sensors* 2019. 19. 1690. doi:10.3390/s19071690 www.mdpi.com/journal/sensors.
16. Yan Huo, Shunqing Ren, Guoxing Yi, Changhong Wang. Establishment of equations of motion of 4 hemispherical resonator and analysis of frequency 5 split caused by slight mass non-uniformity. In *Chinese Journal of Aeronautics*, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.04.011>.
17. Juravlev V.F. [Two-dimensional oscillator Van der Paul with external control]. *Nonlinear dynamics*. 2016. Vol. 12, no. 2. Pp. 211-222 (in Russ.).

Automated Control System of Physical and Accuracy Parameters of Sensitive Elements of Solid-State Wave Gyroscopes

F. I. Spiridonov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K. V. Shishakov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper describes the first comprehensive version of the developed software and hardware stand of automation of end-to-end production control of physical parameters of sensitive elements of solid-state wave gyroscopes to enhance the accuracy characteristics of their output signals.

The general characteristic of the system of control of physical and accuracy parameters of sensitive elements in production is given. To do this, the process of making a sensitive element is summarized and procedures for determining its physical and accuracy parameters are given.

The focus is on creating "hrgCheck" software for the system of automated physical and accuracy parameters monitoring. For this purpose, a diagram of the state of the system, program algorithms, data collection, calculation of physical parameters, calculation of accuracy parameters, software and measurement control structures as well as the program's user interface are given.

As a demonstration example of the performance of the software, a trial test of the effectiveness of use in the control of physical and accuracy parameters of sensitive elements of solid-state wave gyroscopes was carried out. For one of the sensors, 37 standing wave runs were measured, which took 2 hours and 15 minutes. The dependence of identification results on the initial measurement conditions is shown, which requires an excessive series of experiments.

The resulting data on the physical and precise parameters of sensitive elements show the feasibility of introducing the developed software into the production cycle of end-to-end control of the gyroscopes produced. This will reduce the labor and cost of manufacturing, improve product accuracy and reduce the possibility of production faults. The inherent opportunities for improvement, development and expansion allow us to consider it in the general trend of updating the technologies of production processes for the manufacture of high-precision solid-state wave gyroscopes.

Keywords: solid-state wave gyroscope, software, industrial automation, manufacturing processes.

Получено: 28.05.2021