

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 531.383

doi: 10.30987/2658-6436-2023-1-21-31

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА БАЛАНСИРОВКИ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Федор Игоревич Спиридонов^{1✉}, Рамис Ильфатович Мингазов², Константин Валентинович Шишаков³

^{1, 2, 3} Ижевский государственный университет им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия

¹ spiridonov.fedya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8247-8814>

² ramzsjkee@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5027-9466>

³ shishakovkv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6325-257X>

Аннотация. Выполнено обсуждение основных вопросов, возникающих при разработке и внедрении АСУТП в отношении технологических операций балансировки кварцевых полусферических резонаторов твердотельных волновых гироскопов. Для этого приведены: общий алгоритм выполнения технологического процесса балансировки резонаторов; структурные схемы работы АСУТП балансировки и общий алгоритм балансировки резонаторов. В последнем раскрыты внутренние алгоритмы определения физических параметров резонатора гироскопа, принятия решения о балансировке резонатора и управления процессом травления кварцевого резонатора гироскопа. Отдельно рассматривается необходимое прикладное программное обеспечение (ПО) для АСУТП балансировки резонаторов гироскопов. Показано, что для построения первой версии автоматической АСУТП балансировки резонаторов рекомендуется в качестве промежуточного шага модернизировать и отработать «советующую» АСУТП, которая в развитие существующей локально-автоматической АСУТП должна быть дополнена решением следующих важных задач: повышением точности определения физических параметров, вычислением эффективности проводимой операции балансировки и определением эффективного управления ионно-плазменным источником. В рассмотренной автоматической АСУТП балансировки резонаторов ТВГ не предполагается в полной мере исключить роль и значение оператора системы. Им производятся операции первичной проверки стенда, установки резонатора в стенд, а также первоначальная настройка. Автоматизация на первом этапе будет заключаться в замыкании операций определения физических параметров, вычисления эффективности балансировки и ионно-плазменное травление кварцевого резонатора. Замыкание этих операций производится с помощью прикладного ПО, установленного на центральную управляющую вычислительную машину автоматизированного рабочего места оператора системы балансировки.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, балансировка, автоматизация, АСУТП, программное обеспечение

Для цитирования: Спиридонов Ф.И., Мингазов Р.И., Шишаков К.В. Автоматизация технологического процесса балансировки кварцевых резонаторов твердотельных волновых гироскопов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №1 (19). С. 21-31. doi: 10.30987/2658-6436-2023-1-21-31.

Original article

Open Access Article

TECHNOLOGICAL PROCESS AUTOMATION OF BALANCING QUARTZ RESONATORS OF SOLID STATE WAVE GYROSCOPES

Fedor I. Spiridonov¹, Ramis I. Mingazov², Konstantin V. Shishakov³

^{1, 2, 3} Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

¹ spiridonov.fedya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8247-8814>

² ramzsjkee@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5027-9466>

³ shishakovkv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6325-257X>

Abstract. The paper discusses the main issues that arise while developing and implementing automatic process control systems (APCS) in relation to the technological operations of balancing quartz hemispherical resonators of

solid-state wave gyroscopes. For this, the article gives a general algorithm for performing the technological process of resonator balancing; block diagrams of the automatic process control system of balancing and the general algorithm for balancing the resonators. The latter discloses internal algorithms for determining the physical parameters of the gyroscope resonator, for making a decision on resonator balancing and controlling the etching process of the gyroscope quartz resonator. The necessary application software (SW) for the automatic process control system for balancing gyroscope resonators is considered separately. The paper states that to build the first version of the automatic process control system for balancing resonators, it is recommended, as an intermediate step, to modernise and work out the "advising" automatic process control system, which, in the development of the existing locally automatic process control system, should be supplemented by solving the following important tasks: increasing the accuracy of determining physical parameters, calculating the efficiency of the ongoing balancing operation and estimating the effective control of the ion-plasma source. In the considered automatic process control system for balancing the resonators of the solid state wave gyroscopes (SSWG), it is not supposed to completely exclude the system operator's role and importance. He performs the primary check of the stand, the installation of the resonator in the stand, as well as the initial setup. Automation at the first stage will consist of closing the operations of determining the physical parameters, calculating the balancing efficiency and ion-plasma etching of the quartz resonator. The closure of these operations is carried out with the help of application software installed on the central control computer of the automated workplace of the balancing system operator.

Keywords: solid-state wave gyroscope, balancing, automation, automatic process control system, software

For citation: Spiridonov F.I., Mingazov R.I., Shishakov K.V. Technological process automation of balancing quartz resonators of solid state wave gyroscopes. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 1 (19). pp. 21-31. doi: 10.30987/2658-6436-2023-1-21-31.

Введение

Неотъемлемой частью современных высокотехнологических производств навигационных приборов являются активно внедряемые системы и комплексы автоматизации производственных процессов [1]. В том числе и при производстве высокоточных волновых твердотельных гироскопов (ВТГ или ТВГ) актуальна разработка информационного, алгоритмического и машинного обеспечения для развития автоматизированных технологических процессов и производств [2], а также систем управления ими [3].

В настоящее время процессы изготовления ТВГ включают множество технологических операций [4]. Часть из них проводится и контролируется оператором, а часть выполняется под управлением вычислительных машин. При этом автоматизация технологических операций призвана обеспечить повышение производительности труда и стабильности качества изготавливаемой продукции, а также сократить долю рабочих, занятых в производственном процессе.

Одной из важнейших технологических операций является операция балансировки кварцевых резонаторов, которая выполняется через удаление неуравновешенной массы с поверхности полусферического резонатора [5]. На практике такую балансировку проводят как через точечное удаление масс (зубцов) с периметра резонатора, так и через распределенное удаление материала с сегментов поверхности (с помощью ионно-плазменного травления). В обоих вариантах важно предварительно правильно определить величину и место расположения удаляемой массы [6].

В рассматриваемом в статье технологическом процессе балансировка кварцевого полусферического резонатора гироскопа выполняется через удаление части его материала с сегмента поверхности, используя ионно-плазменное травление [7]. В этом случае от горизонтально расположенного источника инертный газ направляется через специальную диафрагму к поверхности поворачивающегося нужной стороной резонатора. Такое вращение осуществляется шаговым двигателем с задаваемой переменной угловой скоростью. Так, задавая функцию вращения двигателя, регулируют глубину ионного распыления стекла по окружности резонатора [8]. При этом время распыления пропорционально толщине слоя, который необходимо удалить. Заметим, что важно учитывать режимы травления, так как при разных режимах работы источника ионов скорость стравливания имеет разные показатели.

На сегодняшний день имеются разные системы, автоматизирующие процесс балансировки резонаторов ТВГ [9]. Они построены по типовой схеме автоматизируемого рабочего места (АРМ) с центральной управляющей вычислительной машиной (УВМ) [10]. При этом информационные системы выполняют функции информирования о состоянии датчиков сис-

темы. Локально-автоматическая система реализует автоматическое управление подсистемами устройств, например, для станда балансировки, формирование вакуума в камере и т.п. Советующая система используется для достаточно сложных процессов, для которых не удаётся в полной мере разработать алгоритм автоматического управления. К такой системе можно отнести станд балансировки в комплексе с дополнительным прикладным программным обеспечением в помощь оператору. Для перехода же к автоматической АСУТП балансировки резонаторов ТВГ необходимо решить три основных задачи: определение параметров резонатора гироскопа; принятие решения о балансировке резонатора; установка и поддержка параметров травления.

Целью статьи является обсуждение основных вопросов, возникающих при разработке и внедрении АСУТП в отношении технологических операций балансировки кварцевых полусферических резонаторов твердотельных волновых гироскопов.

Последовательность технологического процесса балансировки резонаторов ТВГ

В целом, технологический процесс балансировки резонатора ТВГ представлен на рис. 1 в виде диаграммы IDEF0. Его удобно разделить на два крупных этапа: подготовительный и рабочий.

На подготовительном этапе первым шагом включается специальное оборудование для балансировки (станд). После проверки его работоспособности на втором шаге производится установка резонатора в установку для балансировки. На третьем шаге проверяется работоспособность станда вместе с резонатором, т.е. измерительная система станда. На четвертом шаге производится вакуумирование камеры станда. По достижению необходимого давления разрешается переход на рабочий этап балансировки.

На рабочем этапе сначала производится нахождение механических параметров резонатора гироскопа: добротность, разнородность, оси вязкости, резонансная частота, разнородность, оси жесткости. С их помощью проверяется необходимость балансировки. При необходимости резонатор подвергается ионно-плазменному травлению по специально сформированной программе.

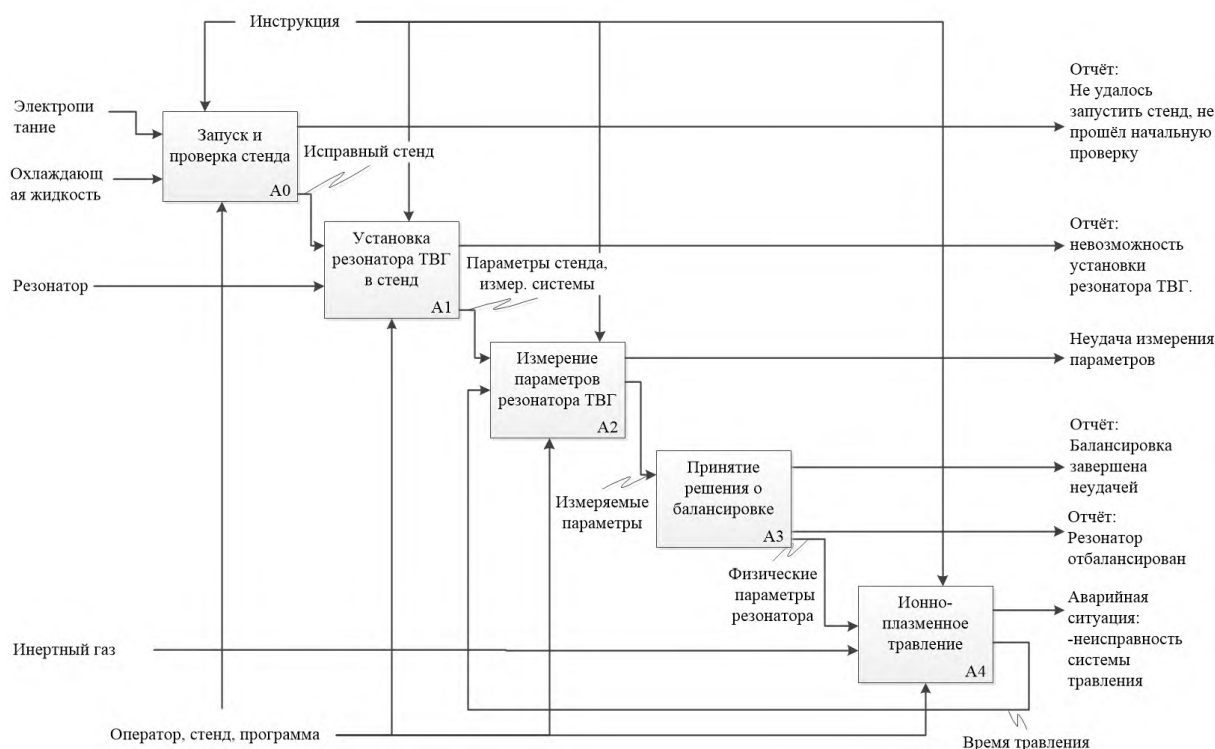


Рис. 1. Общая диаграмма процесса балансировки резонатора

Fig. 1. General diagram of the resonator balancing process

Из диаграммы на рис. 1 выделим три блока, требующие автоматизацию технологического исполнения в первую очередь: измерение параметров резонатора ТВГ; принятие решения о балансировке; ионно-плазменное травление. Рассмотрим их автоматизацию.

Структурные схемы работы АСУТП балансировки кварцевых резонаторов

На рис. 2, а общая схема АСУТП балансировки сначала традиционно представлена как система, состоящая из технологического объекта управления (ТОУ) и системы управления (СУ). При этом СУ взаимодействует с ТОУ на основе: входной информации (X), выходной информации (Y), информации с датчиков (R), а также учитывает случайные факторы (F) и диапазоны их изменения. Здесь в качестве ТОУ выступает стенд балансировки. А СУ представляется прикладным программным обеспечением, с помощью которого производится управления технологическим процессом. На вход ТОУ поступают резонатор и материалы, необходимые для проведения процедуры балансировки (инертный газ, электрическая энергия, жидкость охлаждения и т.д.). На выходе ТОУ должен получиться резонатор с допустимыми механическими погрешностями. Однако в отдельных случаях на выходе можем иметь изделие, ушедшее в брак по причине несоответствия контрольным параметрам (например, по добротности), или же резонатор, не прошедший балансировку по причине неработоспособности автоматизируемой системы. При этом управление ТОУ представляется в виде типовых шагов управления информационным процессом [12]: получение информации, обработка информации (с учетом выбранных критериев управления), выработка управляющих воздействий, изменение выходных величин ТОУ.

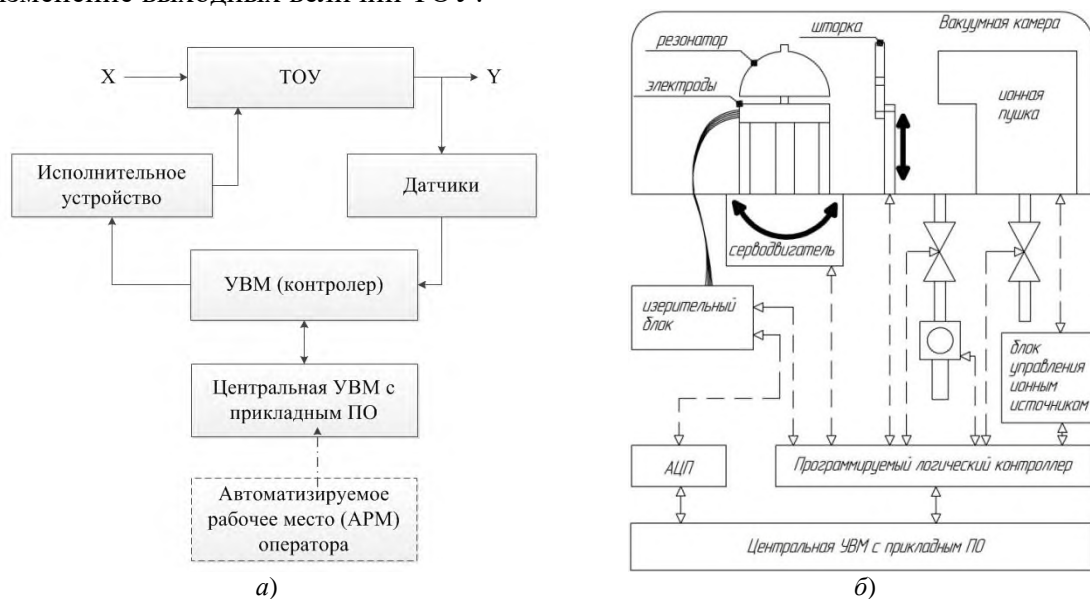


Рис. 2. Общая структурная схема системы балансировки (а) и ее привязка к оборудованию стенда балансировки (б)

Fig. 2. The general block diagram of the balancing system (a) and its binding to the equipment of the balancing stand (b)

Структурное построение АСУТП балансировки резонаторов ТВГ осуществляется в классе распределённых систем с использованием недорогих микропроцессоров, рассредоточенных по технологической установке и связанных с управляющей вычислительной машиной (УВМ) посредством локальной сети (рис. 2, а). Это обеспечивает высокую надёжность за счёт обработки информации с датчиков с использованием микропроцессоров и получение на УВМ оцифрованных сигналов. Также такая архитектура упрощает добавления новой аппаратуры и программного обеспечения в автоматизируемую систему.

Среди фирм, выпускающих специализированные стенды для балансировки кварцевых резонаторов гироскопов выделим компанию «ИОНТЕК-НАНО», изготовившую используемый нами стенд «КРАУДИОН-ИТ1-14/1» [13]. Его структурная схема представлена на рисунке 2, б. Такой стенд относится к типу локально автоматической подсистемы АСУТП.

Автоматическая АСУТП должна замыкать контур управления ТОУ, исключая определяющую роль оператора из процесса управления технологическим процессом. Для ее построения сначала требуется разработать общий алгоритм автоматической балансировки резонаторов с последующей декомпозицией на более детализированные блок-схемы.

Общий алгоритм балансировки резонаторов для АСУТП

Общий алгоритм автоматизации технологических процессов балансировки кварцевых резонаторов схематично изображен на рис. 3. Он включает в себя шесть важных этапов: подготовительный этап; настройка; измерение физических параметров; проверка целесообразности балансировки; травление; формирование отчёта о проведённой балансировке резонатора. На рисунке этапы объединены в две группы: первая (рис. 3, а) реализует «предлагающую АСУТП» (в ней оператор принимает решение), вторая (рис. 3, б) – автоматическую АСУТП.

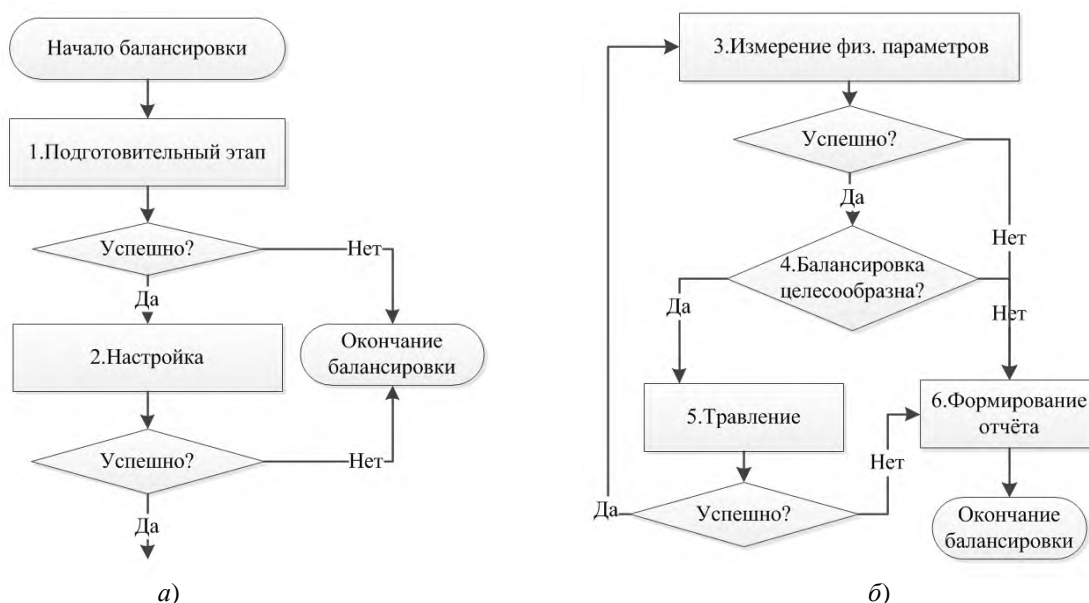


Рис. 3. Схема общего алгоритма автоматической балансировки резонаторов гироскопа:
а – предлагающая подсистема; б – автоматическая подсистема

Fig. 3. Scheme of the general algorithm for automatic balancing of gyroscope resonators:
a – suggesting subsystem; b – automatic subsystem

На подготовительном этапе выполняется первичная проверка работоспособности узлов и агрегатов оборудования балансировки. Для этого в стенд устанавливается резонатор гироскопа и проверяются первичные параметры измерительной системы. На этапе настройки выполняется настройка позиционного возбуждения (по углу) и максимальной амплитуды колебаний. Этап измерения физических параметров включает их математическую идентификацию на основе записанной информации от датчиков измерительной системы. После этого на этапе проверки целесообразности балансировки прогнозируется скорость уменьшения разностотности резонатора относительно времени травления и оценивается эффективность процедуры балансировки. Далее этап травления представляет собой операцию удаления избыточности по заданной функции травления. Он также включает ожидание остывания резонатора гироскопа до приемлемых значений. На этапе формирования отчёта выполняется операция формирования отчёта о проведённой процедуре по балансировке резонатора гироскопа, который выводится оператору на его автоматизированном рабочем месте. Далее рассмотрим более подробно алгоритмы автоматической группы алгоритма балансировки.

Идентификация физических параметров резонатора гироскопа

Идентификация физических параметров резонатора выполняется в режиме его свободных колебаний на основе измерения и математической обработки двух сигналов C , S (рис. 4), имеющих следующую внутреннюю математическую структуру [14, 15]:

$$C(t) = a_C(t) \cos[\omega(t) \cdot t - \varphi_C(t)], \quad S(t) = a_S(t) \cos[\omega(t) \cdot t - \varphi_D(t)].$$

где ω – частота колебаний; a – амплитуды колебаний; φ – фазы.

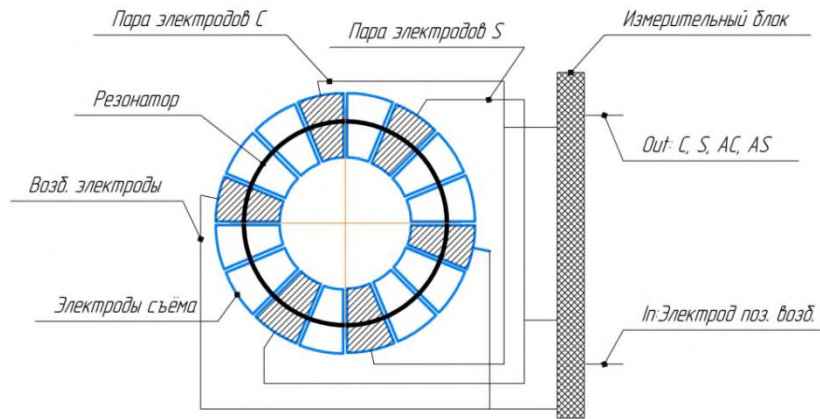


Рис. 4. Формирование сигналов (C, S) в измерительном устройстве
 Fig. 4. Signal generation (C, S) in the measuring device

Далее из них идентифицируются интересующие нас физические параметры резонатора [16, 17]: значение декремента затухания, полуразность декремента затухания в осях максимальной и минимальной добротности, угол оси наименьшей вязкости, значение разнототности, угол оси наименьшей жесткости, угловое положение рабочей стоячей волны. Для этого в режиме свободных колебаний (выбег резонатора на второй угловой гармонике) выполняются: раскачка стоячей волны в выбранном угловом направлении; отключение контура ее активного возбуждения; регистрация и анализ сигналов в двух осях измерительного устройства; идентификация параметров математической модели. В результате для измерительной системы с возможностью углового переключения электродов позиционного возбуждения имеем алгоритм определения физических параметров на рис. 5.

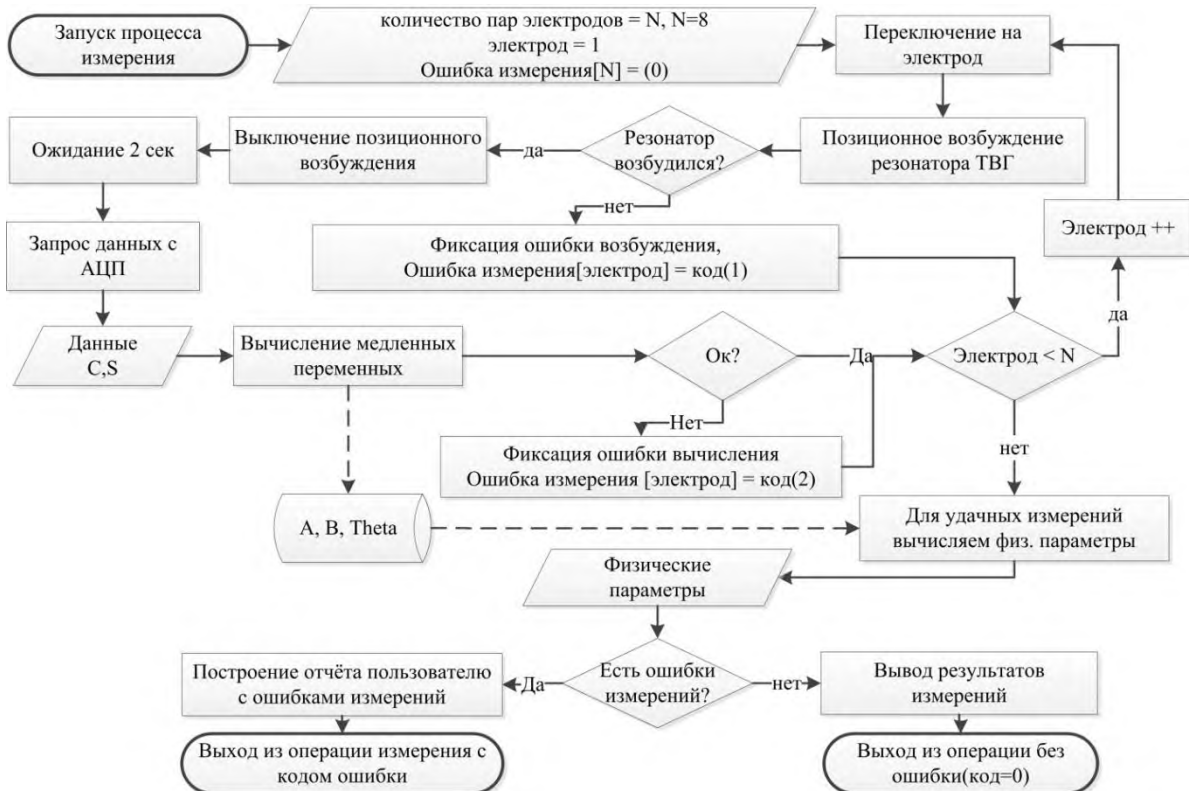


Рис. 5. Алгоритм определения физических параметров
 Fig. 5. Algorithm for determining physical parameters

Сделаем ряд замечаний. Во-первых, для обеспечения нужной точности его практического применения требуется предварительно проверить одинаковость усиления в измерительных каналах (C , S) и при необходимости произвести дополнительное тарирование датчиков. Во-вторых, отдельного внимания заслуживает конструкция приспособления, в которое устанавливается резонатор. Его низкое качество (и измерительных электродов) могут давать высокую ошибку и нестабильность измерений физических параметров. В-третьих, на постоянство измерений параметров оказывают существенное влияние фактор вакуума в камере и температура резонатора. Поэтому измерения рекомендуется проводить только после установления стационарных состояний вакуума и температуры в камере.

Принятие решения о балансировке резонатора

После окончания проведения измерений физических параметров выполняется проверка необходимости балансировки резонатора гироскопа. Она включает три основных шага. На первом шаге проверяется величина механической добротности резонатора, которая не должна быть меньше требуемого значения. На втором шаге проверяется величина разнородности на соответствие допустимым значениям. На третьем шаге проверяется значение разнородности на соответствие допустимым значениям.

Перед началом травления также учитывается, проводилась ли операция травления в рамках текущего процесса балансировки. Если не проводилась, то можно переходить на этап травления. Если проводилась, тогда необходимо проанализировать эффективность выполненной на предыдущем шаге операции травления. Если вычисленное значение окажется меньше ожидаемого, тогда можно считать, что операция балансировки имеет низкую эффективность и процесс балансировки можно завершить с соответствующим предупреждением. При этом допуски на физические параметры и эффективность балансировки составляют требования на выходные параметры ТОУ АСУТП.

Управление процессом травления кварцевого резонатора гироскопа

Как уже отмечалось, процесс травления представляет собой операцию удаления неуравновешенной массы с кромки резонатора. Процесс удаления избыточностей масс ионно-плазменным травлением состоит из основных шагов, показанных на рис. 6.

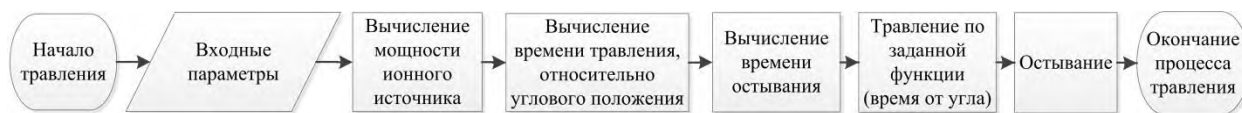


Рис. 6. Алгоритм процесса травления резонатора ТВГ

Fig. 6. The algorithm of the etching process of the TVG resonator

Для эффективного травления материала изначально вычисляется необходимая мощность ионного источника. После чего строится функция времени травления в зависимости от угла. Также вычисляется необходимое время для остывания резонатора ТВГ после ионно-плазменного травления. По окончании всех вычислений, резонатор ТВГ подвергается травлению по ранее заданной функции. На последнем этапе резонатор остывает на протяжении ранее вычисленного времени.

Прикладное программное обеспечение (ПО) для АСУТП балансировки резонаторов гироскопов

Структура информационной модели ПО представлена на рис. 7. Система управления распределённой АСУТП представляет собой централизованную вычислительную машину с прикладным ПО. Данное ПО используется для решения ряда задач и представлено набором систем. К таким системам можно отнести: измерительную систему, вычислительную систему, систему управления действиями процессов, систему контроля и управления стандом, систему инстанцирования действий, систему логирования, систему формирования отчётов,

систему работы с базой данных, систему регистрации пользователей, система регистрации параметров изделия, графический интерфейс ПО.

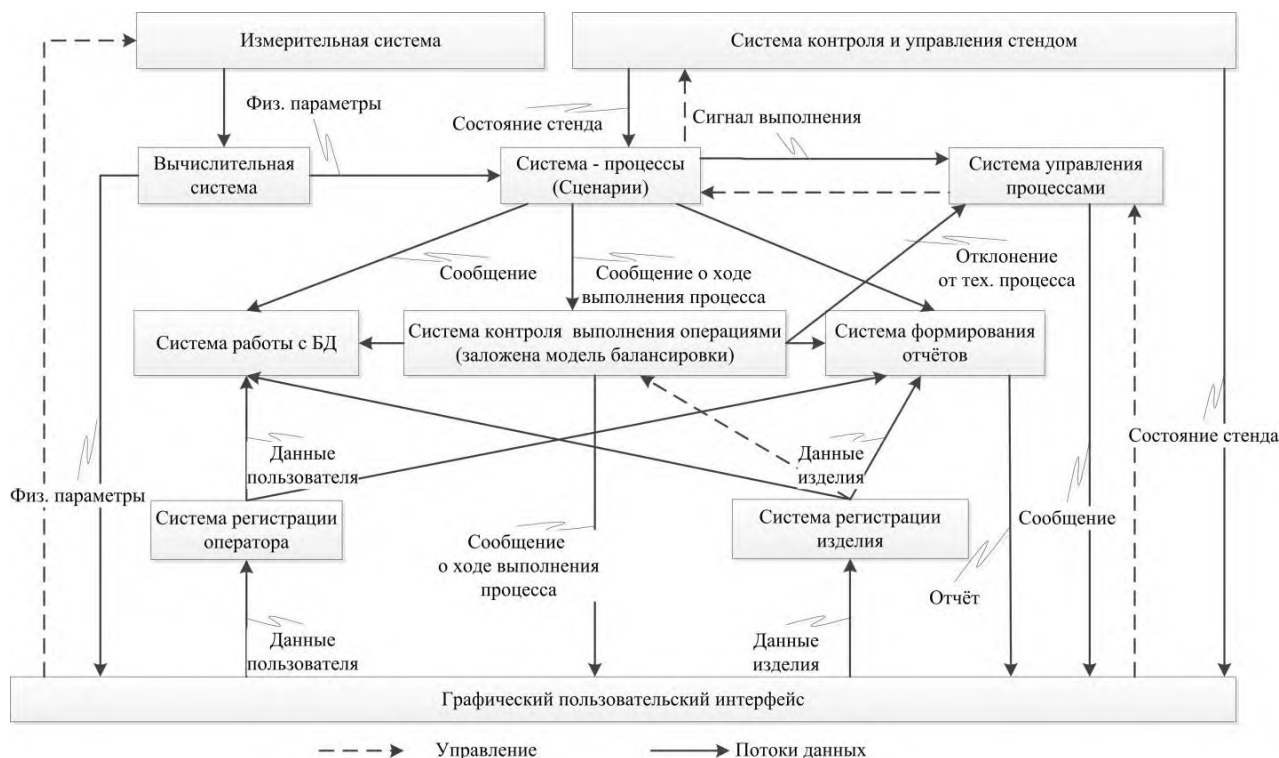


Рис. 7. Структура информационной модели ПО

Fig. 7. Structure of the software information model

Измерительная система представляет собой систему регистрации колебаний резонатора ТВГ и передачи этих данных в программное обеспечение. В ПО данная система реализует взаимодействие ПО с аппаратурой регистрации колебаний резонатора ТВГ посредством передачи данных по программно-аппаратным интерфейсам. Вычислительная система представляет собой расчётную часть программного обеспечения. Сюда относятся: вычисление физических параметров, вычисление доверительных интервалов, вычисление эффективности травления, вычисление параметров травления и т.п. Также к данной системе относятся вспомогательные операции, связанные с линейной алгеброй, аппроксимациями функциями и т.д.

Система контроля и управления стандом состоит из двух подсистем: контроля и управления. Подсистема контроля реализует опрос параметров согласно модели станда. Подсистема управления представляет собой набор команд позволяющая управлять компонентами станда балансировки. Система «процессы/сценарии» предназначена для реализации алгоритмов определения физических параметров, травления и автоматической балансировки (состоит из подпроцессов травления и идентификации физических параметров) резонаторов.

Реализация алгоритмов производится путём взаимодействия следующих систем ПО: измерительная система, вычислительная система, система контроля и управления стандом. Система управления действиями процессов, представляет собой систему управления выполнением процесса. Понимается как класс команд, представленный в виде паттерна «Команда». В её задачи входит инкапсуляция интерфейсов «системы формирования сценариев» и передача процесса управления сценариями в отдельные классы команд. В системе контроля выполнения операций заложена модель алгоритма процесса балансировки резонаторов. Система контролирует ход выполнения операций балансировки и записывает в журнал выполняемые действия. Для каждого отдельного процесса балансировки датчика создаётся отдельный журнал, в котором фиксируются выполняемые действия. В случае отклонения процесса от заданного (или же близкому к отклонению) инцидент записывается в журнал с соответствующей пометкой, а оператору выводится предупреждающее сообщение.

Система логирования предназначена для записи выполняемых всевозможных действий на стенде с использованием ПО. Также регистрирует всевозможные ошибки, возникающие в процессе работы. Система формирования формирует отчёты о процессе балансировки в различных представлениях. Система работы с базой данных реализует взаимодействие с базой данных (БД), в которой журналируются результаты измерений физических параметров, а также параметры операции травления. Система предоставляет упрощенный способ взаимодействия с БД для других систем ПО. В системе реализуются взаимодействие с СУБД посредством языка запросов SQL. Система регистрации оператора ПО предназначена для фиксации данных об операторе на момент выполнения процесса балансировки. Данная система хранит следующую информацию о пользователе: Фамилия, Имя, Отчество. Система регистрации данных о изделии предназначена для фиксации наименования изделия на момент выполнения операции процесса балансировки. Также данная система хранит информацию о требуемых физических параметрах для резонатора ТВГ. Графический интерфейс ПО представляет систему графического взаимодействия ПО с оператором.

Заключение

Рассмотренные вопросы предназначены для выполнения модернизации существующей локально-автоматической АСУТП балансировки кварцевых полусферических резонаторов твердотельных волновых гироскопов с использованием стендового оборудования компании «ИОНТЕК-НАНО» в более современную и экономически эффективную автоматическую АСУТП. При этом рекомендуется для построения первой версии автоматической АСУТП в качестве промежуточного шага модернизировать и отработать «советующую» АСУТП, которая в развитие локально-автоматической АСУТП должна быть дополнена решением следующих важных задач: повышением точности определения физических параметров, вычислением эффективности проводимой операции балансировки и определением эффективного управления ионно-плазменным источником.

В рассмотренной автоматической АСУТП балансировки резонаторов ТВГ не предполагается в полной мере исключить роль и значение оператора системы. Им производится операции первичной проверки стенда, установки резонатора в стенд, а также первоначальная настройка. Автоматизация на первом этапе будет заключаться в замыкании операций определения физических параметров, вычислении эффективности балансировки и ионно-плазменное травление кварцевого резонатора. Замыкание этих операций производится с помощью прикладного ПО, установленного на центральную УВМ АРМ оператора.

Список источников:

1. Шишмарев В.Ю. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Технология машиностроения» направления подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». М.: Академия. 2007. ISBN 978-5-7695-3567-3.
2. Разработка информационно-сетевого комплекса для сопровождения производственных операций контроля, диагностики и настройки точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов / Р.И. Мингазов, Р.В. Мельников и др. // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 1. С. 41-53. DOI 10.22213/2410-9304-2021-1-41-53.
3. Трутнев Г.А., Перевозчиков К.К., Назаров С.Б. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2020. № 1(130). С. 50-63. DOI 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63.

References:

1. Shishmarev V.Yu. Automation of Production Processes in Mechanical Engineering. Moscow: Academy; 2007.
2. Mingazov RI, Melnikov RV, et al. Development of an Information-Network Complex to Support Production Operations of Control, Diagnostics and Adjustment of the Accuracy Characteristics of Solid-State Wave Gyroscopes. Intelligent Systems in Manufacturing. 2021;19(1):41-53. doi: 10.22213/2410-9304-2021-1-41-53
3. Trutnev G.A., Perevozchikov K.K., Nazarov S.B. Sensing Systems and Methods for Measuring Oscillations of the Resonator of a Hemispherical Resonator Gyroscope. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2020;1(130):50-63. doi: 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63.

4. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника. 2014. 174 с. ISBN: 978-5-88070-381-4.
5. Поверхностная балансировка резонаторов волновых твердотельных гироскопов / Б.С. Лунин, М.А. Басараб и др. // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 2-1. С. 74-76.
6. Басараб М.А., Кузовлев В.И., Лунин Б.С. Динамическая поверхностная балансировка оболочек резонаторов волновых твердотельных гироскопов // Динамика сложных систем – XXI век. 2017. Т. 11. № 3. С. 11-15.
7. Чуманкин Е.А., Лунин Б.С., Басараб М.А. Особенности балансировки металлических резонаторов волновых твердотельных гироскопов // Динамика сложных систем – XXI век. 2018. Т. 12. № 4. С. 85-95. DOI 10.18127/j19997493-201804-13.
8. Балансировка полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов методом химического травления / М.А. Басараб, Б.С. Лунин и др. // Гироскопия и навигация. 2015. № 1(88). С. 61-70. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.061-070.
9. Лунин Б.С. Научно-технологические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов: специальность 05.11.03 «Приборы навигации», 05.11.14 «Технология приборостроения»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лунин Борис Сергеевич. Москва. 2006. 361 с.
10. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП: методическое пособие. Санкт-Петербург: ИПК Бионт. 2006. 551 с. ISBN 5-93630-530-9.
11. Андык В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС: Учебник. 1-е изд. – Москва: Издательство Юрайт. 2017. 407 с. ISBN 978-5-534-05087-5.
12. Ицкович Э.Л. Методы рациональной автоматизации производства. Учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия. 2009. 624 с. ISBN 5-9729-0020-6.
13. ИОНТЕК-нано: официальный сайт. Москва. URL: <http://iontec.ru/produkcija/ustanovka-ionnoj-balansirovki-kraudion-it1-14-1/> (дата обращения 25.08.2022).
14. Мингазов Р.И., Спиридонов Ф.И., Шишаков К.В. Методики исследования свободного выбега стоячих волн в твердотельном волновом гироскопе // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 3. С. 20-32. DOI 10.22213/2410-9304-2020-3-20-32.
15. Мингазов Р.И., Шишаков К.В. Исследование алгоритмов идентификации волновых параметров в твердотельных волновых гироскопах без настройки вычислений на периодичность сигналов // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 1. С. 29-42. DOI 10.22213/2410-9304-2022-1-29-42.
16. Определение параметров резонатора твердотельного волнового гироскопа и моделирование по экспериментальным данным / А. В. Кривов, Р. В. Мельников и др. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2019. Т. 75. № 2. С. 127-133.
4. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. Wave Solid-State Gyroscope. Theory and Technology. Moscow: Radiotekhnika; 2014.
5. Lunin BS, Basarab MA, et al. Surface Balancing of Resonators of Solid-State Wave Gyroscopes. Theoretical and Applied Aspects of Modern Science. 2014;2-1:74-76.
6. Basarab M.A., Kuzovlev V.I., Lunin B.S. Dynamical Balancing of the Surface of Shell Resonators of Solid-State Wave Gyroscopes. Dynamics of Complex Systems – XXI Century. 2017;11(3):11-15.
7. Chumankin E.A., Lunin B.S., Basarab M.A. Features of Balancing Metal Resonators of Solid-State Wave Gyroscopes. Dynamics of Complex Systems – XXI Century. 2018;12(4):85-95. doi: 10.18127/j19997493-201804-13
8. Basarab MA, Lunin BS, et al. Balancing of Hemispherical Resonators Gyros By Chemical Etching. Gyroscopy and Navigation. 2015;1(88):61-70. doi: 10.17285/0869-7035.2015.23.1.061-070
9. Lunin B.S. Scientific and Technological Foundations for the Development of Hemispherical Resonators of Solid-State Wave Gyroscopes. Doctor of Technical Sciences Dissertation. Moscow; 2006.
10. Nesterov A.L. The Design of Control Systems. Saint Petersburg: Biont; 2006.
11. Andyk V. S. Automated Control Systems for Technological Processes at Thermal Power Plants. Moscow: Yurayt; 2017.
12. Itskovich E.L. Methods of Rational Production Automation. Vologda: Infra-Engineering; 2009.
13. IONTEK-nano [Internet]. Moscow [cited 2022 Aug 25]. Available from: <http://iontec.ru/produkcija/ustanovka-ionnoj-balansirovki-kraudion-it1-14-1/>
14. Mingazov R.I., Spiridonov F.I., Shishakov K.V. Research Methods of Coasting Standing Waves in a Solid Wave Gyroscope. Intelligent Systems in Manufacturing. 2020;18(3):20-32. doi: 10.22213/2410-9304-2020-3-20-32
15. Mingazov R.I., Shishakov K.V. Investigation of Algorithms for Identification of Wave Parameters in Solid-State Wave Gyroscopes without Adjusting Calculations to the Frequency of Signal. Intelligent Systems in Manufacturing. 2022;20(1):29-42. doi: 10.22213/2410-9304-2022-1-29-42
16. Krivov AV, Melnikov RV, et al. Determining the Parameters of the Resonator of a Solid-State Wave Gyroscope and Modelling Based on Experimental Data. Vestnik of KNRTU n.a. A.N. Tupolev. 2019;75(2):127-133.

17. Мингазов Р.И., Спиридонов Ф.И., Шишаков К.В. Идентификация механических погрешностей резонаторов твердотельных волновых гироскопов в режиме свободного выбега стоячих волн // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 2. С. 4-19. DOI 10.22213/2410-9304-2022-2-4-19

Информация об авторах:

Спиридонов Федор Игоревич

аспирант кафедры «Радиотехника» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, ORCID 0000-0001-8247-8814

Мингазов Рамис Ильфатович

аспирант кафедры «Радиотехника» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, ORCID 0000-0001-5027-9466

Шишаков Константин Валентинович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиотехника» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, ORCID 0000-0001-6325-257X

17. Mingazov R.I., Spiridonov F.I., Shishakov K.V. Identification of Solid-State Wave Gyroscopes Resonators Mechanical Errors in the Mode of Free Run-out of Standing Waves. Intelligent Systems in Manufacturing. 2022;20(2):4-19. doi: 10.22213/2410-9304-2022-2-4-19

Information about authors:

Spiridonov Fedor Igorevich

postgraduate student of the Department “Radio Engineering” of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, ORCID: 0000-0001-8247-8814

Mingazov Ramis Ifatovich

postgraduate student of the Department “Radio Engineering” of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, ORCID: 0000-0001-5027-9466

Shishakov Konstantin Valentinovich

doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Radio Engineering” of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, ORCID: 0000-0001-6325-257X

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.10.2022; одобрена после рецензирования 18.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 23.10.2022; approved after reviewing 18.11.2022; accepted for publication 25.11.2022.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.